

# Uso de explosivos en Construcción

126  
2EJ



T E S I S  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO CIVIL  
p r e s e n t a

JOSE LUIS RAMIREZ CARBAJAL  
FALLA DE ORIGEN

1995



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Señor  
**JOSE LUIS RAMIREZ CARBAJAL**  
Presente.

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-149/95

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. MIGUEL MORAYTA MARTINEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"USO DE EXPLOSIVOS EN CONSTRUCCION"**

- INTRODUCCION**
- I. EXPLOSIVOS**
  - II. ACCESORIOS Y EQUIPO PARA VOLADURA**
  - III. DISEÑO Y VOLADURAS**
  - IV. EXPERIENCIAS DE CAMPO**
  - V. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, 13 de septiembre de 1995  
EL DIRECTOR

ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS

JMCS/GMP\*nlI

*Luis Ramírez Montaña*

*Quien además de ser mi maestro en  
muchos aspectos de la vida es también mi  
papá*

*A mi mamá Maria Elena Carbajal  
Madrid por el apoyo y cariño que me  
ha dado a lo largo de toda mi vida.*

*A mis hermanos*

*Arq. Araceli Magdalena*

*Lic. Lilian*

*Arq. Jorge Luis Urbano (a su memoria)*

*Lic. Luis Ramón*

*Dra. Diana Gloria*

*Al Ing. Miguel Morayta  
Martinez*

*Y*

*A todos mis profesores.*

# **INTRODUCCIÓN**

**I**

# I. Introducción

La primera sustancia con combustión lo suficientemente rápida para constituir una explosión fue la pólvora negra o pírca; utilizada por los chinos en el siglo I después de J.C. con fines pirotécnicos.

Fueron los árabes en el siglo XII los que empezaron a utilizarla con fines bélicos; la usaron como explosivos propulsor de los fusiles.

En los escritos de Roger Bacon en el siglo XIII, se encontró que la proporción para la fabricación de la pólvora, que es el siguiente: 75 % nitrato de potásio, 15% de azufre y 10 % de carbón. Esta fórmula se utilizó hasta 1851, año en el que Lammont Dupont, sustituye el nitrato de potásio por el de sodio, debido a que el primero resultaba ser ya muy caro.

Así fueron evolucionando los explosivos y tuvieron su época más prolífica, en cuanto a su invención, durante el siglo XX, en la segunda guerra mundial y después de ella.

El uso de explosivos en la construcción ha venido a dar mayor rapidez a la solución de problemas que antes eran lentos como por ejemplo en túneles, explotación de bancos, etc.



# **EXPLOSIVOS**

## **II**

## **II. Explosivos**

**Definición:** Por explosivos se entiende aquellas sustancias de poca estabilidad química ( que son capaces al incendiarse o detonar) de producir una gran cantidad de energía la que da origen a una explosión.

Las propiedades o características de los explosivos debemos conocerlas para elegir el tipo de explosivo que resulta más adecuado a nuestro problema. Del material que debe volarse tenemos que tomar en cuenta 3 factores importantes que son su dureza, estructura y densidad.

## **Potencia**

Es la capacidad de energía de un explosivo que, a su vez, contribuye a la fuerza, al poder que desarrolla, y por lo tanto al trabajo que es capaz de efectuar. Las dinamitas puras son la medida, con la cual se comparan las demás dinamitas. La potencia se clasifica de acuerdo con la reacción del porcentaje por peso de la cantidad de nitroglicerina contenida en el cartucho, lo cual significa que por ejemplo una dinamita amoniacal de 60 % tiene 60 % de una dinamita nitroglicinal ( nitroglicerina ).

La potencia explosiva no tiene una relación directamente proporcional al porcentaje señalado o sea que no se puede decir que una 40 % es dos veces más efectiva que una de 20 % esto se debe a que la nitroglicerina no es el único ingrediente que produce energía.

## **Velocidad**

Es la rapidez expresada en metros por segundo con que se propaga la onda de detonación a lo largo de una columna de explosión; su variación es de 1200 a 600 a lo largo de una columna de explosivos. Cuando mayor es la rapidez de explosión mayor suele ser el efecto de quebramiento. Como este efecto depende hasta cierto punto también de la fuerza y densidad, deben de tomarse estas tres propiedades en conjunto para el explosivo adecuado para un determinado objetivo.

## **Resistencia al agua**

Es importante la selección del tipo de explosivo a usar cuando se tiene que soportar la acción del agua sobre él. Las dinamitas amoniacales son las que presentan bastante oposición al agua, por lo que las gelatinas, que son altamente impermeables sería el tipo de explosivo a usarse.

## **Densidad**

Se dice que es la relación de peso a volumen que tiene la dinamita, y por lo general se expresa como la cantidad de cartuchos que contiene una caja de 25 kg.

## **Inflamabilidad**

Es la facilidad con que un explosivo o un agente explosivo puede incendiarse.

## **Emanaciones**

Son los gases que se reducen con la detonación de los explosivos y tiene mayor importancia en los trabajos subterráneos por lo que en este tipo de obras debe tenerse una buena ventilación.

## **Resistencia a la congelación**

Cuando se trabaja en zonas en que existen bajas temperaturas, es importante escoger un explosivo adecuado que tenga un bajo punto de congelación. Cabe hacerse notar que los explosivos que contienen agua al disminuir la temperatura se congelan, y se endurece, esto debe evitarse ya que el descongelamiento es peligroso.

Por lo general las temperaturas mínimas, todos los explosivos comerciales las resisten, por lo que los tiempos poco fríos no influyen en las voladuras.

## **Sensibilidad**

Es una medida de la capacidad de propagación. Lo que quiere decir que las dinamitas deben ser lo bastante sensibles para la detonación de toda la columna pero no deben ser tanto que las vuelvan peligrosas o que no permitan utilizar el sistema de retardos.

# Selección

Para seleccionar el explosivo adecuado se anexa la siguiente tabla con propiedades y usos de los explosivos.

**Tabla I**

Tipo	Agente explosivo	Fuerza	Velocidad	Resistencia al Agua	Emanación	Uso
Dinamita Nitroglicerina	Nitroglicerina	-----	Alta	Buena	Exceso de Gases	Trabajos a cielo Abierto
Extra	Nitroglicerina y Amoniaco	20 a 60 %	Alta	Regular	Exceso de Gases	Trabajos a cielo Abierto
Granulada	Amoniaco	25 a 65 %	Baja	Muy Mala	Exceso de Gases	Trabajos a cielo Abierto Canteras
Gelatina	Amoniaco	30 a 75 %	Muy Alta	Buena a Excelente	Muy pocos gases a nulos	Siempre trabajos Submarinos y subterranos
Fermitidos	?	-----	Alta	Regular	Muy pocos gases	Trabajos mineros ( Carbón )
Baja Densidad	Amoniaco	25 %	Regular	Ninguna	Pocos gases	Trabajos mineros

**\* Selección y propiedades de los explosivos usados comunmente en la construcción**

**ACCESORIOS  
Y  
EQUIPO  
PARA  
VOLADURA**

**III**

### **III. Accesorios y equipo para voladura**

Nos encontramos que los explosivos se pueden dividir en dos grandes grupos que son: Químicos y Nucleares. El estudio de los explosivos nucleares los dejaremos fuera del alcance de esta tesis y nos dedicaremos a estudiar los explosivos químicos que son los comúnmente usados en el terreno de la construcción.

Los explosivos químicos: se dividen a su vez en: "altos explosivos" y "bajos explosivos".

Los "altos explosivos" son aquellos que reaccionan violentamente como las dinamitas, y su denominación es detonantes.

Se les llama "bajos explosivos" a aquellos que reaccionan lentamente como la pólvora negra simulando una combustión y su denominación es DEFLAGRANTES.

# **Explosivos detonantes**

Los explosivos detonantes son sustancias capaces de ejercer presiones repentinas en el medio que las rodea, como resultado de una rápida conversión de la sustancia en gases calientes o sustancias volátiles que ocupan un volumen más grande que el cuerpo original a la misma presión. En el instante de su formación los gases ocupan solamente el volumen del explosivo y por consecuencia su presión es más alta que la presión normal. Esta presión, que es alcanzada por la generación del calor en el curso de la explosión, sobrepasa la presión que la materia circulante ejerce sobre el explosivo, esto le sigue una rápida expansión, la cual constituye la explosión.

Una explosión es una reacción química denominada exotérmica, ya que es acelerada por el calor y retardada por el frío, por todo lo anteriormente mencionado un explosivo debe cumplir con las siguientes características:

1. El explosivo debe tener una sustancia, o una mezcla de sustancias que permanezcan sin cambio en condiciones de manejo y almacenaje, pero que produzcan un violento cambio químico, bajo la acción de un estimulante apropiado.

2. Dicho cambio químico debe producir gases, que a presión normal y a alta temperatura resultante de la explosión, ocupan un volumen mucho mayor que el volumen original del explosivo.

3. El cambio químico mencionado debe ser exotérmico, de modo que caliente los productos de la reacción e incremente su presión. Todas las reacciones químicas deben ser explosivas.

Los explosivos detonantes pueden clasificarse a su vez en altos explosivos y explosivos primarios iniciadores. Dicha clasificación no es precisa y se fundamenta en que los explosivos primarios, detonan instantáneamente al estímulo, mientras que los altos explosivos pueden quemarse sin explotar en muchos casos.



Por deflagración entendemos un proceso puramente químico, cuya velocidad de reacción permite comunicar el calor por conductividad, por lo que su avance es en capas paralelas a su superficie.

Una deflagración típica es la de las pólvoras, cada grano de pólvora se quema simultáneamente con los otros granos y la presión dentro del cartucho es prácticamente uniforme. En base a lo anterior se debe procurar cuando se usa un explosivo deflagrante, dar el mayor grado de confinamiento, porque, de no ser así, la presión de los gases será similar a la presión atmosférica y no se producirá energía útil.

La deflagración de un explosivo puede cambiar a detonación. La propiedad más importante de la detonación es que la acción química no ocurre simultáneamente sobre toda la masa de una carga de explosivo, pero se entiende como una onda desde el punto de iniciación. Mientras esto ocurre, el explosivo por delante de la onda de detonación permanece inalterado, así como las regiones pasadas por la onda contienen sustancialmente material transformado.

## **Accesorios para voladuras**

Los accesorios para voladuras son los productos o dispositivos empleados para cebar explosivos, suministrar ó transmitir una llama que inicie una explosión, o llevar una onda detonadora de un punto a otro de una carga explosiva a otra.

### **Mechas detonantes**

Las mecha de seguridad se utiliza para disparar barrenos solos ó barrenos múltiples en rotación, pero no para disparar dos o más cargas que deben detonar simultáneamente.

## **Thermalita Ignitacord**

Cordón encendedor de mecha. Este dispositivo permite la mayor seguridad y un notable aumento en la eficiencia de las voladuras en minas. Todas las mechas de la barrenación, cortadas de antemano a una misma longitud, se conectan al cordón encendedor por medio de conectores especiales. Para disparar la barrenación basta encender la punta del cordón y este encenderá todas las mechas en el orden deseado. El cordón encendedor se surte en tres tipos, cada uno con una velocidad de combustión particular y distinta a los otros tipos: el tipo medio (A) arde aproximadamente de 26 a 37 segundos por metro, el tipo lento (B) arde aproximadamente de 52 a 65 segundos por metro, y el tipo rápido (C) arde a una velocidad aproximada de 16 segundos por metro.

**Nota:** El cordón encendedor no debe usarse nunca en substitución o en lugar de la mecha.

## **Quarrycord**

Cordón encendedor de mecha para uso en "moneos". Con el "Ignitacord" este producto tiene un sólo y definido propósito: encender todas las mechas de una voladura secundaria en el orden deseado. Tiene regular resistencia al agua. La velocidad de su combustión es aproximadamente de 0.35 mts por segundo.

**Nota:** El "QUARRYCORD" no debe usarse nunca en substitución o en lugar de la mecha.

## **Primacord**

Este producto es un cordón detonante que contiene un núcleo de tetranitrato de pentaeritritol (Niperita) dentro de una envoltura impermeable reforzada con cubiertas que la protegen.

Este cordón detonante posee alta energía cuya función es la de iniciar la detonación de los explosivos. Cuando detona tiene en todos los puntos de su longitud la energía iniciadora de un fulminante.

El cordón detonante "Primacord" puede obtenerse en dos modalidades: Reforzado y E-cord. La velocidad mínima de detonación de ambos tipos es de 6,700 metros por segundo.

El "Primacord" se usa principalmente para disparos múltiples de barrenos grandes en la superficie, ya sea verticales u horizontales. Es ilimitado el número de barrenos que pueden dispararse en esta forma.

# **Detonadores**

Los fulminantes son tubos o casquillos cerrados en un extremo y que contienen una carga de explosivos de gran sensibilidad. Están hechos para detonar con las chispas del tren de la mecha para minas.

## **A) Fulminantes ordinarios**

Son diseños para iniciar la detonación de cargas explosivas. Accionan mediante la flama de una mecha de seguridad. Se fabrican con casquillos de aluminio y en potencias No. 6, 8 y 12. Los fulminantes No. 6 son los de uso más común. Proporcionan una máxima seguridad y estabilidad en su empleo, son suficientemente potentes para detonar las dinamitas.

## **b) Conectores o retardadores MS para Primacord**

Su propósito es introducir retardos en las líneas troncales de cordón detonante Primacord. Se proporcionan con intervalos de 9 a 17 MS (milésimas de segundo). Se pueden obtener otros intervalos combinando dos o más de los citados en serie.

Consisten de una pieza moldeada de plástico, la cual contiene en su parte central interior un elemento del retardador está dispuesto para recibir un tramo de Primacord doblado en el cual se sujeta por medio de un pasador integrado a la unidad.

## **C) Conectores Ignitacord**

Es un dispositivo que sirve para iniciar la combustión de la mecha de seguridad comunicándole directamente la flama que procede del cordón encendedor Ignitacord. Consiste de un casquillo metálico parecido al del fulminante, abierto y vacío en un extremo que permite la introducción de la punta de la mecha a encenderse, con una mezcla inflamable en su base y una ranura en el otro extremo que se usa para fijarlo en la línea de Ignitacord.

Su resistencia al agua es buena y cuando se engargola la mecha, la protege contra la humedad.

## **D) Encendedores de mecha de seguridad de varilla candente.**

Este dispositivo es similar en apariencia a una luz de bengala. Consistente de un alambre rígido cubierto con una mezcla pirotécnica que arde con una flama muy extensa, en una zona anular. Se quema lentamente y a una velocidad más ó menos constante.

Bajo ninguna circunstancia deben considerarse útiles como medidores de tiempo. Estos encendedores se activan con un cerillo y para encender la mecha basta poner en contacto la posición incandescente del encendedor con el extremo recién cortado de la mecha.

Para satisfacer la infinidad de necesidades dentro del campo de iniciación de cargas explosivas se producen los siguientes tipos de detonadores llamados estopines.

## **Estopines**

Los estopines eléctricos, son fulminantes elaborados de tal manera que pueden hacerse detonar con corriente eléctrica. Con ellos pueden iniciarse simultáneamente varias cargas de explosivos de gran potencia. Los estopines eléctricos tienen una carga básica de un explosivo de alta velocidad, una carga como cebo y una carga de ignición suelta o de tipo píldora.

El dispositivo para la detonación con electricidad consiste en dos alambres con aislamiento de plástico, con un tapón de hule que mantiene los alambres en su lugar y un puente de alambre anticorrosivo de diámetro pequeño, que une las terminales de los alambre debajo del tapón.

Cuando se aplica la corriente eléctrica el puente se pone incandescente y detona el estopín.

Los riesgos de disparos prematuros por corrientes eléctricas extrañas se eliminan, mediante desviadores prácticos que mantienen en corto circuito las puntas descubiertas de los alambre mientras no se hace la conexión.

### **Estopines eléctricos instantáneos**

Los estopines eléctricos instantáneos tienen casquillos de aluminio de 1 1/8 de largo; estos son diseñados para uso genera. Un alambre lleva aislamiento color rojo y el otro amarillo. Estos dos colores distintos son de gran ayuda al hacer las conexiones . Potencia No. 6. Alambres de cobre calibre 24.

**Tabla 2**

**Resistencia Nominal de Estopines Eléctricos Instantáneos**

Mínima corriente de dispersión es aquella a la que invariablemente dispara el estopín.

Corriente de diseño es la recomendada para el diseño de circuitos de estopines eléctricos.

Longitud de alambre de cobre en metros	Resistencia en Ohms
2.0	1.60
2.5	1.70
3.0	1.80
3.5	1.90
5.0	2.18
6.0	2.37
7.0	2.56
9.0	2.75
10.0	3.14

**Estopines eléctricos de tiempo**

Los estopines eléctricos de tiempo son semejantes a los estopines eléctricos instantáneos con la diferencia que llevan un elemento de retardo colocado entre el puente de alambre y las cargas de detonación.

Existen dos tipos de estopines eléctricos de tiempo: los regulares Acudet-Mark V y los estopines eléctricos de tiempo MS. Su diferencia estriba en la duración del intervalo de retardo entre períodos consecutivos en la serie.

**Estopines eléctricos de tiempo Acude-Mark V**

Los estopines eléctricos Acude-Mark V se fabrican en una serie de 10 períodos regulares de retardos:

0-25 MS, 1-500 MS, 2-100 MS, 3-1500 MS, 4-2200 MS, 5-300 MS, 6-3800 MS, 7-4600 MS, 8-5500 MS Y 9-6400 MS.

Vienen en guías de alambre de cobre calibre 24 de 3 y 5 metros de longitud.

Estos detonadores están diseñados para disparar en rotación exacta con suficiente intervalo entre ellos para permitir el movimiento de la roca. Su uso da un mayor avance por disparo mejor fragmentación y un nuevo factor de carga.

Mínima corriente de disparo es aquella a la que invariablemente disparará el estopín

Corriente de diseño es la recomendada para el diseño de circuitos de estopines eléctricos.

**Tabla 3**

**Resistencia Nominal de Estopines de Retardo Acudet-Mark V**

Longitud de alambre de cobre en metros	Resistencia en Ohms
3.0	1.68
5.0	2.06

**Uso**

Los estopines Acude-MarkV, se utilizan principalmente en minería subterránea, construcción de túneles, frentes, galerías, tiros, contra-pozos, etc.

**Ventajas**

1. Más avance por disparo: El traslape de tiempos de disparo eliminado y obteniéndose un intervalo de tiempo suficiente para el movimiento de la roca antes del disparo del siguiente período, resulta en mayor avance por disparo.

2. Mejor fragmentación: Al eliminar la superposición de tiempos y al disparar cada barreno en el orden establecido, se obtiene una fragmentación mejor y más uniforme.

3. Control de excavación: El preciso funcionamiento en el instante de disparo requerido, permite un mejor efecto de corte en los barrenos.

4. Economía: La posibilidad del máximo aprovechamiento y rendimiento de cada una de las cargas explosivas en los barrenos permiten un mejor consumo de explosivos. Independientemente, la mejor fragmentación obtenida y la mayor facilidad de rezaga, son factores económicos determinantes de productividad.

## Tiempos de disparo.

El tiempo de disparo de estos estopines los ilustramos en la siguiente gráfica:

Todos los estopines de un mismo período de retardo disparan dentro de los límites de tiempo representados por las áreas negras correspondientes a ese período. Por ejemplo, todos los estopines del 8o. período disparan en el tiempo representado entre las líneas A y B. Antes de que cualquier estopín del 9o. período dispare, deberá transcurrir el tiempo indicado entre las líneas B y C. Este intervalo es el tiempo que queda libre entre los períodos 8o. y 9o. para el movimiento de la roca.

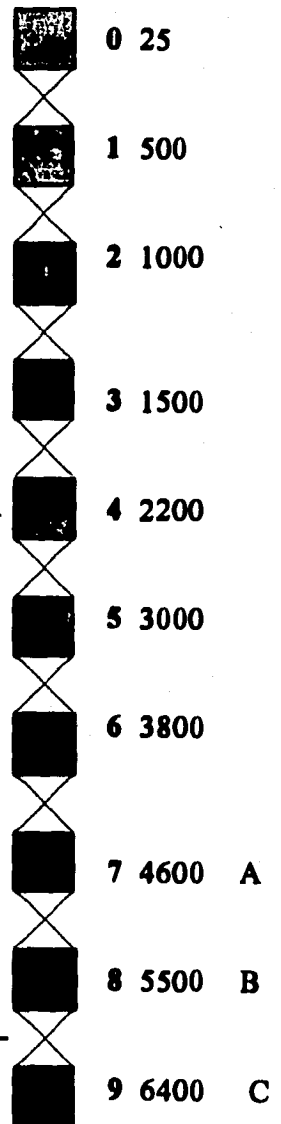
### Estopines eléctricos de retardo MS (milisegundos)

#### Descripción

Los intervalos de tiempo de disparo de estos detonadores son mucho más pequeños que los de la denominación Acude-Mark V. Su fabricación es de 10 períodos de tiempos de disparo nominal dado en milisegundos: MS-25, MS-50, MS-75, MS-100, MS-125, MS-150, MS-175, MS-200, MS-250 Y MS-300.

Vienen con guías de cobre calibre 24, de 3 y 5 metros

**Retardo nominal  
en milisegundos**



**Tiempo libre para el movimiento  
de la roca**

Vienen con guías de cobre calibre 24, de 3 y 5 metros de longitud.

Mínima corriente de disparo es aquella a la que invariablemente disparará el estopín.

Corriente de diseño es la recomendada para el diseño de circuitos de estopines eléctricos.

**Tabla 4**

Mínima corriente de disparo = 0.4A  
Corriente de Diseño = 2A

Longitud de alambre de cobre en metros	Resistencia en Ohms
3.0	1.68
5.0	2.06

## **Resistencia nominal de estopines eléctricos de retardos MS**

### **Uso**

Los detonadores eléctricos de retardo MS se usan en disparos de una o más líneas de barrenos de pequeño diámetro preferentemente a cielo abierto ( construcción ), canteras, minas no metálicas (calizas, yeso, fluorita, etc. ) y excavaciones en roca.

### **Ventajas**

El disparo con estopines de retardo MS tiene las siguientes ventajas sobre aquel con intervalos largos (estopín Acude-Mark V ).

1o. Menor sobre-excavación: La rotación en el disparo permite que el material se mueva antes de que detone el estopín del siguiente tiempo de retardo, desplazándose así hacia un espacio libre y cortando la acción de excavación sobre la línea de barrenación del último período disparado.

2o. Mejor fragmentación: El disparar hacia un espacio libre implica una mejora en la fragmentación. Así mismo, el permite que el material en movimiento del último tiempo disparado alcance el material desplazado por el período anterior. El choque físico de ambos resultará en mayor rompimiento de la roca.



3o. El espacio libre por la detonación de los estopines de retardo anterior permite un menor esfuerzo del explosivo y en consecuencia el mejor aprovechamiento de su energía.

4o. Mientras menor sea la carga explosiva que detona a un mismo tiempo, menor será el efecto de sacudimiento y vibración. La carga explosiva total de una voladura puede dividirse en varias cargas menores, así como el número de períodos de retardo que se empleen.

5o. Control de lanzamiento: Mediante el control del disparo los puntos francos del depósito pueden ser determinados con anticipación. Es posible así lanzar el material en la dirección deseada.

6o. Eliminación de barrenos cortados: Eliminación de explosivos sin explotar en la rezaga.

## **Agentes Explosivos**

Un agente explosivo es un compuesto o mezcla química insensible al fulminante, que no contiene ingredientes explosivos y que puede hacerse detonar cuando se inicia con un cebo de alta potencia.

