



**Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil**

**USO Y CONTROL DE EXPLOSIVOS APLICADOS EN EXPLOTACIÓN DE  
BANCOS DE MATERIAL.**

**LUIS ALONSO CHÁVEZ BARRIENTOS**

Asesorado por Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa

Guatemala, octubre de 2005

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**USO Y CONTROL DE EXPLOSIVOS APLICADOS EN  
EXPLOTACIÓN DE BANCOS DE MATERIAL.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN  
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR  
LUIS ALONSO CHÁVEZ BARRIENTOS**

**ASESORADO POR: ING. RAFAEL ENRIQUE MORALES OCHOA**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**GUATEMALA, OCTUBRE DE 2005**

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **USO Y CONTROL DE EXPLOSIVOS APLICADOS EN EXPLOTACIÓN DE BANCOS DE MATERIAL,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 11 de octubre de 2005.

**Luis Alonso Chávez Barrientos**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos.
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez.
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada.
VOCAL IV	Br. Kenneth Isuur Estrada Ruiz.
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva.
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas.

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios.
EXAMINADOR	Ing. Ronald Galindo Cabrera.
EXAMINADOR	Ing. Pablo De León Rodríguez.
EXAMINADOR	Ing. Edgar Aragón Guzmán.
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas.

## **ACTO QUE DEDICO**

**A:**

**DIOS**

Por haberme permitido alcanzar esta meta.

**MIS PADRES**

Arturo Alonso Chávez y Zoila Elisa Barrientos Hernández, agradeciéndoles el apoyo incondicional a mi lado y por compartir el ideal de alcanzar una meta que hoy se realiza.

**MI ESPOSA**

Vilma Elizabeth Cordón Guillén, por apoyarme incondicionalmente a lo largo de mi carrera.

**MI HIJA**

Melannie Fabiola Chávez Cordón, con cariño y aprecio.

## **AGRADECIMIENTO ESPECIAL**

**A:**

**MIS COMPAÑEROS DE ESTUDIO.**

Por los momentos que hemos recorrido a lo largo de la vida, deseándoles éxitos.

**ING. RAFAEL MORALES.**

Por su apoyo técnico y su asesoría al presente trabajo de graduación.

**LA FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC.**

Por permitirme forjar en sus aulas uno de mis más grandes anhelos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. INGENIERÍA DE EXPLOSIVOS	1
1.1 Fuentes de la energía de los explosivos	1
1.2 Energía de choque	2
1.3 Energía de gas	4
1.4 Explosivos químicos	5
1.5 Identificación de los problemas con las mezclas	11
2. MECANISMOS DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA	13
2.1 La energía de choque en la fragmentación de roca	13
2.2 Cargas confinadas en barrenos	14
2.3 Rigidez del banco	17
2.4 Proceso de fragmentación	20
3. PRODUCTOS EXPLOSIVOS	21
3.1 Características ambientales de los explosivos	21
3.1.1 Sensibilidad	21
3.1.2 Resistencia al agua	23
3.1.3 Vapores	25
3.1.4 Flamabilidad	27
3.1.5 Resistencia a la temperatura	28
3.2 Características de desempeño de los explosivos	29

3.2.1	Sensitividad	29
3.2.2	Velocidad de detonación	30
3.2.3	Presión de detonación	31
3.2.4	Densidad	32
3.2.5	Potencia	34
3.2.6	Cohesividad	35
3.3	Explosivos Comerciales	36
3.3.1	Dinamita	37
3.3.2	Dinamita granulada	38
3.3.2.1	Dinamita pura	38
3.3.2.2	Dinamita extra de alta densidad	39
3.3.2.3	Dinamita extra de baja densidad	39
3.3.3	Dinamita gelatina	39
3.3.3.1	Dinamita gelatina pura	39
3.3.3.2	Dinamita gelatina de amonio	40
3.3.3.3	Dinamita semigelatina	40
3.3.4	Explosivos tipo suspensión	40
3.3.4.1	Suspensiones encartuchadas	41
3.3.4.2	Suspensiones a granel	42
3.4	Agentes explosivos secos	43
3.4.1	Agentes explosivos encartuchados	44
3.4.2	ANFO a granel	45
3.5	Explosivos de dos componentes	45
4.	INICIADORES Y DISPOSITIVOS DE RETARDO	47
4.1	Fulminantes eléctricos	47
4.1.1	Estopines instantáneos	49
4.1.2	Estopines de retardo de período largo	49
4.1.3	Estopines de retardo en milisegundos	49
4.2	Estopines de retardo electrónicos	49

4.3	Magnadet	50
4.3.1	Principios de operación del detonador e iniciador Magnadet	50
4.3.2	Fuente de iniciación	51
4.3.3	Descripción del iniciador	51
4.3.4	Iniciadores deslizantes Magnadet	52
4.3.5	Características de seguridad declaradas	53
4.3.6	Ventajas operacionales declaradas	54
4.4	Maquina explosora secuencial	55
4.5	Sistemas de iniciación no eléctricos	56
4.5.1	Sistemas de iniciación Detaline	56
4.5.2	Cordón Detaline	57
4.5.3	Retardos MS de superficie Detaline	57
4.5.4	Retardos MS de fondo Detaline	58
4.6	Cebos de retardo	58
4.7	Sistemas de iniciación de tubos de choque	59
5.	SELECCIÓN DE CEBOS Y REFORZADORES	61
5.1	Diferencia entre cebos y reforzadores	61
5.2	Tipos de cebos	61
5.2.1	Determinación de la cantidad necesaria	62
5.2.2	Criterios de selección de un cebo	64
5.2.3	Guías de selección de cebos	64
5.3	Reforzadores	65
5.4	Efectos del cordón detonante en la liberación de energía	66
6.	DISEÑO DE VOLADURAS	69
6.1	Bordo	69
6.1.1	Ajustes para el tipo de roca y explosivo	71
6.1.2	Correcciones por el número de hileras	75
6.1.3	Corrección por factores geológicos	75
6.2	Distancia del taco	78

6.3	Sub-Barrenación	81
6.4	Selección del diámetro del barreno	85
6.4.1	Consideraciones de voladura	85
6.4.2	Tiempo de iniciación y tolerancia del iniciador	89
6.5	Efecto del retardo de tiempo en la fragmentación	89
6.5.1	Retardos de barreno a barreno	90
6.5.2	Retardos de hilera a hilera	90
6.6	Efectos del tiempo de iniciación en los barrenos	93
6.6.1	Tamaño de la fragmentación	94
6.6.2	Apilamiento o reparto del material	94
6.6.3	Golpe de aire y roca en vuelo	95
6.6.4	Vibración máxima	95
6.6.5	Traslape en el tiempo de disparo	96
6.6.6	Efectos del tiempo y la distancia	97
6.6.7	Tolerancia de los iniciadores	102
6.6.8	Sobre-rompimiento trasero y lateral	104
7.	DISEÑO DE PLANTILLAS	105
7.1	Principios de las plantillas de voladuras de producción	105
7.1.1	Iniciación instantánea y bancos bajos	107
7.1.2	Iniciación instantánea y bancos altos	108
7.1.3	Iniciación retardada y bancos bajos	110
7.1.4	Iniciación retardada y bancos altos	111
7.2	Fragmentación máxima	112
7.3	Fragmentación de roca y control de pared	114
7.3.1	Fragmentación	115
7.3.2	Resultados de Campo	116
7.3.3	Efectos de la fragmentación en el control de la pared	117
7.4	Producción de Rip-Rap	117
7.5	Consideraciones del apilamiento de la roca	119

8. MEDIDAS DE SEGURIDAD	121
8.1    Medidas de seguridad en el almacenaje de explosivos	121
8.2    Medidas de seguridad en el transporte de explosivos	123
8.3    Cosas que no deben hacerse en el manejo de explosivos	124
CONCLUSIONES	131
RECOMENDACIONES	133
REFERENCIAS	135
BIBLIOGRAFIA	137
ANEXO. Problema resuelto, aplicado a la extracción de roca de un banco de material.	



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.1.	Voladura con plasteo	4
1.2	Reacción ideal del carbón – oxígeno	8
1.3	Reacción ideal del hidrógeno – oxígeno	8
1.4	Reacción ideal del nitrógeno – nitrógeno	9
1.5	Reacción no ideal del carbón – oxígeno	10
1.6	Reacción no ideal de nitrógeno – oxígeno	10
1.7	Pérdida de energía en el ANFO	12
2.1	Energía reflejada y desperdiciada en voladuras de plasteo	14
2.2	Influencia de la distancia a la cara en el sistema de grietas radiales	16
2.3	Diagrama del doblamiento asimétrico	18
2.4	Diagrama de doblamiento en Cantiliver	18
3.1	Mangas con ANFO	43
3.2	Formulaciones con agentes explosivos	44
4.1	Fulminante eléctrico instantáneo	48
4.2	Fulminante eléctrico de retardo	48
4.3	Esquema del armado del Magnadet	51
4.4	Anillo de Ferrita cubierto de plástico	52
4.5	Iniciador Magnadet	53
4.6	Iniciador deslizante Magna	54
4.7	Detaline	57
5.1	Cebo y reforzador en un barreno	62
6.1	Símbolos para el diseño de voladuras	70

6.2	Desempeño de la zona de taco	80
6.3	Barreno relleno debido a estrato suave	82
6.4	Problemas del estrato suave encima del nivel de piso	83
6.5	Sub-barrenación y niveles máximos de esfuerzos de tensión	84
6.6	Regla de sesenta	88
6.7	Apilado y levantamiento resultantes del tiempo de iniciación	93
6.8	Dos ondas separadas	98
6.9	Ondas que se traslapan	98
6.10	Direccionalidad de la vibración, caso general, abarca todos los posibles azimuts	99
6.11	Direccionalidad de la vibración perpendicular a la de la voladura	100
6.12	Direccionalidad de la vibración a lo largo de la hilera de barrenos	100
6.13	La onda de vibración pasa el segundo barreno antes que éste dispare sin tener efectos direccionales	101
7.1	Zona quebrantada debido al espaciamiento cercano	106
7.2	Paredes ásperas debidas al espaciamiento excesivo	107
7.3	Formas de cráteres típicas (vista en planta)	114
7.4	Producción de Rip-Rap Grande, $S = B$	118
7.5	Corte en V, retardos progresivos, $S = 1.4B$	120

## TABLAS

I	Ingredientes de los explosivos	6
II	Sensibilidad (diámetro crítico)	22
III	Resistencia al agua	24
IV	Calidad de vapores	26
V	Resistencia a la temperatura	28
VI	Sensitividad	30
VII	Velocidad de detonación (m/s)	31
VIII	Presión de detonación	32
IX	Densidad	33
X	Carga máxima del cordón	67
XI	Densidad de las rocas	73
XII	Correcciones por el número de hileras	75
XIII	Correcciones por el tipo de depósitos	77
XIV	Correcciones para estructura geológica	77
XV	Problemas potenciales relacionados con la relación de rigidez L/B	86
XVI	Retardo de tiempo entre barrenos (Voladura en Banco)	90
XVII	Retardo de tiempo entre hileras	91



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>A</b>	Factor de la roca -7 para rocas medias, 10 para rocas duras y altamente fisuradas, 13 para duras, rocas con fisuras débiles.-
<b>ANFO</b>	Ammonium Nitrate and Fuel Oil.
<b>B</b>	Bordo (m).
<b>°C</b>	Grados Celsius.
<b>cm.</b>	Centímetro.
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico.
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono.
<b>De</b>	Diámetro del explosivo (mm).
<b>d<sub>e</sub></b>	Densidad de Carga (Kg/m).
<b>Dh</b>	Diámetro del Barreno (m).
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gramos por centímetro cúbico.
<b>g/m</b>	Gramos por metro.
<b>H</b>	Profundidad del barreno (m).
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua.
<b>J</b>	Sub-barrenación (m).
<b>Kd</b>	Factor de corrección por estratos.
<b>Kg.</b>	Kilogramo.
<b>Kr</b>	Factor de corrección por hileras.
<b>Ks</b>	Factor de corrección por estructura geológica.
<b>L</b>	Altura de banco (m).
<b>L/B</b>	Relación de rigidez del banco.
<b>LOX</b>	Liquid Oxygen and Carbon.
<b>mm</b>	Milímetro.
<b>ms</b>	Milisegundos.

<b>m/s</b>	Metros por segundo.
<b>ms/m</b>	Milisegundos por metro.
<b>N<sub>2</sub></b>	Gas Nitrógeno.
<b>NO</b>	<b>Óxido de Nitrógeno.</b>
<b>NO<sub>2</sub></b>	Bióxido de Nitrógeno.
<b>P</b>	Presión de detonación (Kbar).
<b>PC</b>	Longitud de la columna de explosivo (m).
<b>PETN</b>	Tetranitrato de pentaeritrol.
<b>Q</b>	Masa de TNT equivalente en energía a aquella de la carga de explosivo en cada barreno (Kg.).
<b>S</b>	Espaciamiento (m).
<b>S<sub>Ge</sub></b>	Gravedad específica o densidad del explosivo (g/cm <sup>3</sup> ).
<b>S<sub>Gr</sub></b>	Gravedad específica o densidad de la roca (g/cm <sup>3</sup> ).
<b>Sz</b>	Tamaño de la partícula (m).
<b>T</b>	Taco (m).
<b>T<sub>H</sub></b>	Constante de retardo barreno a barreno (ms/m).
<b>t<sub>H</sub></b>	Retardo barreno a barreno (ms).
<b>TNT</b>	Trinitotolueno.
<b>T<sub>R</sub></b>	Factor de tiempo entre hileras (ms/m).
<b>t<sub>r</sub></b>	Retardo entre hileras (ms).
<b>V</b>	Volumen de roca explotado por barreno (m <sup>3</sup> ).
<b>Ve</b>	Velocidad de detonación (m/s).
<b>x</b>	Tamaño medio de fragmentación (cm.).

## GLOSARIO

<b>Azimut</b>	Son los ángulos horizontales que se miden a partir del norte, en dirección de las manecillas del reloj y varía entre 0° y 360°.
<b>Barreno</b>	Son los agujeros cilíndricos que se perforan en un banco de piedra, en los cuales se deposita el material explosivo.
<b>Bordo</b>	Se define como la distancia más corta al punto de alivio al momento que un barreno detona.
<b>Cebo</b>	Se define como una unidad explosiva que contiene un iniciador.
<b>Cebos de retardo</b>	Son unidades de alto explosivo sensitivo con un iniciador no eléctrico individual que se inicia a través de una línea de cordón detonante.
<b>Cohesividad</b>	Se define como la habilidad de un explosivo de mantener su forma original.
<b>Cordón Detaline</b>	Es un cordón detonante de baja energía que tiene una carga de tetranitrato de pentaeritrol (PETN) de 0.5 gramos por metro.

<b>Densidad</b>	Es la relación de la densidad del explosivo con la densidad del agua.
<b>Energía de choque</b>	Es la energía que se libera durante el proceso de detonación comúnmente llamada presión de detonación.
<b>Energía de gas</b>	Es la energía que causa la mayor parte de la fragmentación de la roca durante una voladura con cargas confinadas en los barrenos.
<b>Estopines</b>	Son fulminantes eléctricos que están formados de un casquillo cilíndrico de aluminio o cobre que contiene una serie de cargas explosivas.
<b>Flamabilidad</b>	Es la característica que tiene un explosivo para iniciar la reacción con facilidad a partir de una chispa, flama o fuego.
<b>Plantilla de voladura</b>	Consiste en colocar barrenos diseñados, adecuadamente e individualmente, dentro de una relación geométrica entre ellos y la cara libre.
<b>Plasteo</b>	Cubrir con lodo el explosivo para volar piedras grandes.

<b>Potencia</b>	Se refiere al contenido de energía de un explosivo, que a su vez, es la medida de la fuerza que puede desarrollar y su habilidad para hacer un trabajo.
<b>Presión de detonación</b>	Es la que se obtiene casi instantánea como resultado del movimiento de la onda de choque a través del explosivo.
<b>Reforzador</b>	Es una unidad explosiva de diferente composición a la de la carga principal y no contiene un dispositivo iniciador.
<b>Resistencia al agua</b>	Es la habilidad de un explosivo de soportar el contacto con el agua sin sufrir deterioro en su desempeño.
<b>Rip-Rap</b>	Es roca con un diámetro mayor que se utiliza normalmente para recubrir orillas de canales o laderas para protegerlas de los efectos del agua y la erosión, puede pesar unos cuantos kilogramos o unas cuantas toneladas dependiendo del uso final que se le dé al producto.
<b>Sensibilidad</b>	Es la característica que tiene un explosivo para propagar la reacción a todo lo largo de la carga.
<b>Sensitividad</b>	Está definida por la cantidad de energía que un explosivo requiere para detonar confiablemente.

**Sub-**

**Barrenación** Es la profundidad a la cual se perforará el barreno por debajo del nivel de piso propuesto, para asegurar que el rompimiento ocurrirá a nivel.

**Taco** Se refiere a la porción superior del barreno que normalmente se rellena con material inerte para confinar los gases de la explosión.

**Velocidad**

**de**

**detonación** Es la velocidad a la cual la reacción se mueve a lo largo de la columna de explosivo.

## RESUMEN

Este trabajo de graduación tiene como misión dar un acercamiento sistemático al diseño de voladuras, específicamente, aplicado a la explotación de bancos de material, en virtud de que, en la actualidad, muchos de los problemas que presentan los proyectos de ingeniería se resuelven utilizando material explosivo.

En los primeros tres capítulos, se describe desde la fuente de energía de los explosivos, cuál es la mecánica de fragmentación de las rocas y los productos explosivos existentes en el mercado, así como las características ambientales y de desempeño de los mismos.

En los capítulos cuatro y cinco se abordan temas acerca de iniciadores, dispositivos de retardo, cebos y reforzadores que se usan en la actualidad, además, se dan lineamientos para seleccionarlos adecuadamente, con el fin de que la detonación de una voladura se realice eficientemente.

Los parámetros de diseño de una plantilla de voladura, tales como: bordo, taco, sub-barrenación, espaciamiento y tiempo de iniciación, se definen y calculan en los capítulos seis y siete; los resultados de los mismos deben ser revisados cuidadosamente, ya que, de haber error, en alguno de ellos, provocaría una voladura deficiente, insegura y con niveles de vibración y golpe de aire altos.

Debido a que muchos de los accidentes en voladura de rocas es por negligencia del personal involucrado, en el capítulo ocho se listan las medidas

de seguridad que deben aplicarse en el almacenaje, transporte, uso y manejo de los explosivos.

Por último, se resuelve un problema en el cual se calcula y diseña una plantilla de voladuras con la finalidad de explotar un banco de roca caliza, para producir roca de un tamaño determinado.

## **OBJETIVOS**

### **General:**

Dar un acercamiento sistemático al diseño eficiente y seguro de plantillas de voladuras, aplicado a la explotación de bancos de material.

### **Específicos:**

1. Conocer las diferentes clases de explosivos existentes en el mercado, así como las características ambientales y de desempeño de los mismos con la finalidad de poder seleccionar el explosivo idóneo al diseñar una plantilla de voladura.
2. Conocer qué tipo de iniciadores y dispositivos de retardo existen actualmente y determinar cuándo y cómo aplicarlos en una voladura de roca.
3. Poder diferenciar entre un cebo y un reforzador, conocer los tipos de cebos que existen y los criterios a considerar para seleccionar un cebo.
4. Aprender a calcular los parámetros de diseño de una plantilla de voladura, con el propósito de explotar un banco de material de manera eficiente, segura y con niveles de vibración y golpe de aire razonables.

5. Estar en la capacidad de diseñar un plantilla de voladura, de tal manera, que al explotar un banco de material, se pueda producir roca o agregados de un tamaño requerido.
6. Conocer cuáles son las medidas de seguridad que se deben considerar en el uso, manejo, almacenaje y transporte de explosivos.

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de las materias primas que utiliza la sociedad, actualmente, son producidas con el uso de explosivos en las minas alrededor del mundo. La construcción de carreteras, canales y edificios, se logra gracias a la ayuda de los explosivos. Inclusive la comida que se consume, diariamente, no existiría sin la ayuda de explosivos para producir fertilizantes y metales con los cuales se fabrican tractores y otros equipos agrícolas.

Los problemas en la explotación de bancos de material al utilizar explosivos, son el resultado de un diseño de voladura deficiente, negligencia en el manejo de los mismos, mala ejecución del barrenado, mal cargado, según el diseño propuesto o porque la masa rocosa fue erróneamente evaluada.

Los parámetros de diseño tales como: bordo, taco, sub-barrenación, espaciamiento y tiempo de iniciación, deben ser calculados, cuidadosamente, para que una voladura funcione de manera eficiente, segura y con niveles de vibración y golpe de aire razonables.

En este trabajo de graduación se contó con la colaboración de la empresa Maya Químicos S. A., que proporcionó bibliografía y autorizó visitas técnicas a su planta de producción de ANFO ubicada en Sanarate, El Progreso, las cuales sirvieron para investigar las medidas de seguridad empleadas en el uso, manejo, almacenaje y transporte de explosivos; además, ha sido elaborada para dar un acercamiento sistemático al diseño de plantillas de voladuras aplicado a la explotación de bancos de material.

# 1 INGENIERÍA DE EXPLOSIVOS.

## 1.1 Fuentes de la energía de los explosivos.

Cuando los explosivos reaccionan químicamente, se liberan dos tipos principales de energía. El primero se llama energía de choque y el segundo, energía de gas. Ambos tipos de energía se liberan durante el proceso de detonación.

El responsable de voladuras puede seleccionar explosivos con diferentes proporciones de energía de choque o de gas para adaptarlas a un caso en particular. Si los explosivos se usan sin confinar, como cuando se cubre con lodo el explosivo para volar piedras grandes (comúnmente llamado plasteo), o en el corte de elementos estructurales para demolición, la selección de un explosivo con gran energía de choque es muy provechosa. Si los explosivos se usan de manera continuada dentro de un barreno, la selección de un explosivo que aparte una gran energía de gas es el indicado.