### **Súper Mexamon D**

Reune las principales características de agentes explosivos: seguridad, eliminación de los malestares físicos producidos por las dinamitas y economía. Conjunta las propiedades principales de trabajo de las dinamitas: potencia y velocidad pero con dos ventajas: baja densidad que permite ahorros y resultados superiores, al hacer posible la mejor distribución de la carga explosiva en el barreno. Además, un mínimo de gases tóxicos que lo hace indicado para uso subterráneo.

### **Propiedades**

Su potencia equivale a Dinamita Extra 65 %.  
Densidad vaciado en el barreno: 0,65 gms/c.c  
Velocidad: 3,800 mts/seg. Aproximadamente

## **Ventajas**

- 1o. Puede usarse tanto en minas bajo tierra como en operaciones a cielo abierto.
- 2o. La velocidad de Super-Mexamon D y la energía que desarrolla por su gran volumen de gases de expansión lo equiparan en potencia a la Dinamita Extra 65 %.
- 3o. Por su baja densidad permite la mejor distribución del explosivo en el barreno y en consecuencia, una mejor fragmentación.
- 4o. Super Mexamon D, es un agente explosivo cuidadosamente formulado e íntegramente elaborado, listo para cargarse directamente de la bolsa, tal como se empaca, lo cual implica que no requiere mezclas adicionales, no existe desperdicio y es económico.
- 5o. Super Mexamon D ha demostrado ser más sensible a la onda de detonación que cualquier mezcla de nitrato de Amonio y Aceite Diesel o combustible.
- 6o. Con Super Mexamon D los resultados obtenidos, voladura tras voladura, son constantes y reproducibles siempre y cuando se cebe apropiadamente. Los resultados constantes no son posibles en las mezclas de Nitrato de amonio o fertilizantes con combustibles, debido a las tantas variables que intervienen en su preparación.
- 7o. No contienen nitroglicerina.
- 8o. Puede en muchos casos substituir con ventaja a las dinamitas, las cuales son más altas en precio.

## Carga

En operaciones a cielo abierto, Super Mexamon D puede cargarse por gravedad, vaciado. La tabla mostrada a continuación nos da una idea aproximada de los kilos por metro lineal de barrenos de varios diámetros.

**Tabla 5**

Diámetro Barreno (cm)	kg. por mt lineal de barreno
2.54	0.329
5.08	1.318
7.62	2.964
10.16	5.270
12.70	8.234
15.24	11.857

## Fovex Extra

Este es un agente explosivo licuado para emplearse en barrenos de diámetro grande en las voladuras de roca y de mineral duro y sólido en canteras, tajos abiertos, construcción, etc. Se emplea como carga de fondo en materiales difíciles de romper y para ampliación de las plantillas de barrenación, optimizando por lo tanto los costos unitarios de perforación. Cuando es desprovisto de su envoltura de tubo de polietileno y cargado en el barreno, fluye libremente hacia el fondo, asentándose y acomodándose para llenar totalmente su sección transversal, proporcionalmente la máxima densidad de carga. Su resistencia al agua es excelente y como consecuencia de ello es utilizado en todo tipo de terrenos y climas.

## Propiedades y especificaciones

Densidad: 1.30 gms/c.c  
Velocidad: 5000 m/seg.  
Resistencia al agua: Excelente.

Diámetro Barreno (cm)	Cartucho
10.15	4
12.50	5
15.00	6
20.00	8

**Tabla 6**

## **Ventajas**

**Por su baja sensibilidad al impacto se tiene una máxima seguridad al impacto, al choque y al fuego.**

**Es adecuado y está diseñado para soportar las temperaturas extremas del país.**

**Aumentar la cantidad de explosivos por metro lineal de barreno.**

**La energía disponible para romper y fragmentar que proporciona este explosivo usado como carga de fondo, desarrolla las máximas presiones y esfuerzos en la roca, teniendo como resultado mejor rompimiento y eliminación del problema de patas.**

**Para el cebado de Tovex Extra se recomienda emplear Detomex 450 (cebo detonante de alta presión), se debe colocar un cebo a cada 6 metros y, utilizar un mínimo de 2 cebos por barreno. Según las condiciones del terreno y de la carga en particular, podrán requerirse cebos adicionales.**

**Para una carga de columna de Tovex - Extra, la carga - cebo de fondo debe hacerse introduciéndose un Detomex 450 con el dispositivo iniciador, dentro del explosivo licuado.**

**La unidad cebada colocada al fondo del barreno debe estar en contacto con la carga principal. El cebado múltiple o sea la colocación de cebos adicionales se hace simplemente deslizándolos por el cordón detonante, seguidos de más Tovex Extra.**

# Máquinas Explosoras

Estas máquinas suministran la corriente necesaria para disparos eléctricos. Hay dos tipos de máquinas explosoras.

El tipo "Descarga de Condensador" y el tipo "Generador".

## Descarga de Condensador

Utiliza pilas secas para la carga de un banco de condensador que ya así puede proporcionar una corriente directa y de corta duración a los dispositivos de disparo eléctrico.

Están provistos de cajas metálicas resistentes al agua. Sus características son:

- 1) Una capacidad extremadamente alta, en comparación con su peso y tamaño.
- 2) La ausencia de partes dotadas de movimiento.
- 3) La eliminación del factor humano que interviene en las máquinas de tipo mecánico.
- 4) Una luz piloto.
- 5) Un sistema de alambres e interruptores que reúne importantes características de seguridad.

## Generador

Su principio se basa en un generador modificado que proporciona una corriente directa pulsativa. Estas máquinas son del tipo llamado "de vuelta" o también "cremallera". Están diseñadas de tal manera que no fluye en ellas corriente alguna hasta que se dé todo el movimiento necesario a la manivela de vuelta o de cremallera; es entonces cuando la corriente va a dar las líneas de disparo en caso todo su amperaje o voltaje.

# **Instrumentos de Pruebas**

## **Galvanómetro de pruebas**

Este instrumento tiene una pila especial de cloruro de plata que proporciona a la corriente necesaria para mover una manecilla en una escala graduada. La pila y las partes mecánicas están encerradas en una caja de pasta, la cual está provista de dos " bornes " de contacto. Sirve para probar los estopines eléctricos individuales y también para determinar si un circuito de voladura está cerrado o no y si está en condiciones para el disparo; además sirve para localizar los alambre rotos, las conexiones defectuosas y los cortos circuitos, así como para medir la resistencia aproximada de un circuito.

## **Voltiohmetro para voladuras**

Este instrumento es una combinación del voltímetro y del óhmetro, que sirve para descubrir la presencia de corrientes extrañas, para la lectura de voltaje de las líneas y para medir la resistencia de los circuitos de voladura.

## **Reostato**

Este instrumento se usa para probar la eficiencia de las máquinas explosivas de cremallera.

# **Equipo de Barrenación**

Los barrenos varían mucho en tamaño y tipo, se perforan utilizando diferentes clases de equipo, y en todas las direcciones posibles. En los últimos años se han presenciado algunos desarrollos notables en los equipos que describiremos brevemente.

Los barrenos pequeños de 1 a 2 1/2 pulgadas de diámetro y hasta 30 pies de profundidad se perforan usualmente con máquinas de tipo de percusión operadas por aire, tales como las pistolas neumáticas de pierna o de mano, pequeñas perforadoras montadas sobre orugas, carabinas o jumbos.

La pierna hidráulica que se utiliza con las pistolas ligeras ha recibido amplia aceptación. Este método de montaje es ahora popular para el trabajo de desarrollo en las minas subterráneas y también para la perforación de alta velocidad de túneles a contrato ( en donde en muchas ocasiones se ha adaptado a " jumbos " de plataforma ).

El uso de la pierna para sujetar pistolas más pesadas bajo tierra ha disminuido en favor de " jumbos " de brazos hidráulicos, de los cuales se fabrican, en la actualidad, hay muchos tipos para hacer frente a prácticamente cualquier requisito de túneles.

Los barrenos de pequeño diámetro más profundo se perforan hace tiempo empleando máquinas hidráulicas de rotación con brocas de diamante en donde se requieren profundidades de 100 pies mayores. Estas brocas de diamante, por lo regular son accionadas por aire comprimido.

Los barrenos cortos de pequeño diámetro que se perforan en materiales relativamente suaves, se hacen con gusanos neumáticos ó eléctricos.



## Track Drill

Máquina neumática para barrenar

Los desarrollos logrados en el equipo de perforación móvil han sido significativos con el reemplazo del equipo montado en ruedas. Se encuentran disponibles muchos tipos de autopropulsión montados en orugas en el rango de 2 1/4 a 6 pulgadas de diámetro.

Como podría esperarse, las máquinas mayores requieren considerablemente más aire que las pequeñas. Sin embargo, se utilizan con frecuencia y con eficiencia en formaciones hasta de 100 pies de profundidad.

El equipo de perforación móvil para diámetros grandes se adapta especialmente a bancos de canteras de mas de 40 pies de altura. Los barrenos más grandes, en el rango de 9 pulgadas no siempre producen resultados satisfactorios con patrones de barrenación correspondientemente mayores. El equipo de perforación por percusión son barrenos de diámetro más pequeño y con patrones de barrenación más cerrados permite una mejor distribución de los explosivos y, por consiguiente una mejor fragmentación. Una ventaja suplementaria es la reducida vibración que se obtiene con barrenos pequeños, ya que se inicia con menos kilos de explosivos por periodo de retardo.

El equipo de perforación con pulsetas que se utilizó en el pasado para barrenos verticales de diámetro grande, ha sido virtualmente reemplazado, por equipos de rotación o por equipos de barrenación de percusión en la cabeza.

Se puede mencionar que la barrenación se lleva a cabo fundamentalmente por dos diferentes tipos de equipo que son: compresores y perforadores.

Podríamos definir un compresor como una máquina que es capaz de aumentar la presión del aire reduciendo su volumen, y existen diferentes tipos de ellos.

Son:

- Compresor de acción simple.
- Compresor de doble acción.
- Compresor de una etapa.
- Compresor de dos etapas
- Compresor de etapas múltiples.
- Compresor Centrifugo
- Compresor Rotatorio.

Los compresores pueden ser además, según su uso, estacionarios y portátiles. Los primeros son utilizados en instalaciones en donde se necesita aire comprimido a través de un largo periodo de tiempo.



Pueden ser reciprocantes o rotatorios, que obtienen su fuerza motriz por medio de vapor, motores eléctricos y por motores de combustión interna.

Los segundos son utilizados cuando se necesita estar moviendo el equipo de hule o de acero y sobre plataformas. Generalmente son impulsados por motores de diesel o gasolina y son de una o dos etapas de tipo reciprocante o rotatorio. Para conocer la capacidad de un compresor basta saber la cantidad real de aire que entra al compresor en un minuto y se expresa en pies cúbicos.

Al transmitir el aire de un compresor al equipo neumático es necesario limitar la caída de presión a lo largo de la línea.

Ningún dato fijo puede proporcionar el tamaño correcto de una tubería para todas las instalaciones, en la tabla siguiente se proporcionan los tamaños recomendados de tubo para la transmisión de aire comprimido para diferentes longitudes de tubería.

**Tabla 10**

Volumen de Aire	Tamaño Nominal del Tubo, Pulg.				
	500-200	200-500	500-1000	1000-2500	2500-5000
Longitud del Tubo H					
30 - 60	1	1	1 1/4	1 1/2	1 1/2
60 - 100	1	1 1/4	1 1/4	2	2
100 - 200	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2
200 - 500	2	2 1/2	3	3 1/2	3 1/2
500 - 100	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2
1000-2000	2 1/2	4	4 1/2	5	6
2000-4000	3 1/2	5	6	8	8
4000-8000	6	8	8	10	10

**Tamaño de tubo recomendado para la transmisión de aire comprimido a una presión de 80 a 25 PSI manométricas**

Generalmente los equipos de barrenación necesitan una longitud de manguera flexible entre el tubo de abastecimiento y el equipo, por lo que también será necesario determinar la longitud de la misma.

# **Perforadoras**

## **Perforadoras neumáticas de mano**

Las perforadoras de roca neumáticas que se usan para excavación son generalmente máquinas que golpean y hacen girar una barrera de acero con una broca. Las más ligeras hasta de 30 kg. Siempre se operan con la mano, pero pueden estar montadas en guías equipadas con mecanismos de alimentación manuales o mecánicos. Los modelos más pesados casi siempre están montados en guías y son de alimentación mecánica.

A las perforadoras de roca de mano se les llama pistolas o martillos. Se operan con aire, y excepto las de tipo más pequeño que se llaman barrenos de centrado, hacen girar y golpean una barrena hueca de acero que lleva una broca. Su peso varía de 15 a 70 kg.

Los golpes astillan, rebanan o trituran la roca, la rotación presenta superficies nuevas de ataque y el aire del escape y el que se aplica directamente para soplar a través de la barrena saca el polvo y los pedazos de roca.

## **Perforadoras pesadas**

**Perforadoras montadas.** Las perforadoras de aire que pesan 34 kg, o más, generalmente se montan en soportes y están provistas de mecanismos de alimentación automáticos.

Estas unidades se clasifican generalmente por el diámetro del cilindro en vez de por el peso. Los tamaños ordinarios son de 2 5/8, 2 3/4, 3, 3 1/2, 4, 4 1/2 y 5 1/4 plg, de diámetro en el cilindro, el modelo ordinario de p&g puede pesar 130 lb, y uno de 4 1/2 plg, 175 lb.

Estas perforadoras pueden llevar mecanismos para hacerlas girar en un solo sentido, o para dos sentidos y neutra. Cuando se usan barrenas acopladas, la barrenación se hace con la rotación ordinaria, la rosca se afloja con unos cuantos golpes en neutra, la conexión se desatornilla sosteniendo la parte inferior y haciendo girar en reversa la superior.

## **Perforadoras sin barrenas**

Las perforadoras sin barrenas son unidades neumáticas sencillas en las que el golpe del pistón se aplica contra el vástago de la broca, sin ninguna barrena o varilla intermedia.

La perforadora es muy delgada en proporción a su peso y resistencia. No tiene mecanismo especial para hacer girar la broca. El aire se escapa por la broca y expulsa los fragmentos a la superficie alrededor de las varillas.

El diámetro de los pistones de los martillos varía de 2 1/2 a 5 plg., y los pesos de 13 a 175 lb. Las carreras pueden ser cortas como de 7/8 plg, o tan largas como 5 plgs. La frecuencia de los golpes por minuto varía de 500 a 2700 en las unidades ordinarias y a 3800 en los modelos de alta presión.

El límite teórico de la frecuencia de las carreras es aproximadamente, de 6000 por minuto. La lubricación se efectúa con aceite especial para perforadora que se mezcla con el aire del compresor.

La barra de la perforadora que va arriba de ella conduce al aire, la mantiene en contacto con la roca a la presión correcta y la hace girar. La rotación, que generalmente es de 15 a 25 r.p.m., se obtiene por medio de un motor hidráulico o neumático que tiene posición en la instalación que es la que ocuparía la perforadora. Se sujeta a la perforadora una broca con filos de carburo por medio de un retén de aro partido y una tuerca. Para quitar la broca, se afloja la tuerca por medio de una herramienta hidráulica, y luego se desatornilla por medio del mecanismo que produce la rotación.

Las perforadoras se hacen para funcionar a la precisión ordinaria de la maquinaria de construcción de 100 lb/plg<sup>2</sup>. Los modelos para alta presión pueden funcionar de 250 a 500 lb. Existe la tendencia de aumentar las presiones para obtener una mayor eficiencia.

La perforadora sin barrena es muy eficaz para hacer barrenos de 4 a 9 plg de diámetro en roca dura y de dureza media. Ya que ninguna porción de la fuerza del golpe se absorbe por la barra (a la que se le llama barra o tubo cuando los barrenos son profundos y grandes), la profundidad a que puede funcionar está limitada solamente por la capacidad de la corriente de aire para

expulsar los fragmentos de roca del barreno, y de la capacidad de los cojines giratorios para soportar el peso de una larga serie de barras.

El empuje o presión hacia abajo con estas perforadoras es mucho menor que el de las giratorias. Rara vez excede de 2 500 lb aún en roca muy dura.

El aire de escape que sale por la broca debe tener una velocidad de 3000 pies/min para limpiar el agujero. Para barrenación rápida con fragmentos grandes de roca pueden ser necesarios 5000 pies/seg.

Cuando el barreno es grande en proporción con el diámetro de la barra, la velocidad del aire será baja porque el pasaje es muy ancho. Se puede aumentar la velocidad usando un compresor auxiliar, disminuyendo el tamaño de la broca, o usando barras de mayor diámetro.

### **Perforadoras giratorias**

Este tipo de perforadoras está formado por un mecanismo alimentador, con una plataforma o cabeza giratoria que se coloca arriba del suelo, y de una broca en el fondo del agujero conectadas por una barra hueca que conducen aire comprimido a la broca.

Las brocas son generalmente, del tipo de rodillo o de conos triples, con adaptaciones especiales para limpiarse con aire en vez de lodo. La rotación de la broca contra el fondo hace girar los conos, produciendo un desmenuzamiento y una trituración, y al mismo tiempo tallando y raspando.

En general, los dientes grandes y separados se usan para formaciones blandas, y el tamaño de los dientes se reduce progresivamente según vayan siendo más duras las rocas. Los dientes son de acero, a menudo recubiertos de carburo de tungsteno o con otro recubrimiento duro, excepto para las formaciones más duras en las que se emplean filos de puro carburo de tungsteno.

En las brocas ordinarias la corriente de aire sale por las brocas detrás de los conos, tratando de limpiarlas antes de que lleguen al fondo y soplando los fragmentos allí. Esta construcción es la mejor para la formaciones que están lo suficientemente húmedas para que los fragmentos cortados se aglomeren entre los dientes, y es buena para todas las rocas que no son abrasivas.

Las giratorias son las más rápidas en roca blanda, compiten con las perforadoras sin barrenas en las rocas de dureza media, pero generalmente no son económicas en las formaciones muy duras. Estas indicaciones son de carácter general, y se presentan excepciones neumáticas de extensión se alargan con aire comprimido en la misma forma que los brazos neumáticos, y pueden llevar una punta en cada extremo.

La perforadora se apoya en un asiento especial en la misma columna o en un brazo lateral. Puede girar vertical y horizontalmente. El asiento puede moverse a lo largo del brazo y éste puede moverse a lo largo de la columna.

Las montaduras de columna son de manejo incómodo. Están siendo reemplazadas por los brazos neumáticos en los trabajos ligeros, y por los carros de barrenación en los grandes

### **Perforadoras de carretilla**

La perforadora de carretilla tiene una perforadora y una guía articulada a una barra en forma de U, que está, a su vez, articulada a un bastidor de tres ruedas que puede remolcarse o empujarse a otro sitio. Lleva unas varillas con punta llamadas clavijas, para apoyarlas contra el suelo para sostenerlas en las pendientes y durante la barrenación.

La guía puede girar sobre la barra y U y ésta se puede subir y bajar con una manivela o un gato hidráulico. La combinación de estos dos ajustes proporciona un número casi ilimitado de posiciones de barrenación y de direcciones en el plano central de la máquina.

La guía puede también tener una corredera que permita moverla a lo largo de su conexión con la barra en U, y un pivote que permite una inclinación lateral limitada que sirve para compensar la inclinación del batidor en los declives.

La rueda trasera unida a un eje vertical, gira libremente y está también unida a una barra de tiro. Las ruedas delanteras mayores, tienen dos posiciones, para trasladar el equipo y en ángulo recto para permitir movimientos laterales precisos para alinear la perforación cuando los barrenos van a quedar muy juntos.

La perforadora tiene una carrera de alimentación en la guía de 8 a 10 pies por lo que se puede aumentar el tamaño de las barrenas de 6 a 8 pies en cada

cambio. Se pueden elegir alimentaciones más largas para aumentar más la longitud de las barrenas en los cambios.

Los diámetros de las barrenas son comúnmente de 1 1/4 a 1 1/2 plg. Se puede utilizar un dispositivo centrador de la barrena de dos brazos conectados a la barrena para mantenerla en su posición cuando se emboquilla el barreno, que se puede quitar cuando ya no se necesita. Una argolla en la parte superior de la guía simplifica el manejo y la maniobra de parar las barrenas.

Se puede instalar un torno o malacate movido por aire que permita a la máquina moverse por sí misma o moverse un compresor distancias cortas.

### **Perforadoras gemelas**

Esta unidad es esencialmente un par de guías de perforadoras de carretilla, llevando cada una su propio mecanismo de perforación y de alimentación sujetas a una armazón adaptadas para suspenderla de una pluma de tractor o de grúa. Se utiliza para perforar la roca y hacer cepas para las tuberías. Las barrenas tienen una separación de 3 a 5 pies. Las cepas más angostas pueden barrenarse sosteniendo el bastidor formando un ángulo con la línea central menor de 90°.

## **Perforadoras de propulsión propia**

### **Perforadora ligera de orugas**

La perforadora móvil consta de una perforadora pesada de 4 a 1/2 plg, una guía o carro, un cono o conexión hidráulica y un brazo en un bastidor transversal entre un par de orugas. Las orugas operan separadamente por motores de aire reversibles que operan a través de reducciones de engranes.

Las zapatas de las orugas pueden ser de acero con garras, o provistas de zapatas de hule. Su tracción es buena excepto en roca mojada. El control separado de las orugas permite dar vueltas en el mismo sitio, y hacer maniobras con precisión. El operador se para o camina detrás de la máquina.

Una bomba hidráulica movida por aire proporciona la presión para el brazo hidráulico y para los controles de la guía.

La cantidad de aire depende principalmente del tamaño y condiciones de la perforadora, y generalmente es de 340 y 390 pies<sup>3</sup>/min para las máquinas nuevas. Lo que quiere decir que es necesario un compresor de 600 pies<sup>3</sup>/min para una unidad, o unos de 900 pies<sup>3</sup>/min para dos. Las orugas pueden remolcar su compresor excepto en terreno muy abrupto o muy inclinado.

Algunos sistemas y modelos tienen orugas oscilantes, otras son rígidas, y algunas tienen mecanismos hidráulicos para mantenerlas en contacto con el suelo cuando este es irregular. La flexibilidad del brazo y de la guía permiten ordinariamente barrenar en posiciones muy inclinadas, pero deberán calzarse las orugas lo suficiente para tener la seguridad de que no se mueven durante la barrenación.

Muchos detalles son optativos. Es posible sustituir una bomba de mano por una operada con aire, y sustituir la manipulación a mano para sujetar la torre y para efectuar sus movimientos.

### **Perforadoras Portátiles de torre**

Los equipos mayores de perforación tiene una torre, a la que también se llama mástil o carro, articulada a la base móvil, de tal manera que puede elevarse a las posiciones de operación o bajarse para moverse, por medio de cilindros hidráulicos o un torno de cable. La mayor parte de las perforaciones las ejecutan con la torre en posición vertical, pero muchos modelos pueden trabajar con la torre en posición horizontal o parcialmente levantada. No puede inclinarse en forma lateral. La altura puede ser de 30 a 50 pies para dar una alimentación o carrera de 25 a 50 pies.

Las torres están montadas en la parte posterior del vehículo, que luego se convierte en el " frente " de toda la unidad. Estas máquinas son de construcción sencilla, permiten colocarlas con precisión y toda la máquina puede quedar lejos de los lugares peligrosos. La montadura en el centro permite usar una mayor proporción del peso de la máquina para ejercer presión hacia abajo, y se usa solamente en las unidades grandes.