Para ayudarnos a imaginar la diferencia entre las dos energías, comparemos la reacción del alto y bajo explosivo. Los bajos explosivos son aquellos que se deflagran o queman rápidamente. Estos explosivos pueden tener velocidades de reacción de 600 a 1500 metros por segundo y no producen energía de choque, un ejemplo de estos es la pólvora negra. Los altos explosivos detonan y producen energía de gas y energía de choque. Los bajos explosivos sólo producen energía de gas durante el proceso de combustión.

Durante una detonación de alto explosivo, la presión de choque viaja al frente de la reacción, a través del explosivo antes de que la energía de gas sea liberada. Esta energía de choque generalmente tiene una presión mayor a la energía de gas. Una vez que la energía de choque pasa, la energía de gas se libera. Proporcionalmente la energía de gas de un explosivo detonante (alto explosivo) es mucho mayor que la energía de gas liberada por un bajo explosivo.

## **1.2 Energía de choque.**

Resumiendo: en los altos explosivos, el pico de presión viaja a través del explosivo antes que la energía de gas sea liberada. Por lo tanto, hay dos presiones distintas y separadas, resultado de la reacción de un alto explosivo y sólo una en el caso de un bajo explosivo. La presión de choque es una presión transitoria que viaja a través del explosivo a la velocidad de reacción y es seguida de la presión de gas.

Se cree comúnmente que la energía de choque resulta de la presión de detonación de la explosión. La presión de detonación está en función directa de la densidad del explosivo y la velocidad de detonación. Se calcula multiplicando la densidad del explosivo por la velocidad de detonación al cuadrado y es una forma de energía cinética. El cálculo de la presión de detonación es muy complejo. Existen varios modelos de computadora para aproximar el resultado de esta presión. Desgraciadamente, los programas de computadora arrojan respuestas muy variadas. Hasta hace poco, no existía un método físico para medir la presión de detonación; hoy en día éstos ya existen y proporcionan mediciones exactas en el laboratorio, con esto se podrán corregir paulatinamente los programas de computadora. Hasta que esto no suceda, se

pueden usar muchas fórmulas para obtener un número que tal vez se aproxime a la presión de detonación. Podemos poner este ejemplo:

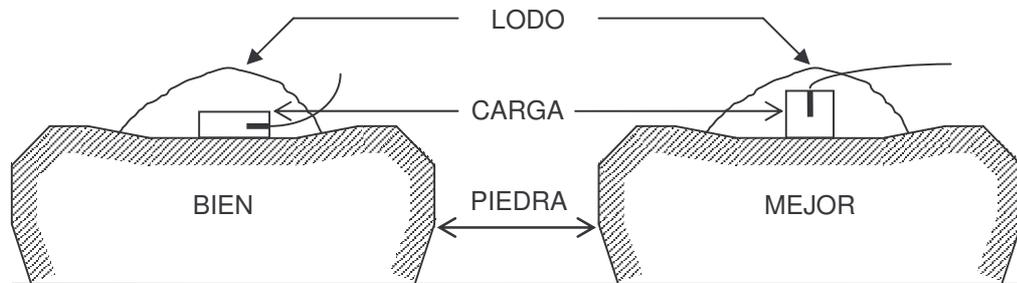
$$P = \frac{4.5 \times 10^{-6} V_e^2 d}{1 + 0.8d}$$

donde:

P	=	Presión de detonación	(Kbar)
d	=	Densidad del explosivo	(g/cm <sup>3</sup> )
V <sub>e</sub>	=	Velocidad de detonación	(m/s)

La presión de detonación o energía de choque puede ser considerada una forma de energía cinética y su valor máximo se da en la dirección de propagación, esto significa que la presión de detonación será máxima en el extremo opuesto del cartucho al cual se inició la reacción. Es una creencia general que la presión de detonación a los lados del cartucho es prácticamente cero, ya que la onda de presión no se extiende a los lados del cartucho. Para obtener los efectos máximos de la presión de detonación de un explosivo, es necesario colocar los explosivos sobre el material que se va a volar e iniciar la reacción del lado opuesto al que está en contacto con el material. El colocar el cartucho de lado y dispararlo de manera que la detonación sea paralela a la superficie del material, reduce los efectos de la presión de detonación; de esta forma el material está sujeto a la presión causada por la expansión radial de los gases, una vez que la onda de detonación ha pasado. Esta aplicación se puede observar en la voladura de piedras grandes con plasteo o en la colocación de cargas externas en elementos estructurales durante demoliciones (Figura 1.1).

Figura 1.1 Voladura con plasteo



Para usar al máximo la presión de detonación es deseable tener la mayor área de contacto posible entre el explosivo y el material. El explosivo debe ser iniciado en el extremo opuesto al que está en contacto con el material; debe seleccionarse un explosivo que tenga una velocidad de detonación y densidad altas. La combinación de alta densidad y alta velocidad de detonación resultará en una alta presión de detonación.

### 1.3 Energía de gas.

La energía de gas liberada durante el proceso de detonación, es la causa de la mayor parte de la fragmentación de la roca durante una voladura con cargas confinadas en los barrenos. La presión de gas, frecuentemente llamada presión de la explosión, es la presión que los gases en expansión oponen contra las paredes del barreno después que la reacción química ha terminado. La presión de la explosión resulta de la cantidad de gases liberados por unidad de peso del explosivo y de la cantidad de calor liberada durante la reacción. Entre más alta sea la temperatura producida, mayor será la presión del gas. Si se libera mayor cantidad de gas a la misma temperatura, la presión también se incrementará. Para obtener un valor rápidamente, se supone que la presión de gas es de aproximadamente la mitad de la presión de detonación.

Debe señalarse que esto es sólo una aproximación y que pueden existir condiciones donde la presión de la explosión sobrepase a la presión de detonación. Esto explica el éxito del ANFO, el cuál tiene una presión de detonación relativamente baja y una presión de explosión relativamente alta. Las presiones de explosión son calculadas con modelos de computadora o bien con pruebas subacuáticas. Las presiones de explosión pueden medirse también directamente en los barrenos, sin embargo, pocos fabricantes de explosivos usan esta nueva técnica para catalogar sus productos. Una revisión de la química básica de los explosivos nos ayudará a comprender como los metales pulverizados y otras sustancias afectan a la presión de la explosión.

#### **1.4 Explosivos químicos.**

Los explosivos químicos son materiales que pasan por reacciones químicas muy rápidas para liberar productos gaseosos y energía. Estos gases bajo altas presiones liberan fuerza sobre las paredes del barreno, lo que provoca que la roca se fracture.

Los elementos que forman los explosivos, generalmente se consideran ya sea elementos combustibles o elementos oxidantes (Tabla I). Los explosivos usan el oxígeno como elemento oxidante. El Nitrógeno es un elemento común en los explosivos y se encuentra en forma líquida o sólida, pero una vez que reacciona forma Nitrógeno gaseoso. Algunas veces podemos encontrar explosivos que contengan otros elementos además de los combustibles y los oxidantes. Los metales en polvo, tales como el Aluminio, se utilizan en algunas fórmulas. La razón para utilizarlos es que, durante la reacción, los metales en polvo generan calor. Este calor eleva la temperatura de los gases, resultado de

la reacción de otros ingredientes, provocando con esto una presión de explosión mayor.

Tabla I. Ingredientes de los explosivos

<b>Ingrediente</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Función</b>
Nitroglicerina	$C_3H_5O_9N_3$	Base Explosiva
Nitrocelulosa	$C_6H_7O_{11}N_3$	Base Explosiva
Trinitotolueno (TNT)	$C_7H_5O_6N_3$	Base Explosiva
Nitrato de Amonio	$H_4O_3N_2$	Portador de Oxígeno
Nitrato de Sodio	$NaNO_3$	Portador de Oxígeno
Diesel	$CH_2$	Combustible
Pulpa de Madera	$C_6H_{10}O_5$	Combustible
Carbón	C	Combustible
Polvo de Aluminio	Al	Sensibilizador, Combustible
Carbonato de Calcio	$CaCO_3$	Antiácido
Óxido de Zinc	ZnO	Antiácido
Cloruro de Sodio	NaCl	Supresor de Flama

Los explosivos pueden contener otros ingredientes que en realidad no aportan nada a la energía de los explosivos en sí. Estos ingredientes se les añaden a los explosivos para bajar la sensibilidad o incrementar el área de contacto. Ciertos ingredientes tales como el carbonato de calcio o el óxido de zinc funcionan como antiácidos para incrementar la vida en almacén del explosivo. La sal de mesa común, de hecho, hace que un explosivo sea menos eficiente ya que actúa como un supresor de flama y esto enfría la reacción. Por otro lado el añadir la sal permite usar el explosivo en ambientes saturados de

metano, ya que una flama menos caliente y de corta duración, hace menos probable que se provoque una explosión del metano. Esta es la razón por lo que los explosivos permisibles se usan en minas de carbón o en túneles en roca sedimentaria donde se pueda encontrar metano.

Los elementos básicos o ingredientes que producen trabajo directo en las voladuras, son aquellos que generan gases cuando reaccionan, tales como: el carbón, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno.

Cuando el carbón reacciona con el oxígeno, puede formar ya sea, monóxido o bióxido de carbono. Para poder obtener la máxima temperatura de una reacción, deseamos que los elementos se oxiden completamente, en otras palabras, que se forme bióxido de carbono en vez de monóxido de carbono. Para poder liberar el máximo de energía de la reacción explosiva, los elementos deben reaccionar y formar los siguientes productos:

2. El carbono reacciona para formar bióxido de carbono (Figura 1.2).
3. El hidrógeno reacciona para formar agua (Figura 1.3).
4. El nitrógeno, sólido o líquido, reacciona para formar nitrógeno gaseoso (Figura 1.4).

Si sólo ocurren las reacciones ideales del carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, no queda ningún átomo de oxígeno libre ni tampoco hace falta ninguno. El explosivo tiene balance de oxígeno y produce la misma cantidad de energía.

Figura 1.2 Reacción ideal del carbón – oxígeno

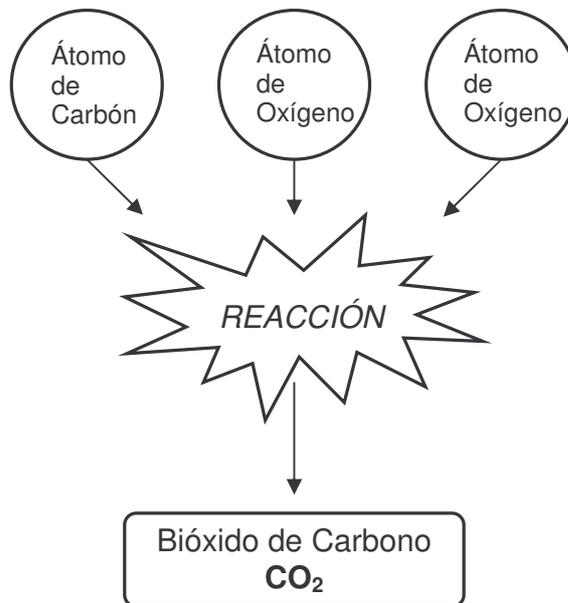


Figura 1.3 Reacción ideal del hidrógeno – oxígeno

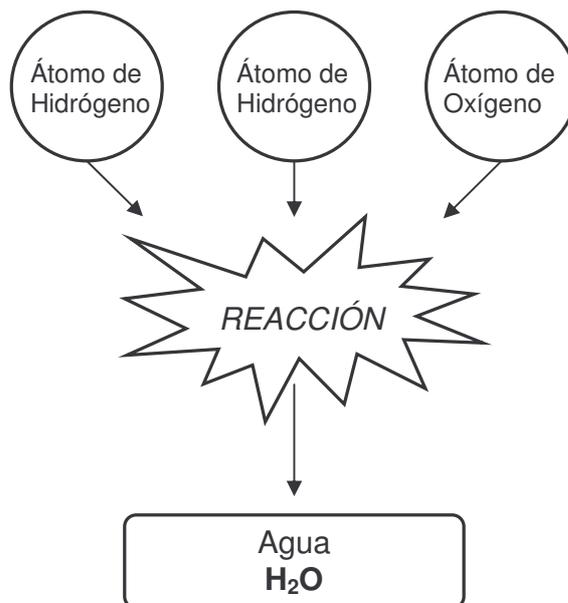
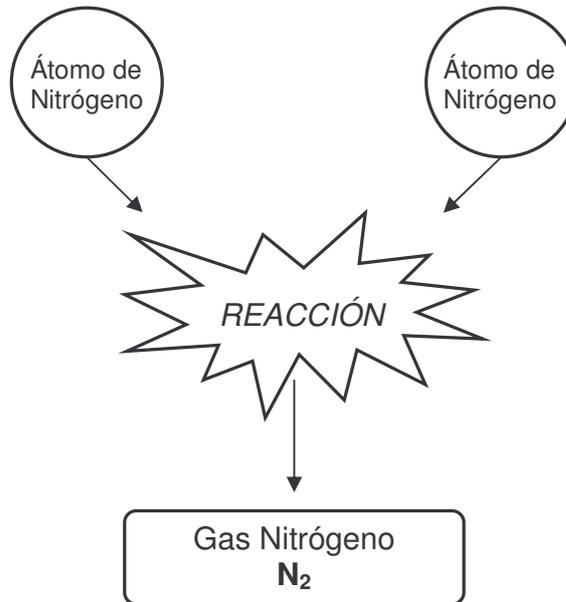


Figura 1.4 Reacción ideal del nitrógeno – nitrógeno



Si se mezclan dos ingredientes, tales como el nitrato de amonio y el diesel, y se agrega diesel en exceso a la mezcla, se dice que la reacción explosiva tiene balance de oxígeno negativo. Esto significa que no hay suficiente oxígeno para combinarse totalmente con el carbón y el hidrógeno y formar los productos finales deseados. En cambio lo que ocurre es que queda carbón libre, así que se liberará monóxido de carbono (Figura 1.5).

Si se le agrega poco combustible a la mezcla de nitrato de amonio y diesel, entonces ésta tiene oxígeno en exceso, el cual no puede reaccionar con el carbón y el hidrógeno. A esto se le llama reacción con balance de oxígeno positivo. Lo que ocurre es que el nitrógeno, que generalmente es un gas inerte, reaccionará formando óxidos de nitrógeno (Figura 1.6). Si éstos se forman, aparecerán gases de color ocre y se reducirá la energía de la reacción. La energía se reduce ya que los productos de la reacción ideal liberan calor al

formarse, los óxidos de nitrógeno, en cambio, absorben calor cuando se forman.

Figura 1.5 Reacción no ideal del carbón - oxígeno

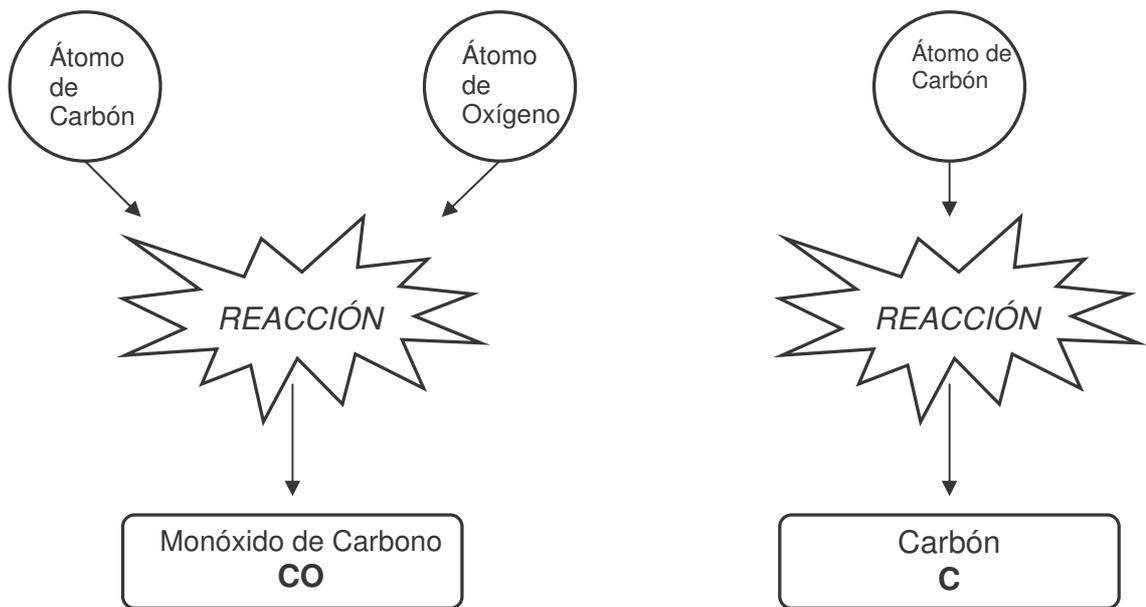
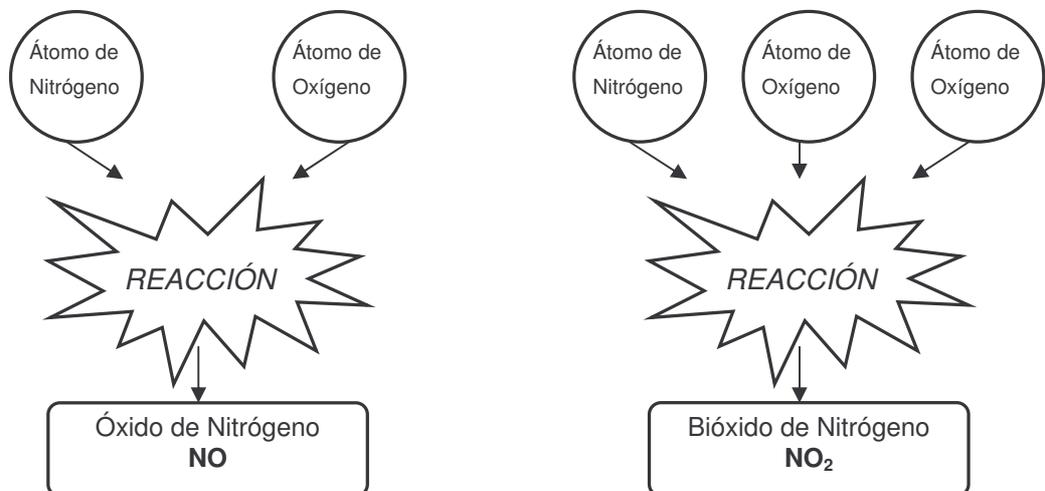


Figura 1.6 Reacción no ideal de nitrógeno – oxígeno



#### **1.41 Identificación de los problemas con las mezclas.**

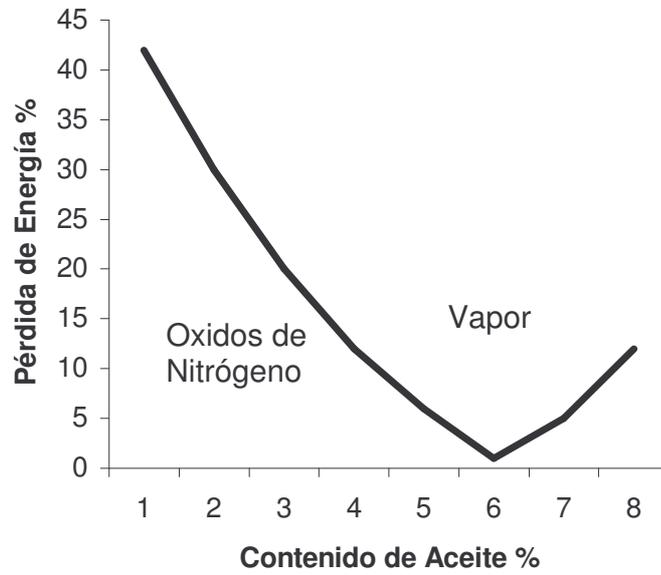
Existen signos visuales de la adecuada o inadecuada liberación de energía. Los colores de los gases son indicadores de la eficiencia de la reacción que se relaciona con la liberación de la energía. Cuando aparece un vapor gris claro, el balance de oxígeno es casi ideal y se libera el máximo de energía. Cuando los gases son de color ocre o amarillo, son indicación de una reacción ineficiente que puede deberse a una mezcla con balance de oxígeno positivo. Las mezclas con balance de oxígeno negativo producen gases de color gris oscuro y pueden dejar carbón en las paredes del barreno.

Para demostrar la importancia del balance de oxígeno en la liberación de energía, uno puede recurrir al ejemplo del nitrato de amonio y diesel que es un explosivo muy común. Ya sea que se le añada poco o mucho diesel al nitrato de amonio, ocurrirán reacciones no deseadas que provocarán la pérdida de energía.

La Figura 1.7 muestra la pérdida de energía contra el porcentaje de diesel en la mezcla. Se puede observar que la cantidad óptima de diesel es de aproximadamente 6%. Cuando se agrega diesel en cantidad insuficiente y demasiado oxígeno queda en la mezcla, se producen óxidos de nitrógeno y ocurre una gran pérdida de energía. Con un 1% de diesel la pérdida de energía es de 42% aproximadamente. Si se agrega diesel en demasía, las pérdidas de energía no son tan severas como en el caso anterior. Cuando el contenido de diesel es mayor a 6%, se formará monóxido de carbono y carbón puro.

Estos signos visuales le pueden dar al responsable de las voladuras una indicación de si los explosivos están funcionando de manera adecuada o no.

Figura 1.7 Pérdida de energía en el ANFO



## **2 MECANISMOS DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA.**

### **2.1 La energía de choque en la fragmentación de roca.**

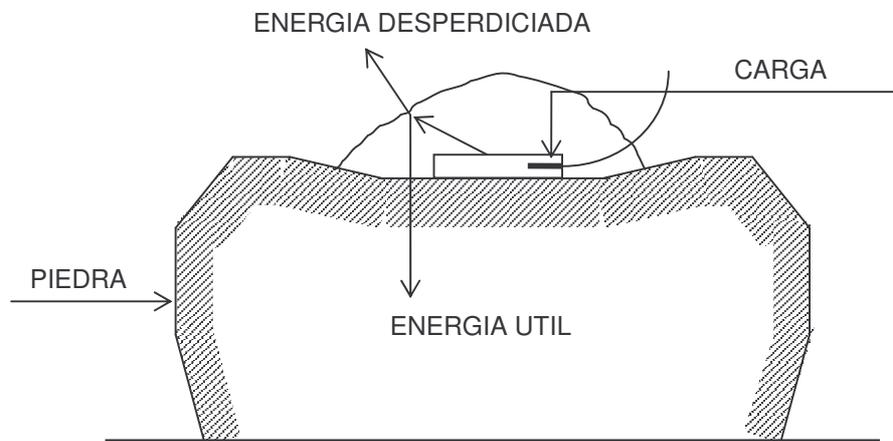
Las cargas sin confinar colocadas sobre piedras grandes y que se detonan posteriormente producen energía de choque que se transmite a la piedra en el punto de contacto entre la carga y la piedra. Ya que la mayor parte de la carga no está en contacto con la piedra, la mayoría de la energía útil del explosivo se dispersa en el aire y se desperdicia. Este desperdicio de energía se manifiesta como un golpe de aire excesivo. La presión de gas no se puede formar ya que la carga está totalmente sin confinar, por lo tanto, la energía de gas hace poco (o nada) trabajo. Solo una pequeña cantidad de la energía útil del explosivo se aprovecha cuándo las cargas se colocan de esta manera sobre las piedras.