La montadura puede consistir en un soporte individual con controles propios del tipo de las palas, sobre un tractor grande, o en un camión para servicio pesado como los que se usan para las grúas. Cuando las orugas están impulsadas por motores de aire revestibles separados, es posible maniobrar

con precisión en los lugares reducidos. La montadura de camión se prefiere cuando los lugares de trabajo cambian con frecuencia, como en las perforaciones de los pozos de agua.

La máquina se nivela antes de empezar a perforar por medio de tres gatos hidráulicos controlados por separado desde la caseta del operador. Un nivel de burbuja o de péndulo en la torre indica cuando tiene una posición vertical. Válvulas de retención mantienen la presión en los gatos si falla el sistema hidráulico. La bomba hidráulica se mueve mecánicamente o por medio de un motor de aire.

La barrena generalmente se hace girar desde el extremo superior con un motor de aire o hidráulico y un engranaje de reducción. La unidad que hace girar la barrena incluye una cabeza por la que entra el aire comprimido a la barrena. Las unidades de los campos petroleros pueden usar la mesa giratoria, que se describe después para la perforación profunda.

El mecanismo de alimentación puede ser un motor de aire y cadena, un pistón hidráulico de doble acción conectado directamente u operando una cadena que pasa por una polea, o uno de cable y tambor de propulsión eléctrica para subir y bajar una propulsión hidráulica para el control de alimentación.

La alimentación mantiene la broca en contacto con la roca y produce la presión adecuada ( empuje hacia abajo ). Esta puede llegar a ser de 25 ton en estas máquinas móviles, y mucho mayor en los equipos de perforación estacionarios, para pozos profundos. El sistema de alimentación se invierte para sacar las barrenas y la broca del agujero, cuando se ha terminado o cuando se presentan averías.

El aire que necesitan varía de 100 pies<sup>3</sup>/min para los modelos menores a 1200 para los mayores. El compresor o compresores están generalmente montados en el tractor o camión que lleva la perforadora, formando una unidad independiente. Los modelos pequeños o especiales pueden remolcar un compresor, o usar una tubería de aire de una fuente estacionaria o distante.

La potencia la puede suministrar el motor del vehículo con una toma de fuerza, un motor separado de gasolina o de diesel, o por motores eléctricos.

El compresor o compresores pueden ser la única fuente de potencia, haciendo todas las maniobras de la operación con motores de aire. Algunas



máquinas están impulsadas por el motor del vehículo, con una toma de fuerza, o por un motor diesel separado, con varias combinaciones de propulsión neumática, hidráulica y mecánica. Una unidad grande de propulsión eléctrica utiliza 50 hp para caminar, 125 para compresión del aire, 15 para la bomba hidráulica y 10 para comprimir aire. Otro utiliza dos motores de 125 hp para aire y dos de 25 para elevar y para la propulsión giratoria.

Estas máquinas pueden estar equipadas con perforadoras sin barrenas para perforar agujeros hasta de 9 plg de diámetro, y con brocas giratorias para diámetros hasta de 12 plg. En ocasiones se utilizan taladros. Los modelos proyectados especialmente para perforadoras sin barrenas pueden tener una rotación más lenta y menor presión hacia abajo que la necesaria para barrenación giratoria. La perforadora sin barrena puede necesitar una capacidad de aire mayor y mayor presión que las giratorias. Sin embargo, la mayor parte de las máquinas pueden utilizarse en dos tipos de barrenación.

Se puede utilizar perforadoras montadas con un diámetro de 4 1/2 ó 5 1/4 plg, pueden utilizarse para perforar barrenos hasta de 4 plg de la manera convencional. La rotación se puede obtener con la perforadora o con la cabeza giratoria. La profundidad de los barrenos está limitada por la absorción del impacto del martillo por la barrena larga. La eficiencia empieza a declinar a los 30 pies en roca dura, y a profundidades algo mayores en material blando. Algunas veces se usan hasta 100 pies o más.

Las perforadoras sin barrena y las giratorias tiene una profundidad de barrenación limitada por la capacidad de la masa giratoria para soportar el peso de las barrenas largas, y por la capacidad de la corriente de aire para mantener el agujero libre de fragmentos. Los barrenos hechos con perforadoras sin barrena se pueden hacer ordinariamente hasta de 200 pies y se han llegado a perforar hasta de 800 pies o más. Se puede conectar un compresor extra para ayudar a mantener limpio el barreno a mayores profundidades. Si se utiliza una perforadora giratoria, y se sustituye un sistema de circulación de lodo por el sistema de soplete de aire para la limpieza, no existe un limite exacto para la profundidad. Sin embargo, los equipos especiales son más eficientes para agujeros muy profundos.

La profundidad práctica máxima de perforación es diferente con cada sistema y modelo, y a menudo, tiene que conocerse por la experiencia. En general, las máquinas mayores con los controles más elaborados son capaces de mantener su eficiencia a las mayores profundidades, pero no siempre.

# Brocas

Una broca para perforar tiene que efectuar cuatro funciones importantes. Debe penetrar en la roca, molerla en granos finos, lo suficientemente pequeños para que se mezclen fácilmente con el agua, mantener en suspensión los fragmentos en el agua y perforar el agujero con la sección completa y de forma redonda. Para hacerlo, debe tener la forma correcta cuando se coloca en el conjunto de herramientas y lo suficientemente dura y tenaz para permanecer en esas condiciones durante un tiempo razonable.

Una broca gastada o deformada se puede reconformar y endurecer forjándola y golpeándola con el martillo.

La perforadora debe estar provista de brocas de repuesto suficientes, para que nunca sea necesario trabajar con una desafilada.

## Barrenas y Brocas

### Barrenas

Las barrenas huecas para las perforadoras de mano y las montadas se hacen con diámetros de  $3/4$  a  $1\ 1/2$  o 2 plg. Las longitudes ordinarias son de 1 a 20 ó 30 pies, pero las mayores se están reemplazando por barrenas seccionales. Su sección transversal puede ser hexagonal, octogonal o redonda.

El extremo inferior de la barrena puede forjarse formando una broca, pero este sistema es cada vez más raro. Generalmente, el extremo lleva una rosca para la broca. Los filetes de la rosca son gruesos y es rosca izquierda y son de formas diferentes según las diferentes marcas de las brocas.

Los golpes para la barrenación pueden transmitirse a la broca por la roca, o en un talón de la barrena sobre el que se apoya la broca. La rotación normal de la perforadora mantiene la broca apretada cuando está en operación.

La longitud de la rosca es con la aproximación de  $1/8$  plg, igual al diámetro de la barrena.

El enchufe para las brocas desechables o de un uso puede ser una espiga cuadrada o casi redonda en la barrena, que encaja en un agujero de la broca.

Se usan tres formas de espiga en las barrenas - hexagonales cuadradas con las esquinas biseladas, y redondas, con talones. Las redondas con dos talones se usan principalmente con las perforadas más grandes y las barrenas más gruesas. El diámetro de las espigas, por lo general, es el mismo que el de las barrenas o ligeramente menor.

El collar de la espiga sirve para limitar la penetración de la barrena hacia arriba, en el porta herramientas, e impide que el sujetador permita que se salga la barrena de la perforadora.

Las longitudes de las espigas, de la parte superior del collar al extremo son de tres y cuatro pulgadas en las barrenas pequeñas y de cuatro y cuatro para los tamaños grandes.

Es importante que estas longitudes no varíen más de 1/16 y que el extremo se mantenga formando un ángulo recto con el eje de la barrena.

Las roscas para la broca y las espigas se deterioran con el uso y requieren reparaciones frecuentes. Existen máquinas para forjar que pueden formarles estos extremos a las barras rectas de acero de barrenación, o repararlas, y también darles la forma de brocas y reconstruirlas. Cada proceso reduce la longitud del acero un poco.

Las barrenas se doblan con frecuencia por accidente, mal manejo, o al volar las que se atorán en los agujeros. En general, las barrenas delgadas y largas son las que se dañan más a menudo y más seriamente. Casi siempre se pueden enderezar en un taller de herrería a un costo menor que el de reemplazarlas.

El juego de barrenas consiste en barrenas de longitud ascendente desde la rompedora que así se llama a la primera, hasta la más larga que se emplee. Cuando se trabaja con perforadoras de mano el aumento usual de las barrenas sucesivas es de 2 pies. A la diferencia de longitud entre dos barrenas sucesivas se le llama cambio de barrena.

### **Brocas**

Las brocas separables de acero se miden por su calibre que es la longitud de uno de sus filos y el tamaño de la rosca. La más usual es la que tiene los filos en forma de cruz, en la que los filos se cortan en ángulos rectos. Que es la que se adapta a la mayoría de los tipos de roca.

Las rocas para varios usos, se proyectan para poderse afilar cuando se embotan.

La parte más ancha de la broca está en el filo y se va angostando hacia la barrena. De esta manera el barreno queda con un espacio para que no se atoren. En roca blanda, en la que la broca penetra rápidamente, puede perforar dejando una serie de estrías helicoidales alrededor del barreno en vez de hacerlo completamente parejo. A este proceso se le llama rayado. Que hace muy difícil o imposible sacar la broca. Puede reducirse usando brocas con los filos en forma de X, en las que los filos no se cruzan en ángulo recto.

Las brocas llevan los agujeros del aire en el centro, o a sus lados, o en ambas posiciones. El aire comprimido, o el aire y agua, que se inyecta por la barrena, escapa por la boca arrastrando los fragmentos de roca desde los filos hasta la superficie. Las brocas con agujero central producen una limpieza algo mejor, pero presentan la tendencia a taparse en formaciones blandas o fisuradas.

Las brocas generalmente se construyen de acero de aleación y se templen a profundidades variables. El temple y la forma de las alas (gavilanes), filos y otros detalles dependen de factores bastante complejos.

Los diámetros de las brocas varían de una pulgada a cuatro y media pulgadas y las roscas de 5/8" a 2 1/16". Las brocas gastadas tienen tamaños intermedios.

Al usarse una broca se va gastando a lo largo de los filos y de los costados de las aletas. El desgaste lateral es el más importante porque pronto se invierte la conicidad, por lo que el filo tiene una longitud menor que la parte de atrás. Que tiene como efecto introducir la broca en un agujero que es chico para ella.

El grado de desgaste con el que se atora varía con el tipo de roca.

Las rocas que se afilan pueden reacondicionarse en máquinas especiales. Una broca que se ha templado profundamente se puede afilar varias veces. Se rebaja de los costados hasta que se corrige la conicidad A invertida.

El tamaño de la broca disminuye con el reacondicionamiento.

Siempre que se cambie una broca en un barreno la nueva deberá ser menor para evitar que se atore. Si se utilizan brocas nuevas solamente, la reducción deberá ser de un octavo de pulgada.

**DISEÑO  
Y  
VOLADURAS**

**IV**

## **IV. Diseño y Voladuras**

En tanto mayor es la magnitud de una tronada, mayor importancia cobra su correcta planeación y ejecución, lo que implica disponer de un método seguro y de suficiente aproximación que permita calcular adecuadamente las cargas de explosivos, su más conveniente distribución en la " tanda de barrenación " y aún dentro de cada barreno individual, a fin de tener un efectivo control de la rotura del material, su grado de fragmentación, lanzamiento, daños a bienes de terceros, así como la economía del trabajo. Para los fines perseguidos en esta tesis, lo que en definitiva nos interesa es justamente calcular las cargas de explosivos a fin de poder determinar en forma más o menos precisa los consumos y los cargos económicos derivados de ello.

Ya desde hace más de dos siglos, Belidor V.F. ( Nouveau Cours, Mathématique a L "Usage d' Artillerie et du Génie ) desarrolló la fórmula conocida por su nombre y que ha sido extensivamente usada por muchas generaciones en el cálculo de las cargas explosivas en los trabajos de minas.

Por otra parte, sabemos que cuando menos desde hace un siglo, los Ingenieros de Minas han venido calculando con sorprendente aproximación y eficiencia las cargas explosivas necesarias en los trabajos de su competencia.

En páginas subsecuentes, se describe un método de cálculo desarrollado por ULF Langerford de Estocolmo, Suecia.

El método de cálculo que a continuación se expone está basado en experiencias sistemáticas conducidas, observadas y registradas, sobretronadas realizadas para comprobar las deducciones teóricas del método. Los resultados han sido sometidos a comprobaciones exhaustivas en operaciones de tronadas en gran escala y magnitud bajo condiciones muy variadas; las fórmulas y nomogramas, que en resumen, son el resultado del procedimiento de cálculo, pueden ser empleados con confianza, aunque claro está, se puede obtener errores, por lo general aceptables.

La aplicación de los resultados de este sistema es particularmente útil y aproximada en rocas de mediana dureza, compactas y más o menos homogéneas, como representativas de las cuales podemos enumerar el granizo, esquistos, andesitas, riolitas, etc., etc.

## Simbología y terminología

A fin de uniformizar todas las posteriores discusiones referentes a trabajos con empleo de explosivos, a continuación se consignan los símbolos que serán utilizados en forma sistemática:

Notación	Terminología	Unidades de Medición
A	Sección transversal	M <sup>2</sup> . (pie 2)
Bb	Rendimiento de Perforación	m/h (pie/h.).
b	Incremento en la longitud de los cambios de acero de barrenación	m. (pie).
c	Constante de la roca	Kg. de explosivo por m <sup>3</sup> de roca.
	( Se refiere a un explosivo con 35 % de potencia )	
D	Diámetro de la broca	mm. ( plg ).
d	Diámetro efectivo del barreno	mm. ( plg ).
E	Espaciamiento entre barrenos	m. ( pies ).
f	Factor de construcción F = 1 en tronadas de bancos con frente vertical, en los que los barrenos verticales tienen su fondo constreñido o confinado por el piso del banco.	
G	Longitud total de barrenación en un cuele.	
g	Metros de barrenación por m <sup>3</sup> roca.	
H	Profundidad total de los barrenos.	
h	Longitud de la columna de la carga en un barreno.	m ( pies )
I	Cuele por tronada. ( avance efectivo que se logra en el frente después de cada voladura.	m ( pies )
K	Altura del banco	m ( pies )

Notación	Terminología	Unidades de Medición
k	Una constante	m ( pies )
$l_i$	Carga de explosivo por metro de barreno. ( Total )	kg/m (Lb. /ft )
$l_b$	Carga de explosivo concentrada en el fondo de un barreno y medida en kilogramos por metro de barreno.	kg/m ( Lb./ft )
$l_p$	Carga de explosivos distribuida en la columna del barreno y medida en kilogramos por metro de barreno.	kg/m ( Lb./ft )
M	Número de trabajadores en un frente.	
N	Número de barrenos en un cuele.	
P	Presión manométrica del aire comprimido.	( PSI )
Q	Peso de la carga de explosivos en un barreno.	
Qo	Peso de la carga concentrada en el fondo del barreno	Kg. ( Lb )
Qp	Peso de la carga distribuida en la columna del barreno.	Kg. ( Lb )
q	Carga específica de explosivos, que se mide en kilogramos por metro cúbico de roca.	kg./m <sup>3</sup> ( Lb/cu.ft. )
S	Resistencia específica de la roca a ser tronada.	
s	Potencia del explosivo ( referida a una dinamita extra de 35 % de potencia, que se considera como potencia unitaria ). s = 1 Para dinamita extra de 35 %.	



Notación	Terminología	Unidades de Medición
T	Tiempo total empleado en los trabajos para completar cada tanda o tronada.	
V	Separación frontal de los barrenos, medida con respecto al borde libre del banco, y que es la línea de menor resistencia hacia la cual normalmente tiende a ser lanzado el material.	
Vmas	Separación frontal máxima de los barrenos, para ciertas condiciones determinadas.	

Con fines ilustrativos, en las figuras I y II, se consigna parcialmente la nomenclatura empleada en excavaciones de bancos a cielo abierto con empleo de explosivos.

# Principios Básicos

Partiendo de la suposición de que las características de la roca y de los explosivos empleados son conocidos, la cantidad de la carga necesaria para tronar un barreno dependerá principalmente de la magnitud correspondiente a la separación frontal del mismo. ( Línea de menor resistencia ).

Por otra parte, dentro de ciertas limitaciones, la magnitud de la carga de explosivos es independiente del diámetro del barreno y de la distribución de la misma. En experimentos realizados en rocas homogéneas formadas principalmente por granitos de la costa occidental de Suecia, cuando  $V = H = 1$  m como se ilustra en la Fig I. Aproximadamente se requirió  $H = 0.11$  m, que cuando  $D = 22$  mm, y  $h = 0.33$  m. Resultados equivalentes se obtuvieron en otros experimentos en los que  $V = H = 0.5$  m, se puede considerar como regla empírica que si la longitud de la carga " h " no es mayor de un tercio de la magnitud de la separación frontal del barreno, dicha longitud y el grado de ataque de la misma no tiene influencia significativa en el efecto explosivo de la carga de fondo. Este hecho aquí enunciado como una regla empírica, permite simplificar apreciablemente el cálculo de la magnitud de la carga.

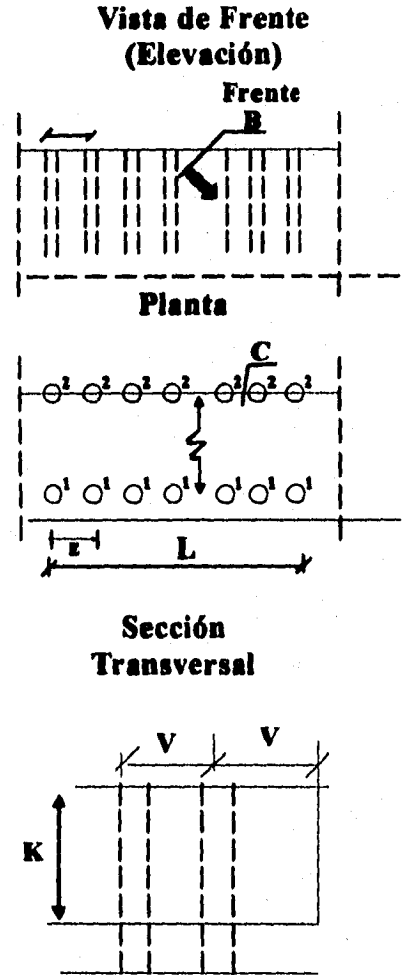
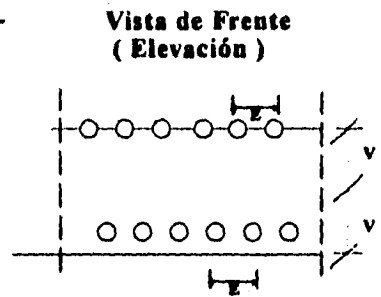


Fig I. Esquema ilustrativo mostrando la nomenclatura estándar empleada en las tronadas de bancos con barrenos verticales.

Los números indican la secuencia de los disparos ( cuando se emplean detonadores eléctricos de tiempo ).

- B = barrenos.
- E = espaciamiento entre barrenos.
- K = altura del banco.
- L = Longitud del frente del banco.
- V = Separación frontal ( línea de menor resistencia ).
- C = contorno calculado después de la tronada ( respaldo ).



El hecho de que el efecto explosivo sea independiente, dentro de amplios límites, del diámetro del barreno y de la densidad de la carga, permite simplificar notoriamente el cálculo de la misma.

El peso de la carga (Q) puede ser expresado por medio de la siguiente serie exponencial

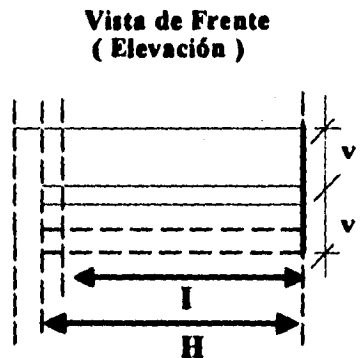
$$Q = k_0 + k_1 V + k_2 V^2 + k_3 V^3 + \dots + k_n V^n \dots (1)$$

En la que los valores de  $k_0$ ,  $k_1$  y  $k_2$ , etc., depende de la relación de  $k/v$  y de la distribución de la carga en el barreno.

El problema por tanto se reduce a determinar los valores de las constantes  $k$ . ( Posteriormente se verá que son constantes ).

Si ahora consideramos la carga de explosivos, por metro de altura o profundidad de barreno, el valor medio de la misma ( 1 m ) para el conjunto del barreno será:

$$Q/K = Q/x V; \text{ en lo que } x = K/V$$



**Fig II. Esquema ilustrativo mostrando la nomenclatura estandar empleada en las tronadas de banco con barrenos horizontales.**

- E = Espaciamiento entre barrenos
- H = Profundidad del barreno
- I = Cuele por tronadas
- V = Separación frontal

Substituyendo en la ecuación (1), el valor medio de la carga se puede expresar por la ecuación (a):

$$1m = \frac{1}{x} (k_0 = k_1 + k_2 V + k_3 V^2 + \dots + k_n V^{n-1}) \dots (2)$$

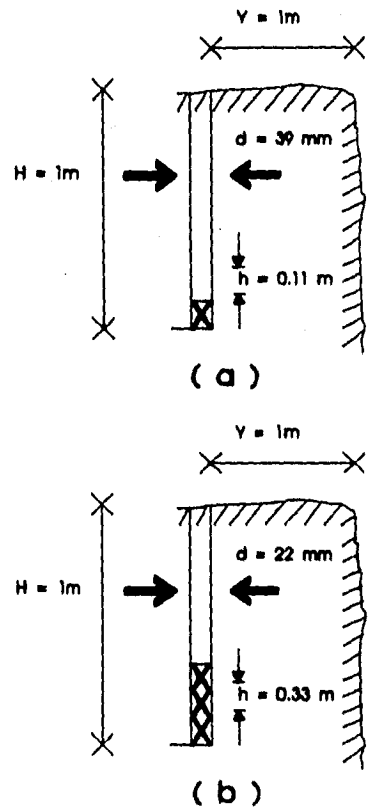
Para un cierto valor fijo de  $x$ , la carga por metro será igual a cero si la separación frontal ( $V$ ) es igual a cero, y por lo tanto  $k_0 = k_1 = 0$ . La experiencia ha demostrado que los términos de la progresión afectados de una potencia mayor de  $V^3$  pueden despreciarse; con este criterio la ecuación (1) se puede escribir:

$$Q = K_2 V^2 + k_3 V^3 \dots (3)$$

La fórmula anterior es en general aplicable. Cuando se aplica a casos diferentes en los que la relación de la altura del banco entre la separación frontal del barreno,  $K/V$ , es constante se introduce la importante simplificación de que  $k_2$  y  $k_3$  son constantes. Tal caso se presenta justamente en las tronadas en minas y túneles. En donde la ecuación (2) coincide con la clásica fórmula de Belidor antes mencionada y tan frecuente despreciada.

En los esquemas a y b de la fig III, se ilustran dos ejemplos básicos que sirven como elementos auxiliares para el cálculo de las cargas. El especial valor que en tales casos adquiere el coeficiente  $k$ , lo indicaremos por los coeficientes  $a$  y  $b$ , respectivamente en las ecuaciones posteriores.

**Fig III. Esquema mostrando dos tronadas experimentales con cargas iguales, el mismo efecto se obtuvo en ambos casos a y b**



La ecuación (3) podemos expresarla en la siguiente forma:

$$Q = K_3 V^3 \left( 1 + \frac{k_2}{k_3} \frac{1}{V} \right) \dots (4)$$

Examinando la ecuación anterior, se que para valores altos de  $V$ , la expresión entre paréntesis tiende a ser igual a la unidad, lo cual implica que la cantidad o magnitud de la carga explosiva para valores altos de  $V$  es aproximadamente igual a  $V^3$ ; esto es, la magnitud de la carga explosiva es aproximadamente igual al volumen de roca tronada. Empero, tal aproximación no resulta satisfactoria para aquellos casos en que  $V$  tiene valor muy bajo.

De acuerdo con experiencias estadísticamente conducidas a partir de tronadas experimentales, se ha determinado que  $K_2/K_3$  tiene un valor comprendido entre 0.15 y 0.30. Cuando  $V$  se mide en metros; en la Fig V, se ilustra cómo influye la contribución del valor de  $V^2$  en la magnitud de la carga  $Q$ , la cual disminuye al incrementarse la separación frontal del barrenos ( $V^2$  se expresa en porcentaje de  $K_3 V^3$  en la gráfica de la Fig V.

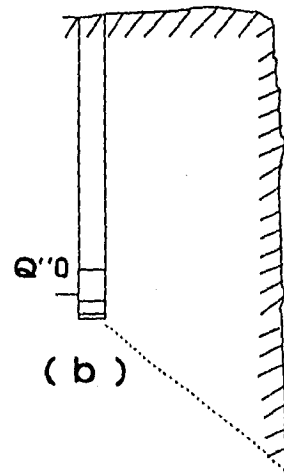
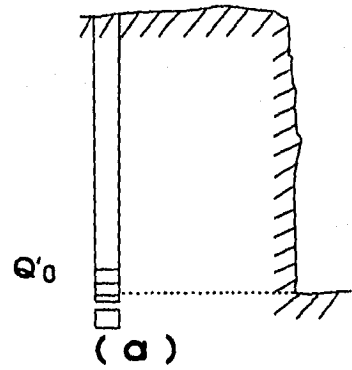


Fig IV. Voladura de banco con (a) barreno con su fondo confinada por el piso del banco (b) con su fondo sin confinamiento.

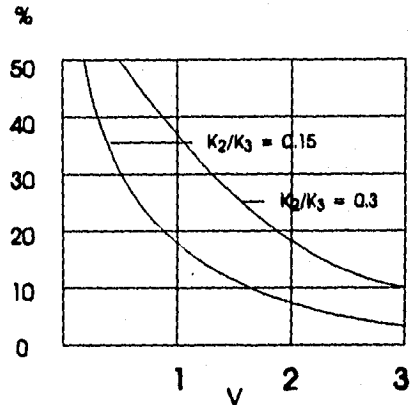
**Formula para la carga de un barreno aislado**

Por las mismas razones como se apreciará en el curso del presente trabajo, la carga de un barreno preferiblemente debe ser calculada en forma de hacer distinción entre la parte de la misma necesaria en el fondo del barreno, y la requerida en la columna del mismo para fragmentar la roca de la parte superior del banco respectivo.

**Carga de fondo.** Con la finalidad de facilitar el cálculo de la carga de fondo de un barreno, se analiza un caso especial en el cual  $K/V = 1$ , en el que el fondo del barreno se encuentra constreñido o confinado por el piso del banco como se ilustra en la Fig IV, caso a, encontrándose la carga concentrada en el fondo del propio barreno. El peso de la carga lo indicamos por  $Q_0$ ,  $K_2$  y  $K_3$  lo sustituimos por  $a_2$  a  $a_3$  respectivamente, y de la ecuación 3 establecemos:

$$Q_0 = a_2 V^2 + a_3 V^3 \dots \dots \dots (5)$$

En esta última ecuación  $a_2, a_3$  son constantes. Cuando se realiza la tronada de un barreno cuyo fondo no está confinado, esto es, que la línea de menor resistencia en el mismo se mide hacia el frente del banco, como se ilustra en el caso b de la Fig IV, normalmente se requiere un 25 % menos de explosivos que en el caso en que si hay confinamiento, de acuerdo con experiencias prácticas ampliamente corroboradas.



**Fig V. Gráfica mostrando cómo contribuye el término  $V^2$  en porcentaje del término en la magnitud de la carga  $Q$ ,**

$$(Q = k_2 V^2 + k_3 V^3)$$

**Carga de columna.** En aquellos casos en que la altura del banco  $K$  es muy grande comparada con la separación frontal del barreno  $V$ , o cuando existe una grieta, plano de debilidad o de estratificación formando un ángulo normal al eje del barreno, como se ilustra en la Fig VI, la carga resulta ser proporcional a la longitud del barreno. Si indicamos por  $2p$  la carga de explosivos correspondientes a cada metro de barreno, por el mismo procedimiento anterior obtenemos que:

$$1p = b_2 V + b_3 V^2 \dots \dots \dots (6)$$

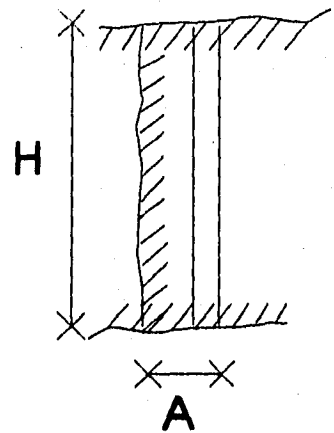
Ecuación en la que  $b_2$  y  $b_3$  son constantes puesto que la altura del banco no afecta a  $1p$ .

En el caso generalmente planteado en la práctica  $V$  y  $K$ , como se ilustra en la Fig VII, en la que el fondo del barreno se encuentra constreñido o confinado por el piso del banco, puede y debe ser tratado como una combinación de los casos elementales antes analizados.

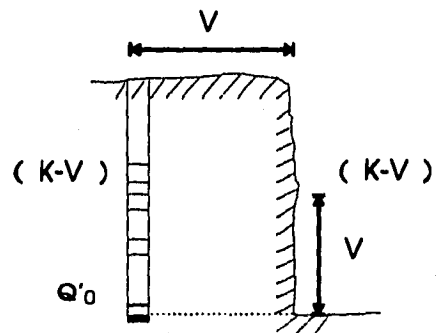
Refiriéndonos a la Fig VII, para producir una rotura desde el fondo del barreno hasta una altura sobre el mismo igual a  $V$ , se requiere una carga de fondo con magnitud  $Q_0$ , y para el resto del barreno una carga con valor igual a  $1p (K-V)$ ; consiguiente la carga total en el barreno aislado será:

$$Q_1 = Q_0 + 1p (K-V) \dots \dots \dots (7)$$

La ecuación anterior (7) se aplica bajo el supuesto de que la carga explosiva sea distribuida dentro del barreno en forma tal que  $Q_0$ , se encuentra concentrada en el fondo del mismo, y la carga restante distribuida en forma uniforme a todo lo largo del barreno, como se ilustra en la fig VII.



**Fig VI.** Esquema mostrando una voladura de losa definida por fracturación del banco.



**Fig VII.** Esquema mostrando un barreno con carga concentrada en el fondo y carga de columna uniformemente distribuida. El fondo del barreno está confinado por el piso del banco.

Por tronadas experimentales se ha determinado que las constantes  $a$  y  $b$  son fijas y ligadas por una interrelación que es independiente de la naturaleza de la roca. Se ha encontrado que  $B = 0.4a$ , lo cual cumple con suficiente y aceptable aproximación para las rocas ordinarias de durezas medias y semiduras, como el granito. Lo anterior implica que:

$$b_2 = 0.4 a_2 \text{ y } b_3 = 0.4 a_3$$

Por otra parte, se ha determinado que las variaciones de  $a_2$  son considerablemente menores que las correspondientes a  $a_3$  y en la mayoría de los casos la constante  $a_2$  se convierte en un simple factor de corrección. El hecho de que la constante  $a_2$  varíe en algunos casos con las propiedades de las rocas, puede ser ignorado, despreciándose, pero introduciéndose un valor promedio. De acuerdo con tronadas experimentales, se puede asignar un valor promedio,  $a_2$ , por conveniencia metodológica, la sustituiremos por el símbolo  $S$  representativo de la resistencia específica de la roca a ser tronada.

Las ecuaciones 5 a 7, podemos expresarlas en la forma siguiente, que resulta aplicable para el caso de barrenos aislados:

$$Q_1 = 0.4 (K/V + 1.5) (0.07 V^2 + SV^3) \dots (8)$$

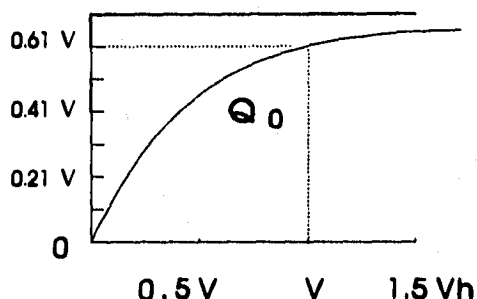
Comparando la ecuación anterior (8) con la ecuación (3) se ve que:

$$k_2 = 0.4 (K/V + 1.5) 0.07 \text{ y que } k_3 = 0.4 (K/V + 1.5) S$$



## Distribución de la carga

Larga de fondo como quedó antes señalado, se supone concentrada en el fondo del barreno, puesto que la misma carga, si se distribuye en la columna tendrá un menor efecto explosivo que en el fondo. En la fig VIII, se ilustra una curva representativa de  $Q_0$ , que se calculó en forma teórica como una función de  $h$ , en la que "1" es la carga por metro de barreno y  $h = 0.3V$ ,  $Q_0$  resulta más o menos igual a  $1 \cdot h$ , lo cual significa que la carga distribuida tiene el mismo efecto o es prácticamente equivalente a la carga concentrada. Si se incrementa la longitud de la columna cargada, el efecto de fondo de la misma se aproxima en forma asintótica a un valor máximo igual a  $Q_0 = 0.70 \text{ l.V.}$



**Fig VIII. Efecto explosivo en el fondo de una carga que ocupa una columna  $H$  en el barreno y tiene una densidad "1",  $Q_0$  es una carga concentrada en el fondo del barreno y que tiene el mismo efecto explosivo.**

Si el barreno es perforado hasta un nivel inferior al del piso del banco (subbarrenación), o en el caso de un túnel, se perfora a una profundidad mayor que el "cuele" que se logrará en la tronada, se obtendrá un efecto explosivo mucho mayor. Una carga colocada a una profundidad no mayor que  $0.3V$  del piso del banco será prácticamente 100 % eficiente. Por otra parte, una carga colocada a una profundidad comprendida entre  $0.3V$  y  $0.4V$ , sólo tendrá una eficiencia del orden de 50 a 60 %.

Como guía general, podemos establecer la regla empírica de que los barrenos deberán ser perforados hasta una profundidad igual a  $0.3V$  por debajo del piso del banco, como se ilustra en la fig IX, en vez del 10 % de la profundidad total del barreno, que es la práctica común.

Cuando un barreno es perforado hasta una profundidad de  $0.3V$  por debajo del piso del banco, cargado en la forma acostumbrada, como se ilustra en la fig IX, la longitud del tramo de barreno que alojará a la carga de fondo será igual a  $0.3V + V$ . Si la carga de fondo, expresada por metro de profundidad del barreno se indica por el símbolo  $1b$  corresponderá a una carga concentrada en el fondo de  $Q_0 = (0.3 + 0.6) 1b = 0.9 1b V$ . Substituyendo la expresión anterior en la ecuación 5, con  $a_2 = 0.07$  y  $a_3 = S$ , la carga necesaria por metro para un barreno vertical con su fondo confinado por el piso del banco, se podrá indicar por la siguiente ecuación:

$$1b = 1.1 (0.07 V + SV^2) \dots \dots \dots (9)$$

La carga de fondos será:

$$1b = 1.3 V 1b = (1.4 (0.07 V^2 + SV^3)) \dots \dots (10)$$

La carga de la columna será:

$$Q_p = Q_t - 0b; \\ i_p = 0.4 (K/V - 2) (0.07 V^2 + SV^3) \dots \dots \dots (11)$$

Un barreno no puede ser cargado con explosivos hasta su brocal, ya que de hacerlo así, con toda seguridad se tendría lanzamientos inútiles, antieconómicos y peligrosos.

Por lo general, la parte superior de un barreno deberá dejarse sin carga (retacándola) en una longitud de  $0.5$  a  $1. V$ .

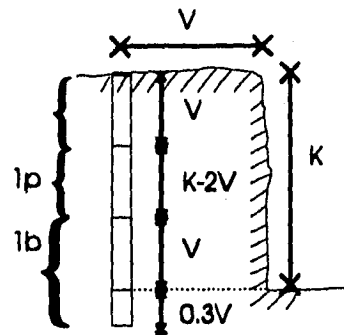


Fig IX. Esquema mostrando la distribución de la carga de fondo y la carga de columna de un barreno vertical

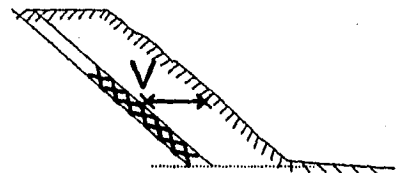


Fig X. Esquema mostrando un barreno inclinado que forma un ángulo favorable con la superficie del respaldo del banco.

Con una longitud sin carga igual a  $V$  por la parte superior del barreno, la longitud del barreno que alojará a la carga de columna será a  $(K - 2V)$  y por consiguiente la carga por metro de columna será:

$$q_p = Q_p : (K - 2V) = 0.4 (0.07V + SV^2) \dots \dots (12)$$

Comparando las ecuaciones 9 y 12 se ve que la carga por metro correspondiente al fondo de barreno deberá ser aproximadamente 2.7 veces mayor que la carga de columna, si se desea obtener una rotura mayor que la carga de columna, si se desea obtener una rotura limpia a ángulo recto con el eje longitudinal del barreno. En aquellos casos en que el barreno tiene su fondo sin confinamiento (línea de menor resistencia hacia el frente del banco), como se ilustra en la fig IV, caso b, la relación anterior se reduce al orden de 2 (dos), aproximadamente; cuando se truenan barrenos inclinados como el mostrado en la fig X, la relación puede reducirse apreciablemente, aun en el caso de que el fondo del barreno sea confinado por el piso del banco.

En la práctica, a fin de reducir el volumen de barrenación, es muy usual emplear en el fondo de los barrenos explosivos de mayor potencia o densidad que en la columna.

A fin de utilizar óptimamente el volumen del barreno, sin sobrecargar la columna del mismo, deberá emplearse en términos generales un explosivo más potente en el fondo del mismo. Introduciendo un factor (s) representativo de la potencia ó densidad de los explosivos empleados, las ecuaciones 9 y 12 se plantean correctamente como sigue:

$$1b = 1.1/sb (0.07 V + SV^2) \dots\dots\dots (13)$$

$$ap = 0.4/sp (0.07 V + SV^2) \dots\dots\dots (14)$$

En las dos ecuaciones anteriores ( 13 y 14 ), se considera s-1, cuando se utilizan dinamitas con una potencia de 35 %; es decir, con un contenido del 35% de nitroglicerina.

## **Resistencia de la roca a ser tronada**

La resistencia que la roca presente a ser fragmentada por una tronada, deberá determinarse experimentalmente por el procedimiento de aproximaciones sucesivas realizando pequeñas tronadas. Para el efecto es de gran importancia que las tronadas experimentales sean realizadas en partes del frente que sean verdaderamente representativas del banco que se realizarán los trabajos en gran escala, debiéndose evitar zonas en las que se aprecien fracturas, planos de debilidad o estratificación, juntas de relleno, etc.

Las tronadas experimentales podrán llevarse a cabo en pequeña o gran escala. El procedimiento más simple consiste en disparar un barreno sencillo con profundidad de 0.5m y separación frontal de 0.5 m. La prueba se inicia partiendo de un valor supuesto para S., el cual podrá resultar muy alto o muy bajo, por lo que será el grado de lanzamiento del material el que orientará para juzgar al respecto.

En el caso de que el barreno fallara no produciéndose la rotura, se deberá repetir el ensayo aumentando la carga de un 30 a 50 %, repitiéndose el aumento hasta lograr la rotura del barreno. Si el centro de gravedad de la masa de roca tronada es lanzada de 0 a 1 metro hacia adelante, la carga será justamente la correcta. Lanzamientos mayores de 2, 4, 6 y 8 m. Indicarán excesos de carga en proporciones aproximadamente de 10, 20, 30 y 40 por ciento respectivamente.

En la práctica se ha determinado que para trabajos de tronadas formales, el valor de S deberá incrementarse en un 20 % aproximadamente, sobre el valor determinado experimentalmente. En tronadas realizadas en diferentes tipos de roca, en Suecia se ha encontrado que en la mayoría de los casos, la resistencia específica de la roca a ser tronada, tiene un valor aproximado de 0.4 con variaciones del orden de 15 a 20 por ciento en más o menos.

Por lo dicho en el párrafo anterior, podemos estimar que para rocas comunes en México, S podrá variar entre 0.3 y 0.6 aproximadamente, según se trate de rocas muy suaves o rocas duras.

# Formula para determinar la carga de una tanda de barrenos múltiples

En una tanda formada por un número n de barrenos, intervienen dos variables que deberán ser consideradas, a saber: el espaciamiento (E) entre barrenos consecutivos y el número (n) de barrenos. Si todos los barrenos son disparados instantáneamente, la magnitud de la carga por barreno tenderá a decrecer en tanto mayor sea el número de barrenos. En las rocas comunes normales en su grado de fisuramiento y agrietamiento, las cargas de los barrenos separados por un espaciamiento mayor que el doble del valor de la separación frontal V, no producen un efecto coordinado. En tandas de cuatro o más barrenos en los que E = V, la carga en cada uno de ellos puede ser reducida aproximadamente hasta el 80 %, de la magnitud correspondiente a un barreno aislado, la cual quedó determinada en la ecuación 8. Introduciendo el factor derivado de la potencia del explosivo (s) y el factor de constricción o confinamiento (f), se obtiene la siguiente fórmula para calcular la carga:

$$Q = f \frac{I E}{S V} 0.901 \dots (15)$$

En la Qt es el peso total de la carga correspondiente a un barreno que se encontrará aislado. Basado en el diámetro real del barreno y en cartuchos con cortes, fuertemente atacados en el barreno.

Estas cifras pueden variar debido a diferencias en el tamaño de los cartuchos o a la forma irregular de los barrenos.

Diámetro del barreno (pulgadas)	Numero de cartuchos 1 1/4" X 8" por caja de 50 Libras.												
	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
1	0.89	0.79	0.71	0.64	0.59	0.55	0.50	0.47	0.44	0.41	0.40	0.37	0.35
1 1/4	1.40	1.24	1.12	1.01	0.93	0.85	0.80	0.75	0.70	0.66	0.62	0.59	0.56
1 1/2	2.01	1.79	1.61	1.46	1.34	1.24	1.15	1.07	1.01	0.95	0.89	0.85	0.80
1 3/4	2.74	2.43	2.19	1.98	1.82	1.68	1.56	1.46	1.37	1.29	1.22	1.12	1.10
2	3.39	3.19	2.86	2.59	2.39	2.19	2.04	1.91	1.79	1.69	1.59	1.50	1.43
2 1/2	5.39	4.98	4.47	4.05	3.73	3.43	3.16	2.98	2.79	2.62	2.47	2.35	2.24
3	8.05	7.17	6.44	5.86	5.36	4.95	4.59	4.29	4.02	3.78	3.58	3.38	3.22
3 1/2	10.91	9.69	8.72	7.93	7.27	6.71	6.21	5.81	5.45	5.13	4.84	4.59	4.35
4	14.26	12.67	11.40	10.36	9.49	8.76	8.14	7.60	7.12	6.71	6.33	7.49	5.69
4 1/2	18.00	15.99	14.41	13.08	12.01	11.07	10.28	9.60	9.00	8.46	7.99	7.57	7.20
5	22.35	19.89	17.88	16.23	14.90	13.77	12.75	11.92	11.18	10.53	9.95	9.45	8.94
5 1/2	26.92	23.56	21.55	19.55	17.91	16.54	15.42	14.48	13.48	12.67	11.99	11.37	10.79
6	32.12	28.32	25.70	23.26	21.43	19.79	18.34	17.14	16.02	15.12	14.27	13.56	12.85
7	43.81	39.02	35.10	31.87	29.23	26.97	25.03	23.39	21.90	20.64	19.49	18.45	17.55
8	56.92	50.91	45.82	41.65	39.16	35.10	32.77	30.52	28.61	28.54	25.45	24.32	22.92

Tabla 7. Peso de dinamita en kilogramos, por metro de longitud de barreno, dinamita de diversas densidades.

## Constricciones o confinamiento del barreno

Un aspecto de gran interés en las tronadas de bancos y rebajes es la magnitud del factor de constricción o confinamiento para diferentes ángulos entre el barreno y la superficie del frente del banco. (Ver fig X ), así como la diferencia entre la parte superior, los lados y el fondo a base, cuando se trate de un rebase.

Como se puede apreciar de la ecuación (15), la magnitud, de la carga es directamente proporcional al factor de constricción (f). Entronadas de bancos con barrenos verticales con su fondo confinado por el piso del banco, como se ilustra en la fig IX, la constante deberá ser seleccionada de tal forma que se obtenga que  $f = 1$ . En la siguiente tabla se consignan los valores del factor de constricción o confinamiento para las cargas de fondo con diversas inclinaciones (el barreno) con respecto al plano de fondo.

**Tabla 8. Valores del factor de constricción o confinamiento para diferentes inclinaciones del Barreno con respecto al plano Base.**

Inclinaciones del Barreno	$\alpha$ a 1	3 a 1	2 a 1	Sin confinamiento en su base (Ver Fig IV)
Banco: Lados del rebajo	1	0.9	0.85	0.75
Rebajo de cabeza	0.8	0.7	0.9	0.6

Para cargas de columna,  $f = 1$  cuando se trate de bancos y secciones laterales, y  $f = 0.80$  tratándose de rebajes de cabeza independientemente de las condiciones de su fondo. Los valores consignados para rebajes de cabeza están referidos a un espaciamiento frontal del barreno ( línea de menor resistencia ) con valor de 0.50 metros.

El factor de constricción o confinamiento decrece con el incremento de la separación frontal V, puesto que la contribución del propio peso de la roca incrementa relativamente la rotura superficial. Más importante aún que esta reducción, es el hecho de que cuando se hacen barrenos deberá seleccionarse sobre la base de la carga de la columna necesaria, en lugar de la carga de fondo, pudiéndose así incrementar la separación frontal V hasta en un 50 %; empero en este caso, como es el peso de la columna tronada el que produce la rotura en el fondo de los barrenos, el nuevo contorno del respaldo del rebaje después de la tronada el que produce la rotura en el fondo de los barrenos, el nuevo contorno del respaldo del rebaje después de la tronada dependerá de las fracturas, juntas y fallas locales.

La observación más importante derivada de los valores de  $f$  consignados en la Tabla es que en barrenos inclinados es posible aumentar el valor de la separación frontal, reduciendo así el número de metros lineales de barrenación por metro cúbico de roca efectivamente tronada. Con inclinaciones de 2 a 2 y 3 a 1 se obtienen reducciones del orden del 15 % a 10 %, respectivamente. En tronadas realizadas con el empleo de detonadores de tiempo, generalmente se recomienda una inclinación de 3 a 1 para los barrenos, ya que con ello existirá un riesgo menor de romper el respaldo del banco, que barrenando verticalmente.

Cuando los barrenos exteriores de una tanda de barrenos múltiples se encuentran constreñidos o confinados lateralmente, requerirán una mayor cantidad de explosivos que los barrenos centrales. En disparos instantáneos, tal incremento llega a ser hasta del orden del 50 %. Para compensar este efecto los barrenos deberán ser localizados con un espaciamiento menor, preferiblemente reduciendo la separación frontal de los barrenos extremos.