Si comparamos dos ejemplos, uno donde las cargas se colocan dentro de un barreno, en una piedra, y el barreno se tapa hasta la boca y en el segundo caso la carga se coloca sin confinar sobre la piedra, encontraremos que se requiere muchas veces la cantidad de explosivo sobre la piedra para obtener la misma fragmentación que con la carga confinada dentro del barreno.

Hace muchos años se descubrió que una capa de lodo colocada sobre la piedra y con los cartuchos de explosivo contenidos dentro de ésta, provoca que la carga de explosivo ejerza una fuerza mayor hacia abajo sobre la piedra, lo cual no sucede si no se utiliza la capa de lodo. Se podría concluir que el confinamiento de los gases causado por unos cuantos puñados de lodo ayudó en el proceso de fragmentación. El sentido común nos indicará que esto no es lógico ya que esa cantidad de lodo no puede resistir significativamente

presiones que se aproximan a los cien mil Kilo bares. Lo que puede suceder es que el lodo forme una especie de trampa de ondas, donde algo de la energía de choque desperdiciada, que en condiciones normales se disiparía en el aire, es reflejada hacia la piedra (Figura 2.1).

Figura 2.1 Energía reflejada y desperdiciada en voladuras de plasteo



## 2.2 Cargas confinadas en barrenos.

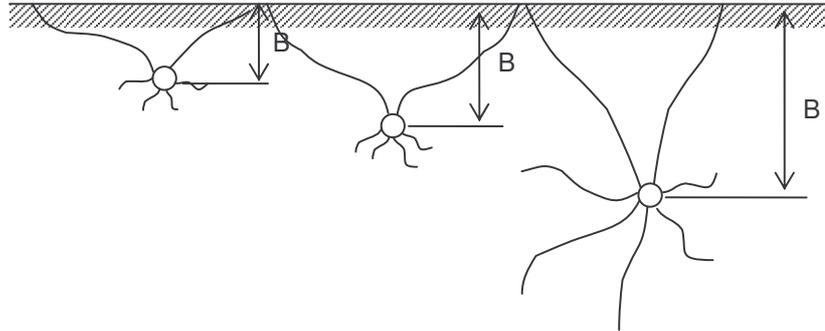
Son tres los mecanismos básicos que contribuyen a la fragmentación de la roca cuando las cargas están confinadas en barrenos. El primero y menos importantes de estos mecanismos de fragmentación es causado por la onda de choque. Cuando mucho, la onda de choque provoca micro fracturas en las paredes del barreno e inicia micro fracturas en las discontinuidades del bordo. Este pulso de presión transitorio se disipa rápidamente con la distancia desde el barreno y ya que la velocidad de propagación del pulso es de aproximadamente 2.5 a 5 veces la velocidad máxima de propagación de las grietas, el pulso sobrepasa rápidamente la propagación de las grietas.

Los dos mecanismos principales de fragmentación de la roca son el resultado de la presión de gas sostenida dentro del barreno. El explosivo sólido se transforma en gas durante el proceso de detonación, el barreno actúa de forma similar a un recipiente cilíndrico de presión. Las fallas en estos recipientes, tales como tuberías de agua o líneas hidráulicas, ofrecen una analogía a este mecanismo de fragmentación de roca. Cuando el recipiente se somete a una presión excesiva, la presión ejercida de forma perpendicular a las paredes del recipiente provoca que se fracture en el punto más débil del recipiente. En el caso de tuberías de agua congeladas, una ranura longitudinal aparece paralela al eje de la tubería.

El mismo fenómeno ocurre en otro tipo de recipientes de presión debido a la generación de esfuerzos. Si un barreno es considerado como un recipiente de presión, esperaríamos que las fracturas se orientaran paralelamente al eje del barreno. La mayor diferencia entre presurizar un barreno y una línea de agua es el incremento proporcional de la presión. Un barreno se sobre presuriza de forma instantánea y por lo tanto no falla en el punto más débil de la pared. En lugar de ello, fallará simultáneamente en muchos puntos. Cada fractura resultante se orientará paralela al eje del barreno. Este tipo de falla ha sido identificado por muchos años y comúnmente es llamado agrietamiento radial.

La dirección y extensión del sistema de grietas radiales pueden ser controladas seleccionando la distancia adecuada del barreno a la cara (bordo) (Figura 2.2).

Figura 2.2 Influencia de la distancia a la cara en el sistema de grietas radiales



El segundo mecanismo principal de fragmentación ocurre cuando el agrietamiento radial ha concluido. Existe un intervalo de tiempo antes de que el segundo mecanismo entre en acción. Este segundo mecanismo afecta la fragmentación perpendicularmente al eje de la carga.

Antes de discutir el segundo mecanismo, formemos una imagen mental de lo que ha pasado durante el proceso de agrietamiento radial. La onda de esfuerzo (choque) ha causado fracturación menor o micro fracturas en las paredes del barreno y en las discontinuidades del bordo. La presión sostenida del gas, que sigue a la presión de choque, somete a las paredes del barreno a una tensión debido a los esfuerzos radiales generados y provoca que las micro fracturas crezcan. La alta presión de los gases extiende las fracturas por todo el bordo. Este bordo en forma roca sólida (masiva) se transforma de una masa sólida, en una que está rota por las grietas radiales en muchas piezas con forma de cuña o rebanada de pastel. Estas cuñas funcionan como columnas, soportando el peso del bordo. Las columnas se hacen más débiles si la proporción entre la longitud y el diámetro o relación de esbeltez aumenta. Por lo tanto, una vez que un bordo masivo se transforma en piezas tipo cuña, con una altura de banco fija, se debilita drásticamente debido a que la relación de esbeltez se ha incrementado.

El proceso no se ha completado ya que el barreno que se expande contiene aún gases a muy altas presiones. Estos gases someten a las cuñas a fuerzas que actúan perpendicularmente al eje del barreno. Se puede decir que estas fuerzas empujan hacia el punto de alivio o la línea de menor resistencia. Este concepto de alivio perpendicular al eje del barreno se conoce desde hace más de cien años. Debe haber alivio disponible perpendicular al eje del barreno para que las cargas contenidas en éste funcionen adecuadamente. Si no hay alivio, Solo se formarán grietas radiales y los barrenos harán cráteres o el taco saldrá disparado hacia arriba. En cualquier caso, la fragmentación disminuye y los problemas ambientales aumentan.

### **2.3 Rigidez del banco.**

En la mayor parte de las operaciones, el primer movimiento visible ocurre cuando la cara se arquea hacia fuera cerca del centro. Dicho de otra forma, la porción central de la cara se está moviendo más rápido que la parte inferior o superior de bordo (Figura 2.3).

Este tipo de arqueado o acción de doblaje no siempre ocurre. Se pueden dar casos donde en lugar de que el centro se arquee hacia fuera, es la parte inferior o superior del bordo la que se desplaza hacia fuera en forma de cantiliver (Figura 2.4).

Figura 2.3 Diagrama del doblamiento asimétrico

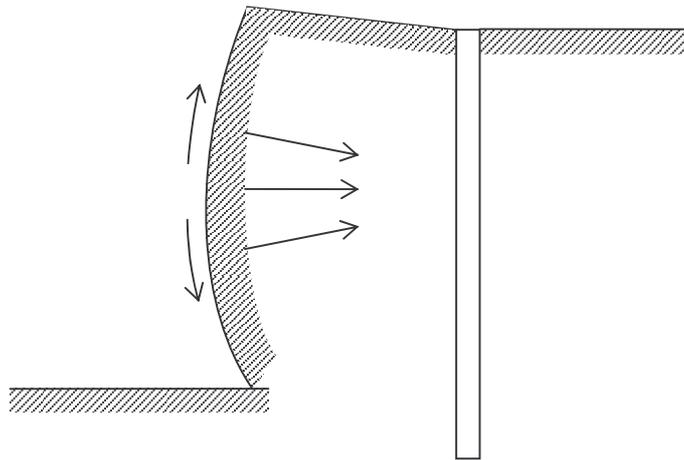
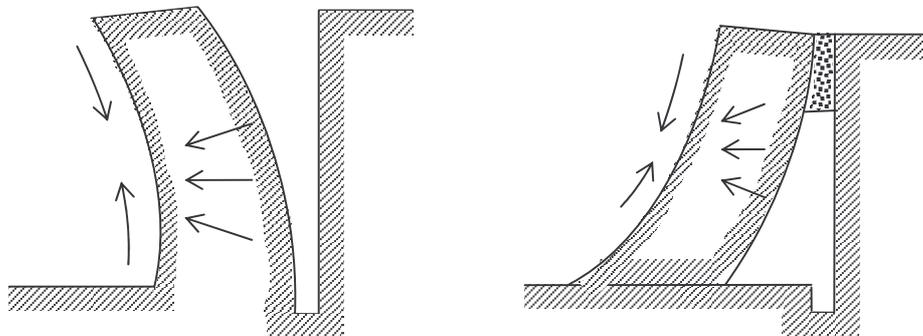


Figura 2.4 Diagrama de doblamiento en Cantiliver



En cualquiera de estos casos, el movimiento diferencial provoca que el borde se rompa en la tercera dimensión. Este mecanismo de fragmentación se ha llamado ruptura por cortante o falla por cortante. Para discutir apropiadamente la falla por cortante debemos estar conscientes que cada una de estas columnas de roca en forma de cuña, causadas por el agrietamiento

radial también estarán sometidas a una fuerza perpendicular a la longitud de la columna. Esto sería similar a las condiciones de carga de una viga, donde el factor de rigidez es significativo. El factor de rigidez relaciona el espesor de la viga a su longitud. El efecto de la rigidez puede ser explicado usando, como ejemplo, un lápiz. Es relativamente fácil romper el lápiz con la fuerza ejercida con los dedos. Sin embargo, si se ejerce la misma fuerza en un lápiz de 5 cm. de longitud, resulta más difícil romperlo. El diámetro del lápiz no ha cambiado, lo único que cambio fue su longitud. Un fenómeno similar de rigidez ocurre en las voladuras. La roca del bordo es más fácil de romper con falla por cortante cuando la altura del banco se aproxima a la longitud del bordo. Cuando la altura del banco es muchas veces la longitud del bordo, la roca del bordo se rompe con más facilidad.

Existen dos modos generales de falla por cortante en el bordo. En el primero, el bordo se dobla hacia fuera o se abulta en el centro más rápido que en la parte superior o inferior. En el segundo, cualquiera de los extremos del bordo se mueve a mayor velocidad que el centro. Cuando la roca se abulta en el centro, se provocan tensiones en la cara y compresiones cerca de la carga. En esta condición, la roca se fragmentará hacia atrás de la cara hasta el barreno (Figura 2.3). Este modo de falla generalmente conlleva a una fragmentación más deseable.

En el segundo modo, la roca se desplaza hacia fuera en cantiliver (Figura 2.4) y la cara del banco se somete a compresión y las paredes del barreno a tensión.

Este segundo caso no es deseable. Este mecanismo ocurre cuando las grietas entre barrenos se unen antes de que el bordo se rompa y normalmente es causado por espaciamiento insuficiente entre barrenos. Cuando las grietas

entre barrenos alcanzan la superficie, los gases pueden escaparse prematuramente antes de haber completado todo el trabajo potencial. El resultado puede ser: golpe de aire y roca en vuelo severos, así como problemas en la parte inferior del banco.

El mecanismo de doblamiento o falla por cortante se controla seleccionando los espaciamientos adecuados y los tiempos de iniciación entre barrenos contiguos. Cuando el tiempo entre barrenos resulta en cargas que están siendo retardadas una de otra a lo largo de la misma hilera de barrenos, el espaciamiento debe ser menor al requerido si todos los barrenos de la misma hilera se dispararán simultáneamente. La selección del espaciamiento apropiado es afectada por el factor de rigidez. A medida que se reducen las alturas del banco comparadas con el bordo, se debe reducir también el espaciamiento entre barrenos para superar los problemas de la rigidez.

#### **2.4 Proceso de fragmentación.**

El proceso de fragmentación de la roca ocurre en cuatro pasos claramente definidos. Cuando detona un explosivo, una onda de esfuerzo se mueve a través de la roca uniformemente en todas direcciones alrededor de la carga. Entonces las grietas radiales se propagan predominantemente hacia la cara libre. Después de que el proceso de las grietas radiales ha terminado, gases a altas presiones penetran por las grietas hasta aproximadamente  $2/3$  de la distancia entre el barreno y la cara libre a través de todo el sistema de grietas radiales. Solo después de que el gas ha tenido tiempo de penetrar en el sistema de grietas, los esfuerzos en la cara son de magnitud suficiente para causar que la cara se mueva hacia fuera. Antes de que la cara empiece a moverse y doblarse hacia fuera, se crean fracturas en la tercera dimensión como resultado de la falla por cortante o doblamiento.

## **3 PRODUCTOS EXPLOSIVOS.**

### **3.1 Características ambientales de los explosivos.**

La selección de un explosivo que se usará para una tarea en particular se basa en dos criterios principales. El explosivo debe ser capaz de funcionar segura y confiablemente bajo las circunstancias ambientales donde se va a usar y, el explosivo debe ser el que resulte más económico para producir los resultados finales deseados. Antes de que el responsable de las voladuras seleccione el explosivo que usará para un trabajo en particular, debe determinar qué explosivos son adecuados para las condiciones ambientales y las características de operación que se adapten a la economía del proyecto. Se consideran cinco características en la selección de un explosivo que tiene que ver con factores ambientales: sensibilidad, resistencia al agua, vapores, flamabilidad y resistencia a la temperatura.

#### **3.1.1 Sensibilidad.**

Sensibilidad es la característica que tiene un explosivo para propagar la reacción a todo lo largo de la carga y controla el diámetro mínimo para usos prácticos.

La sensibilidad se mide al determinar el diámetro crítico de un explosivo. El término diámetro crítico se usa frecuentemente en la industria de los explosivos para definir el diámetro mínimo en el cual un compuesto explosivo en particular detonará confiablemente. Todos los compuestos explosivos tienen un diámetro crítico. Para algunos compuestos puede ser tan pequeño como un milímetro.

Por otra parte, otro compuesto puede tener un diámetro crítico de 100 milímetros. El diámetro del barreno propuesto para un proyecto específico determinará el diámetro máximo de la carga de columna. Este diámetro de la carga debe ser mayor al diámetro crítico del explosivo que se usará en ese barreno. Por lo tanto, al seleccionar con anticipación ciertos diámetros de barreno, uno puede eliminar ciertos productos explosivos para usarse en ese proyecto en particular (Tabla II).

La sensibilidad es también una medida de la habilidad del explosivo para propagar la reacción de cartucho a cartucho, asumiendo que el diámetro es superior al crítico. Se puede expresar como la distancia máxima de separación (en centímetros) entre un cartucho cebado (donador) o uno sin cebar (receptor), donde la transferencia de la detonación ocurrirá.

Tabla II. Sensibilidad (diámetro crítico)

Tipo	Diámetro Crítico		
	< 25 mm	25 mm – 50 mm	> 50 mm
Dinamita Granulada	X		
Dinamita Gelatina	X		
Emulsión Encartuchada	X	X	X
Emulsión a Granel		X	X
ANFO colocado neumáticamente	X		
ANFO Vaciado		X	
ANFO Encartuchado		X	X
ANFO Pesado			X

### **3.1.2 Resistencia al agua.**

La resistencia al agua es la habilidad de un explosivo de soportar el contacto con el agua sin sufrir deterioro en su desempeño. Los productos explosivos tienen dos tipos de resistencia al agua, interna y externa. La resistencia al agua interna se define como la resistencia al agua que provee la composición misma del explosivo. Por ejemplo, algunas emulsiones e hidrogeles pueden ser bombeados directamente al barreno lleno de agua, estos explosivos desplazan el agua hacia arriba pero no se mezclan con ello y no muestran deterioro si se disparan dentro de un tiempo razonable. La resistencia al agua externa se provee no por los materiales propios del explosivo, sino por el empaque o cartucho dentro del que se coloca el material. Por ejemplo, el ANFO no tiene resistencia al agua interna, sin embargo, si se coloca dentro de una manga de plástico o un cartucho en el barreno, puede mantenerse seco y se desempeñará satisfactoriamente. La manga o el cartucho proveen la resistencia al agua externa para este producto en particular.

El efecto que tiene el agua en los explosivos es que puede disolver algunos de los ingredientes o enfriar a tal grado la reacción que los productos ideales de la detonación no se formarán aún cuando el explosivo este balanceado de oxígeno. La emisión de vapores café rojizos o amarillos en una voladura, muchas veces es indicación de una detonación poco eficiente causada, frecuentemente, por el deterioro del explosivo debido al agua. Esta situación se puede remediar si se utiliza un explosivo con mayor resistencia al agua o si se usa un empaque externo mejor.

Los fabricantes de explosivos pueden describir la resistencia al agua de dos formas. Una forma es usar términos tales como excelente, bueno, regular o malo (Tabla III). Cuando se encuentra agua en las operaciones de voladuras,

un explosivo catalogado por lo menos como regular debe seleccionarse y debe dispararse lo más pronto posible después del cargado. Si el explosivo va a estar en contacto con el agua por un período considerable de tiempo, es aconsejable seleccionar un explosivo catalogado por lo menos como bueno. Si las condiciones de agua son severas y el tiempo de exposición es significativo, un responsable de voladuras prudente debe seleccionar un explosivo con una excelente resistencia al agua. Los explosivos con resistencia al agua mala no deben usarse en barrenos húmedos.

Tabla III. Resistencia al agua

<b>Tipo</b>	<b>Resistencia</b>
Dinamita Granulada	Mala a Buena
Dinamita Gelatina	Buena a Excelente
Emulsión Encartuchada	Muy Buena
Emulsión a Granel	Muy Buena
ANFO Colocado Neumáticamente	Mala
ANFO Vaciado	Mala
ANFO Encartuchado	Muy Buena
ANFO Pesado	Mala a Muy Buena

La segunda forma de catalogar la resistencia al agua de los explosivos es por números. Por ejemplo: la resistencia al agua Clase 1 indica una tolerancia al contacto con el agua por 72 horas sin deterioro; la Clase 2 – 48 horas, Clase 3 – 24 horas y Clase 4 – 12 horas. El método descriptivo de catalogar la resistencia al agua es el más comúnmente usado en las hojas técnicas de los productos explosivos. En general, el precio de un producto está relacionado

con la resistencia al agua. Entre más resistencia al agua tenga el explosivo, mayor será el precio.

La habilidad para permanecer sin cambios ante presiones ante presiones estáticas altas se conoce como: tolerancia a la presión del agua. Algunos compuestos explosivos se densifican y desensibilizan debido a las presiones hidrostáticas que se dan en barrenos muy profundos. Una combinación de otros factores como clima frío y cebos pequeños contribuirán al fracaso.

### **3.1.3 Vapores.**

La clase de vapores de un explosivo se mide de acuerdo a la cantidad de gases tóxicos producidos en el proceso de detonación. El monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno son los gases principales que se consideran en la catalogación de vapores. Aunque la mayoría de los agentes explosivos comerciales están cercanos al balance de oxígeno para reducir al mínimo los vapores y optimizar la liberación de energía, estos vapores se generarán y el responsable de las voladuras tiene que estar consiente de esto. En la minería subterránea y en la construcción, los problemas que pueden resultar de la producción estos vapores sin la ventilación adecuada son obvios. Debe señalarse que en las operaciones de superficie, especialmente en cortes muy profundos o zanjas, la producción de vapores y su retención pueden ser peligrosas para el personal asignado a ese trabajo. Algunas condiciones de voladura pueden producir vapores tóxicos aún cuando el explosivo esté balanceado de oxígeno. Algunas de estas condiciones son: diámetro de la carga insuficiente, resistencia al agua inadecuada, cebado deficiente y pérdida prematura del confinamiento.

El Instituto de Fabricantes de Explosivos de los Estados Unidos (IME) ha adoptado un método de catalogar vapores. La prueba se lleva a cabo por el método de Bichel Gauge. Se mide el volumen de gases venenosos liberados por cada 200 gramos de explosivo, si se producen menos de 4,530 cm<sup>3</sup> de vapores tóxicos entonces el explosivo se cataloga como clase 1. Si se producen entre 4,530 cm<sup>3</sup> y 9,344 cm<sup>3</sup> entonces se cataloga clase 2 y entre 9,344 cm<sup>3</sup> y 18,972 cm<sup>3</sup> clase 3. Los productos más comunes se catalogan de forma cualitativa en la Tabla IV.

Tabla IV. Calidad de vapores

<b>Tipo</b>	<b>Calidad</b>
Dinamita Granulada	Mala a Buena
Dinamita Gelatina	Regular a Muy Buena
Emulsión Encartuchada	Buena a Muy Buena
ANFO Colocado Neumáticamente	Buena
ANFO Vaciado	Buena
ANFO Encartuchado	Buena a Muy Buena
ANFO Pesado	Buena

Hablando estrictamente, el bióxido de carbono no es, en si, un gas tóxico sin embargo, muchas muertes han ocurrido a lo largo de los años debido a la generación de grandes cantidades de bióxido de carbono durante las voladuras en áreas confinadas. Aunque el bióxido de carbono no es venenoso, se produce en grandes cantidades en la mayoría de las voladuras y provoca que los músculos con movimiento involuntario del cuerpo dejen de funcionar. En otras palabras, el corazón y los pulmones dejan de trabajar si se encuentran

con concentraciones altas de bióxido de carbono. Concentraciones del 18% o más en volumen, pueden provocar la muerte por asfixia. Otro problema que presenta el bióxido de carbono es que tiene una densidad de 1.53, si se compara con el aire y tiende a estancarse en los sitios más bajos de la excavación o donde hay poco movimiento. Una solución práctica al problema es usar aire comprimido para diluir cualquier alta concentración posible en las depresiones de las zanjas.

#### **3.1.4 Flamabilidad.**

La flamabilidad es la característica que tiene un explosivo para iniciar la reacción con facilidad a partir de una chispa, flama o fuego. Algunos explosivos explotan debido a una chispa mientras que otros pueden ser quemados y no detonan. La flamabilidad es importante desde el punto de vista del almacenamiento, transportación y uso. Algunos explosivos aunque son muy económicos, han perdido mercado debido a la flamabilidad. Un buen ejemplo es el LOX (Liquid Oxygen and Carbon), oxígeno líquido y carbón, que fue utilizado en la década de los 50's como agente explosivo. Su alta flamabilidad y los problemas relacionados con la seguridad provocaron su retiro del mercado. La mayoría de los compuestos explosivos que se utilizan hoy en día no tienen una flamabilidad cercana a la del LOX, sin embargo, todavía ocurren accidentes debido a la flamabilidad.

Durante las últimas dos décadas, los productos explosivos, en general, se han vuelto menos flamables. Algunos fabricantes indican que ciertos productos explosivos pueden ser incinerados sin que detonen en cantidades de hasta 20,000 kilogramos. El problema resulta debido a que se da a los responsables de las voladuras una sensación falsa de seguridad. Algunos creen que todos los explosivos hoy en día son relativamente inflamables. Este sentido falso de

seguridad ha provocado la muerte a personas que han sido descuidadas al manejar explosivos y han asumido que la flamabilidad no es problema. Todos los compuestos explosivos deben ser tratados como altamente flamables. Debe prohibirse fumar durante el cargado de los barrenos y, si los explosivos van a ser destruidos incinerándolos, deben seguirse los procedimientos indicados por el IME (Instituto de Fabricante de Explosivos) sin importar el tipo de explosivo de que se trate.

### 3.1.5 Resistencia a la temperatura.

Los productos explosivos pueden verse afectados en su desempeño si se almacena bajo temperaturas extremas (Tabla V). Bajo temperaturas de almacenamiento altas, arriba de 32.2 grados Celsius, muchos compuestos se descomponen lentamente o cambian sus propiedades y la vida de anaquel disminuye. El almacenamiento de agentes explosivos de nitrato de amonio por arriba de los 32.2 grados Celsius puede provocar el ciclado (cambio de cristalización), lo que afectará el desempeño y la seguridad del producto.

Tabla V. Resistencia a la temperatura

<b>Tipo</b>	<b>Entre -18°C y 38°C</b>
Dinamita Granulada	Buena
Dinamita Gelatina	Buena
Emulsión Encartuchada	Mala abajo de 4.5°C
Emulsión a Granel	Mala abajo de 4.5°C
ANFO Cargado Neumáticamente	Mala arriba de 32.2°C
ANFO Vaciado	Mala arriba de 32.2°C
ANFO Empacado	Mala arriba de 32.2°C
ANFO Pesado	Mala abajo de 4.5°C

### **3.2 Características de desempeño de los explosivos.**

En el proceso de selección de un explosivo, las condiciones ambientales pueden eliminar el uso de ciertos tipos de explosivos en un proyecto en particular. Después de considerar las condiciones ambientales, se deben considerar las características de desempeño de los explosivos. Las principales de estas características son: sensibilidad, velocidad de detonación, densidad, potencia y cohesividad.

#### **3.2.1 Sensitividad.**

La sensibilidad de un explosivo está definida por la cantidad de energía que un explosivo requiere para detonar confiablemente. Esto es conocido en ocasiones como los requerimientos mínimos de cebado. Algunos explosivos requieren de muy poca energía para detonar confiablemente. El fulminante estándar número 8 hará detonar la dinamita y algunos de los hidrogeles y emulsiones sensibles al fulminante. Por otro lado, un fulminante solo no iniciará la reacción del ANFO o hidrogeles a granel. Para obtener una detonación confiable, uno debe usar un cebo o reforzador en combinación con el fulminante.

Muchos factores pueden influenciar la sensibilidad de un producto. Por ejemplo: la sensibilidad puede reducirse debido a la presencia de agua en el barreno, diámetro inadecuado de la carga o por temperaturas extremas. La sensibilidad de un producto define los requerimientos de cebado, esto es, el tamaño y la potencia del cebo. Si la detonación confiable de la carga principal no se da, los vapores pueden aumentar, los niveles de vibración del suelo se pueden incrementar, los barrenos se pueden escopetear y se pueden provocar cantidades considerables de roca en vuelo. La sensibilidad del riesgo define la

respuesta de un explosivo a la adición accidental de energía, por ejemplo: el impacto de una bala (Tabla VI).

Tabla VI. Sensitividad

<b>Tipo</b>	<b>Sensitividad de riesgo</b>	<b>Sensitividad de desempeño</b>
Dinamita Granulada	Moderada a Alta	Excelente
Dinamita Gelatina	Moderada	Excelente
Emulsión Encartuchada	Baja	Buena a Muy Buena
Emulsión a Granel	Baja	Buena a Muy Buena
ANFO Cargado Neumáticamente	Baja	Mala a Buena
ANFO Vaciado	Baja	Mala a Buena
ANFO Encartuchado	Baja	Buena a Muy Buena
ANFO Pesado	Baja	Mala a Buena

### 3.2.2 Velocidad de detonación.

La velocidad de detonación es la velocidad a la cual la reacción se mueve a lo largo de la columna de explosivo. Tiene un rango que va de 1,524 a 7,620 m/s en los productos explosivos comerciales. La velocidad de detonación es una consideración importante para aplicaciones fuera del barreno, tales como el plasteo o la demolición de elementos estructurales. La velocidad de detonación tiene una importancia menos significativa si el explosivo se usa dentro de un barreno.

La velocidad de detonación puede usarse como una herramienta para determinar la eficiencia de una reacción explosiva en el uso práctico. Si surge

una duda en cuanto al desempeño de un compuesto explosivo durante su aplicación, se pueden insertar sondas de velocidad en el producto; cuando el producto detona, el rango de reacción puede ser medido y así juzgar el desempeño por la velocidad registrada. Si el producto está detonando a una velocidad significativa menor a la especificada, es una indicación que el desempeño del explosivo no cumple con las normas especificadas en la hoja técnica. Las velocidades de detonación típicas de los explosivos se dan en la Tabla VII.

Tabla VII. Velocidad de detonación (m/s)

Tipo	Diámetro		
	32 mm	76 mm	229 mm
Dinamita Granulada	2100 – 5800		
Dinamita Gelatina	3600 – 7600		
Emulsión Encartuchada	4000 – 4600	4300 – 4900	
Emulsión a Granel		4300 – 4900	3700 – 5800
ANFO Colocado Neumáticamente	2100 – 3000	3700 – 4300	4300 – 4600
ANFO Vaciado	1800 - 2100	3000 – 3400	4300 – 4600
ANFO Encartuchado		3000 – 3700	4300 – 4600
ANFO Pesado			3400 – 5800

### 3.2.3 Presión de detonación.

La presión de detonación es la que se obtiene casi instantánea como resultado del movimiento de la onda de choque a través del explosivo (Tabla

VIII). Cuando se inicia un explosivo con otro, la presión de choque del explosivo primario se usa para causar la iniciación del explosivo secundario. La presión de detonación puede ser relacionada con la presión del barreno, pero no es necesariamente, una relación lineal. Dos explosivos con presiones de detonación similares no tendrán necesariamente la misma presión del barreno o presión de gas. La presión de detonación se calcula matemáticamente.

Tabla VIII. Presión de detonación

<b>Tipo</b>	<b>Presión de Detonación (Kbar)</b>
Dinamita Granulada	20 – 70
Dinamita Gelatina	70 – 140
Emulsión Encartuchada	20 – 100
Emulsión a Granel	20 – 100
ANFO Vaciado	7 – 45
ANFO Encartuchado	20 – 60
ANFO Pesado	20 – 90

La presión de detonación está relacionada con la densidad del explosivo y la velocidad de la reacción. Cuando se seleccionan explosivos como iniciadores, es muy importante considerar la presión de detonación.

### **3.2.4 Densidad.**

La densidad de un explosivo es importante debido a que los explosivos se comparan, almacenan y utilizan sobre la base del peso. La densidad se expresa normalmente como gravedad específica, la cual es la relación de la

densidad del explosivo con la densidad del agua. La densidad determina el peso del explosivo que puede cargarse dentro de un diámetro específico de barreno. Basándose en el peso, no hay una diferencia muy marcada en la energía entre diversos explosivos. La diferencia en energía sobre la base de la unidad peso no ni si quiera cercana a la diferencia de energía sobre la base de la unidad de volumen. Cuando se encuentra roca dura y el costo de la barrenación es alto, un producto más denso y de precio más alto, es justificable. La densidad típica de algunos productos explosivos se da en la Tabla IX.

Tabla IX. Densidad

<b>Tipo</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Dinamita Granulada	0.8 – 1.4
Dinamita Gelatina	1.0 – 1.7
Emulsión Encartuchada	1.1 – 1.3
Emulsión a Granel	1.1 – 1.6
ANFO Cargado Neumáticamente	0.8 – 1.0
ANFO Vaciado	0.8 – 0.9
ANFO Encartuchado	1.1 – 1.2
ANFO Pesado	1.1 – 1.4

La densidad de un explosivo se usa comúnmente como herramienta para calcular la potencia y los parámetros de diseño entre explosivos de diferentes fabricantes y diferentes familias genéricas. En términos generales podemos decir que: a mayor densidad, mayor energía en el producto. Una expresión útil de la densidad es lo que comúnmente se llama densidad de carga, o sea, el peso de explosivo por longitud de la carga para un diámetro dado. La densidad

de carga se usa para determinar el total de kilogramos de explosivos que se usarán por barreno y por voladura. La densidad de los productos comerciales varía de 0.8 a 1.6 g/cm<sup>3</sup>.

Un método fácil para calcular la densidad de carga es:

$$d_e = \frac{SG_e \times D_e^2 \times \pi}{4000}$$

donde:

$d_e$	=	Densidad de Carga	(Kg/m)
$SG_e$	=	Densidad del explosivo	(g/cm <sup>3</sup> )
$D_e$	=	Diámetro del explosivo	(mm)

**Ejemplo:** Determinar la densidad de carga de un explosivo que tiene un diámetro de 76.2 mm y una densidad de 1.2 g/cm<sup>3</sup>.

$$d_e = \frac{1.2 \times 76.2^2 \times \pi}{4000} = 5.47 \text{ Kg/m}$$

### 3.2.5 Potencia.

El término potencia se refiere al contenido de energía de un explosivo, que a su vez, es la medida de la fuerza que puede desarrollar y su habilidad para hacer un trabajo. La potencia ha sido clasificada por varios fabricantes sobre la base de un peso o volumen igual, y comúnmente se les llama potencia en peso y potencia en volumen. Aunque no existe un método de medición que se utilice

por todos los fabricantes de explosivos, existen muchos métodos de medición de la potencia tales como: la prueba balística de mortero, valores de ejecución sísmica, medición del pulso de esfuerzo, craterización, cálculo de presiones de detonación, cálculo de presiones de barreno y la determinación de la temperatura de reacción. Sin embargo, ninguno de esos métodos puede usarse satisfactoriamente para fines de diseño de voladuras. La clasificación de potencia es engañosa y no compara, de manera certera, la efectividad de fragmentar la roca con el tipo de explosivo. En general se puede decir que, la clasificación de potencia, es solo una herramienta para identificar los resultados finales y asociarlos con un producto específico.

Una prueba de clasificación de potencia, la prueba subacuática de energía de choque y burbuja, que se usa para determinar la energía de choque y la energía de los gases en expansión, es utilizada por algunos con propósitos de diseño. En resumen, la prueba de burbuja produce resultados confiables, los cuales pueden ser usados para aproximar los parámetros de diseño de una voladura.

### **3.2.6 Cohesividad.**

La cohesividad se define como la habilidad de un explosivo de mantener su forma original. Hay ocasiones en que el explosivo debe mantener su forma original y otras en que debe fluir libremente. Como ejemplo, cuando se hacen voladuras en roca muy fragmentada y agrietada, definitivamente se debe utilizar un explosivo que no fluya hacia las grietas causando con esto que el barreno quede sobrecargado. Por el contrario, en otras aplicaciones, tales como el cargado a granel, los explosivos deben fluir fácilmente y no atascarse en el barreno ni formar huecos en la columna de explosivo.

### **3.3 Explosivos Comerciales.**

Los productos que se utilizan como carga principal de los barrenos pueden dividirse en tres categorías genéricas: las dinamitas, las suspensiones y los agentes explosivos. Una cuarta categoría, de menor importancia, es la de los explosivos binarios o de dos componentes que también merecen ser discutidas por sus características únicas.

Todas las categorías genéricas discutidas en esta sección son altos explosivos desde el punto de vista de que todos ellos detonan y generan onda de choque. Por otro lado, comúnmente se nombra a algunos de estos explosivos por otros nombres tales como agentes explosivos. El término agentes explosivo no le resta al explosivo su capacidad de detonar o de funcionar como un alto explosivo. Este término, agente explosivo, es una clasificación considerada desde el punto de vista del almacenamiento y la transportación. Los agentes explosivos son menos sensitivos a la iniciación y por lo tanto pueden almacenarse y transportarse bajo normas diferentes a las que normalmente se usan para altos explosivos más sensitivos. El término alto explosivo se refiere a cualquier producto, usado en voladuras, que sea sensitivo al fulminante y que reaccione a una velocidad mayor a la velocidad que viaja el sonido a través del explosivo. La reacción debe ir acompañada de una onda de choque para que se pueda considerar como alto explosivo.

Los agentes explosivos, una subclase de los altos explosivos, son un material o mezcla que consiste de un combustible y un oxidante. Normalmente, los agentes explosivos no contienen ingredientes que por si solos sean altos explosivos. Algunas emulsiones que contienen TNT, pólvora sin humo u otros ingredientes de altos explosivos, pueden ser clasificados como

agentes explosivos si estos son insensitivos a la iniciación de un fulminante número 8.

### **3.3.1 Dinamita.**

La nitroglicerina fue el primer alto explosivo utilizado en voladuras comerciales. Tiene una densidad de 1.6 y una velocidad de detonación de aproximadamente 7,600 m/s. La nitroglicerina es extremadamente sensible al choque, la fricción y el calor, lo que la hace extremadamente peligrosa de usar en su forma líquida. En Suecia en 1865, Alfredo Nobel encontró que si este líquido tan peligroso se mezclaba con un material inerte, el producto resultante era seguro de manejar y era mucho menos sensible al choque, la fricción y el calor. A este producto se le llamó dinamita.

La mayoría de las dinamitas son productos con base a la nitroglicerina. Pocos fabricantes de dinamita tienen productos en los que han substituido los altos explosivos que no producen dolores de cabeza, como el nitroalmidón, en lugar de la nitroglicerina. Las dinamitas son las más sensitivas de todas las clases genéricas de explosivos utilizados hoy en día. Debido a esta sensibilidad, las dinamitas ofrecen un margen mayor de seguridad dentro del barreno, ya que, los huecos dentro de la columna de explosivo y muchos otros factores ambientales, que provocan el mal funcionamiento de otros explosivos, no afectan a la dinamita. Por supuesto que es verdad que la dinamita de alguna manera es más susceptible a la iniciación accidental debido a la sensibilidad. Los responsables de las voladuras deben decidir cual de estas propiedades es más importante para ellos cuando hacen su selección de explosivos.

Dentro de la familia de las dinamitas, hay dos divisiones principales: dinamita granulada y dinamita gelatina. La dinamita granulada es un compuesto que utiliza la nitroglicerina como base explosiva. La dinamita gelatina es una mezcla de nitroglicerina y nitrocelulosa que produce un compuesto resistente al agua de aspecto ahulado.

### **3.3.2 Dinamita granulada.**

Dentro de las dinamitas granuladas hay tres clasificaciones que son: dinamita pura, dinamita extra de alta densidad y dinamita extra de baja densidad.

#### **3.3.2.1 Dinamita pura.**

La dinamita pura se compone de: nitroglicerina, nitrato de sodio, combustibles de carbono, azufre y antiácidos. El término pura significa que no contiene nitrato de amonio. La dinamita pura es el explosivo comercial más sensitivo que se utiliza hoy en día. No debe usarse para obras de construcción ya que su sensibilidad al choque puede provocar la detonación simpática de barrenos adyacentes. Por otro lado, la dinamita pura es un producto extremadamente adecuado para abrir zanjas en tierra. La detonación simpática discutida previamente es un atributo en apertura de zanjas ya que elimina la necesidad de un detonador en cada barreno. En la apertura de zanjas, normalmente se usa un detonador en el primer barreno y todos los demás disparan por detonación simpática. Aunque la dinamita para abrir zanjas es más cara que otras dinamitas, para obras de este tipo puede ahorrar cantidades considerables de dinero ya que las cargas no necesitan detonadores ni conexión del sistema de iniciación.

### **3.3.2.2 Dinamita extra de alta densidad.**

Este producto es el tipo de dinamita más utilizado. Es similar a la dinamita pura con la excepción de que parte de la nitroglicerina y el nitrato de sodio se reemplazan con nitrato de amonio. La dinamita de amonio o extra es menos sensitiva al choque y la fricción que la dinamita pura. Se le ha utilizado en una amplia gama de aplicaciones en canteras, minas subterráneas y construcción.

### **3.3.2.3 Dinamita extra de baja densidad.**

Las dinamitas de baja densidad son similares en su composición a las de alta densidad excepto que una mayor cantidad de la nitroglicerina se substituyen por nitrato de amonio. Debido a que el cartucho contiene gran parte de nitrato de amonio, su potencia por volumen es relativamente baja. Este producto es muy útil en roca suave o donde se pretende limitar deliberadamente la cantidad de energía dentro del barreno.

### **3.3.3 Dinamita gelatina.**

La dinamita gelatina que se utiliza en aplicaciones comerciales, se pueden subdividir en tres clases: gelatina pura, gelatina de amonio y dinamitas semigelatinas.

#### **3.3.3.1 Dinamita gelatina pura.**

Las gelatinas puras básicamente son geles explosivos con nitrato de sodio, combustibles y azufre adicionales. En potencia, es el equivalente gelatinoso de la dinamita pura. La gelatina explosiva pura es el explosivo con base de

nitroglicerina más poderoso. Una gelatina pura debido a su composición es la dinamita más resistente al agua que existe.

### **3.3.3.2 Dinamita gelatina de amonio.**

La gelatina de amonio es llamada algunas veces como gelatina extra o especial. Es una mezcla de gelatina pura a la que se le añade nitrato de amonio para sustituir parte de la nitroglicerina y el nitrato de sodio. Las gelatinas de amonio son apropiadas para condiciones de humedad y se utilizan principalmente como cargas de fondo en barrenos de diámetro pequeño. Las gelatinas de amonio no tienen la misma resistencia al agua que las gelatinas puras y con frecuencia se utilizan como iniciadores para agentes explosivos.

### **3.3.3.3 Dinamita semigelatina.**

Las dinamitas semigelatinas son similares a las gelatinas de amonio excepto que una mayor cantidad de la mezcla de nitroglicerina, nitrato celulosa y nitrato de sodio se reemplaza con nitrato de amonio. Las semigelatinas son menos resistentes al agua y más baratas comparadas con las gelatinas de amonio. Debido a su naturaleza gelatinosa, tienen mayor resistencia al agua que muchas de las dinamitas granuladas y frecuentemente se utilizan bajo condiciones húmedas y algunas como iniciadores de agentes explosivos.

### **3.3.4 Explosivos tipo suspensión.**

Un explosivo tipo suspensión es una mezcla de nitrato de amonio u otros nitratos un sensibilizador, un combustible que puede ser un hidrocarburo o hidrocarburos y aluminio. En algunos casos se utilizan sensibilizadores explosivos, como el TNT o la nitrocelulosa, además de cantidades variables de

agua. Las características de una emulsión son, de alguna manera, diferentes a las de un hidrogel o suspensión, pero su composición contiene ingredientes similares y su funcionamiento dentro del barreno es similar. En general, las emulsiones tienen una velocidad de detonación un poco más alta y, en algunos casos, tienden a ser húmedos y adherirse a las paredes del barreno causando dificultades para el cargado a granel. Para efectos de discusión las emulsiones y los hidrogeles serán tratados bajo el nombre genérico de suspensión.

Las suspensiones, en general, contienen grandes cantidades de nitrato de amonio y se hacen resistentes al agua a base del uso de goma, ceras, agentes de acoplamiento o emulsificantes. Existe una gran variedad de suspensiones, y debe recordarse que diferentes suspensiones mostrarán diferentes características de campo. Algunas pueden ser clasificadas como altos explosivos mientras que otras se clasifican como agentes explosivos ya que no son sensitivas a un fulminante número 8. Esta diferencia en clasificación es muy importante desde el punto de vista del almacenamiento. Una ventaja más de las suspensiones sobre las dinamitas es que pueden transportarse los ingredientes por separado y mezclarse en el lugar de consumo. Los ingredientes transportados de esta manera en camiones tanque no son explosivos hasta que se mezclan antes de cargarlos al barreno. La carga a granel de las suspensiones puede reducir en gran medida el tiempo y el costo de cargado de grandes cantidades de explosivos. Las suspensiones se pueden dividir en dos clasificaciones generales: encartuchadas y a granel.