## **Grado de atacado y diámetro de los barrenos**

Como quedó anteriormente consignado, la densidad de la carga ( grado de atacado ), en el fondo del barreno debe ser del orden de 2.3 a 2.7 veces mayor que la de la carga de columna, siendo por esta razón que no es posible utilizar óptimamente el volumen correspondiente al espacio del barreno en que queda alojada la carga de columna.

**A fin de evitar sobrecarga en la columna del barreno, en la misma deberá colocarse un explosivo de menor potencia.**

**Quando se emplea un explosivo de la misma potencia a lo largo de todo el barreno, su respectivo volumen es utilizado completamente solo cuando  $H = 2V$ . Espero, en muchos casos con la finalidad de obtener una adecuada fragmentación de la roca, es conveniente disponer una cierta cantidad de carga en exceso de la necesaria para el simple trabajo de romper y desplazar la roca limitada por el barreno y el frente del banco. En la tabla siguiente se indica el porcentaje del exceso de carga en la columna, cuando el barreno se encuentra totalmente cargado hasta un nivel V metros por debajo de su respectivo brocal:**

<b>K/V . . . . .</b>	<b>2, 3, 4, 5, 6</b>
<b>Exceso de carga en % . . . . .</b>	<b>0, 35, 55, 70, 80</b>

**Para una altura dada del banco el exceso de carga puede ser reducido incrementando la separación frontal del barreno, de tal manera que K/V resulte más pequeño. Al incrementar la separación frontal de un barreno se requiere un aumento en la carga de fondo del mismo, lo cual se obtiene ya sea colocando un explosivo más denso o potente, o bien, aumentando el diámetro del barreno en su fondo, práctica esta última muy empleada en los trabajos de minería (barrenos secanteados).**

**En la práctica de las excavaciones de roca, la carga de fondo puede ser incrementada por cualquiera de los procedimientos siguientes:**

- 1. Emplear un explosivo más potente.**
- 2. Emplear cartuchos de mayor densidad.**
- 3. Aumentando el grado de atacado del explosivo, que es la práctica más comúnmente seguida.**

**La conclusión más importante de esto es que tanto mayor sea la reducción de la relación K/V, mayor será el peso de la carga de explosivo por metro cúbico de roca. El grado de atacado p de los explosivos se indicará en  $\text{Kg/dm}^3$ .**



## **Espaciamiento entre barrenos**

La separación frontal de los barrenos puede ser cambiada sin variar el diámetro de los mismos, pero espaciándolos en diferente forma. Si fuera conveniente reducir la relación  $K/V$  incrementando la separación frontal, como quedo señalado en párrafos anteriores, esto puede ser también reduciendo el espaciamiento  $E$  de los barrenos, puesto que se requiere del mismo volumen de barrenación, y se tiene la alternativa, frecuentemente preferible, de trabajar con barrenos de mayor diámetro y más espaciados

entre sí. Desde el punto de vista de la fragmentación del material tronado, existen limitaciones para el espaciamiento entre los barrenos. Generalmente el espaciamiento resulta más favorable cuando  $E = 1.3V$ . Para valores apreciablemente mayores, el rompimiento tiende a no producirse, mientras que para valores muy bajos, aunque se obtiene un respaldo muy afinado en el banco después de la tronada, la fragmentación de la roca resulta muy poco satisfactoria aumentando en forma muy notable el lanzamiento de material.

## Carga específica, fragmentación y lanzamiento.

Por cada específica se entiende el peso de explosivos medido en kilogramos, necesario y suficiente para tronar adecuadamente un metro cúbico de roca.

En la tabla siguiente, se consigna la relación existente entre la carga específica y el grado de fragmentación de la roca, aunque eventualmente se pueden obtener rocas individuales de mucho mayor tamaño, debido a fallas, fracturas, etc., desfavorablemente localizadas en la zona delimitada de la tronada:

**Tabla 9. Relación entre la carga específica y el grado de fragmentación de la roca.**

<b>Carga específica</b> En Kg/m <sup>3</sup> de roca	0.20	0.24	0.23	0.33	0.38
Tamaño máximo de las piedras	1	0.5	0.25	0.13	0.06

\*Los valores consignados en la tabla corresponden a una dinamita con potencia de 35% ( 35 % de nitroglicerina ), t a ricas con una resistencia específica a ser tronadas, del orden de  $S = 0.4$ , para voladuras realizadas con el empleo de detonadores eléctricos con retardos de milisegundos.

Si la carga colocada se encuentra uniformemente distribuida dentro del barreno, encontrándose la parte superior de éste descargada, como suele hacerse en la práctica, el lanzamiento de material dependerá principalmente del exceso de carga y del método de disparo. El exceso de carga de explosivos se suele referir como porcentaje de la carga "JUSTAMENTE SUFICIENTE" ( $S_0$ ).

Los valores consignados a continuación correlacionan el exceso de carga con la distancia de lanzamiento, corresponden aproximadamente a tronadas efectuadas con disparos instantáneos en una sola fila de barrenos colocada paralelamente al frente del barco, por lo que su factura es libre:

Exceso de carga en %	0	25	50	75	100
Distancia principal de roca ( en metros )	0	5	10	15	20

Por supuesto que piedras individuales podrán ser lanzadas a distancia de 5 a 10 veces mayores que el resto de la masa, cuando se presenten condiciones desfavorables. Con el empleo de detonadores con retardos de milisegundos racionalmente organizados con una secuencia que corresponde a las características de la roca, el lanzamiento del material puede ser reducido en forma muy notable, cargando la primera fila de barrenos con menor cantidad de explosivos y colocando tales explosivos en la fila de barrenos más atrasada, o sea, la correspondiente al respaldo de la tronada, donde el lanzamiento es obstruccionado por la masa de roca del frente, la cual se desplaza primero.

## **Separación frontal máxima de los barrenos.**

La separación frontal máxima de los barrenos depende de la magnitud de la carga de fondo de los mismos, potencia del explosivo empleado, resistencia específica de la roca a ser tronada, del grado de constricción o confinamiento del fondo de los barrenos y del interespaciamento de los mismos.

La carga de fondo queda determinada por el diámetro del barreno en el mismo (db) y por el grado de atacado (p). Si la carga por metro en un barreno de 32 mm, de diámetro se indica por el símbolo  $l_{32}$  y el diámetro en el fondo por db, la carga por metro de barreno será:

$$l = l_{32} (db/32)^2 = p ( db/32 )^2 \dots \dots \dots (16)$$

La carga por metro, para un diámetro fijo varía dentro de amplios límites con la clase de explosivos empleado y la temperatura durante la carga. Los valores consignados a continuación corresponden a una dinamita extra de 35 % de potencia ( 35 % de contenido de nitroglicerina ):

Atacado normal con atacador de madera  $l_{32} = 1 \text{ kg/ metro}$

Cargado con máquina neumática  $l_{32} = 1.3 \text{ kg/ metro}$

Cartuchos de 25mm. (1") amontonados libremente en un barreno de 32 mm.  $l_{32} = 0.7 \text{ kg/ metro}$

Introduciendo en las ecuaciones 10 y 15, el factor de construcción (f) y la potencia del explosivo para tronar un banco con más de cuatro barrenos será:

$$Q_b = 1.1 f \frac{E}{V} (0.7V^2 + SV^3) \dots \dots \dots (17)$$

Suponiendo que el barreno se encuentra perforado hasta una profundidad 0.3V por debajo del nivel del piso del banco, el espacio comprendido entre el fondo y un nivel V metros por encima del piso del banco contendrá.

$$Q_b = 1.3 V_p (db/32)^2 \dots \dots \dots (18)$$

Las ecuaciones 17 y 18 conjuntamente nos dan:

$$+ \frac{0.07}{S} V = \frac{1.2.SB.P(\frac{db}{32})^2}{f_s(\frac{E}{V})} \dots \dots \dots (19)$$

Ecuación en función de la cual se puede obtener la separación frontal de los barrenos, planteándola en la forma siguiente:

$$= 0.9 \frac{Sb}{f_s} P(\frac{db}{32})^2 - 0.07V_s \dots \dots \dots (20)$$

Incorporando en forma similar el factor de constricción  $f$  y la potencia del explosivo  $p$  en la ecuación 11, para un disparo instantáneo de una fila de barrenos, la magnitud de la carta de la columna correspondiente a cada barreno, colocada a un nivel  $V$  metros por encima del piso del banco será:

$$Q_p = 0.32 \frac{f}{S_p} \frac{E}{V} \left( \frac{K}{V} - 2 \right) (0.07V + SV^3) \dots \dots \dots (21)$$

Indicando la longitud de la carga de columnas por  $h_p$ , tenemos:

$$Q_p = h_p \left( \frac{dp}{32} \right)^2 \dots \dots \dots (22)$$

Por consiguiente, cuando la separación frontal de los barrenos es conocida, como suele serlo en la práctica, el grado de ataque necesario en la columna puede ser calculado a partir de las ecuaciones 21 y 22 arriba consignadas.

En el cálculo de la separación frontal de los barrenos, empleando la ecuación 20 deberá introducirse un factor adecuado de seguridad, de acuerdo con las variantes características de cada trabajo, especialmente en barrenos muy profundos en los que se tenga la sospecha de posible peligro de falla en el disparo. En casos semejantes la seguridad deberá incrementarse reduciendo la separación frontal de los barrenos.

# Sumario de las formulas para el cálculo de cargas explosivas

A continuación se presenta un sumario de las principales fórmulas empleadas en el cálculo de las cargas, señalando los respectivos NOMOGRAMAS que deberán ser utilizados para hacer el cálculo más expedito. ( Todas las fórmulas y nomogramas están referidos a un explosivo equivalente a una dinamita extra con 35 % de nitroglicerina, cuyo factor de potencia  $s = 1.0x$  ).

Barreno vertical sencillo	Nomogramas
Carga de columna en kg/m = $1p = 0.4(0.07V + sv_2)$	1
Carga de fondo en kg. $Q_0 = 2.51pV$	1
Carga total en kgs.: $Q_1 = (K + 1.5V) 1p$	2
 Tandas de barrenos múltiples	
Carga total por barreno en kg.	
$Q = \frac{f}{s} \cdot \frac{E}{V} \cdot 0.80Q_1$	4
Carga específica expresada en kg. de explosivos por m <sup>3</sup> . de roca $q = Q/KEV$	3
Separación frontal máxima para un diámetro d en el fondo del barreno y $E/V = 1.3$ que es el valor óptimo:	
$= 0.9 \frac{Sb}{f} \frac{p}{s} \left( \frac{db}{32} \right)^2 \cdot 0.7V$	1a y 1b
Longitud de la columna ocupada por la carga de fondo $H_0 = 1.3V$	

## **Explicaciones sobre el uso de los nomogramas para el cálculo de cargas explosivas**

Con el empleo de los nomogramas, el cálculo de los diversos datos desconocidos en una tronada se hace en forma muy rápida, lo que permite estudiar alternativas múltiples en forma fácil y expedita, como en el caso de estudios para programas y aún de precios unitarios. Desde luego deberá tenerse presente que, todos los nomogramas fueron construidos para un explosivo equivalente a una dinamita con 35 % de potencia y los resultados que se obtengan podrán diferir en la práctica con ligeros errores, siempre y cuando los diversos factores sean convenientemente conocidos para operar con los nomogramas. El factor que por lo general resulta desconocido es  $S =$  resistencia específica de la roca a ser volada, el que tiene valores promedio del orden de 0.4 a 0.5 para rocas compactas y homogéneas medianamente duras como el granito. Para las rocas predominantes en México, podemos considerar en general un promedio de  $S = 0.5$ , para materiales tales como: calizas, granitos, andesitas, riolitas, basaltos, lutitas, etc.

Los nomogramas han sido construidos para calcular la MAXIMA SEPARACION DE LOS BARRENOS (Nomogramas 1a y 1b), la cantidad de explosivos correspondiente a LA CARGA DE FONDO y a la CARGA DE COLUMNA (nomogramas 1a y 1b), la CARGA TOTAL POR BARRENO (Nomograma 2), la CARGA ESPECIFICA (Nomograma 3), la longitud de la columna de barreno ocupada por la carga (Nomograma 4) y las cargas para tronadas experimentales conducidas por aproximaciones sucesivas (Nomograma 5). Los datos obtenidos empleados tales nomogramas son suficientemente aproximados, con pequeño margen de error, siempre y cuando se operen entrando a los mismos con valores reales de los bancos en que se efectuarán las tronadas.

En muchos de los nomogramas algunas de las líneas están dibujadas punteadas, en tanto que la mayoría son líneas continuas. Las primeras, esto es, las líneas punteadas, son líneas auxiliares que aparecen en los grupos ó familias de líneas, en las cuales representan valores promedio de los coeficientes representados por el grupo completo. En los nomogramas que muestran líneas principales (líneas punteadas), el nomograma se usa acercándose a la línea principal desde la izquierda, y al intersectarlas, se gira 90° hacia arriba o hacia abajo hasta intersectar la línea representativa del valor correspondiente al problema planteado. Si la línea principal es la requerida, esto es,

corresponde al valor del problema planteado, se continúa horizontalmente hacia la derecha hasta intersectar la línea principal del siguiente grupo, procedimiento sucesivamente en la misma forma. Para usar el nomograma en sentido contrario, se aproxima el trazo auxiliar hasta intersectar la línea representativa del valor del problema planteado, girando entonces  $90^\circ$  en el sentido correspondiente para avanzar hasta intersectar la línea principal del grupo, continuando de derecha a izquierda hasta la siguiente familia de líneas, procediendo en la misma forma.

En párrafos posteriores se plantean ejemplos del manejo de los nomogramas, describiendo la secuela correspondiente. Todos los valores consignados en los nomogramas a unidades del sistema métrico decimal.

## **Separación frontal máxima de los barrenos**

La separación frontal máxima de los barrenos que puede ser adoptada en la práctica con resultados satisfactorios, se puede determinar optativamente en los nomogramas 1a y 1b, para aquellos casos en que la altura del banco sea menor que el doble del valor correspondiente a la separación frontal  $K \ 2V$ ; para el efecto se partirá del diámetro del barreno, tomando en consideración el grado de atacado y peso de la carga explosiva, el espaciamiento entre barrenos, el factor de constricción o confinamiento y la resistencia específica de la roca a ser tronada. Especial atención debe prestarse al hecho de que los resultados obtenidos en los nomogramas dependen fundamentalmente de la densidad con que se entra al cálculo; la experiencia ha demostrado que frecuentemente no se presta la atención debido al grado de atacado de la carga, del cual depende la densidad de la misma.

**Ejemplo 1a. (Se emplea el nomograma 1a)**

Argumentos de cálculo. Altura del banco  $K = 6.0$  mts.; diámetro del barreno en su fondo  $d = 32$  mm.; carga realizada por medio de máquina cargadora, con la que se obtiene un grado de atacado  $p = 1.25$ ; se operará con un explosivo equivalente a una dinamita al 35 % de potencia, por lo que la potencia  $s = 1.0$ ; espaciamiento entre barrenos  $E = 1.3V$ ; inclinación 2 a 1; resistencia específica de la roca,  $S = 0.4$ .

Cálculo empleando el nomograma 1b de la fig XI partimos del argumento  $db = 32$ mm, en la escala horizontal de la extrema izquierda inferior, llevando



un trazo auxiliar hasta "a" sobre la línea  $p = 1.25$ , en cuya intersección se gira  $90^\circ$  continuando horizontalmente hasta "b" sobre la línea principal s-1, del grupo correspondiente, después de cuya intersección se continúa horizontalmente (por tratarse de línea principal) hacia la derecha hasta "c" en la intersección con la línea principal  $E = 1.25 V$ ; en donde se gira  $90^\circ$  continuando verticalmente hacia la derecha hasta "e", en la línea principal representativa del factor de constricción ó confinamiento  $f$ , que corresponde a una inclinación del barreno con valor de 2:1; se continuará horizontalmente hasta "g" en la línea  $S = 0.4$ , girando finalmente  $90^\circ$  hacia abajo llevando el trazo vertical hasta la escala inferior horizontal de la extrema derecha, en la que se obtiene LA MAXIMA SEPARACION FRONTAL = 1.65 m.

En el caso de que los barrenos fueran verticales, es decir, con una pendiente de infinito a 1, se obtendría  $V = 1.55$  m.; si simultáneamente  $E$  fuera igual a 1.25, entonces se obtendría que  $V = 1.6$  m.

#### **Ejemplo 1b ( Se emplea el nomograma 1b)**

Argumentos de cálculo. Altura del banco  $K = 2.0$  m; se carga el explosivo con atacador manual, por lo que  $p = 1.0$ ; los barrenos tienen una inclinación de 3:1; los datos restantes son los mismos del ejemplo 1a.

Cálculo. Entremos al nomograma 1b con el argumento  $K = 2.0$  m en escala horizontal inferior, llevando un trazo auxiliar vertical hasta un punto entre las líneas  $1b = 0.9$  y  $1b = 1.35$  puesto que la carga de fondo tiene una densidad de  $1b = 1.0$  kg/m, para el diámetro de 32 mm. A partir del punto anterior se gira  $90^\circ$  hacia la izquierda llevando el trazo horizontal hasta la escala vertical de la izquierda, en la cual se obtiene que  $V = 1.35$  m.

En este caso se empleó el nomograma 1b, por tratarse de un banco bajo cuya altura es menor que  $2V$ .

# **Determinación de la carga de fondo y de la carga de columna**

## **(Nomogramas 1a, 1b y 4)**

Quando los nomogramas 1a y 1b se leen en sentido contrario, se obtienen cantidades de explosivos correspondientes a la carga de fondo y a la carga de columna, para un valor dado de  $V$  (separación frontal de barrenos). Si la altura de los barrenos, se deberá emplear el nomograma 1a, y para valores menores deberá emplearse el nomograma 1b. (En aquellos casos en que la altura del banco sea apreciablemente que el doble de la separación frontal, no deberán aplicarse los mismos resultados obtenidos del nomograma 1a, para la carga de fondo. En un caso tal, deberá reducirse el valor de  $V$ ).

Se supone que como indica la teoría, los barrenos son perforados hasta una profundidad de  $0.3V$  por debajo del piso del banco, y que la carga del fondo es colocada en una columna comprendida entre el fondo del barreno y una altura  $V$  medida sobre el piso del banco. La longitud de la carga de la columna se determina tomando en consideración que la parte superior del barreno deberá quedar sin carga en una longitud igual al valor de la separación frontal del barreno ( $V$ ), y que la carga de fondo ocupa una longitud igual a  $V$  sobre el piso del banco. Por lo anterior se obtiene que:

$$\text{Carga de columna} = \text{altura del banco} - 2V$$

Ejemplo II. Determinar la carga de fondo partiendo de los siguientes datos ó argumentos de cálculo: de acuerdo con lo obtenido en el ejemplo 1a, la separación frontal se toma igual a  $V = 1.65$ ; la altura del banco  $K = 6.0$  m, los barrenos son perforados hasta una profundidad igual a  $0.3V$  por debajo del piso. La longitud ocupada por la carga de fondo será por consiguiente igual a:  $V = 0.3V = 1.3 \times 1.65 \text{ m} = 2.2 \text{ m}$ .

Cálculo. Partiendo con el argumento  $V = 1.65$  m, en la escala horizontal inferior de la extrema derecha del nomograma 1a, se procede leyendo en sentido inverso al eje del ejemplo 1a, pasando por los puntos, g, f, e, d, c, b y a. A partir de a, se continúa horizontalmente hasta la escala vertical de la extrema derecha, en la que se lee que  $1b = 1.25$  kg/m.

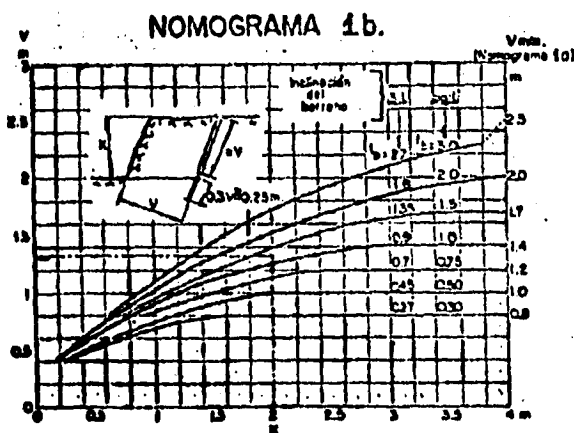
Consecuentemente el peso de la carga de fondo será:  
 $1b = 2.2 \times 1.25 = 2.5$  Kg, de dinamita al 35 %

Ejemplo III. Determinar la carga de columna partiendo de los mismos datos o argumentos del ejemplo II, salvo que en este caso se considerará un explosivo cuyo factor de potencia  $s = 0.8$ . La altura del banco  $K = 6.0$  m, y la longitud de la carga de columna será por tanto  $K - 2V = 6 - 3.3 = 2.7$  m

$$3.3 = 2.7 \text{ m.}$$

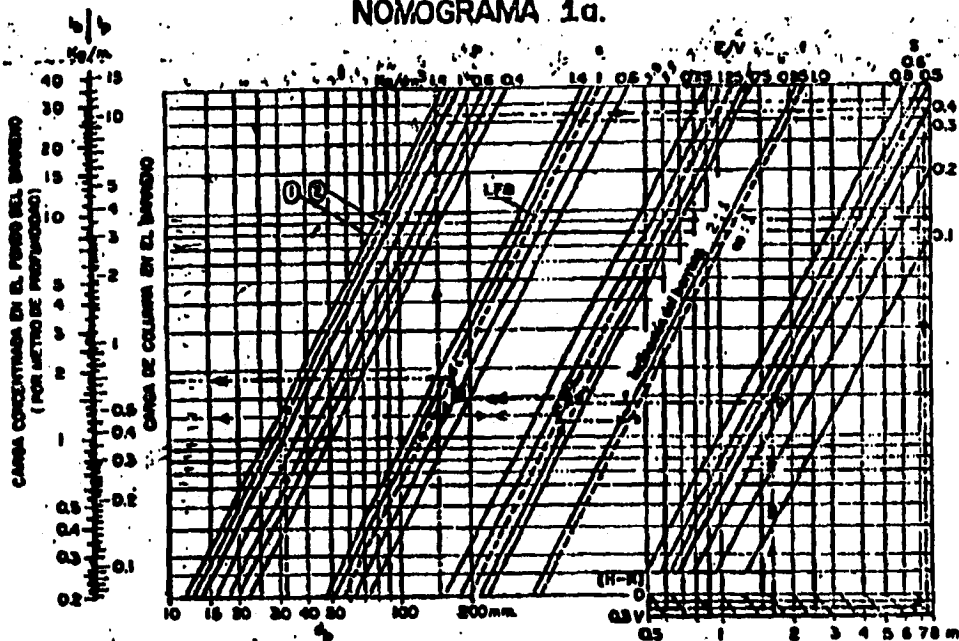
Cálculo. Partimos de  $V = 1.65$  m. en la escala horizontal inferior de la extrema derecha en el nomograma 1a y procediendo hacia la izquierda con un trazo auxiliar que pasa por los puntos g, f, d, d', c', b y b', continuando horizontalmente hasta la escala de la izquierda, en la que se lee:  $1p = 0.65$  kg/m. Por lo tanto el peso de la carga de columna será igual a  $2.7 \times 0.7 = 1.9$  kg, de explosivo de la potencia indicada.

Nota. La inclinación de los barrenos no tiene influencia sobre la magnitud de la carga de columna, lo cual explica por qué en el trazo auxiliar se continuó pasando por el punto "f" sin ninguna desviación.



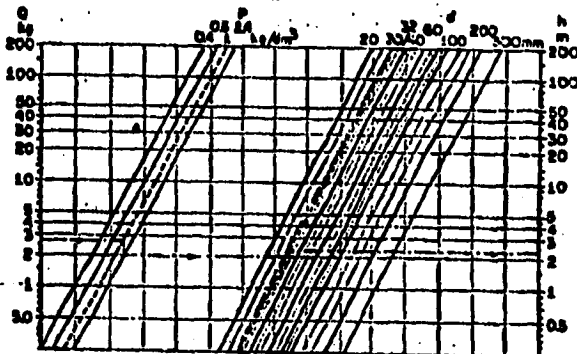
**Cálculo de la separación frontal de los barrenos para bancos de poca altura ( $K < 2V$ ) y diferentes cantidades de explosivo por metro del barreno.**

### NOMOGRAMA 1a.



- p- Grado de atacamiento del explosivo.
- s- Factor de potencia explosiva (igual a 1 para una dinamita extra de 35 % a 40 %).
- e/V- Inclinação del barreno.
- F- Resistencia específica de la roca.
- LFB- (Dinamita extra sueca) equivalente a una dinamita extra con 35 % de nitroglicerina aproximadamente.
- (H-K)- Sub-barrenación
- V- Separación frontal (línea de menor resistencia).
- db- Diámetro del barreno en el fondo.
- E- Espaciamiento entre barrenos.
- K- Altura del frente en el banco.
- L- Longitud del banco.
- H- Profundidad del barreno.

### Nomograma 4



**Cálculo de la longitud de barreno ocupada por la carga en función del peso de la carga, grado de atacado y diámetro del barreno en su fondo.**

## **Carga total por barreno (Nomograma 2)**

La carga total por barreno puede ser calculada para diferentes valores de separación frontal ( $V$ ), altura del banco ( $K$ ) y resistencia de la voladura ( $S$ ) utilizando para ello el nomograma 2. El resultado obtenido es aplicable cuando se utiliza el mismo explosivo en la carga de fondo y en la carga de columna. Los valores del nomograma de referencia corresponde a kilogramos de dinamita al 35 % (la carga total puede ser también calculada a partir de los datos obtenidos con el nomograma 1).

### **Ejemplo IV.**

(Empleando los nomogramas 2 a 1a).

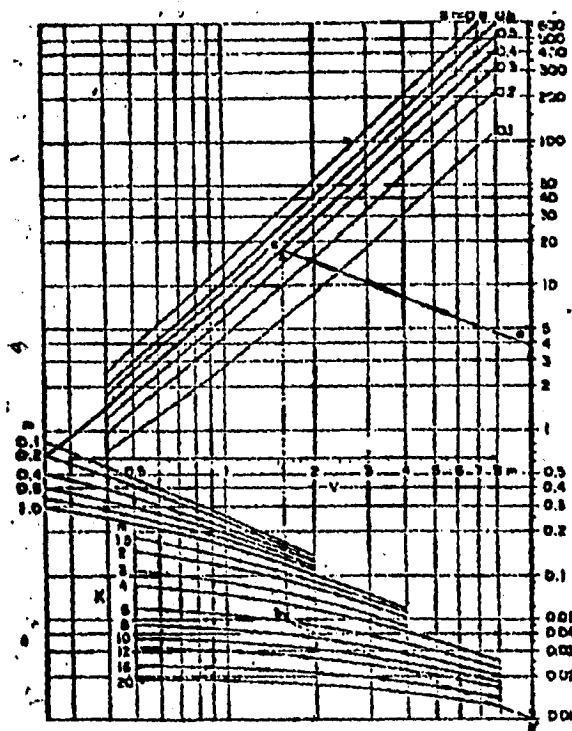
Se disponen de los siguientes datos: altura del Banco  $K = 6.0$  m separación frontal de los barrenos  $V = 1.6$  m; diámetro  $d = 32$  mm; resistencia específica a la voladura  $S = 0.4$ ; potencia específica a la voladura  $S = 0.4$ ; potencia específica empleada  $s = 1.0$  (dinamita al 35 %) grado de atacado  $p = 1.25$  (atacado con máquina), espaciamiento entre barrenos  $E = 1.25$  V; barrenos verticales \*inclinación infinito a uno).

Cálculo. Partimos de  $V = 1.6$  m, en la escala horizontal localizada al centro del Nomograma 2, trazando una línea vertical hacia arriba hasta intersectar la curva correspondiente a  $S = 0.4$  y otra línea también vertical y hacia abajo hasta la intersección con la curva representativa de la altura del banco  $K = 6.0$  m. Midiendo la distancia entre los puntos a y b en las intersecciones antes señaladas, se transporta dicha distancia a la escala vertical de la derecha, marcando los puntos a' y b', éste último en el origen de la escala; en el punto a, se lee una carga total  $i_1 = 3.8$  kg, de dinamita de la potencia señalada.

El cálculo puede ser realizado también con la ayuda del nomograma 1a, en la forma siguiente: La longitud ocupada por la carga de fondo  $l_b$  en el barreno

es igual a  $V + 0.3 = 2.1$  m. Cuando  $p = 1.25$ , la carga de fondo resulta ser  $Q_b = 2.1 \times 1.25 = 2.6$  Kg. Por otra parte, la carga de columna ocupa un espacio  $K - 2V = 2.8$  m, por lo que el peso de dicha carga será  $Q_p = 1p \times 2.8 \text{ m} = 0.44 \text{ kg/m} \times 2.8 = 1.2$  Kg. Consiguientemente la carga total de  $q_1 = 2.6 + 1.2 = 3.8$  Kg de dinamita el 35 %.

**Nomograma 2**



**Cálculo de la carga total por barreno en función de la separación frontal, altura del banco y resistencia específica de la roca a ser volada.**

# Determinación de carga específica

## (Nomograma 3)

El consumo de explosivos expresado en kilogramos por metro cúbico de roca tronada, se obtiene con el auxilio del nomograma 3. Este nomograma también se puede utilizar en bancos en los que la separación frontal de los barrenos es mayor que la altura del banco, en cuyo caso se supone una inclinación en los barrenos igual a 3.1 ó 2.1.

### Ejemplo V (Nomograma 3).

Caso a). Voladura de un banco con barrenos verticales, disponiéndose de los datos siguientes: altura del banco  $K = 6.0$  m; separación frontal de los barrenos  $V = 1.6$  m; resistencia específica a la voladura  $S = 0.4$ ;  $K/V = 3.7$ .

Cálculo. Partimos con el dato  $V = 1.6$  m, en la escala horizontal en la parte inferior izquierda del nomograma 3, trazando a partir de ese valor una línea vertical hacia arriba hasta su intersección con  $S = 0.4$ , en donde se gira  $90^\circ$ , continuando horizontalmente hacia la derecha hasta intersectar  $K/V = 3.7$ . (Valor intermedio no mostrado en el nomograma), en donde giramos nuevamente  $90^\circ$ , continuando verticalmente hacia abajo hasta la escala horizontal derecha, en la que obtenemos el valor correspondiente a la carga específica  $q = 0.2$  kg. (dinamica al 35 %)  $m^3$  de roca tronada.

El cálculo puede ser realizado empleando el nomograma 2 en la forma siguiente, aplicable a este mismo ejemplo:

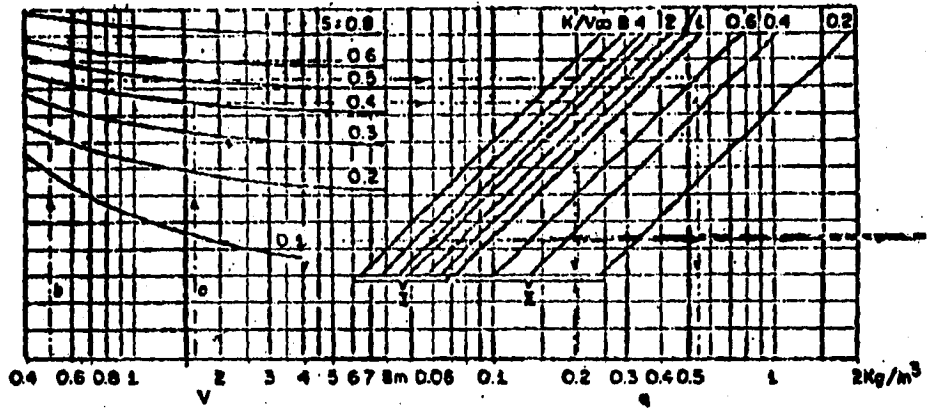
Con una carga total de 3.8 kg, por barreno y un volumen tronado igual a  $K \times V \times E = 19$   $m^3$ , la carga específica resulta ser  $3.8/19 = 0.2$  kg/ $m^3$ .

Caso b). Banco con altura de 0.3m.: separación frontal  $V = 0.5$  m;  $K/V = 0.6$ ;; inclinación de los barrenos del orden de 2:1.

Cálculo. Al igual que en el caso Va, se sigue la misma secuela obteniendo un valor igual a  $q = 0.55$  kg/ $m^3$ .

**Nota:** En este caso el Nomograma 2 puede ser utilizado, puesto que ha sido construido para cálculo de barrenos verticales y utilizándolo se obtendrá un valor erróneo, que en este caso resultaría ser:  $q = 0.59$  kg/ $m^3$ .

### Nomograma 3



**Cálculo de la carga específica (dinamita de 35 %) en Kg/m<sup>3</sup> roca, como una función de la separación frontal de los barrenos, resistencia a la voladura y relación K/V.**



# Determinación de la resistencia específica a la voladura

## (Nomograma 5)

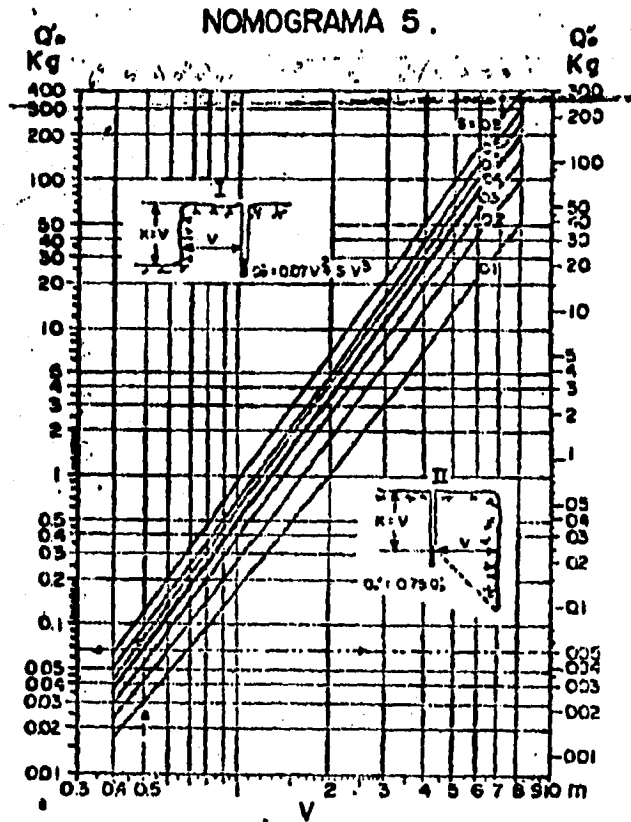
La resistencia específica de una roca a ser volada puede ser determinada por medio de tronadas experimentales conducidas por el procedimiento de tanteos ó aproximaciones sucesivas, auxiliándose con el nomograma 5. Las tronadas pueden ser realizadas de acuerdo con diferentes principios.

Una primera tronada se calcula suponiendo un valor para  $S = 0.4$ , y después de la misma se juzga a partir de los resultados, tomando en cuenta la factura y lanzamiento del material, para determinar que tan aproximada fue de la carga calculada. La determinación puede hacerse, bien con una tronada en gran escala o con aproximaciones sucesivas tronando barrenos individuales en los que se van corrigiendo los valores hasta ajustar a la carga correcta. El nomograma 5 presupone que la separación frontal de los barrenos será de una magnitud justamente igual a la altura del banco, y es aplicable tanto a bancos en los que el fondo del barreno se encuentre confinado por el piso ( $Q_0'$ ), como a los que tienen sin confinamiento ( $Q_0''$ ).

Ejemplo: Se tiene barrenos en los que  $K = V = 0.5$  m., con su fondo libre sin confinamiento, como se ilustra en la Fig II del nomograma. Inicialmente se supone un valor  $S = 0.4$ .

Cálculo. Partiendo con el argumento  $V = 0.5$  en la escala horizontal de la parte inferior, se sigue un trazo auxiliar vertical hacia arriba hasta intersectar la línea correspondiente a  $S = 0.4$ , a partir de cuya intersección se continúa hacia la escala de la derecha, en la que se obtiene que  $Q_0'' = 0.05$  Kg (Dinamita al 35 %). En el caso de que el fondo del barreno se encuentre confinado, se hace la lectura en la escala de la izquierda,  $Q_0' = 0.07$  kg.

Con la carga calculada se realiza la tronada, la cual se juzga a partir de sus resultados, en función de la fragmentación y del lanzamiento del material. En caso de fallar la tronada, se repite aumentando la carga aproximadamente en un 20 %.



**Cálculo de la resistencia específica de la roca a ser tronada, determinable por tronadas experimentales.**  
**La carga mínima de fondo se obtiene para una separación frontal de los barrenos igual a la altura del banco,  $K = V$ .**

# **Voladuras controladas**

**Se presenta un análisis de varios métodos de voladuras controladas. Aunque se presentan limitaciones de cada técnica, se considera que debe darse énfasis adicional al hecho de que el control de sobrerrompimiento es todavía, sobre todo, una función de la geología.**

**La experiencia con procedimientos de voladuras controladas muestra que no puede esperarse un buen control del sobrerrompimiento en todas las formaciones geológicas. Si la formación no puede sostenerse por sí misma, se tendrá sobrerrompimiento sea cual sea la técnica de voladura utilizada.**

**Estas técnicas no son una panacea, y, por lo tanto, 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 se pueden utilizar, y si así fuera, establecer entonces cargas y patrones óptimos.**

**Se emplea numerosas técnicas de voladuras controladas para reducir el sobrerrompimiento. Sin embargo, todas tienen un objetivo común: reducir y distribuir mejor las cargas explosivas para minimizar la fatiga y la fractura de las rocas más allá de la línea de excavación neta.**

**Los nombres descriptivos asociados con las técnicas de voladuras controladas son numerosos, y, en algunos casos, aún confusos.**

**Desde el primer uso de los explosivos en la minería y construcción, se efectuaron intentos para desarrollar fórmulas que proporcionaran métodos "a prueba de tontos" para controlar el sobrerrompimiento. Sin embargo, en años recientes, las ideas han sido más sofisticadas. Siguen siendo proposiciones de tanteo y error en lo que a aplicación práctica en el campo se refiere. Esto no es, en realidad, sorprendente cuando se consideran las variables geológicas en las voladuras. No es realista creer, por ejemplo, que la misma técnica de voladuras será igualmente buena en formaciones ígneas masivas como en depósitos sedimentarios altamente estratificados.**

Durante muchos años, la barrenación en línea fue la única técnica utilizada para controlar el sobrerrompimiento. La barrenación en línea simplemente involucra una línea sencilla de barrenos sin carga, muy próximos entre sí, perforados a lo largo de la línea de excavación neta, y que proporciona un plano de debilidad contra el cual pueda romper la voladura.

A través de los años, diferentes modificaciones a la barrenación en línea han conducido a la introducción de otros términos como: voladuras amortiguadas, precorte, voladuras suaves, perimetrales y de contorno. Estas técnicas difieren del principio original de barrenación en línea principalmente en que algunos, o todos los barrenos, se cargan con cantidades de explosivos relativamente ligeras y bien distribuidas.

El disparo de estas cargas ligeras tiende a cortar la roca entre los barrenos, permitiendo espaciamientos más amplios que la barrenación en línea. Por consiguiente los costos de barrenación se reduce y en muchos casos se obtiene un mejor control del sobrerrompimiento.

Las técnicas de voladuras controladas descritas en este capítulo se agrupan en cuatro categorías: (1) Barrenación en Línea, (2) Voladuras Amortiguadas, (3) Voladuras Suaves y (4) Precorte. Algunas de las técnicas anteriores tiene aplicación tanto bajo tierra como en la superficie. Este capítulo enumera sus aplicaciones, ventajas y limitaciones.

# Barrenación en línea

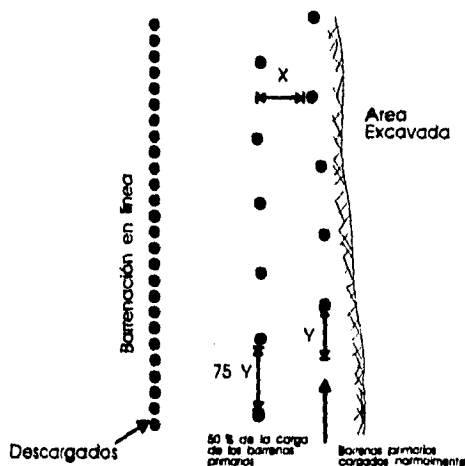
## Principio

La barrenación en línea involucra una hilera sencilla de barrenos de pequeño diámetro, sin carga y muy próximos entre sí, a lo largo de la línea de excavación neta. Esto proporciona un plano de debilidad contra el cual puede romper el disparo primario. También causa que se reflejen algo de las ondas de choque creadas por la voladura, lo que reduce la fractura y fatiga de la pared terminada.

## Aplicación

Los barrenos de una perforación en línea son generalmente de 2 a 3 plg de diámetro, y están espaciados de 2 a 4 veces el diámetro del barreno a lo largo de la línea de excavación. Rara vez se utiliza barrenos mayores de 3 plg de diámetro en barrenación en línea ya que el incremento en espaciamiento no justifica los mayores costos en barrenación.

Los barrenos para voladura directamente adyacentes a los barrenos de la perforación de línea, por lo regular, se cargan más ligeros y tienen menor espaciamiento que los otros barrenos. La distancia entre los barrenos de la perforación en línea y los barrenos de voladuras directamente adyacentes es, por lo común, del 50 al 75 % del bordo normal. Una práctica común es reducir los espaciamientos de los barrenos para voladura adyacentes la misma cantidad con una reducción del 50 % en la carga de explosivos. Los explosivos deben estar bien distribuidos en el barreno, utilizando separadores y líneas de barreno de cordón detonante.



La barrenación en línea es lo indicado para formaciones homogéneas en donde los planos de estratificación juntas y vetas son un mínimo. Estas 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 a la perforación en línea para control de 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.

### **Trabajo abierto**

La figura anterior muestra un patrón y procedimiento típico para la barrenación en línea, en trabajo abierto. Se obtiene los mejores resultados cuando se efectúa la excavación primaria hasta dejar únicamente de una a tres hileras de barrenos antes de la línea de excavación neta. La última hilera o hileras de barrenos se disparan, utilizando estopines de retardos o conectores MS. Este procedimiento da el máximo alivio enfrente de la pared terminada, permitiendo que la roca se mueva hacia adelante, y por lo tanto, creando menor presión hacia atrás, la que podría causar sobrerrompimiento más allá de la barrenación en línea.

En formaciones sedimentarias con estratificación fina y metamórfica foliada, los resultados obtenidos con barrenación en línea pueden, por lo general, mejorarse cargando ligeramente alguno de los barrenos de la línea. Este procedimiento condujo al desarrollo de las voladuras amortiguadas y voladuras suaves. También se encontró que los resultados de la barrenación en línea pueden mejorarse, en algunas formaciones, cargando ligeramente y disparando los barrenos de la línea antes que la voladura principal. Esto condujo a la introducción de la técnica conocida como precorte. Estas modificaciones de la perforación en línea promueve planos de debilidad adicionales a lo largo de la línea de excavación neta, utilizando la fuerza de los explosivos para cortar la roca entre los barrenos.

## **Trabajo subterráneo**

La aplicación de la perforación básica en línea utilizando únicamente barrenos sin carga es muy limitada en trabajo subterráneo. Por lo regular, se utilizan barrenos muy próximos entre sí, pero se emplean ligeras cargas. Esta es la técnica que usualmente se conoce como voladura suave, y que se describirá más adelante.

### **Ventajas**

La barrenación en línea es aplicable en áreas en donde aún las ligeras cargas de explosivos asociados con otras técnicas de voladura controlada pueden causar daño más allá del límite de excavación. Cuando se utiliza entre barrenos cargados, la barrenación en línea provoca el corte y proporciona resultados mejorados.

### **Limitaciones**

Existen varias limitaciones a la barrenación en línea que deben tomarse en consideración. Puede ser impredecible excepto en formaciones muy homogéneas, y los costos de barrenación son elevados a causa de los pequeños espaciamientos requeridos. Debido a que la barrenación en línea necesita de un gran número de barrenos en espaciamiento más bien cortos, la barrenación se vuelve tediosa y los resultados son, a menudo, poco satisfactorios a causa de una mala alineación de los barrenos.

# **Voladuras amortiguadas**

## **Principio**

Las voladuras amortiguadas, conocidas algunas veces como voladuras perfiladas, se iniciaron en Canada. Igual que la barrenación en línea, involucra una hilera sencilla de barrenos a lo largo de la línea de excavación neta. Aunque las voladuras amortiguadas como se practicaron originalmente comprenden barrenos de 4 a 6 1/2 plg de diámetro, esta técnica se utiliza ahora con barrenos de diámetro más pequeños, como de 2 a 3 1/2 plg. Los barrenos de una voladura amortiguada se llenan con cargas ligeras y bien distribuidas, completamente retacadas y disparadas después de efectuar la voladura principal. El taco "amortigua" el choque en la pared terminada al disparar la banqueta, y minimiza las fracturas y esfuerzos en la misma. Al disparar los barrenos amortiguados con un retardo mínimo entre ellos, la detonación tiende a cortar la roca entre barrenos y da una pared tersa con un mínimo de sobrerrompimiento. Obviamente, entre más grande sea el diámetro, mayor será el efecto de amortiguamiento.

## **Aplicación**

En las voladuras amortiguadas se retira el área principal de corte, dejando una banqueta mínima frente a la línea de excavación neta. Los barrenos amortiguados pueden barrenarse antes del disparo primario o justo antes de retirarse la banqueta final.

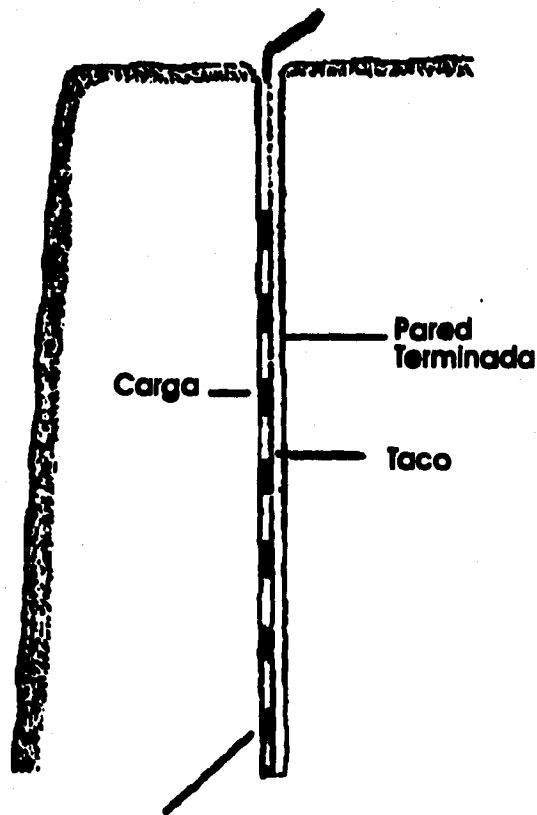
## **Trabajo abierto**

El bordo (banqueta) y espaciamiento varía con el diámetro del barreno utilizado. La Tabla II proporciona una guía para los patrones y cargas para diferentes diámetros del barreno. Nótese que los números mostrados son un valor promedio debido a las variaciones experimentadas con el tipo de formación con el que se trabaja. Los barrenos se cargan en rosario con líneas de barreno de cordón detonante, con cartuchos completos o parciales de 1 a 2 plg de diámetro por 8 plg de longitud de dinamita, espaciados a cada 1 o 2 pies.