#### **3.3.4.1 Suspensiones encartuchadas.**

Las suspensiones encartuchadas están disponibles tanto en cartuchos de diámetro grande como de diámetro chico. En general, los cartuchos de menos de 5 cm. de diámetro contienen explosivo sensitivo para que puedan sustituir a

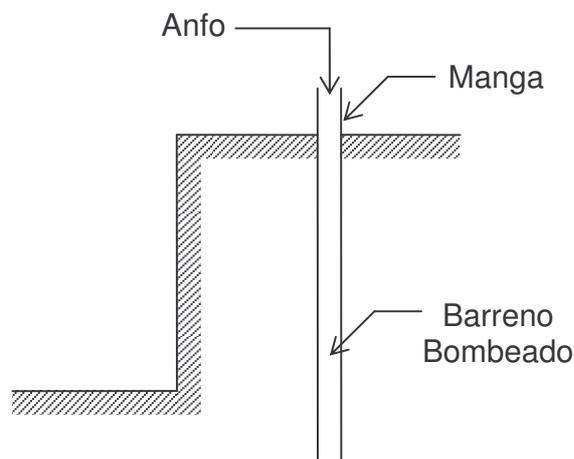
la dinamita. La sensibilidad a la temperatura de las suspensiones y su menor sensibilidad pueden causar problemas cuando substituyen a la dinamita en algunas aplicaciones. El responsable de las voladuras debe estar consciente de algunas limitaciones antes de hacer la substitución. Los cartuchos de diámetro mayor son menos sensitivos. Las suspensiones encartuchadas normalmente se sensibilizan con nitrato de monometilamina o aluminio, y en el caso de las emulsiones, con aire. La sensibilización con aire se logra con la adición de microesferas o incorporando aire durante el proceso de mezclado.

#### **3.3.4.2 Suspensiones a granel.**

Las suspensiones a granel se sensibilizan por cualquiera de tres métodos. La sensibilización con aire se puede lograr agregando agentes gasificantes, los cuales después de ser bombeados al barreno, producen pequeñas burbujas a lo largo de la mezcla. El incorporar polvo o granalla de aluminio a la mezcla aumenta su sensibilidad. Agregar nitrocelulosa o TNT a la mezcla la sensibilizará para la iniciación. Las suspensiones que no contengan aluminio o sensibilizadores explosivos son las más económicas y con frecuencia son las menos densas y menos potentes. En condiciones húmedas y sobre todo cuando no se saca el agua de los barrenos, las suspensiones más baratas compiten con el ANFO. Debe señalarse que estas suspensiones de bajo costo tienen menos energía que el ANFO. Las suspensiones aluminizadas y aquellas que contienen cantidades significativas de otros de otros altos explosivos producen cantidades significativamente mayores de energía y se utilizan para voladuras en roca más densa y dura. La alternativa de usar suspensiones de alta energía es desalojar el agua, donde sea posible, con bombas sumergibles y usar mangas de poliestireno dentro del barreno con nitrato de amonio como explosivo (Figura 3.1). En la mayoría de los casos, el uso de bombeo, mangas

y nitrato de amonio producirán costos significativamente más bajos de los que se obtendrían al usar suspensiones de precio más alto. Tanto las bombas como las mangas se pueden adquirir de muchos de los proveedores de explosivos.

Figura 3.1 Mangas con ANFO

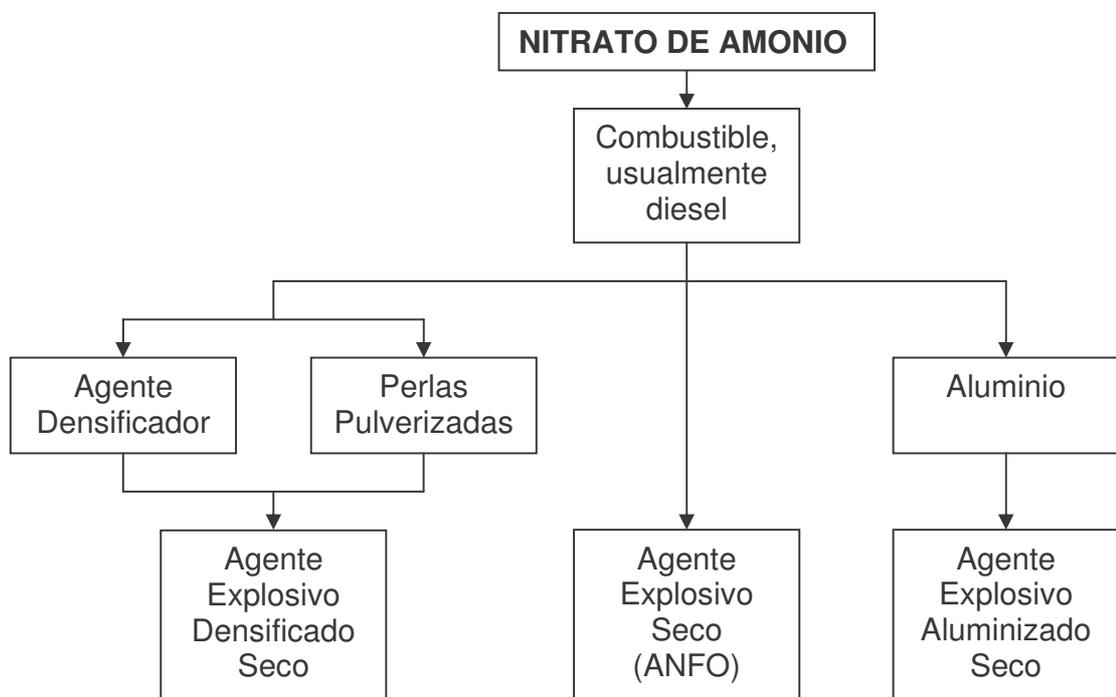


### 3.4 Agentes explosivos secos.

Los agentes explosivos secos son los más utilizados de todos los explosivos hoy en día. El término agente explosivo seco se refiere a todo aquel material en el cual no se utiliza agua en su formulación. Los primeros agentes explosivos empleaban combustibles basándose en carbón sólido o carbón mineral y nitrato de amonio en varias formas. A través de la experimentación se encontró que los combustibles sólidos tendían a segregarse durante la transportación y los resultados de las voladuras no eran óptimos. Se encontró que el diesel mezclado con perlas porosas de nitrato de amonio daban los mejores resultados. El término ANFO (Ammonium Nitrate and Fuel Oil) se ha convertido en el sinónimo de los agentes explosivos secos. Una mezcla de ANFO balanceada de oxígeno es la fuente de energía explosiva más barata que se

puede obtener hoy en día (Figura 3.2). El añadir polvo de aluminio a los agentes explosivos secos aumenta la producción de energía pero también aumenta el costo. Los agentes explosivos secos se pueden dividir en dos categorías: encartuchados y a granel.

Figura 3.2 Formulaciones con agentes explosivos



### 3.4.1 Agentes explosivos encartuchados.

Para uso en barrenos húmedos y donde no se utiliza el bombeo, se puede usar un cartucho de ANFO aluminizado o densificado. Un ANFO densificado se hace ya sea moliendo aproximadamente el 20% de las perlas y agregándolas de nuevo a la mezcla normal, o, agregando compuestos de hierro para incrementar la densidad dentro del cartucho. En ambos casos, el objetivo es

producir un explosivo con una densidad mayor a uno, de manera que se sumerja en el agua. Otro tipo de ANFO encartuchado se hace a partir del ANFO a granel con una densidad de 0.8. Este cartucho no se hundirá en el agua, sin embargo, es ventajoso usar este tipo de ANFO encartuchado en barrenos que han sido previamente bombeados o que contienen cantidades muy pequeñas de agua.

#### **3.4.2 ANFO a granel.**

El ANFO a granel se compone de perlas de nitrato de amonio y diesel. A menudo se le coloca dentro del barreno por medios mecánicos o neumáticos desde un camión. El ANFO puede colocarse ya mezclado dentro del camión y en algunos camiones las perlas de nitrato de amonio y el diesel se pueden mezclar en el campo antes de colocar el material en el barreno. La industria de los explosivos tiene gran dependencia en los agentes explosivos secos debido al gran volumen que se usa. Los agentes explosivos secos no funcionarán apropiadamente si se colocan en barrenos húmedos por períodos prolongados de tiempo. Por esta razón, el responsable de las voladuras debe saber las limitaciones del producto que está utilizando.

#### **3.5 Explosivos de dos componentes.**

A los explosivos de dos componentes con frecuencia se les llama binarios ya que están hechos de dos ingredientes separados. Ninguno de estos ingredientes es un explosivo en sí hasta que se mezclan. Los explosivos binarios normalmente no están clasificados como explosivos. Pueden ser embarcados y almacenados como materiales no explosivos. Los explosivos de dos componentes disponibles comercialmente son una mezcla de nitrato de amonio pulverizado y nitrometano que ha sido teñido de rojo o verde.

Estos componentes se llevan a la obra y se mezcla exclusivamente la cantidad necesaria. Al mezclar los materiales se obtiene un producto sensitivo al fulminante listo para usarse. Estos explosivos binarios se pueden utilizar en substitución de suspensiones sensitivas o dinamita, o como iniciadores de agentes explosivos. Su costo por unidad es considerablemente mayor al de la dinamita pero los ahorros en transportación y almacenamiento equilibran la diferencia en el costo por unidad. Si se requieren grandes cantidades para un trabajo en particular, el costo por peso es mayor y la molestia de mezclarlos en el lugar acabarán con los ahorros derivados de los requerimientos más flexibles del transporte y almacenamiento.

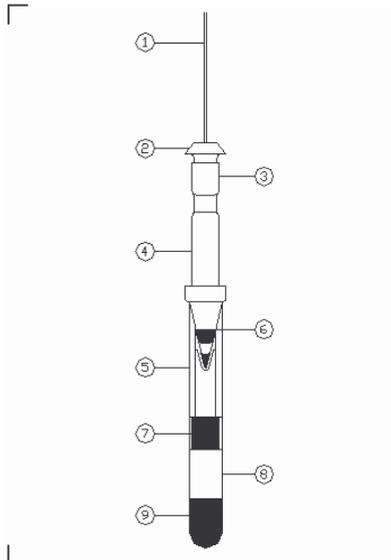
## **4 INICIADORES Y DISPOSITIVOS DE RETARDO.**

### **4.1 Fulminantes eléctricos.**

Los fulminantes eléctricos (estopines) están formados de un casquillo cilíndrico de aluminio o cobre que contiene una serie de cargas explosivas (Figura 4.1). La corriente eléctrica se suministra al estopín por medio de dos alambres de conexión que están conectados internamente a un alambre más pequeño de alta resistencia conocido como el puente. El puente o resistencia tiene una función similar al filamento de un foco eléctrico. Cuando una corriente de suficiente intensidad pasa a través del puente, éste se calienta hasta el punto de incandescencia y enciende un compuesto sensible al calor. Una vez que ocurre la ignición, ésta inicia una carga primaria y una carga base dentro del estopín, ya sea de manera instantánea o después de viajar a través de un elemento de retardo que funciona como un fusible interno. Este elemento provee un retardo de tiempo antes de que la carga base detone (Figura 4.2). Los alambres de conexión de un estopín están hechos ya sea de hierro o cobre. Cada alambre de conexión tiene un forro aislante de diferente color y todos los estopines en una serie tienen los mismos colores de alambres lo cual es una ayuda al momento de hacer la conexión.

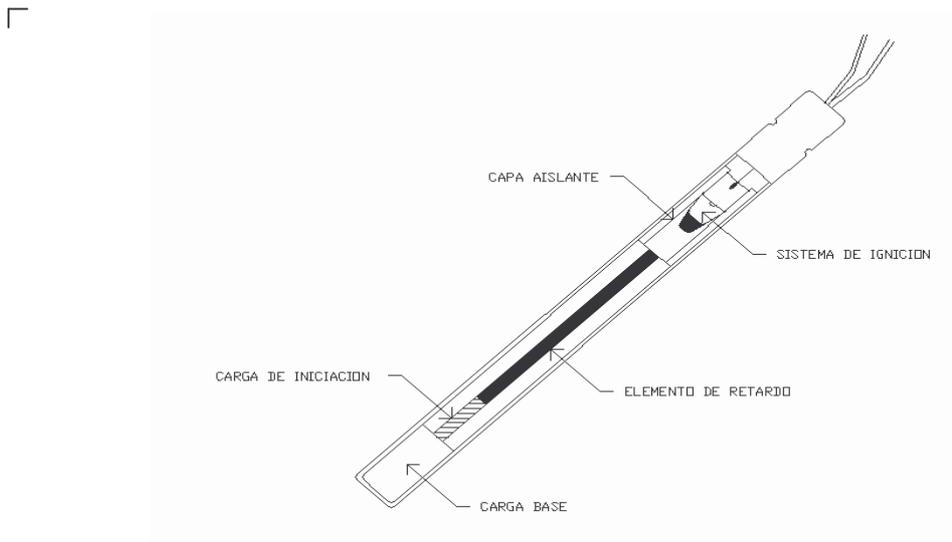
Los alambres de conexión entran al estopín por el lado abierto del casquillo. Para evitar la contaminación por algún material extraño o agua, un tapón de hule sella la abertura de manera que Solo los alambres de conexión pasan a través del tapón.

Figura 4.1 Fulminante eléctrico instantáneo



- 1.- Alambres de conexión
- 2.- Sello de hule
- 3.- Acanalado doble
- 4.- Casquillo de metal
- 5.- Tubo aislante de plástico
- 6.- Puente eléctrico "SF"
- 7.- Cápsula interna
- 8.- Carga primaria
- 9.- Carga base

Figura 4.2 Fulminante eléctrico de retardo



#### **4.1.1 Estopines instantáneos.**

Los estopines instantáneos están hechos para detonar dentro de unos cuantos milisegundos después de que se aplica la corriente eléctrica. Los estopines instantáneos no contienen tubo de retardo o elemento de retardo alguno.

#### **4.1.2 Estopines de retardo de período largo.**

Los retardos de período largo tienen intervalos que van desde cien milisegundos hasta más de medio segundo de retardo. Estos retardos proveen tiempo para que la roca se mueva en voladuras estrechas. Generalmente se utilizan en excavación de túneles, tiros de minas y voladuras subterráneas.

#### **4.1.3 Estopines de retardo en milisegundos.**

Los estopines de retardo en milisegundos (ms) se utilizan generalmente en voladuras de superficie. Los períodos de retardo varían dependiendo del fabricante, sin embargo, los incrementos más comunes son de 25 y 50 milisegundos.

### **4.2 Estopines de retardo electrónicos.**

Al paso de los años, ha surgido la necesidad de tener retardos muy precisos. La tecnología electrónica ha avanzado al punto de que existe la tecnología para fabricar retardos electrónicos a un costo de razonable. En algunos países ya se utilizan los retardos electrónicos. Un iniciador electrónico con tiempo de disparo muy preciso y con la habilidad de tener períodos infinitos de retardo con cualquier intervalo, revolucionará la industria. Este sistema de iniciación

eliminará virtualmente los problemas causados por la tolerancia en el tiempo de disparo, detonación imprecisa y disparos fuera de secuencia. Se tendrá el control de la vibración del terreno, roca en vuelo, golpe de aire y fragmentación. Debido a la sofisticación que se puede lograr en los componentes electrónicos, se puede dar a los fulminantes un código específico bajo el cual la detonación accidental debido a la corriente estática no será un peligro.

### **4.3 Magnadet.**

Debido a que se reconoce la importancia de contar con un sistema de iniciación seguro y preciso, muchas compañías se encuentran en el proceso de investigar y desarrollar nuevos sistemas. Un sistema que mencionaremos brevemente será el sistema de iniciación Magnadet que fue inventado por ICI en Escocia y que hoy en día se utiliza en varios países alrededor del mundo.

El sistema Magnadet ofrece ventajas sobre los sistemas de iniciación eléctrica convencionales en la facilidad de conexión y en la reducción de muchos de los peligros más comunes de las voladuras con iniciación eléctrica.

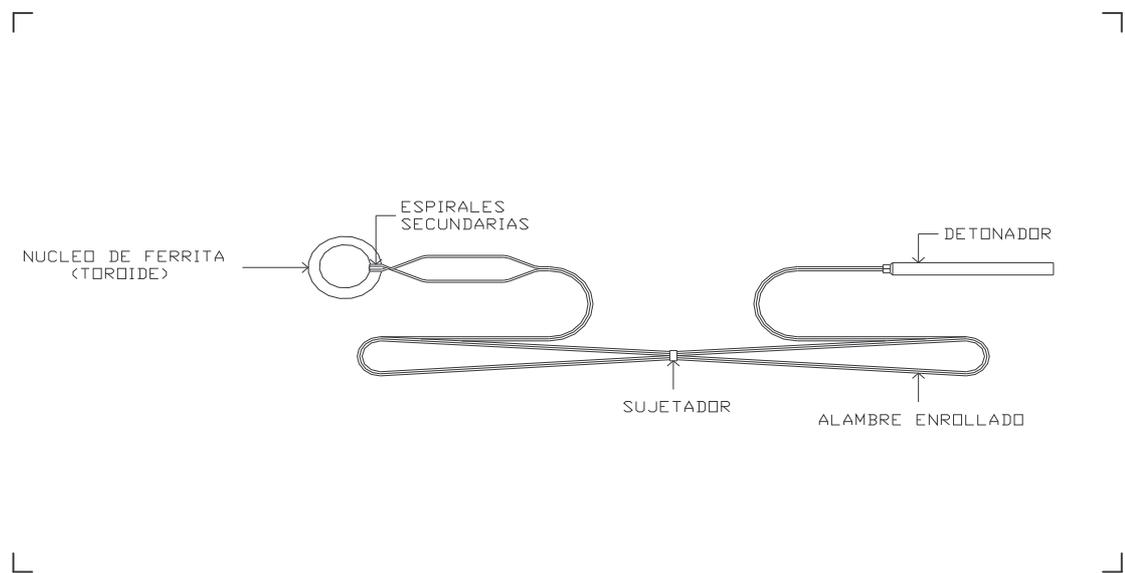
#### **4.3.1 Principios de operación del detonador e iniciador Magnadet.**

La transmisión de la energía eléctrica en el sistema Magnadet no es por conexión directa de los cables. El sistema funciona por inducción electromagnética entre las bobinas primaria y secundaria de un transformador (Figura 4.3).

### 4.3.2 Fuente de iniciación.

La fuente de corriente alterna que opera a una frecuencia de 15,000 Hz o más se suministra a través de una máquina explosora especial.

Figura 4.3 Esquema del armado del Magnadet



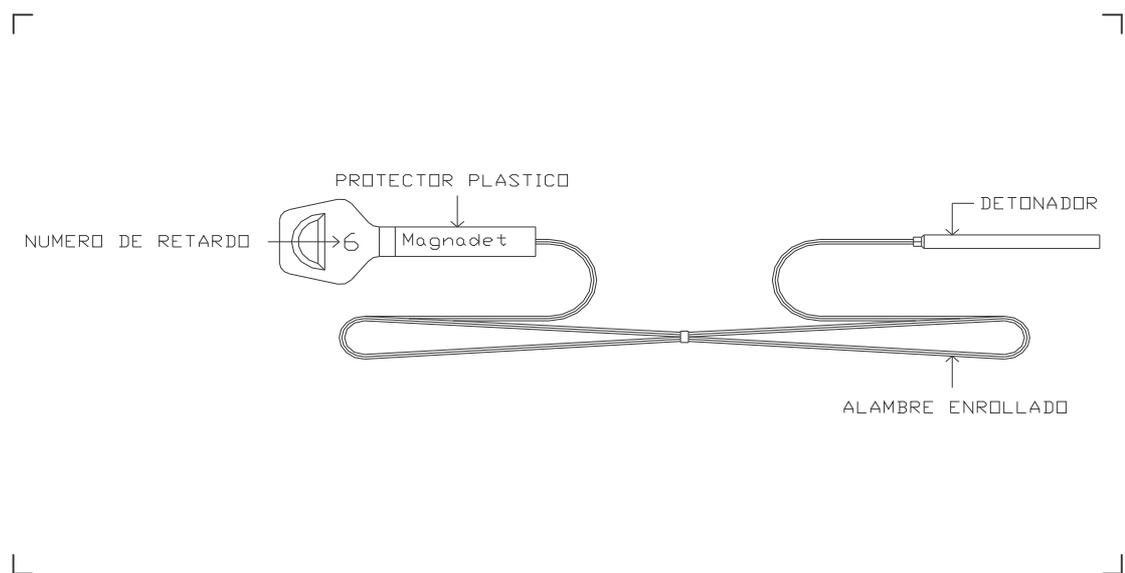
### 4.3.3 Descripción del iniciador.

El iniciador Magnadet tiene un transformador externo para cada iniciador. Este transformador es un anillo de Ferrita de 10 mm de ancho, con un diámetro interno de 10 mm y un diámetro externo de 20 mm. Los alambres de conexión de cada iniciador están acoplados a su propio anillo de Ferrita y forman la bobina secundaria del transformador. Un alambre aislado de conexión que pasa por en medio de cada anillo de Ferrita forma la bobina primaria del transformador (Figura 4.4). La porción detonante del dispositivo es de construcción convencional. El anillo de Ferrita y los alambres que forman la

bobina secundaria están recubiertos por una funda de plástico de colores brillantes como protección contra daños mecánicos. Cada protector de plástico tiene impreso un número que corresponde al número de retardo del iniciador al que está adherido.

El estopín de retardo en sí es de construcción convencional. El número de retardos se incrementa al utilizar un explosor secuencial.

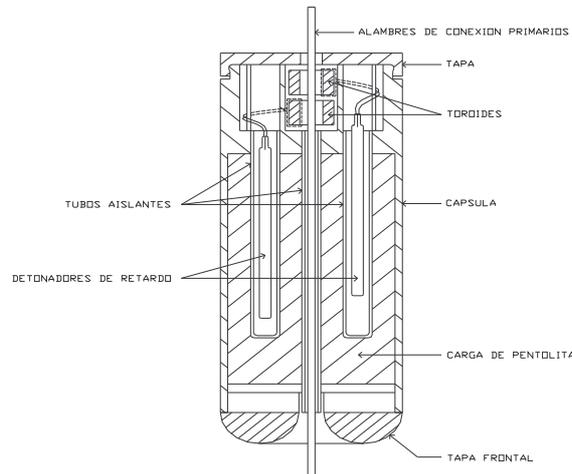
Figura 4.4 Anillo de Ferrita cubierto de plástico



#### 4.3.4 Iniciadores deslizantes Magnadet.

El iniciador deslizante Magnadet es un reforzador que puede alojar dentro de sí estopines Magnadet con alambres de 50 mm. El orificio central permite que un cable eléctrico sea pasado a través del iniciador y de los anillos de Ferrita de los estopines Magnadet proveyendo con esto el circuito primario y formando un acoplamiento inductivo como ya se explicó previamente (Figura 4.5).