Para promover el corte en el fondo del barreno, se emplea generalmente una carga de fondo igual a 2 ó 3 veces la utilizada para la parte superior del barreno. Para un máximo amortiguamiento, las cargas deben colocarse tan cerca del lado de excavación del barreno como sean posible.

### **Línea de barreno de cordón detonante**



2 a 3 veces la carga/pie en el fondo para asegurar el corte en el piso

### **Colocación de las cargas para una voladura amortiguada**

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Los cartuchos se encitan a las líneas de cordón detonante o se dejan caer a los intervalos deseados si se tienen tubos para el cordón detonante. Pueden utilizarse tubos de espaciamiento para obtener la separación deseada entre los cartuchos.

Si no se utilizan espaciadores, puede vaciarse material de taco entre los cartuchos cargados por gravedad. Cuando se prepara un tramo completo de cordón detonante encintándole las cargas, el taco se vacía después de colocar toda la carga. En este caso, tanto la arena, como la piedra triturada o la grava, pueden servir como material de taco, siempre y cuando tengan suficiente fluidez. La línea de cordón detonante se sube y baja a medida que se vacía el taco para ayudar a rellenar el espacio entre los dos cartuchos. Los últimos 2 ó 3 pies antes de llegar a la boca del barreno deben taparse completamente con material de taco y no tiene que cargarse. La cantidad de taco superior necesaria varía con la formación en cuestión.

Un retardo mínimo entre los barrenos de amortiguamiento proporciona la mejor acción de corte entre barreno y barreno; por lo tanto, se utilizan normalmente líneas troncales de cordón detonante. Si el control del ruido y de la vibración son críticos, se recomienda el uso de estopines de retardo MS.

La relación bordo - espaciamiento varía con las diferentes formaciones, pero, para obtener máximo corte entre barrenos, los espaciamientos siempre deben ser menores que la anchura de la banquetta o bordo que se está disparando.

**Tabla 11**

<b>Cargas y Patrones Propuestos para Veladuras Amortiguadas</b>			
<b>Diámetro del barreno en plg</b>	<b>Espaciamiento en pies**</b>	<b>Bordo en pies**</b>	<b>Cargas explosivas en lb/pie **</b>
2 - 2 1/2	3	4	0.08-0.75
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

**\*\* Depende de la formación que se este trabajando.  
Las cifras mencionadas son un promedio.**

Las voladuras amortiguadas pueden practicarse por método de banqueo o perforado con anticipación los barrenos de amortiguamiento a la profundidad total de la excavación. Cuando se utiliza el sistema de banqueo, por lo regular se deja un mínimo de un pie por banco, ya que es imposible colocar la perforadora sobre el plano de la pared del banco superior.

La máxima profundidad que puede dispararse con amortiguamiento depende de la precisión del alineamiento de los barrenos. Con barrenos de diámetro grande, es posible mantener una mejor alineación de los barrenos con profundidades mayores. Las desviaciones de más de 6 plg. medidas del plano de los barrenos, por lo general, dan resultados pobres, pero con este sistema se han disparado con éxito barrenos de 90 pies de profundidad. Debe también considerarse la rapidez de penetración del equipo para determinar la profundidad que va a dispararse con amortiguamiento. Si la penetración después de una profundidad dada es excesivamente lenta, por ejemplo, puede ser más económico banquear para reducir el costo de barrenación total.

Cuando se necesite disparar con amortiguamiento en áreas curvas o esquinas, se requieren espaciamientos más pequeños que al disparar una sección recta. También pueden utili-

### Coladuras amortiguadas de frentes No lineales

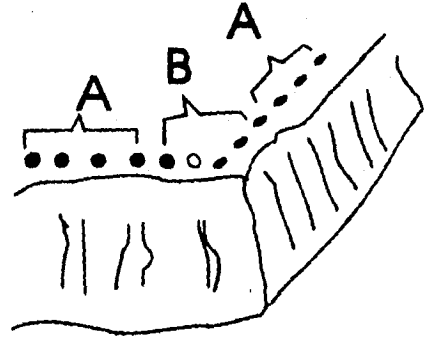


Figura 13

- A) BARRENOS AMORTIGUADOS
- B) BARENACION EN LINEA
- C) SECCION CON PRECORTE

- CARGADO
- DESCARGADO

zarse barrenos de guía al disparar frentes no lineales. En esquinas a 90°, una combinación de técnicas de voladuras controladas dará mejores resultados que el uso exclusivo de voladuras amortiguadas. Fig 13.

En muchas formaciones sedimentarias, donde es difícil conservar tersa una pared, se recomienda el uso de barrenos de guía sin cargar entre los barrenos amortiguados. En general, se emplean barrenos de guía de pequeño diámetro para reducir los costos de barrenación.

En donde únicamente la parte superior de la formación está imtemperizada, los barrenos de guía necesitan perforarse sólo a esa profundidad y no a la profundidad total de los barrenos amortiguados. Este procedimiento es común en el primer banco, ya que el sobrerrompimiento es más probable allí que en los bancos inferiores. La figura 14 a continuación muestra los resultados obtenidos con la combinación de barrenos amortiguados y de guía, en la que los últimos se perforaron a profundidad total. La figura 14, muestra los resultados obtenidos en disparos amortiguados, utilizando barrenos de pequeño diámetro y barreno de guía sin cargar.

Se han obtenido cortes satisfactorios en formaciones sólidas y homogéneas utilizando taco únicamente en los 2 ó 3 últimos pies del barreno y entre cargas. En este caso, el aire entre las cargas y las paredes del barreno sirve como el colchón protector. Si no se usa taco entre cargas, los gases formados por la explosión pueden encontrar zonas de falla en la formación y tiende a fugarse antes de producir el corte deseado entre tramos completos de barrenos. De un modo semejante, los gases pueden encontrar áreas de debilidad en la pared terminada y producir sobrerrompimiento. A menos que la formación sea homogénea y dura, es aconsejable el uso completo de taco entre y alrededor de las cargas indivi-

### Coladuras amortiguadas de frentes No lineales

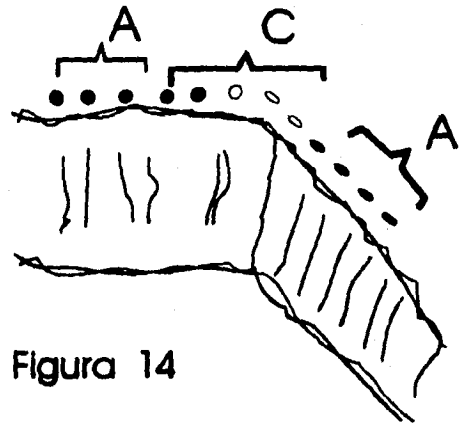


Figura 14

- A) BARRENOS AMORTIGUADOS
- B) BARENACION EN LINEA
- C) SECCION CON PRECORTE

- CARGADO
- DESCARGADO

duales. También, aunque no es la práctica general en el campo, el colocar las cargas al tresbolillo entre los barrenos, según se muestra en la figura 14, mejora la distribución de carga y proporciona mejores resultados.

Para dar una óptima distribución de la carga deben utilizarse columnas sólidas de dinamita de baja densidad y pequeño diámetro (7/8 a 1 plg). Esta técnica, por lo general, elimina la necesidad de emplear taco entre los cartuchos y la pared de los barrenos, debido a la reducida concentración de cargas de explosivos en cualquier punto.

**Con esta técnica sin embargo, es todavía necesario utilizar taco desde la parte superior de la carga de columna hasta la boca del barreno. A menudo se emplea en la parte superior de la columna una taza de papel para evitar el paso del taco . (Fig 14 ).**

**Las voladuras amortiguadas en trabajo abierto tienen aplicación con barrenos inclinados y verticales. En ambos casos, es esencial un buen alineamiento de ellos.**

# **Trabajos subterráneos**

Puesto que la más efectivas voladuras amortiguadas resultan del uso de taco entre y alrededor de las cargas, es de poco valor en trabajo subterráneo, en donde se utilizan barrenos con taco obviamente no es práctico, pero puede obtenerse alguna ventaja mediante los espacios vacíos. En trabajo de tiros, o en cualquier otra operación subterránea que involucre barrenos verticales o inclinados, se aplican los mismos dados anteriormente para trabajo a cielo abierto.

Para ser prácticos, el control de sobrerrompimiento en frentes subterráneos deben involucrar únicamente el taco en la boca. Este tema se cubrirá bajo voladuras suaves.

## **Ventajas**

Las voladuras amortiguadas ofrecen ciertas ventajas que influyen en un mayor espaciamiento entre barrenos, reduciéndose los costos de perforación; mejores resultados en formaciones no consolidadas; y los resultados pueden observarse en el primer disparo, lo que permite el ajuste de las cargas si fuera necesario antes de reanudar. También, cuando se carguen los barrenos amortiguados, puede obtenerse una ventaja completa de la información geológica ganada al efectuar los disparos principales, lo que significa menor trabajo a ciegas. Finalmente, una mejor alineación de los barrenos con diámetros grandes permite barrenos más profundos.

## **Limitaciones**

Hay ciertas limitaciones a las voladuras amortiguadas que deben tomarse en consideración. Estas son: la necesidad de retirar el área excavada antes del disparo y, que no son prácticas para cortar esquinas a 90° sin usar también la barrenación en línea o el precorte. También, el sobrerrompimiento producido por los disparos en algunas ocasiones tumba completa o parcialmente la banqueta que debe dispararse con amortiguamiento, requiriendo, por lo tanto, varios ajustes de carga para diferentes barrenos.

# **Voladuras suaves**

## **Principio**

Las voladuras suaves, también conocidas como voladuras perimetrales o perfiladas, se introdujeron en Suecia y es el método mayormente aceptado para controlar el sobrerrompimiento en frentes y rebajes bajo tierra. Las técnicas de voladura suaves tienen aplicación tanto a cielo abierto como en trabajo subterráneo. Sin embargo, puesto que el uso de esta técnica en trabajo abierto es, para todos los fines prácticos, idéntico a las voladuras amortiguadas, únicamente se cubrirán en este capítulo sus aplicaciones a trabajo subterráneo.

El principio básico de las voladuras suaves es el mismo que para las voladuras amortiguadas: se perforan barrenos a lo largo de los límites de la excavación y se cargan ligeramente para tirar el bordo final. Al disparar con retardo mínimo entre barrenos se obtiene una acción de corte, lo que proporciona paredes tersas con un mínimo de sobrerrompimiento.

## **Aplicación - trabajo subterráneo**

En frentes subterráneos, en donde se tienen caídos en las costillas y en el cielo, debido a material no consolidado, el sobrerrompimiento es común debido a la acción de sacudimientos producida por el disparo.

Al utilizar la técnica de voladura suave con cargas explosivas ligeras y bien distribuidas en los barrenos de perímetro, se requiere menos ademe y se obtiene un menor sobrerrompimiento. Aún en las formaciones más duras y más homogéneas, las voladuras suaves proporcionan respaldos y costillas más tersas y firmes.

Las voladuras suaves en trabajo subterráneo involucra barrenos perimetrales perforados sobre una relación de borde a espaciamiento de aproximadamente 1 1/2 a 1, con cargas ligeras y bien distribuidas, y disparos con el último período de retardo de la barrenación. Fig 15.

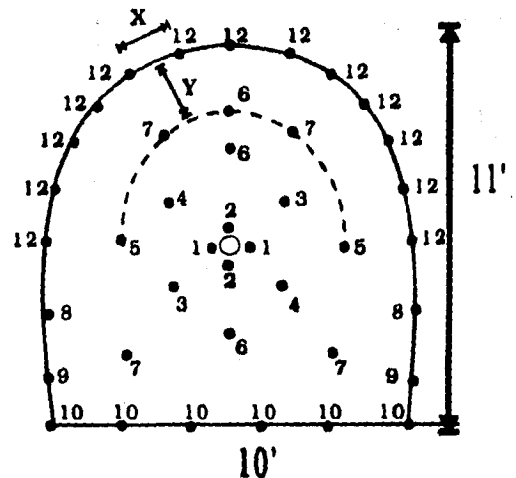
Estos barrenos se disparan después de los barrenos de pata, para asegurar que la roca quebrada se desplace suficientemente, ofreciendo un máximo alivio para los barrenos de la voladura suave. Este alivio permite un movimiento irrestricto del bordo final, y da como resultado menor sacudimiento y menor fragmentación más allá de la línea de excavación.

Para asegurar un máximo alivio, se utiliza, algunas veces, un frente piloto. Después de haber excavado completamente, se barrena y dispara el bordo final.

En este caso, pueden dispararse con esta técnica longitudes mayores que la de una barrenación sencilla. El método del frente piloto permite el uso de voladuras suaves en una mayor porción de la periferia de un frente. Al disparar barrenos con voladuras suaves como se muestra en la figura anterior, el alivio del confinamiento está limitado al arco y parcialmente hacia abajo en las costillas debido a la pila de rezaga. Por lo tanto, por lo general, no se obtienen buenos resultados de voladuras suaves en la parte inferior de las costillas o tablas.

Aunque se recomienda como punto de arranque una relación de borde-a-espaciamiento de 1 1/2 a 1, la formación que se está trabajando puede necesitar modificaciones. También, no siempre es necesario disparar los barrenos de la voladura suave con un mínimo retardo entre barrenos. Las cargas ligeras bien distribuidas en los barrenos perimetrales, con patrones y retardos convencionales, producen a menudo resultados satisfactorios. La tabla da los patrones recomendados y cargas por pie para voladuras suaves.

**Patrón de retardo típico para una frente subterráneo**



**Figura 15**  
**Y es más grande que X**



Cargas y Patrones Propuestos para Voladuras Amortiguadas			
Diámetro del barrenado en plg	Espaciamento en pies**	Borde en pies**	Cargas explosivas en lb/pie **
1 1/2 - 1 3/4	2	3	.12 - .25
2	2 1/2	3 1/2	.12 - .25

**\*\* Depende de la formación que se este trabajando.  
Las cifras mencionadas son un promedio.**

Puesto que no es conveniente o práctico fijar cargas a las líneas de cordón detonante en barrenos horizontales, las voladuras suaves generalmente se efectúan cargando a carril cartuchos de pequeño diámetro de dinamita de baja densidad, para obtener cargas ligeras así como una buena distribución en todo el barrenado. Es necesario tapar estos barrenos con arcilla, tapones, o aún con un cartucho retacado de la dinamita de tamaño estándar. Si los barrenos de la voladura suave no se tapan con taco, la explosión de los barrenos anteriores succionará las cargas colocadas a carril. El taco también evita un exceso del efecto de escopeta y permite el uso de cargas más ligeras. Las pruebas iniciales con cargas de cartuchos de pequeño diámetro colocados a carril, a menudo no tiene éxito debido a que se cargan demasiado cerca a la boca. Al hacer esto, el sobrerrompimiento producido por el disparo de los barrenos anteriores succiona y expulsa la pólvora hacia afuera antes de que tenga tiempo para detonar. Los cartuchos largos de pequeño diámetro, de explosivos de baja densidad, dan una buena distribución de pólvora en toda la longitud del barrenado, pero los cartuchos estándar de 8 plg de longitud se han utilizado con éxito en trabajos de voladuras suaves bajo tierra cuando se han usado espaciadores entre los cartuchos para dar una baja concentración total de carga (libras por pie). Esta técnica, sin embargo, da como resultado concentraciones relativamente altas en distintos puntos, y pueden obtener inferiores resultados en formaciones no consolidadas.

**Las dos ventajas principales de las voladuras suaves son** : reducen el sobrerrompimiento producido por los métodos convencionales, y se requieren menores ademes posteriores.

**Las limitaciones en las voladuras suaves:** por lo regular involucran mayor número de barrenos perimetrales que los métodos convencionales. También no trabajarán en todas las formaciones, ya que si el terreno es demasiado débil para autosoportarse, las voladuras suaves no eliminarán completamente la necesidad de ademe.

# Precorte

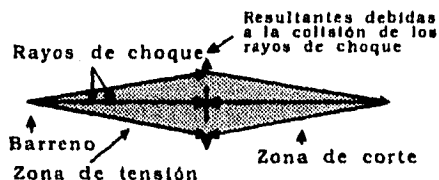
## Principio

El precorte, involucra una hilera sencilla de barrenos perforados a lo largo de la línea de excavación neta. Los barrenos son usualmente de igual diámetro (2 a 4 plg), y en la mayoría de los casos, están todos cargados. El precorte difiere de la barrenación en línea, de las voladuras amortiguadas y de las suaves, en que los barrenos se disparan antes de disparar cualquier voladura principal. La teoría del precorte es que al disparar dos cargas simultáneamente en barrenos adyacentes, la colisión de las ondas de choque entre los barrenos coloca al terreno en tensión y provoca una fisura que da una zona de corte entre los barrenos (Figura 16). Con un espaciamiento y carga adecuados, la zona de fractura entre los barrenos será una área estrecha de corte contra la cual pueden romper las voladuras primarias subsecuentes. Esto da como resultado una pared tersa con poco o ningún sobrerrompimiento.

El plano de precorte refleja algunas de las ondas de choque de las voladuras principales que siguen, lo que evita que se transmita hacia la pared terminada y minimiza la fragmentación y el sobrerrompimiento.

**Aplicación-trabajo abierto.** Los barrenos de precorte se carga de un modo similar a los barrenos de voladuras amortiguadas, esto es, con cargas en rosario de cartuchos completos o parciales de 1 a 2 plg de diámetro por 8 plg de longitud, espaciadoras de 1 ó 2 pies centro a centro. También, las columnas de cargas de 7/8 plg de diámetro han demostrado ser muy efectivas.

Como las voladuras amortiguadas, los barrenos se disparan, por lo regular, en forma simultánea mediante el uso de una línea troncal de cordón detonante. Si se disparan líneas excesivamente largas, las porciones pueden retardarse mediante el uso de estopines eléctricos de retardo MS o Conectores MS.



**El Principio del Precorte**

En formaciones débiles y suaves, los resultados pueden mejorarse utilizando barrenos de guía o de alivio entre barrenos cargados para promover el corte a lo largo del plano deseado. Aún en formaciones más duras, los barrenos de guía entre barrenos cargados dan mejores resultados que el aumentar la carga explosiva por barreno.

Los espaciamientos y cargas promedios por pie de barreno se dan en la tabla 13. Estas cargas son para condiciones normales de roca y pueden obtenerse utilizando cartuchos de dinamita parciales o enteros, espaciados sobre líneas de barreno de cordón detonante, o mediante columnas continuas de dinamita de pequeño diámetro y de gran longitud, acopladas entre sí para asegurar el alineamiento. En formaciones muy suaves e intemperizadas, por ejemplo, se obtuvieron resultados pobres hasta que la carga se redujo a una columna de 400 granos\* de cordón detonante en barrenos perforados a cada 12 plg centro a centro. Existen también un caso donde fue necesario reducir la carga de columna a dos líneas de cordón detonante de 50 gramos para evitar el sacudimiento excesivo de una pared terminada demasiado no consolidada. Las cargas y espaciamientos dados en la tabla 13, por lo tanto, pueden utilizarse únicamente como guía, y en formaciones en extremo intemperizadas debe consultarse a un representante de Du Pont de proseguir.

Todos los barrenos de precorte cargados retacarse completamente alrededor y entre las cargas para evitar las fugas de gas hacia estratos débiles y resultados pobres.

**Cargas y espaciamientos propuestos para precorte**  
**Tabla 13**

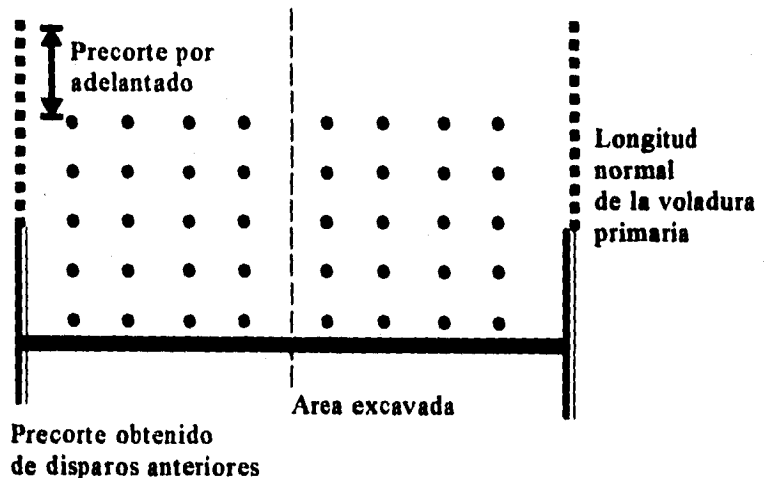
<b>Cargas y Patrones Propuestos para Voladuras Amortiguadas</b>		
<b>Diámetro del barreno en plg</b>	<b>Espaciamento en pies**</b>	<b>Cargas explosivas en lb/pie **</b>
1 1/2 - 1 3/4	1 1/2	0.00-0.25
2 - 2 1/2	1 1/2 - 2	0.00-0.25
3 - 3 1/2	1 1/2 - 3	0.13-0.50
4	2-4	0.25-0.75

Sin embargo, como en las voladuras suaves, se han obtenido buenos resultados en las formaciones más sólidas y homogéneas retacando únicamente los últimos 2 ó 3 pies del barreno. También como en las voladuras suaves, es deseable incrementar la carga en los primeros pies del barreno hasta llegar a dos o tres veces la que se utiliza en la parte superior. Esto promueve el corte en el fondo es más difícil de obtener.

Las cargas de precorte se colocan y detonan de igual manera que las voladuras amortiguadas. Se recomienda también para el precorte y para dar una mejor distribución de la carga la colocación al tresbolillo de las cargas en barrenos adyacentes y las cargas de columnas sólidas con grados de baja densidad y pequeño diámetro.

La profundidad que puede precortarse en cada disparo depende de nuevo de la habilidad en mantener un buen alineamiento de los barrenos. Una desviación del plano deseado de corte mayor de 6 plg dará resultados inferiores. Generalmente 50 pies es la profundidad máxima que puede utilizarse para barrenos de 2 a 3 1/2 plg de diámetro sin tener una desviación significativa del alineamiento.

En teoría, la longitud de un disparo de precorte es ilimitado. En la práctica, sin embargo, el disparar con demasiada anticipación a la excavación principal puede conducir a problemas si las características de la roca cambian y la carga provoca fragmentación excesiva en las áreas más débiles. Cuando se lleva el precorte únicamente medio disparo adelante de las voladuras principales (Fig 17). El conocimiento obtenido en los disparos principales en lo que se refiere a la roca puede aplicarse a disparos de precorte si fuera necesario, y se tiene menor riesgo si se compara con el disparo de todo el tramo de la línea de excavación neta antes de empezar las voladuras primarias.

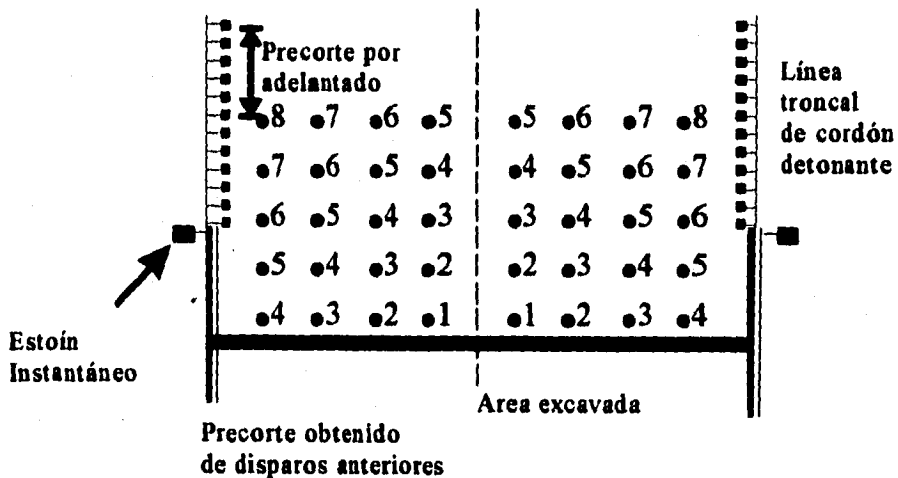


**Figura 17**  
**Procedimiento Recomendado**  
**Para un Precorte**

El precorte puede lograrse durante el disparo primario retardando los barrenos primarios de tal modo que los barrenos de precorte disparen antes de ellos.

En muchos casos, especialmente en disparos no lineales, el precorte en combinación con la barrenación en línea da buenos resultados. Por ejemplo, cuando se desea conservar una esquina de roca sólida, la barrenación en línea de la esquina puede utilizarse para prevenir el rompimiento a través de ella (Fig 18). Los barrenos de guía empleados para promover el corte a lo largo del plano deseado son tan ventajosos en el precorte como lo son en las voladuras amortiguadas.

Al efectuar precortes en formaciones no consolidadas y al usar barrenación en línea entre barrenos normalmente espaciados, los barrenos de la perforación en línea pueden variar en profundidad desde unos pocos pies hasta la profundidad total de los barrenos del precorte. El sobrerrompimiento es más que probable en la parte superior de un banco; en consecuencia, la barrenación en línea entre barrenos de precorte para los primeros pies de la parte superior reduce la posibilidad de sobrerrompimiento en todos los tipos de formaciones.



**Figura 18**  
**Técnica de Voladuras con**  
**Retardo para Precorte**  
**Durante un disparo Principal**

En material notablemente no consolidado, la carga de explosivos por pie en la parte superior del barreno debe reducirse en un 50% para minimizar el sobrerrompimiento en la cresta de la pared terminada.

Bajo tierra. Usualmente asociado con el trabajo a cielo abierto, el precorte tiene alguna aplicación en frentes y rebajes subterráneos para controlar el sobrerrompimiento y mejorar la estabilidad del respaldo y las costillas y reducir los requerimientos de concreto.

Si los barrenos perimetrales de un frente se perforan utilizando el principio del precorte, si se cargan ligeramente, y si se dispara simultáneamente antes del disparo principal, puede minimizarse el sobrerrompimiento. En barrenos horizontales, sin embargo, es impráctico colocar cartuchos en rosario empleando cordón detonante, o usar taco alrededor de la carga. En consecuencia en este tipo de trabajo, debe utilizarse dinamita de pequeño diámetro con espaciadores para reducir la carga por pie de barrenos de precorte.

### **Ventajas**

Algunas ventajas ofrecidas al utilizar el precorte son un aumento en el espaciamiento entre barrenos con una reducción en el costo de barrenación, y que no es necesario regresarla disparar las costillas después de las excavaciones primarias.

### **Limitaciones**

al emplear el precorte, es difícil determinar resultados hasta que la excavación primaria ha llegado a la pared terminada. Puesto que el precorte se efectúa antes de las voladuras primarias, no es posible tomar ventaja del conocimiento de las condiciones locales de la roca que se obtiene de los disparos primarios. También en algunos casos los espaciamientos en voladuras amortiguadas y voladuras perfiladas pueden, usualmente, ser mayores que el precorte, reduciendo de este modo los costos

# **EXPERIENCIAS DE CAMPO**

**V**

## **V. Experiencias de Campo**

**Las recomendaciones que se deben seguir para la prevención de accidentes en todo tipo de actividad, siempre se deben tener muy presentes, puesto que en la medida en que se sigan al pie de la letra los programas formulados para la prevención de los mismos se evitarán grandes problemas.**

**La prevención de accidentes en el uso de explosivos está cuestionada por la correcta aplicación de las instrucciones y tomar en cuenta las advertencias que cada uno de los diferentes tipos de explosivos nos formula.**

**Las personas encargadas del manejo de los explosivos siempre deben tener presente lo peligroso de su manejo y de estar conscientes que si no lleva a cabo las instrucciones recomendadas está poniendo en peligro su vida y además la de sus compañeros de trabajo. Deben ser personas muy competentes, responsables y experimentadas, que deben poner en práctica todas las medidas de seguridad necesaria. Por otra parte cuanto menor sea el número de personas que manejen los explosivos, menores serán los riesgos de que ocurra un accidente, además es necesario evitar la cercanía de personas ajenas al trabajo.**

**Además de todo lo anterior, se debe exigir a todos los trabajadores en general, el cumplimiento de las reglas de seguridad en todo sentido. Se deben señalar de antemano los límites de la zona o zonas de voladura, para que con esto se cumpla la seguridad para el trabajador en un primer término y en un segundo la protección de la maquinaria y equipo.**

**Se mencionan a continuación algunas recomendaciones en términos muy generales que se deben cumplir en cada etapa de una voladura para la prevención de accidentes:**



# **Al transportar explosivos**

**1. Deben cumplirse todos los requisitos que exige la Sría. de la Defensa Nacional.**

**2. Todo tipo de vehículo que se emplee para la transportación de explosivos, debe de estar en buen estado de operación y dotado de cubierta o piso sin aberturas o grietas y hecho de madera o de algún metal que no genere chispas; los costados y extremos serán de suficiente altura para impedir que caiga el explosivo. Los camiones abiertos deberán ir cubiertos con una lona a prueba de agua y resistente al fuego y no debe permitir el contacto entre los explosivos y cualquier fuente de calor. Todo el alumbrado del vehículo estará bien aislado para impedir cualquier corto circuito y se contará con un mínimo de dos extinguidores de fuego. Los vehículos se identificarán plenamente para dar advertencia al público del tipo de carga.**

**3. No se permitirá que el metal, salvo las carrocerías metálicas de camión aprobadas, entren en contacto con las cajas de explosivos. No se transportarán sustancias metálicas, inflamables, fácilmente oxidables, ó corrosivos junto con explosivos.**

**4. No se permitirá fumar a bordo del vehículo, o que vayan a bordo personas no autorizadas o innecesarias.**

**5. Se cargarán y descargarán los explosivos con mucho cuidado. No se deben tener explosivos en el camión.**

**6. Asegurarse que los demás explosivos, inclusive las mechas detonadoras y/o detonadores eléctricos cuando se permita transportarlos en un sólo vehículo.**

**7. Es muy importante que nunca se maneje un vehículo cargado de explosivos, a través de la ciudad o de algún pueblo o aldea, ni tampoco lo deje estacionado cerca de lugares habitados.**

8. En caso de incendios nunca combatirlos cuando el fuego entre en contacto con los explosivos. Se evacuará a todo el personal a un área y se cuidará contra entrada de intrusos.

## **Cuando se almacenan los explosivos**

1. Los explosivos se almacenarán de acuerdo con todos los requisitos que exige la Secretaria de la Defensa Nacional.

2. Se almacenarán los explosivos en un depósito limpio, seco, bien ventilado, razonablemente templado, correctamente ubicado, de construcción resistente a las balas, los incendios y cerrado.

3. Nunca se almacenan los explosivos, mechas, encendedores de mecha, junto con papel, madera o trapos, ni cerca de petróleo, gasolina, soluciones o solventes de aseo u otro material extraño, incluyendo materiales fácilmente oxidables, o cerca de radiadores, tuberías de vapor, tuberías de escape, estufas u otras fuentes de calor, ni en lugares húmedos.

4. No se almacenarán cartuchos rotos de explosivos en bolsas de papel, cajas de cartón, cajas de madera o recipientes de metal, salvo que estén forrados con algún plástico inerte.

5. No se permitirá que las cajas de explosivos dañadas ó que tengan fuga, permanezcan en el polvorín o en el edificio de almacenamiento. Debe enjuagarse el piso completamente con alguna sosa de aseo (no detergente) y agua.

6. No se almacenarán detonadores o detonadores eléctricos en la misma caja, o en el mismo recipiente y/o en el mismo polvorín con otros explosivos.

7. No guarde herramientas u otros objetos de metal que generen chispas dentro de un depósito de explosivos.

8. No se permitirá fumar, ni siquiera cargar cerillos o cualquier otra fuente de fuego o de llama dentro o cerca de un depósito de explosivos.

9. Nunca permita que se acumulen hojas, zacates, ramas o basura dentro de un área de 10 metros de un depósito de explosivos.

10. Prohibido disparar sobre los explosivos. Tampoco se permitirá el disparo de armas cerca de explosivos.

11. Se establecerán siempre los depósitos de explosivos en los sitios más aislados con que se disponga.

## **Al hacer uso de los explosivos**

1. No se usen herramientas hechas de metal que generen chispas para abrir los tambores o cajas de madera de los explosivos. Se podrán emplear cuchillas metálicas para abrir cajas de cartón siempre y cuando la cuchilla no entre en contacto con las grapas metálicas de la caja.

2. Nunca fumar, ni cargar fósforos ó cualquier otra fuente de fuego o llama, dentro de una distancia de 30 mts de una zona en que se estén manejando o empleando explosivos.

3. No se coloquen los explosivos donde puedan quedar expuestos a llamas, al calor excesivo, a las chispas o al impacto.

4. Se prohíbe cargar los explosivos en las bolsas de su ropa, o en cualquier otra parte de su persona.

5. No introduzca nada, salvo la mecha, en el extremo abierto de un detonador.

6. No golpee, ni manipule, ni trate de remover, ni investigar el contenido de algún detonador o detonador eléctrico.

7. Se prohíbe que se acerquen niños o personas no autorizadas y/o personas innecesarias a una zona en que se maneje o usen explosivos.

8. No se usen explosivos, equipo ó accesorios que evidentemente estén deteriorados y que hayan sufrido algún daño.

9. Nunca trate de recuperar o de emplear mechas, detonadores, detonadores eléctricos o explosivos que se hayan empacado en agua aún si ya están secos. Consultar al fabricante.

10. Use sólo y exclusivamente las cápsulas de aluminio ó cobre que el proveedor y su experiencia le indiquen.

11. Usar un cebo adecuado con las dinamitas o con los materiales no sensitivos.

12. Evitar el contacto entre el explosivo, los ojos y la piel, además de la ropa.

13. Lávese las manos en forma completa después del contacto con los explosivos.

## **Al preparar el cebo**

1. No se debe preparar el cebo dentro del polvorín o cerca de cantidades excesivas de explosivos o en exceso de sus necesidades inmediatas.

2. No se trate de asentar con presión el detonador o el detonador eléctrico dentro del explosivo.

3. Prepare los cebos de acuerdo con métodos bien establecidos y comprobados.

# **Al perforar y cargar los barrenos**

1. Cumplir con todos los requisitos que exige la Sría de la Defensa Nacional.

2. Examine la superficie o frente con cuidado antes de barrenar para determinar la posible presencia de explosivos no detonados. Nunca se debe perforar un barreno con explosivos.

3. Comprobar cuidadosamente el interior del barreno con atacador de madera o cinta de medir para conocer su condición, antes de colocar la carga.

4. No amontone los explosivos cerca de las zonas de trabajo al cargar los barrenos.

5. Siempre corte y libre del carrete la línea de mecha detonante que se extiende dentro del barreno, antes de colocar el resto de la carga.

6. Procurar evitar daños a los alambres del detonador al colocar la carga.

7. No se introduzcan explosivos en un barreno con presión ni lo forcé de cualquier obstrucción dentro del barreno.

8. No rasgue, deje caer ó abuse del cebo.

9. Asegurarse que los extremos de los alambres por conectarse hayan quedado limpios y brillantes.

10. Mantener los alambres del detonador eléctrico o los alambres de conexión desconectados de la fuente de energía o en corto circuito hasta que todo esté listo para disparar.

11. Manejar la mecha con cuidado para evitar daños al revestimiento.
12. Nunca emplee una mecha corta.
13. Encender la mecha con un encendedor especial diseñado para ese fin.
14. No se sostengan los explosivos en la mano para encender la mecha.

## **Al apisonar**

1. No apisona ningún explosivo que se haya sacado del cartucho.
2. Evitese todo apisonado violento. Nunca apisona un cebo.
3. Siempre asiente los explosivos dentro del barreno con arena, tierra, arcilla o algún otro material incombustible y adecuado para formar taco.
4. No imponga dobleces u otros daños en las mechas o en los alambres al apisonar.

### **Al detonar electricamente**

1. No desenrolle los alambres ni haga uso de detonadores eléctricos, mientras pase una tolvanera o esté cerca cualquier otra fuente de cargas masivas de electricidad.
2. No desenrolle los alambres ni haga uso de detonadores eléctricos salvo que estén a una distancia segura.
3. Mantener el circuito detonador completamente aislado de la tierra o de otros conductores, tales como alambres descubiertos, rieles, tuberías u otras rutas para corrientes vagabundas.
4. No mantenga alambres o cables eléctricos de cualquier índole cerca de los detonadores eléctricos o de cualquier otro explosivo, salvo en el momento y con el fin de detonar la carga.

5. Comprobar todo detonador eléctrico, ya sea en forma individual o dentro de un circuito en serie, empleando exclusivamente un galvanómetro de voladura diseñado específicamente para este fin.

6. No trate de disparar un detonador eléctrico individual, ni un circuito de detonadores eléctricos con una corriente menor a la que especifica el fabricante.

## **Antes y después de la detonación**

1. Nunca dispare una carga sin haber recibido una señal positiva de la persona encargada de vigilar que todo explosivo sobrante ha quedado en un lugar seguro, que todas las personas y vehículos estén a una distancia segura o bajo suficiente protección y que haya dado adecuada advertencia.

2. Cuando ha sido concluida una voladura no regrese al sitio, sino hasta que se hayan disipado el humo y los gases de la explosión.

3. No tratar de investigar una detonación fallida.

4. No perfore, barrene o levante un cartucho de explosión cuya detonación falló.

## **Como deshacerse de los explosivos**

1. No se deben dejar explosivos abandonados.

2. Nunca deje material explosivo, cartuchos vacíos, cajas o fósforos de cualquier otro material empleado en el empaque de los explosivos donde los puedan alcanzar niños o personas no autorizadas.

3. No se permite que cualquier plástico, madera, papel o material usado en el empaque de los explosivos se quemem en alguna estufa, chimenea o cualquier otro espacio encerrado, o que se use para cualquier otro fin. Todo este material debe quedar destruido, quemándose en algún sitio aislado y a la intemperie y no debe acercarse ninguna persona en un área de 30 mts, una vez que haya empezado a arder.

## **Sugerencias para reducir al mínimo los peligros de gases tóxicos librados por los explosivos**

1. Use el cartucho de explosivos con el diámetro máximo compatible con el trabajo que se pretende lograr.
2. No deben emplearse explosivos que manifiesten deterioro o daño.
3. No deben sacarse los explosivos de su cartucho.
4. No debe colocarse carga excesiva.
5. No debe agregarse papel o cualquier otro material combustible a la carga.
6. Se evitará toda condición que podría dar lugar al simple encendido en vez de la detonación de los explosivos.
7. Cuando se trabaja en húmedo, siempre deben usarse explosivos de una resistencia adecuada al agua y se detonará en el momento factible después de haber concluido la colocación de la carga.
8. Debe contenerse la carga con material incombustible de empaque.
9. Se asegura ventilación adecuada con el aire dirigido hacia los puntos de trabajo.



**10. Haga pruebas repetidas para asegurar que el aire empleado para la ventilación este libre de monóxido de carbono y otros gases nocivos.**

**11. Rocié la rezaga con agua.**

**12. Deje pasar el tiempo máximo factible, después de la voladura antes de regresar a revisar el sitio de trabajo.**

# **CONCLUSIONES**

**VI**

## **VI. Conclusiones**

**En la explotación de roca a cielo abierto tenemos que considerar varios factores para poder efectuar la explotación en la forma más adecuada posible. Debemos tener presente las condiciones naturales en que se encuentra el terreno para poder hacer una selección adecuada.**

**En una forma de dependencia se manifiesta la relación existente entre las condiciones del terreno y los objetivos deseados al efectuar un trabajo de esta naturaleza.**

**Varios factores de muy diversa índole existente pero los más importantes son:**

- Seguridad.
  - Magnitud de la obra.
  - Tamaño deseado de la roca.
  - Maquinaria con la que se cuenta
  - Acabado de los cortes
  - Economía
- Seguridad: Este es un factor que no sólo en trabajos de esta naturaleza ocupa un primer término, es la seguridad del trabajador más importantes a considerar aspectos en toda las diferentes actividades del ser humano
- Magnitud de la obra: Dependiendo de este factor será el tipo de maquinaria a emplear, aspectos de seguridad, no de trabajadores a emplear, frentes de ataque y magnitud de las voladuras.
- Tamaño deseado de la roca: Este es un factor del que dependerá el tipo de accesorios y voladura a emplear, además de las medidas a seguir para protección tanto de personal como de maquinaria y resguardo del material sobrante el cual en la mayoría de los casos deberá ser mínimo.

- **Maquinaria:** Como se mencionó anteriormente dependiendo de la magnitud a la obra será el tipo de maquinaria a emplear como pueden ser Track - Drill, Pailoader, Eucler, Tractores, etc.

- **Acabados de cortes:** Seleccionando el tipo de accesorios y voladura adecuado se tendrá un buen acabado en los cortes lo cual repercutirá en el aspecto económico.

- **Económico:** Factor por demás importante considerado en todos los aspectos de una obra de Ingeniería Civil.

Tomando todo lo anterior en cuenta para la realización de una obra de Ingeniería Civil se presentaron problemas de diversa naturaleza los cuales surgirán conforme avance en la obra y que no están contemplados en los estudios realizados de acuerdo al criterio del Ingeniero Civil y cuya solución será tomada por él.

# Indice

<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>II. Explosivos</b>	<b>2</b>
Potencia .....	3
Velocidad .....	3
Resistencia al agua .....	3
Densidad .....	3
Inflamabilidad .....	4
Emanaciones .....	4
Resistencia a la congelación .....	4
Sensibilidad .....	4
Selección .....	5
<b>III. Accesorios y equipo para voladura</b>	<b>6</b>
Explosivos detonantes .....	7
<u>Accesorios para voladuras</u> .....	<u>8</u>
<u>Mechas detonantes</u> .....	<u>8</u>
<u>Thermalita Ignitacord</u> .....	<u>9</u>
<u>Quarrycord</u> .....	<u>9</u>
<u>Primacord</u> .....	<u>9</u>
Detonadores .....	10
<u>A) Fulminantes ordinarios</u> .....	<u>10</u>
<u>b) Conectores o retardadores MS para Primacord</u> .....	<u>10</u>
<u>C) Conectores Ignitacord</u> .....	<u>10</u>
D) Encendedores de mecha de seguridad de varilla candente .....	11
<u>Estopines</u> .....	<u>11</u>

<u>Estopines eléctricos instantáneos</u> .....	11
<u>Estopines eléctricos de tiempo</u> .....	12
<u>Estopines eléctricos de tiempo Acude-Mark V</u> .....	12
<u>Tiempos de disparo</u> .....	14
<u>Estopines eléctricos de retardo MS (milisegundos)</u> .....	14
<u>Resistencia nominal de estopines eléctricos de retardos MS</u> .....	15
<u>Agentes Explosivos</u> .....	16
<u>Súper Mexamon D</u> .....	16
<u>Fovex Extra</u> .....	18
<u>Propiedades y especificaciones</u> .....	18
<u>Máquinas Explosoras</u> .....	20
<u>Descarga de Condensador</u> .....	20
<u>Generador</u> .....	20
<u>Instrumentos de pruebas</u> .....	21
<u>Galvanómetro de pruebas</u> .....	21
<u>Voltiohmetro para voladuras</u> .....	21
<u>Reostato</u> .....	21
<u>Equipo de Barrenación</u> .....	21
<u>Perforadoras</u> .....	25
<u>Perforadoras neumáticas de mano</u> .....	25
<u>Perforadoras pesadas</u> .....	25
<u>Perforadoras sin barrenas</u> .....	26
<u>Perforadoras giratorias</u> .....	27
<u>Perforadoras de carretilla</u> .....	28
<u>Perforadoras gemelas</u> .....	29
<u>Perforadoras de propulsión propia</u> .....	29
<u>Perforadora ligera de orugas</u> .....	29
<u>Perforadoras Portátiles de torre</u> .....	30
<u>Brocas</u> .....	33
<u>Barrenas y Brocas</u> .....	33
<u>Barrenas</u> .....	33
<u>Brocas</u> .....	34

#### **IV. Diseño y Voladuras**

**36**

<u>Simbología y terminología</u> .....	37
<u>Principios Básicos</u> .....	40
<u>Distribución de la carga</u> .....	47
<u>Resistencia de la roca a ser tronada</u> .....	50

Formula para determinar la carga de una tanda de barrenos múltiples .....	51
Constricciones o confinamiento del barreno .....	52
Grado de atacado y diámetro de los barrenos .....	53
Espaciamiento entre barrenos .....	55
Carga específica, fragmentación y lanzamiento .....	56
Separación frontal máxima de los barrenos .....	57
Sumario de las formulas para el calculo de cargas explosivas .....	60
Separación frontal máxima de los barrenos .....	62
Determinación de la carga de fondo y de la carga de columna .....	64
(Nomogramas 1a, 1b y 4) .....	64
Carga total por barreno .....	67
(nomograma 2) .....	67
Determinación de carga específica .....	69
(Nomograma 3) .....	69
Determinación de la resistencia específica a la voladura .....	71
(Nomograma 5) .....	71
Voladuras controladas .....	73
Barrenación en línea .....	75
<u>Trabajo abierto .....</u>	<u>76</u>
<u>Trabajo subterráneo .....</u>	<u>77</u>
Voladuras amortiguadas .....	78
<u>Trabajo abierto .....</u>	<u>78</u>
Trabajos subterráneos .....	84
<u>Voladuras suaves .....</u>	<u>85</u>
<u>Principio .....</u>	<u>85</u>
<u>Aplicación - trabajo subterráneo .....</u>	<u>85</u>
Precorte .....	88

## **V. Experiencias de Campo**

**93**

Al transportar explosivos .....	94
Cuando se almacenan los explosivos .....	95
Al hacer uso de los explosivos .....	96
Al preparar el cebo .....	97
Al perforar y cargar los barrenos .....	98
Al apisonar .....	99
Antes y despues de la detonación .....	100
Como deshacerse de los explosivos .....	100

Sugerencias para reducir al minimo los peligros de gases toxicos librados por los  
explosivos ..... 101

**VI. Conclusiones**

**103**