Figura 4.5 Iniciador Magnadet



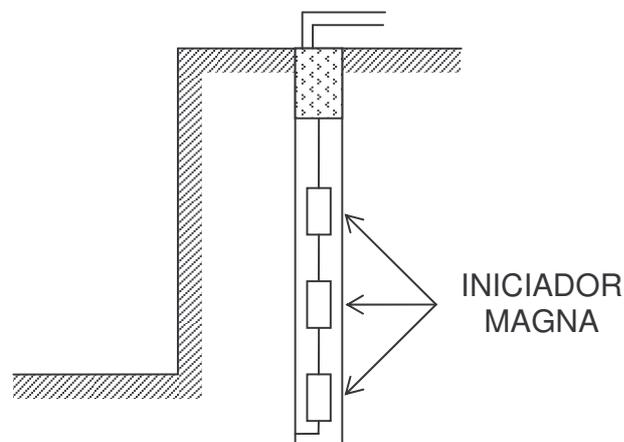
Si se requiere más de un iniciador por barreno, como cuando se disparan cargas con tacos intermedios, las unidades adicionales de iniciadores Magna pueden deslizarse por el mismo cable del circuito primario hasta la profundidad deseada dentro del barreno (Figura 4.6).

#### 4.3.5 Características de seguridad declaradas.

1. Protección contra corrientes dispersas de fuentes de corriente directa, el transformador no responde ante la energía de la corriente directa.
2. Protección contra corrientes dispersas de fuentes de corriente alterna, los 50 o 60 Hz de la corriente alterna común son demasiado bajos comparados con los 15,000 Hz que se necesitan para un disparo confiable.
3. Protección contra energía electrostática, el dispositivo está diseñado para resistir peligros potenciales asociados con la carga neumática del ANFO debido al roce con los alambres principales de los estopines.

4. Protección contra la energía de las radiofrecuencias.
5. Protección contra pérdida de energía, el voltaje efectivo a través de cada unidad es bajo, generalmente 1 o 2 voltios. No hay suficiente fuerza de transmisión para que ocurra una pérdida de energía.

Figura 4.6 Iniciador deslizante Magna



#### 4.3.6 Ventajas operacionales declaradas.

Simplicidad y conveniencia en el proceso de conexión, todo lo que se requiere es pasar un alambre en forma continua a través de los hoyos en los protectores de plástico que están pegados a los alambres principales de los iniciadores.

El sistema puede resultar gran ahorrador de tiempo en el procedimiento de cargado y conectado de la voladura.

El sistema de iniciación con los iniciadores deslizantes Magnadet ofrece un sistema de iniciadores deslizantes con una tecnología simple y segura de

retardos dentro del barreno y permite disparar cargas con tacos intermedios donde cada carga dispara con un retardo diferente.

Ofrece todas las ventajas de la iniciación eléctrica sin los riesgos de seguridad.

#### **4.4 Máquina explosora secuencial.**

Es una máquina de estado sólido, de descarga de condensadores, con un cronómetro secuencial lo que permite detonar muchos estopines. La máquina es capaz de disparar 175 ohms por circuito a intervalos diferentes muy precisos. La máquina consiste de 10 circuitos de disparo diferentes que se programan para disparar uno después de otro a los intervalos seleccionados. La combinación de los 10 circuitos diferentes, o intervalos, en combinación con los retardos de los estopines puede producir muchas voladuras independientes.

Los explosores secuenciales se utilizan en construcción al igual que en minería. Estos explosores permiten el uso de muchos retardos dentro de la misma voladura. El peso de los explosivos disparados por cada período de retardo puede ser reducido significativamente para controlar el ruido y los efectos de vibración ya que hay muchos retardos disponibles. El explosor secuencial puede fijarse para disparar desde 5 hasta 999 ms en incrementos de 1 ms.

El explosor secuencial programable permite que la máquina se fije con nueve incrementos de retardo diferentes. La máquina también permite el uso de cuatro máquinas esclavas de la máquina maestra. Al usar las máquinas esclavas en combinación con la máquina maestra, se pueden tener 50 retardos

diferentes que son totalmente ajustables. Existen explosores para estopines normales así como para el sistema Magnadet.

#### **4.5 Sistemas de iniciación no eléctricos.**

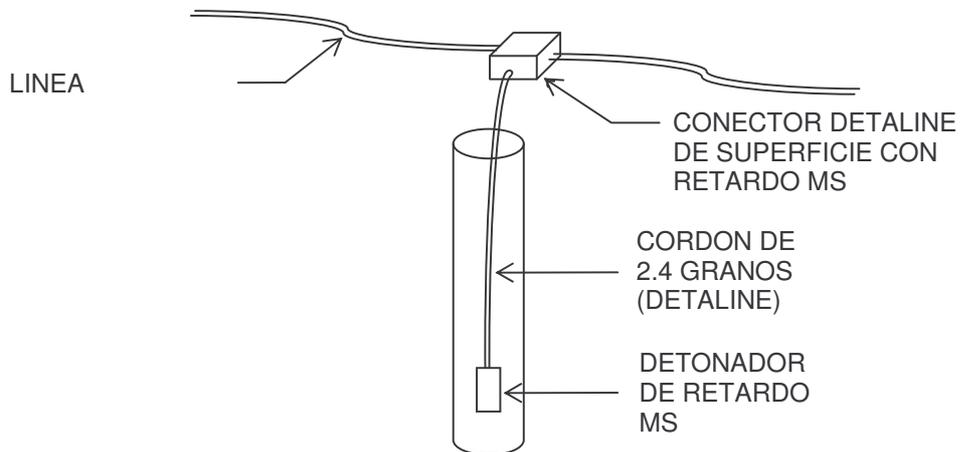
Los sistemas de iniciación no eléctrica se han usado en la industria de los explosivos durante muchos años. El primer método de iniciación, mecha y fulminante, proporcionaba un sistema de bajo costo y poco riesgo. Su uso ha disminuido debido a la introducción al mercado de sistemas más sofisticados y menos peligrosos, por otro lado, lograr tiempos de retardo precisos con mecha y fulminante es imposible. Este sistema no tiene cabida en la industria de la construcción moderna.

Actualmente hay cuatro sistemas de iniciación disponibles comercialmente. Todos tienen aplicación en la industria de la construcción. Para incrementar los períodos de retardo disponibles, los usuarios combinan frecuentemente el uso de varios sistemas de iniciación no eléctrica en una sola voladura. A menudo, componentes de sistemas eléctricos y no eléctricos se combinan para dar una selección mayor de retardos y tiempos de tardo específicos.

##### **4.5.1 Sistemas de iniciación Detaline.**

Es un sistema no eléctrico de dos trayectorias compatible con líneas descendentes de cordón detonante y retardos de fondo no eléctricos. El sistema Detaline consiste en: cordón Detaline, arrancadores Detaline, retardos ms de superficie Detaline y retardos ms de fondo Detaline (Figura 4.7).

Figura 4.7 Detaline



#### 4.5.2 Cordón Detaline.

El cordón Detaline es un cordón detonante de baja energía que tiene una carga de tetranitrato de pentaeritritol (PETN) de 0.5 gramos por metro. El núcleo explosivo se encuentra dentro de fibras textiles y está cubierto de un forro plástico continuo. El cordón Detaline no continuará su detonación a través de un empalme anudado. Para empalmar el cordón, se requiere de un arrancador Detaline, el cual se requiere también para iniciar la línea troncal Detaline.

#### 4.5.3 Retardos MS de superficie Detaline.

Los retardos ms de superficie Detaline tienen la misma forma que los arrancadores y contienen un explosivo que se quema a menor velocidad para proporcionar el tiempo de retardo entre la activación y la iniciación del cordón detonante que está asegurado en el extremo señalado con una flecha.

#### **4.5.4 Retardos MS de fondo Detaline.**

Los retardos de fondo Detaline se parecen a un fulminante común con la excepción de un sello en la parte superior diseñado para insertar el cordón Detaline. Hay diecinueve períodos de retardo disponibles desde 25 ms hasta 1,000 ms. Una etiqueta está adherida a cada fulminante para la identificación del período.

#### **4.6 Cebos de retardo.**

Los cebos de retardo son unidades de alto explosivo sensitivo con un iniciador no eléctrico individual que se inicia a través de una línea de cordón detonante. El cebo de retardo se utiliza para detonar ANFO, agentes explosivos o cualquier explosivo no sensitivo al fulminante. Los cebos de retardo son ideales para la iniciación desde el fondo del barreno, estos pueden ser usados con columnas completas de explosivos así como con tacos intermedios.

Un tubo corre a lo largo del cebo en el cual se entreteje una sola línea de cordón detonante. Esto elimina la necesidad de separar la línea de cordón para cada carga intermedia. Se pueden entrelazar cualquier número de cebos en esta línea sencilla de cordón detonante.

El detonador de 454 g. se utiliza para agentes explosivos a granel o empacados y emulsiones con diámetro de 100 mm o más. Se recomienda que se utilice un cordón detonante de 5.3 g/m como línea de bajada con una resistencia a la tensión por arriba de 90 Kg.

#### **4.7 Sistemas de iniciación de tubos de choque.**

Los tubos de choque son sistemas de transmisión de señal no eléctricos, instantáneos y no disruptiva. El sistema detona dentro de un tubo de plástico que contiene una pequeña capa de material reactivo en el interior. Este material reactivo tiene un peso de carga de alrededor de 0.02 g/m y propaga una onda de choque sin ruido a una velocidad de 2,000 m/s aproximadamente. El sistema elimina todos los riesgos eléctricos, excepto la posible iniciación por un golpe directo de un rayo.

Los sistemas de tubo de choque necesitan una cantidad precisa de energía para iniciar la reacción dentro del tubo. Pueden ser iniciados con cordón detonante, estopín eléctrico, mecha y fulminante o un arrancador de bajo costo como un fulminante de escopeta con un dispositivo de percusión. Los aspectos únicos de estos sistemas son:

1. Son totalmente seguros contra la mayoría de los riesgos eléctricos y de radio frecuencias.
2. No producen ruido en la superficie.
3. No inician explosivos sensitivos dentro de los barrenos.
4. Propagan la reacción a través de nudos y dobleces extremos.



## **5 SELECCIÓN DE CEBOS Y REFORZADORES.**

### **5.1 Diferencia entre cebos y reforzadores.**

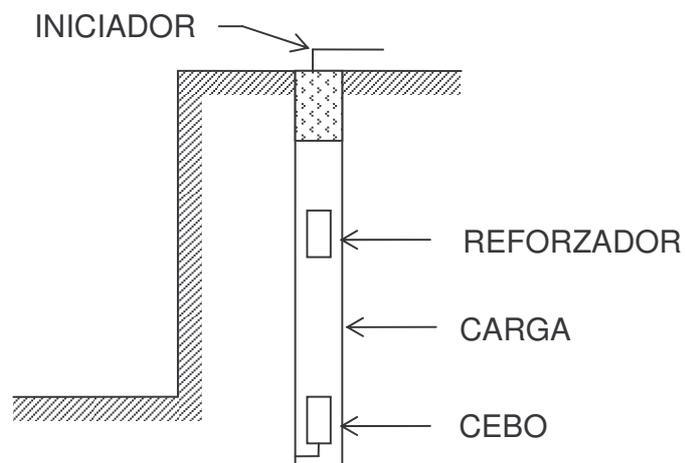
La diferencia entre un cebo y un reforzador se encuentra principalmente en su uso más que en su composición física o fabricación. Un cebo se define como una unidad explosiva que contiene un iniciador. Por ejemplo, si un iniciador se coloca dentro de un cartucho de dinamita, ese cartucho con iniciador se convierte en un cebo. Un reforzador, por otro lado, es una unidad explosiva de diferente composición a la de la carga principal y no contiene un dispositivo iniciador. El reforzador es iniciado por la carga de columna adyacente a él. Un reforzador se utiliza para poner energía adicional dentro de una capa de roca dura o difícil de romper (Figura 5.1).

### **5.2 Tipos de cebos.**

Los cebos se pueden encontrar en muchos tamaños y muchas composiciones diferentes. Los cebos pueden ser tan pequeños como el Detaprime, el cual cabe en la punta de un iniciador y pesa unos cuantos gramos, o puede consistir de un cartucho de 20 Kg. de explosivo. El diámetro puede variar de desde unos cuantos milímetros hasta más de 30 cm. Los cebos se encuentran en una gran variedad de composiciones. Varios grados de dinamita se usan como cebos así como hidrogeles, emulsiones y compuestos densificados de nitrato de amonio. Diferentes tipos de explosivos de alta densidad, alta velocidad de detonación y costo son usados como cebos. Debido al gran número de tamaños y composiciones de cebos, existe cierto

grado de confusión entre los usuarios. La selección inadecuada puede causar, frecuentemente, resultados muy pobres.

Figura 5.1 Cebo y reforzador en un barreno



Un cebado inadecuado puede ser costoso para el operador. Si la carga principal del barreno no se inicia apropiadamente, las plantillas de barrenación por necesidad serán mucho más pequeñas de lo que normalmente serían. El tamaño de la fragmentación será más grande. Los procedimientos deficientes de cebado no solo son costosos, sino que pueden causar vibración excesiva del terreno, golpe de aire, roca en vuelo y un daño considerablemente mayor detrás de la última hilera de barrenos de lo que ocurriría si se utilizaran procedimientos de cebado adecuados.

### 5.2.1 Determinación de la cantidad necesaria.

El número de cebos que se colocan dentro de un barreno es dependiente de un número de factores diferentes. No hay un método de cebado que se pueda definir como un procedimiento universalmente aceptado.

Es una práctica común entre algunos operadores el colocar en forma rutinaria dos cebos dentro del barreno independientemente de la longitud de éste. Se preocupan acerca de la posibilidad de tener un iniciador defectuoso, que no dispare, o bien preocuparse por cortes del barreno debido al movimiento de la roca provocado por el disparo previo de otros barrenos. En cualquier caso, su razonamiento es que el usar un segundo cebo es un seguro contra cualquier problema. Si un manto rocoso contiene un número considerable de capas de arcilla, donde el confinamiento de la carga principal puede perderse durante el proceso de detonación, es común el encontrar operadores que colocan cebos adicionales en el barreno para provocar que la carga de explosivo dispare más rápidamente, reduciendo así la posibilidad de problemas debidos a la pérdida de confinamiento.

Si el operador está trabajando en roca competente, el uso de barrenos cuya longitud sea mayor a dos veces el bordo puede requerir un segundo cebo para obtener una detonación eficiente a lo largo de toda la columna de explosivo. De manera inversa, en la mayoría de los casos desde un punto de vista puramente técnico, Solo un cebo es necesario para una columna sencilla de explosivo si la altura del banco es menor a dos veces el bordo. En estos casos donde más de un cebo es utilizado, se asume que ambos cebos dispararán casi instantáneamente.

Si dos o más cebos se colocan en un barreno, normalmente el segundo cebo se colocará con un retardo posterior ya que la localización del primer cebo puede ser crítica para que la voladura se desempeñe apropiadamente. El segundo cebo retardado actuará Solo como unidad de respaldo si el primero fallara en iniciar al tiempo proyectado.

### **5.2.2 Criterios de selección de un cebo.**

Los dos criterios más críticos son: la composición y el tamaño. La composición del cebo determina la presión de detonación que es la directamente responsable de la iniciación de la carga principal. El tamaño del cebo también es importante para obtener una reacción apropiada. Cebos con diámetros pequeños no son tan eficientes como los de diámetro mayor.

### **5.2.3 Guías de selección de cebos.**

A continuación se dan algunos lineamientos generales para el cebado:

1. La presión de detonación de un cebo debe ser mayor al nivel necesario para provocar que la carga principal detone a, o por encima de su velocidad normal de detonación. La densidad y la velocidad de detonación en confinamiento pueden usarse como indicadores de la presión de detonación, si los valores de ésta no están disponibles. Un cebo que tenga una densidad aproximada de  $1.2 \text{ g/cm}^3$  con una velocidad de detonación en confinamiento mayor a 4600 m/s normalmente será adecuado para cebar explosivos no sensitivos, materiales tales como ANFO, agentes explosivos y la mayoría de hidrogeles. Esta combinación de densidad y velocidad produce una presión de detonación de alrededor de 60 kilo bares. Para explosivos tales como emulsiones, que detonan a velocidades mayores, cebos más energéticos producirán mejores resultados. Un cebo con densidad de  $1.3 \text{ g/cm}^3$  con una velocidad de detonación en confinamiento mayor a 5200 m/s será adecuado para rápidamente alcanzar la velocidad normal del explosivo. Esta combinación de densidad y velocidad produce una presión de detonación de alrededor 80 kilo bares.

2. El diámetro del cebo debe ser mayor al diámetro crítico del explosivo usado como carga principal de la columna.
3. El cebo debe ser sensible al iniciador. Una gran variedad de productos son usados como cebos. Estos cebos tienen diferentes sensibilidades. Algunos pueden ser iniciados por cordón detonante de baja energía, mientras que otros pueden ser insensitivos a estos iniciadores. Es importante que el operador entienda la sensibilidad de un cebo para asegurar que la detonación ocurra en la carga principal de columna.
4. El explosivo en el cebo debe alcanzar su velocidad nominal de detonación dentro de la longitud del cartucho. Si esto se logra, entonces los cartuchos adicionales de explosivo de cebado no tienen un propósito útil.
5. Para la mayoría de las aplicaciones de voladura, no son necesarios más de dos cebos por barreno. El segundo cebo, aunque técnicamente no se necesita, es comúnmente usado como sistema de respaldo en caso en caso de que el primero falle o no dispare la carga completa.

### **5.3 Reforzadores.**

Los reforzadores se utilizan para intensificar la reacción del explosivo en un punto en especial dentro de la columna de explosivo. Los reforzadores se utilizan algunas veces entre cada cartucho de explosivo para asegurar la transmisión de la detonación a través de las uniones de los cartuchos. Esto normalmente una pobre excusa para el uso de los reforzadores, ya que el costo del reforzador puede ser considerable. La selección de un explosivo que no requiera un reforzador entre cada cartucho puede ser una solución más económica.

En general, los reforzadores se utilizan para poner más energía dentro una capa dura en la columna de roca. Algunas veces se utilizan también para

intensificar la reacción alrededor del cebo lo que aportará más energía en el punto donde se localice el cebo. Esto es usado comúnmente cuando los cebos se localizan cerca del fondo del barreno, ya que es en este punto donde la roca es más difícil de romper. El usar un reforzador en el fondo del barreno normalmente permite el incremento en las dimensiones del bordo y una mejor fragmentación en la pata de la voladura. Los reforzadores pueden estar hechos de materiales explosivos similares a los cebos. Su única función es la de aportar más energía en puntos específicos dentro de la columna de explosivo.

#### **5.4 Efectos del cordón detonante en la liberación de energía.**

Los explosivos sensitivos, tales como la dinamita, se inician con cordón detonante. Los explosivos no sensitivos tales como el nitrato de amonio, emulsiones e hidrogeles pueden ser afectados de muchas maneras por el cordón detonante que pasa a través de la columna de explosivo. Si el cordón detonante tiene la suficiente energía, los explosivos pueden detonar o quemarse. Una combustión, en lugar de una detonación, libera Solo una parte de la energía disponible de los explosivos. La voladura está subcargada debido a la poca liberación de energía. Los niveles de vibración del terreno aumentan mientras que los barrenos se escopetean produciendo roca en vuelo.

Para prevenir que la carga principal de explosivo se queme o deflagre, uno debe estar seguro que el cordón detonante no es demasiado grande para el diámetro del barreno. Las cargas del cordón que no deben causar deflagración se encuentran en la Tabla X.

Tabla X. Carga máxima del cordón

<b>Diámetro del barreno (mm)</b>	<b>Carga máxima del cordón (g/m)</b>
25 – 127	2.1
127 – 204	5.3
204 – 381	10.7

Si el cordón detonante no tiene la carga suficiente para causar la reacción del explosivo, puede provocar que el explosivo se dañe. La localización del cordón puede ser al centro del barreno o a un lado y esta localización controlará la severidad de los efectos. El daño resultante es llamado presión muerta o precompresión. La precompresión incrementa la densidad del explosivo y éste no detona. Esto ocurre cuando el cordón detonante tienen suficiente energía para quebrar los espacios de aire dentro del explosivo o romper las micro esferas llenas de aire que se utilizan en algunos productos. Las bolsas de aire proveen lugares para la formación de puntos calientes para la detonación. La compresión adiabática del aire es necesaria para que la detonación prosiga a lo largo del explosivo.

Cuando el explosivo está parcialmente comprimido o dañado por la precompresión, puede detonar o quemarse liberando Solo una parte de la energía disponible. Este efecto puede ser confuso ya que puede estar totalmente consumido y tener muy poca fragmentación de roca. Comúnmente, el operador que sufre este tipo de problemas piensa que el problema es debido a la dureza de la roca.

La recomendación general es: no utilizar ningún cordón detonante en barrenos de diámetro pequeño cargados con explosivos no sensitivos.

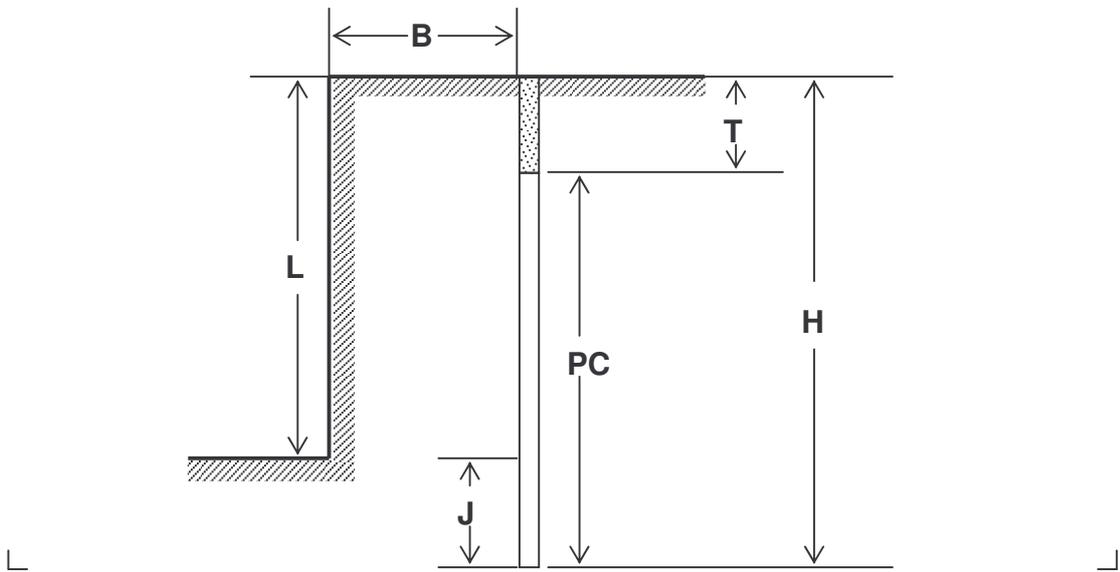


## 6 DISEÑO DE VOLADURAS.

### 6.1 Bordo.

La dimensión del bordo se define como la distancia más corta al punto de alivio al momento que un barreno detona (Figura 6.1). El alivio se considera normalmente como la cara original del banco o bien como una cara interna creada por una hilera de barrenos que han sido disparados previamente con un retardo anterior. La selección del bordo apropiado es una de las decisiones más importantes que hay que hacer en cualquier diseño de voladuras. De todas las dimensiones de diseño en una voladura, el bordo es la más crítica. Si los bordos son demasiados pequeños, la roca es lanzada a una distancia considerable de la cara. Los niveles de golpe de son altos y la fragmentación puede resultar demasiado fina. Por el otro lado, si los bordos son muy grandes, dará como resultado el rompimiento trasero y el bronqueo de la cara final. Los bordos excesivos también pueden ocasionar que los barrenos se escopeteen lanzando piedra a distancias considerables, los niveles de golpe de aire altos y la formación de cráteres ocurren cuando los barrenos Solo tienen el alivio hacia arriba. Los bordos excesivos causan un exceso de confinamiento en los barrenos, lo que da como resultado niveles de vibración significativamente más altos por kilogramo de explosivo utilizado. La fragmentación de la roca puede ser extremadamente gruesa y con frecuencia se tiene problemas en la parte baja o pata del banco. Otras variables de diseño son más flexibles y no producirán diferencias tan drásticas en los resultados como la misma proporción de error en la dimensión del bordo.

Figura 6.1 Símbolos para el diseño de voladuras



donde:

B	=	Bordo
T	=	Taco
J	=	Sub-barrenación
L	=	Altura de banco
H	=	Profundidad del barreno
PC	=	Longitud de la columna de explosivo

Si el operador ha seleccionado un bordo y lo ha utilizado con éxito con un diámetro de barreno determinado y quiere calcular el bordo para un diámetro diferente, ya sea mayor o menor, puede hacerlo de manera fácil siempre y cuando lo único que esté cambiando sea el diámetro de barreno y el tipo de roca y explosivo se mantenga igual. Para hacer esto, puede utilizar la siguiente relación:

$$B_2 = B_1 ( De_2 / De_1 )$$

donde:

$B_1$	=	Bordo utilizado exitosamente en voladuras previas
$De_1$	=	Diámetro del explosivo para $B_1$
$B_2$	=	Nuevo bordo
$De_2$	=	Diámetro nuevo del explosivo para $B_2$

**Ejemplo:** Un contratista estaba trabajando en un corte de una carretera con bordos de 4.6 m. Se hicieron barrenos de 152 mm en roca arenisca y se cargaron con nitrato de amonio. El operador decidió reducir el diámetro de los barrenos a 102 mm mientras seguía utilizando el nitrato de amonio como explosivo. Determinar el nuevo bordo necesario para el diámetro de la carga de 102 mm.

$$B_2 = B_1 ( De_2 / De_1 ) = 4.6 ( 102 / 152 ) = \mathbf{3.09 \text{ m}}$$

La ecuación utilizada en el ejemplo anterior tiene severas limitaciones ya que Solo puede usarse si las características de los explosivos y la roca se mantienen sin cambio.

### **6.1.1 Ajustes para el tipo de roca y explosivo.**

Cuando un operador se está moviendo hacia una nueva área de trabajo donde no ha tenido experiencia previa, Solo tendrá las características generales de la roca y el explosivo para trabajar. En estos casos y sobre todo si existen asentamientos humanos cercanos, es esencial que la primera voladura no sea

un desastre. Para estimar el bordo bajo estas situaciones, la siguiente fórmula empírica resulta de ayuda.

$$B = 0.012 ( ( 2SGe / SGr ) + 1.5 ) De$$

donde:

B	=	Bordo	(m)
SGe	=	Gravedad específica o densidad del explosivo	(g/cm <sup>3</sup> )
SGr	=	Gravedad específica o densidad de la roca	(g/cm <sup>3</sup> )
De	=	Diámetro del explosivo	(mm)

**Ejemplo:** Un operador ha diseñado un patrón de voladura en una formación de roca caliza usando barrenos de 76 mm de diámetro. Estos barrenos se cargarán con dinamita semigelatina con una densidad de 1.3 g/cm<sup>3</sup>. La caliza tiene una densidad de 2.6 g/cm<sup>3</sup>, y el diámetro de los cartuchos es de 62 mm. Determinar el bordo (las densidades de las rocas se dan en la Tabla XI).

$$B = 0.012 ( ( 2SGe / SGr ) + 1.5 ) De = 0.012 ( ( 2 \times 1.3 / 2.6 ) + 1.5 ) 62 = \mathbf{1.86 \text{ m}}$$

En la mayoría de los casos, los bordos utilizados en un trabajo, serán razonables si están dentro de  $\pm 10\%$  del valor obtenido con la ecuación del ejemplo anterior. La densidad de la roca se utiliza en esta ecuación como una indicación de la resistencia de la matriz de la roca. Existe una relación entre la densidad de la roca y sus resistencia; entre más densa sea la roca, se necesitará mayor energía para superar su resistencia a la tensión y causar el rompimiento. Existe también una relación con la cantidad de energía necesaria para mover la roca. Las características de potencia de los explosivos pueden aproximarse utilizando la gravedad específica (densidad) ya que entre más potente sea un explosivo, será más denso. Si la potencia de los explosivos

fuese la misma sobre la base de la unidad de peso, entonces la potencia sería proporcional a la densidad. Sin embargo, también existen diferencias en la energía de los explosivos sobre la base de la unidad de peso. Esas diferencias comparadas con las diferencias en la densidad son, normalmente bastante pequeñas, lo que nos permite usar la ecuación del ejemplo anterior como una primera aproximación.

Tabla XI. Densidad de las rocas

<b>Tipo de roca</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Arenisca	2.0 – 2.8
Basalto	2.8 – 3.0
Caliza	2.4 – 2.9
Cuarcita	2.0 – 2.8
Diorita	2.8 – 3.0
Dolomita	2.8 – 2.9
Esquisto	2.4 – 2.8
Feldespatos	2.6 – 3.0
Gneis	2.6 – 2.9
Granito	2.6 – 2.9
Hematita	4.5 – 5.3
Mármol	2.1 – 2.9
Mica	2.5 – 2.9
Pizarra	2.5 – 2.8
Trap Rock	2.6 – 3.0

Las ecuaciones anteriormente propuestas para el cálculo del bordo usaban la densidad de los explosivos como un indicador de la energía. La nueva generación de suspensiones explosivas, llamadas emulsiones, de alguna manera tienen diferentes energías aunque tienen casi la misma densidad. Las ecuaciones de bordo propuestas hasta ahora definirán un bordo razonable pero no diferenciarán entre los niveles energía de algunos explosivos como las emulsiones. De manera de poder aproximar aún más el bordo para una voladura de prueba, se puede utilizar una ecuación que considera la potencia relativa por volumen en lugar de la densidad del explosivo. La potencia relativa por volumen es el nivel de energía a volumen constante y comparado a un explosivo básico.

El explosivo básico para comparación es el nitrato de amonio y diesel al cual se le ha asignado un nivel de energía de 100. Para usar la ecuación de energía se deben considerar la potencia relativa por volumen del explosivo. Se ha encontrado que los valores de la potencia relativa por volumen que resulta de los datos de la prueba de la energía burbuja, normalmente producen resultados razonables. El trabajar con energías relativas puede ser confuso ya que las energías relativas pueden ser calculadas, en lugar de obtenidas de datos de prueba de energía de burbuja. El explosivo dentro del ambiente del barreno puede no ser tan eficiente como se podría esperar por los datos de la prueba subacuática. La ecuación que utiliza energía relativa es:

$$B = 8 \times 10^{-3} D_e \sqrt[3]{(Stv / SGr)}$$

donde:

B	=	Bordo	(m)
De	=	Diámetro del explosivo	(mm)
Stv	=	Potencia relativa por volumen	(ANFO = 100)
SGr	=	Gravedad específica la roca	(g/cm <sup>3</sup> )

### 6.1.2 Correcciones por el número de hileras.

Muchas operaciones de voladuras se llevan a cabo usando una o dos hileras de barrenos. En estos casos, el bordo entre la primera y segunda hilera será igual. En otras voladuras sin embargo, se utilizan tres o más hileras. Cuando el tiempo de voladura no es correcto, es más difícil romper las últimas hileras de barrenos en voladuras de hileras múltiples, ya que las hileras previas añaden resistencia y confinamiento extra a las hileras traseras. Esto ocurre también con frecuencia en voladuras con apilamientos anteriores. Las voladuras con apilamientos anteriores son aquellas que se disparan antes de que el material de la voladura previa sea removido. Para ajustar los bordes de la tercera, cuarta e hileras subsecuentes, se puede utilizar el factor de corrección  $K_r$  como se indica en la Tabla XII. El bordo para la voladura de prueba será el calculado originalmente multiplicado por  $K_r$ .

Tabla XII. Correcciones por el número de hileras

Hileras	$K_r$
Una o dos hileras	1.0
Tercera hilera y subsecuentes o voladuras con apilamiento anteriores	0.9

### 6.1.3 Corrección por factores geológicos.

Ningún valor será satisfactorio para la dimensión exacta del bordo en un tipo particular de roca debido a la naturaleza variable de la geología. Aún cuando las características de resistencia se mantengan sin cambio, la forma del depósito y la estructura geológica deben ser considerados en el diseño de una voladura. El ángulo de los estratos influye el diseño del bordo dentro del patrón.

Existen dos resistencias de la roca que debe superar el explosivo: la resistencia a la tensión de la matriz de la roca y la resistencia a la tensión de la masa rocosa. La resistencia a la tensión de la matriz es aquella que se puede medir con las pruebas de ruptura efectuada en una máquina de pruebas uniaxial. Los procedimientos de prueba mecánicos requieren el uso de una muestra masiva y sin daño del material. Los resultados se verán influenciados debido a que se utilizan muestras intactas en vez de aquellas que ya tienen fracturas. Al hacer esto, solo se está midiendo la resistencia de la matriz y no la de la masa rocosa. La resistencia de la masa puede ser muy baja mientras que la de la matriz resulte muy alta. Por ejemplo: se puede tener una roca muy dura alta mente fracturada, rota, foliada y laminada. La masa rocosa sin embargo, puede encontrarse al borde del colapso debido simplemente a la estructura de la roca.

Para estimar la desviación de la fórmula normal del bordo para estructuras rocosas poco usuales, se incorporan dos constantes a dicha fórmula. La constante  $K_d$  se utiliza para forma del depósito y la constante  $K_s$  es la corrección para la estructura geológica. Los valores de  $K_d$  tienen un rango de 1.0 a 1.18 y describen el sentido de los estratos (Tabla XIII). El método de clasificación se divide en tres casos generales de depósito: estratos sumergiéndose hacia el corte, estratos sumergiéndose hacia la cara y otros tipos de depósitos.

La corrección para la estructura geológica toma en cuenta la naturaleza fracturada de la roca in situ, la resistencia de las juntas y su frecuencia así como la forma en que están cementados los estratos de roca. Los factores de corrección para la estructura de la roca varían de 0.95 a 1.30 (Tabla XIV). La roca masiva e intacta tendrá un valor de  $K_s$  de 0.95 mientras que la roca altamente fracturada puede tener un valor de  $K_s$  cercano a 1.30.

Tabla XIII. Correcciones por el tipo de depósitos

Orientación de los estratos	Kd
Estratos hacia el corte	1.18
Estratos hacia la cara	0.95
Otros tipos de depósitos	1.00

Tabla XIV. Correcciones para estructura geológica

Estructura geológica	Ks
Altamente fracturada, juntas frecuentes y débiles, capas con poco cementante	1.30
Capas delgadas bien cementadas con juntas estrechas	1.10
Roca intacta y masiva	0.95

**Ejemplo:** La formación rocosa es de caliza (densidad = 2.6 g/cm<sup>3</sup>) y tiene estratos horizontales con muchas juntas débiles. Está altamente laminada con capas poco cementadas. El explosivo será una suspensión encartuchada (potencia relativa de 140) con una densidad de 1.2 g/cm<sup>3</sup>. Los cartuchos de 127 mm de diámetro serán cargados dentro de barrenos mojados de 165 mm de diámetro.

$$B = 8 \times 10^{-3} D_e \sqrt[3]{(Stv / SGr)} = 0.008 \times 127 \times \sqrt[3]{(140 / 2.6)} = 3.84 \text{ m}$$

Corrección para condiciones geológicas

$$B = K_d \times K_s \times B = 1 \times 1.3 \times 3.84 = \mathbf{4.99 \text{ m}}$$

Primero se calcula el bordo promedio. Con cartuchos de 127 mm, el bordo promedio es de 3.84 m. Cuando se aplican los factores de corrección el bordo será de 4.99 m.

## 6.2 Distancia del taco.

La distancia del taco se refiere a la porción superior del barreno que normalmente se rellena con material inerte para confinar los gases de la explosión. Para que una carga de alto explosivo funcione adecuadamente y libere el máximo de energía, la carga debe encontrarse confinada dentro del barreno. El confinamiento adecuado también es necesario para controlar la sobre presión de aire y la roca en vuelo. La relación común para la determinación del taco es:

$$T = 0.7B$$

donde:

T	=	Taco	(m)
B	=	Bordo	(m)

En la mayoría de los casos, una distancia de taco de 0.7B es adecuada para evitar que salga material prematuramente del barreno. Debe recordarse que la distancia del taco es proporcional al bordo y, por lo tanto, al diámetro de la carga, a la densidad del explosivo y a la densidad de la roca ya que todos éstos son necesarios para determinar el bordo. La distancia del taco es también función de estas variables. Si la voladura tiene un diseño pobre una distancia del taco de 0.7B puede no ser adecuada para evitar que el material se escopetee. De hecho, bajo condiciones de un diseño deficiente, el doblar,

triplicar o cuadruplicar la distancia del taco, no asegura que los barrenos funcionen correctamente, por lo tanto, la distancia del taco promedio discutida anteriormente solamente es válida si la voladura está funcionando adecuadamente.

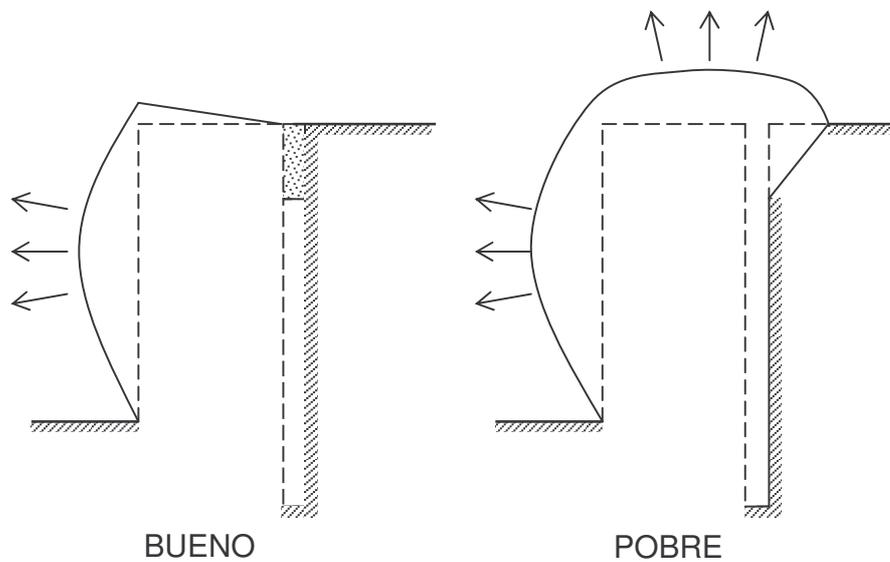
El material más común utilizado para taco son las astillas de barrenación ya que, se localizan convenientemente en la boca de los barrenos. Sin embargo, las astillas muy finas comúnmente llamadas polvo son un material muy pobre para el taco. Si se utilizan astillas de barrenación que contengan demasiado polvo, se tendrá que utilizar aproximadamente un 30% o 0.3B más (taco = bordo) que si se utiliza piedra triturada como material de taco. En casos donde la roca sólida se localiza cerca de la superficie del banco, los operadores, con frecuencia suben la columna principal de explosivo lo más posible, para poder romper esta roca masiva. Sin embargo, no quieren arriesgar la posibilidad de que los barrenos se escopeteen, haya roca en vuelo y sobre presión de aire.

En casos como éste, es una práctica común el traer piedra triturada al lugar de trabajo para usarla como material de taco. El polvo de barrenación es un material de taco muy pobre ya que no se traba contra las paredes del barreno y es fácilmente expulsado.

Si las distancias de los tacos son excesivas, se obtendrá una fracturación muy pobre en la parte superior del banco y la cantidad de rompimiento trasero se incrementará. Cuando una voladura funciona apropiadamente, la zona del taco se levantará suavemente y caerá en la pila de roca después de que el bordo se ha movido hacia a fuera. Esta acción se ilustra en la figura 6.2.

La selección del tamaño del material de taco es importante, si se desea minimizar la profundidad de éste, para poder romper la capa superior de roca.

Figura 6.2 Desempeño de la zona de taco



El polvo de barrenación muy fino no se mantendrá dentro del barreno. El material muy grueso tiene la tendencia a dejar huecos de aire cuando se vacía en el barreno y puede ser expulsado como pelotas de golf. El tamaño óptimo del material de taco será aquel que tenga en promedio un diámetro aproximado al 5% del diámetro del barreno. Dicho material debe tener aristas agudas para que funcione adecuadamente. El tamaño apropiado se determina de la siguiente manera:

$$S_z = D_h/20$$

donde:

$$\begin{array}{llll} Sz & = & \text{Tamaño de la partícula} & (\text{m}) \\ Dh & = & \text{Diámetro del Barreno} & (\text{m}) \end{array}$$

La grava de río de este tamaño, que tiene cantos rodados, no funcionará también como la grava triturada. Cuando ocurre la detonación en el barreno, las partículas del taco ubicadas a una distancia corta por encima de la carga, serán comprimidas hasta tener una consistencia de argamasa.

### **6.3 Sub-Barrenación.**

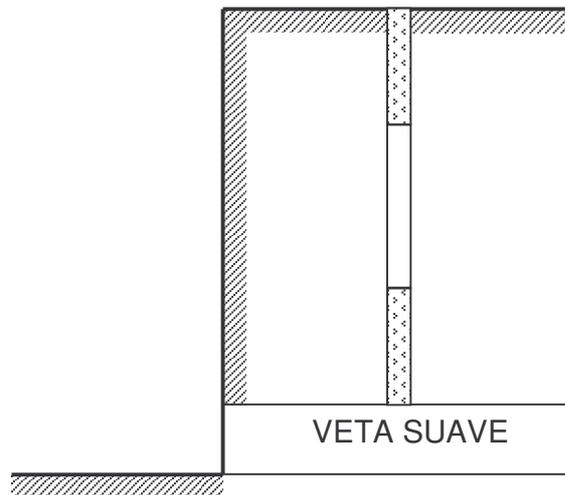
El término sub-barrenación se utiliza comúnmente para definir la profundidad a la cual se perforará el barreno por debajo del nivel de piso propuesto, para asegurar que el rompimiento ocurrirá a nivel. Los barrenos normalmente no rompen la profundidad total. En la mayoría de las obras de construcción se utiliza la sub-barrenación, a menos que, por coincidencia, exista un estrato suave o que una junta de dos estratos se localice a nivel de piso. Si esto ocurre, no se utilizará la sub-barrenación. De hecho los barrenos pueden rellenarse una distancia equivalente de 6 a 10 diámetros de la carga, para confinar los gases y mantenerlos alejados del estrato suave (Figura 6.3). Por otro lado, si existe un estrato suave a corta distancia por encima del nivel de piso propuesto y por debajo de éste existe roca masiva, es común encontrar sub-barrenaciones más profundas de manera de poder romper el material por debajo del estrato suave. Como ejemplo, la Figura 6.4 muestra un estrato suave 30 cm por arriba del nivel de piso. En este caso, se requirió de una sub-barrenación igual a la dimensión del bordo por debajo del nivel de piso para asegurar el rompimiento a nivel. En la mayoría de los casos la sub-barrenación se calcula de la siguiente manera:

$$J = 0.3B$$

donde:

J	=	Sub-barrenación	(m)
B	=	Bordo	(m)

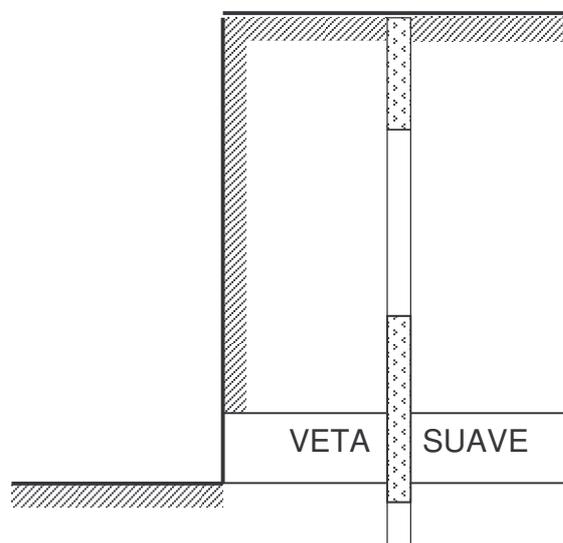
Figura 6.3 Barreno rellenado debido a estrato suave



La sub-barrenación no debe contener astillas de barrenación, lodo o cualquier otro material rocoso. Si las paredes del barreno se derrumban y rellenan y rellenan el barreno, la sub-barrenación real deberá ser más profunda que la sub-barrenación discutida previamente de manera que al tiempo de cargar la cantidad calculada de sub-barrenación, ésta esté abierta y aloje a los explosivos.

Para poder obtener un fondo plano en una excavación es de sentido común, económicamente hablando, barrenar por debajo del nivel de piso, lo que asegura, a pesar de los errores en la profundidad de barrenación y los derrumbes aleatorios, que todos los fondos de los barrenos se encontrarán a la profundidad correcta al tiempo del cargado. Si la barrenación se hace un poco más profunda de lo requerido y algunos de los barrenos son demasiado profundos al tiempo del cargado, el responsable de las voladuras tiene la opción de rellenar con astillas de barrenación o material de taco los barrenos y así darles la profundidad deseada. El responsable de voladuras, sin embargo, no tiene la forma, al tiempo del cargado, de remover material o polvo de barrenación que haya caído en el barreno.

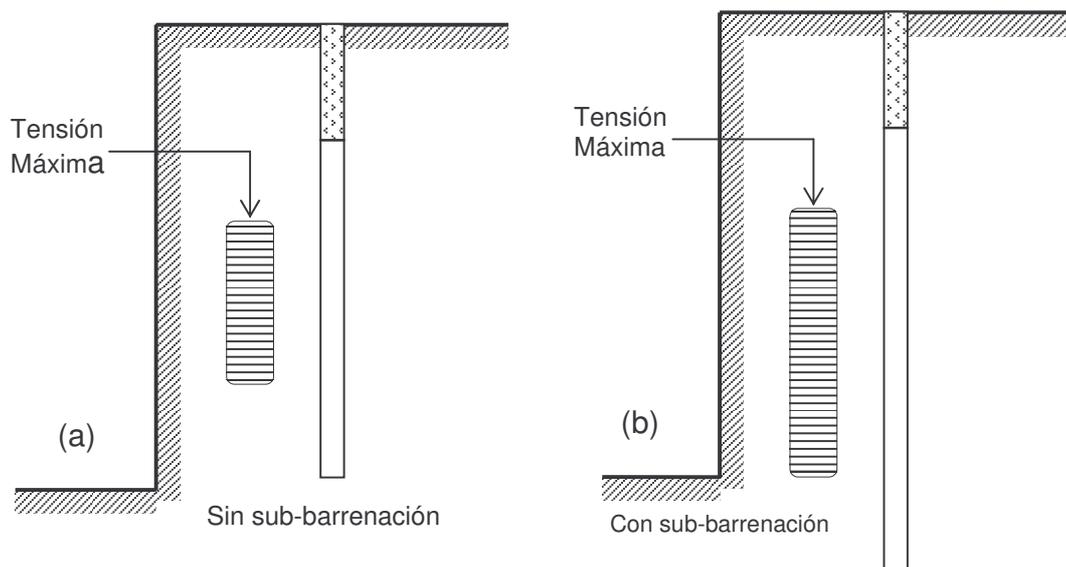
Figura 6.4 Problemas del estrato suave encima del nivel de piso



La función de la sub-barrenación se ilustra en la Figura 6.5. Las líneas en la figura representan los contornos representados los contornos o zonas de tensión donde los esfuerzos en las rocas son iguales. La zona rayada indica la zona de

máxima tensión en la roca. En la Figura 6.5 donde se utilizó la sub-barrenación, existe una zona mayor de tensión máxima y se da mas cerca del nivel del piso o del área que debe ser cortada.

Figura 6.5 Sub-barrenación y niveles máximos de esfuerzos de tensión



**Ejemplo:** Un barreno de 76 mm de diámetro fue utilizado en la Figura 6.2 en roca caliza. El bordo resultó 1.86 m. La cantidad de barrenación extra o sub-barrenación que se necesita por debajo del nivel de piso para asegurar el rompimiento a nivel se determina usando la ecuación:  $J = 0.3B$ .

Solución:

$$J = 0.3B = 0.3 \times 1.86 \text{ m} = 0.56 \text{ m.}$$

## **6.4 Selección del diámetro del barreno.**

La selección del diámetro adecuado del barreno para cualquier trabajo requiere una evaluación en dos partes. La primera parte considera el efecto del diámetro del barreno en la fragmentación, sobre-presión de aire, roca en vuelo y vibración del terreno. La segunda parte considera la parte económica de la barrenación.

### **6.4.1 Consideraciones de voladura.**

Las consideraciones de voladura como la fragmentación, la sobre-presión de aire, la roca en vuelo y la vibración del terreno deben ser evaluadas. En general, entre más sea el diámetro del barreno, mayores serán los problemas con la sobre-presión de aire, la roca en vuelo, la vibración y la fragmentación. Para adentrarse más en los problemas potenciales que pueden resultar, es necesario considerar la relación de rigidez, que se define como: la altura del banco dividida entre la distancia del bordo o  $L / B$ . La Tabla XV es un resumen en general de los problemas potenciales relacionados con la relación de rigidez.

Con la ayuda de la Tabla XV, el operador puede determinar el potencial de los efectos indeseables que han sido discutidos previamente y determinar cuanto puede cambiar la barrenación y el cargado sobre la base de estos factores. Mientras más masiva sea la roca en una voladura de producción, los resultados de la Tabla XV serán más probables.

Tabla XV. Problemas potenciales relacionados con la relación de rigidez L/B

Relación de Rigidez	1	2	3	4
Fragmentación	Pobre	Regular	Buena	Excelente
Sobre-presión de aire	Severa	Regular	Buena	Excelente
Roca en vuelo	Severa	Regular	Buena	Excelente
Vibración del terreno	Severa	Regular	Buena	Excelente
Comentarios	Rompimiento trasero severo y problemas de piso. No dispere. Vuelva a diseñar	Rediseñe si es posible	Buen control y fragmentación	No hay mayores beneficios con el incremento de la relación de rigidez arriba de 4

**Ejemplo:** La compañía constructora Ajax está haciendo un corte en una carretera. La altura máxima del banco es de 6 m. Debido a que el equipo de carga es pequeño, la fragmentación debe de ser buena. El operador tiene perforadoras capaces de perforar barrenos de hasta 127 mm de diámetro y un martillo de fondo capaz de perforar barrenos de 200 mm. ¿Qué diámetro debe seleccionarse en base a las condiciones locales?

Solución: Primero hay que responder estas preguntas:

1. ¿Están mojados los barrenos? ¿Qué explosivo debe usarse, encartuchado o a granel? (suponga barrenos secos, utilizando ANFO como explosivo)

2. ¿Qué cantidad de explosivo se puede cargar por barreno o carga intermedia sin tener problemas con la vibración?
3. ¿Deben evitarse totalmente la sobre-presión de aire y la roca en vuelo y deben utilizarse tapetes de voladura?

Ya que la fragmentación debe ser buena, seleccione una relación de rigidez de 3. El explosivo seleccionado en base a la respuesta de la pregunta 1, tiene una densidad de 0.8 y la densidad de la roca es de 2.6.

La ecuación para ajustes del tipo de roca y explosivo, puede ser utilizada para resolver el diámetro de la carga ( $D_e$ ). Si  $L/B = 3$  y  $L = 6$  m entonces:

$$B = ( L / 3 ) = ( 6 \text{ m} / 3 ) = 2 \text{ m}$$

Utilizando la ecuación para ajustes del tipo de roca y explosivo tenemos:

$$B = 0.012 ( ( 2SG_e / SG_r ) + 1.5 ) D_e$$

Despejando la incógnita y substituyendo 2 por B en la ecuación:

$$D_e = B / ( 0.012 ( ( 2SG_e / SG_r ) + 1.5 ) ) = 2 / ( 0.012 ( ( 2 \times 0.8 / 2.6 ) + 1.5 ) ) = 79 \text{ mm}$$

La respuesta obtenida con estos cálculos no será necesariamente la el diámetro óptimo de la carga. Será el diámetro máximo de la carga que se debe utilizar para minimizar las condiciones antes discutidas. La vibración será razonable para el tamaño de las cargas. Por otro lado, cualquier diámetro mayor a 76 mm incrementará la posibilidad de obtener una fragmentación más gruesa, sobre-presión de aire alta, roca en vuelo y más vibración del terreno por kilo de explosivo utilizado.

Un método simple utilizado para estimar la longitud del barreno, donde la relación de rigidez sea superior a 2, se muestra en la Figura 6.6 y con frecuencia se le llama “Regla de Sesenta”.

$$L_H = 60 \times D_e / 1000$$

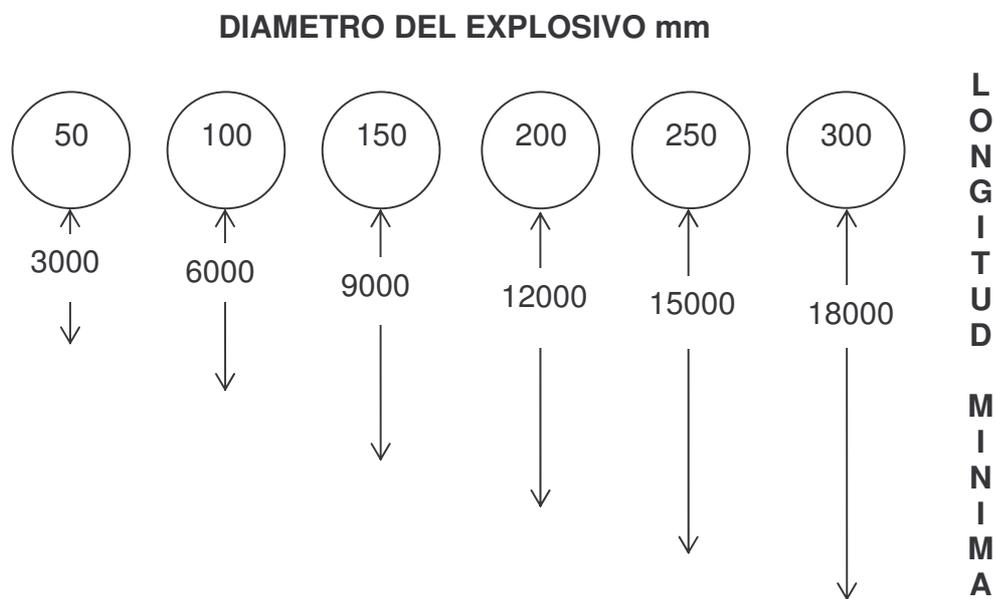
donde:

$L_H$  = Altura de Banco Mínima (m)

$D_e$  = Diámetro del Explosivo (mm)

La longitud mínima de un barreno en metros se aproxima a multiplicar el diámetro del barreno en milímetros por 60 y dividiendo entre 1000.

Figura 6.6 Regla de sesenta



#### **6.4.2 Tiempo de iniciación y tolerancia del iniciador.**

Todos los sistemas de iniciación utilizados hoy en día tienen tolerancia en los tiempos de disparo, lo que significa que los iniciadores no disparan exactamente en el retardo nominal. En general, a menos que se especifique de otra forma por el fabricante, se puede asumir que el período nominal de retardo tiene una tolerancia máxima aproximada de  $\pm 10\%$ . Esto es para indicar, por ejemplo, que un iniciador eléctrico o no eléctrico con un retardo nominal de 200 milisegundos disparará entre 180 y 220 milisegundos.

#### **6.5 Efecto del retardo de tiempo en la fragmentación.**

La selección del tiempo de iniciación adecuado es tan importante en cada aspecto, como la selección de las dimensiones físicas tales como bordo y espaciamento. Dos condiciones generales de tiempo de iniciación serán discutidas. La primera es donde los barrenos dentro una hilera son disparados instantáneamente o simultáneamente. La iniciación simultánea a lo largo de la hilera requiere de un espaciamento mayor y por lo tanto, ya que los barrenos se encuentran más alejados, el costo por metro cúbico o por tonelada del material extraído se ve reducido. Las desventajas de tener iniciación simultánea a lo largo de la hilera, son los problemas que surgirán relacionados con la vibración del terreno debido a que hay muchos barrenos detonando al mismo tiempo. Aunque se producen más metros cúbicos con la iniciación instantánea, la fragmentación será más gruesa que la obtenida con los retardos de tiempo adecuados y espaciamentos más cortos. La iniciación retardada a lo largo de la hilera reduce la vibración del terreno y produce una fragmentación más fina a un costo mayor. La tabla XVI proporciona las constantes de tiempo para diferentes tipos de roca.

Tabla XVI. Retardo de tiempo entre barrenos (Voladura en Banco)

Tipo de Roca	Constante $T_H$ (ms/m)
Arenas, Margas, Carbón	6.5
Algunas Calizas, Esquistos	5.5
Calizas compactas y mármoles, algunos granitos y Basaltos, Cuarzita, algunos gneis	4.5
Feldespatos porfíricos, gneis compactos y mica, magnetitas	3.5

### 6.5.1 Retardos de barreno a barreno.

$$t_H = T_H \times S$$

donde:

$t_H$  = Retardo barreno a barreno (ms)

$T_H$  = Constante de retardo barreno a barreno según Tabla XVI

$S$  = Espaciamiento (m)

### 3.1.2 Retardos de hilera a hilera.

Los lineamientos para el retardo entre hileras son los siguientes:

1. Los retardos cortos causan pilas de roca más altas y pegadas a la cara.
2. Los retardos cortos causan más rompimiento trasero.
3. Los retardos cortos causan más violencia, sobrepresión de aire y vibración del terreno.
4. Los retardos cortos tienen más potencial para causar roca en vuelo.

5. Los retardos largos reducen los niveles de vibración.
6. Los retardos largos reducen el rompimiento trasero.

El tiempo de retardo no debe ser menor a 8.5 milisegundos por metro de bordo entre hileras. Los tiempos de retardo normalmente no deben ser mayores a 16.5 milisegundos por metro de bordo entre hileras. Cuando el control de la pared final es crítico en voladuras multilíneas (6 o más hileras), los retardos pueden ampliarse tanto como 40 ms por metro de bordo para obtener pila de material bajas o lanzamiento de descapote.

Para determinar el retardo que debe utilizarse entre hileras en voladuras de rocas de producción, la Tabla XVII proporciona lineamientos generales.

Tabla XVII. Retardo de tiempo entre hileras

<b>Constante T<sub>R</sub> (ms/m)</b>	<b>Resultado</b>
6.5	Violencia, sobrepresión de aire excesiva, rompimiento trasero, etc.
8.0	Pila de material alta cercana a la cara, sobrepresión y rompimiento moderados
11.5	Altura de pila promedio, sobrepresión y rompimiento promedio
16.5	Pila de material dispersa con rompimiento trasero mínimo

La ecuación para el retardo entre hileras es la siguiente:

$$t_r = T_R \times B$$

donde:

$t_r$  = Retardo entre hileras (ms)

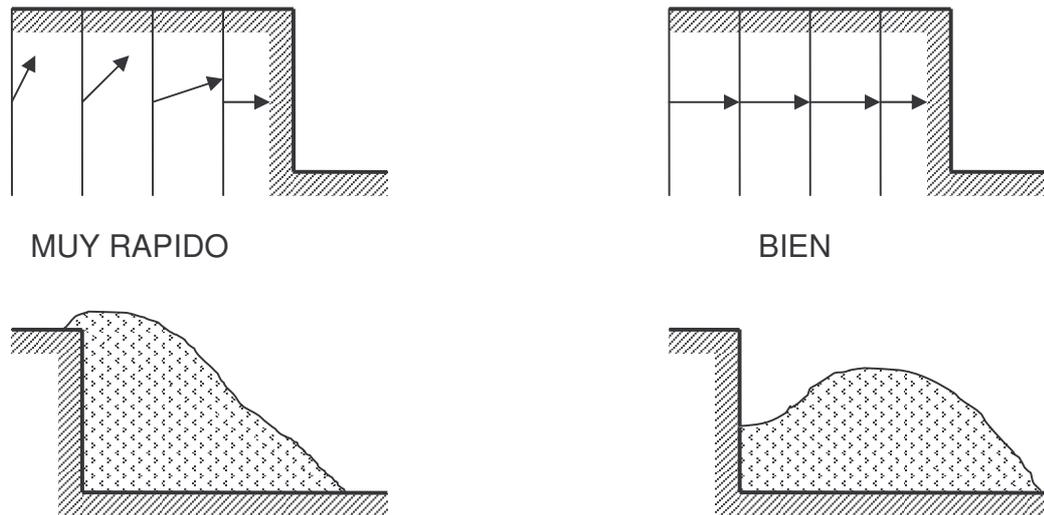
$T_R$  = Factor de tiempo entre hileras según Tabla XVII (ms/m)

B = Bordo

La selección de un tiempo aproximado en milisegundos se obtiene determinando un factor de tiempo utilizando las Tablas XVI y XVII y haciendo una multiplicación. Los valores obtenidos pueden ser difíciles si no es que imposibles de implementar en el campo debido a las limitaciones de los dispositivos disponibles de los fabricantes. El obtener el tiempo preciso es crítico.

Una parte significativa de los problemas, resultado de las voladuras y que causan sobrepresión de aire, roca en vuelo, vibración excesiva y poca fragmentación están directamente relacionados con el tiempo de iniciación (Figura 6.7). Las Tablas XVI y XVII expresan valores del tiempo de iniciación, que pueden ser utilizados para determinar las características de desempeño del tiempo de iniciación. Sin embargo, el tiempo de iniciación debe ser considerado debido al potencial que tiene de causar vibración del terreno.

Figura 6.7 Apilado y levantamiento resultantes del tiempo de iniciación



## 6.6 Efectos del tiempo de iniciación en los barrenos.

Los responsables en voladuras han reconocido la necesidad de dar secuencia a los barrenos. La necesidad de una secuencia adecuada es aún más evidente en las obras subterráneas. Si los barrenos no tienen la secuencia adecuada se obtiene como resultado problemas en la pata y la voladura no corta a la profundidad deseada. La secuencia de barrenos se ha utilizado por muchos años, desafortunadamente, existen otras consideraciones de retardo que solo dar secuencia a los barrenos. Si una plantilla está barrenada y cargada adecuadamente, el tiempo de iniciación controla el tamaño de la fragmentación, el apilado del material quebrado, el nivel máximo de vibración, la cantidad de ruido generada, la cantidad de roca en vuelo producida y el rompimiento trasero y lateral. El tiempo de iniciación es una de las variables de diseño más importante, desafortunadamente, es la más frecuentemente ignorada. Un diseño del tiempo de iniciación pobre en combinación con otras

insuficiencias del diseño son las responsables de la mayoría de los problemas de voladura.

#### **6.6.1 Tamaño de la fragmentación.**

El tamaño al que se rompe la roca, en una voladura, depende de la manera en que la energía trabaja tanto entre barrenos, como entre hileras. El espaciamiento de los barrenos depende también del tiempo de iniciación. La fragmentación se verá afectada si el espaciamiento y el tiempo de iniciación están mal. En los últimos 30 años, se han efectuado gran cantidad de investigaciones en muchos países determinando los efectos que el tiempo de iniciación de barreno a barreno tiene en la fragmentación y existen muchas recomendaciones diferentes en los libros referentes a cual debe ser el tiempo óptimo de iniciación. Es un hecho reconocido, la iniciación dentro de una cierta ventana de tiempo producirá mejores resultados, sin utilizar explosivos adicionales.

#### **6.6.2 Apilamiento o reparto del material.**

El tiempo de iniciación entre hileras de una voladura, controla el apilamiento o reparto del material quebrado. Si los retardos son demasiados cortos de hilera a hilera, la roca será lanzada al aire verticalmente y puede inclusive crear un apilamiento sobre la parte superior del banco. Si se utilizan retardos más largos, el material puede desplazarse, hilera por hilera, permitiendo el movimiento del material fragmentado hacia enfrente. Los operadores, que utilizan las voladuras de reparto en minas de carbón a cielo abierto, saben que el tiempo de iniciación controla la cantidad de material que puede ponerse en la pila de desperdicio.

### **6.6.3 Golpe de aire y roca en vuelo.**

Tanto la sobrepresión de aire como la roca en vuelo son influenciadas por el tiempo de retardo. Una voladura bien diseñada puede salir mal con solo cambiar los períodos de retardo dentro de los barrenos. En general, un tiempo de retardo demasiado corto de hilera a hilera, incrementará los problemas de sobrepresión de aire y roca en vuelo. Por ejemplo, si el tiempo de retardo de hilera a hilera es demasiado corto y la hilera previa no ha tenido oportunidad de moverse, existe una resistencia añadida en la segunda hilera. El barreno, de hecho, tiene un bordo mucho mayor, no puede trabajar en forma lateral y tiende a soplarse hacia arriba. Esta soplada puede ser muy difícil de controlar.

Otra fuente de sobrepresión de aire es la conmoción, el sonido subaudible producido por la pared que está cayendo. Si la velocidad de iniciación a lo largo de la cara del banco es igual a la velocidad del sonido en el aire, las ondas de sonido pueden ser superpuestas causando un golpe de aire mayor, el cual bajo ciertas circunstancias, puede tener efectos direccionales.

### **6.6.4 Vibración máxima.**

La vibración del terreno también es controlada por el tiempo de iniciación. El tiempo de iniciación afecta a la vibración de dos formas separadas. Por ejemplo, si el retardo en el tiempo de iniciación de hilera a hilera es muy corto, existe una resistencia añadida en los barrenos de la segunda hilera, se obtiene menos fragmentación y un porcentaje mayor de la energía total se convierte en energía sísmica provocando problemas con la vibración del terreno. Se sabe que un exceso en el confinamiento de los barrenos eleva los niveles de vibración hasta en un 500%. El tiempo de iniciación de barreno a barreno

también puede afectar la vibración, ya que si se tiene un incremento en el alivio de cada barreno, la fragmentación aumenta y los efectos sísmicos disminuyen.

#### **6.6.5 Traslape en el tiempo de disparo.**

Cuando dos barrenos disparan en tiempos muy cercanos el uno al otro, se pueden tener vibraciones que se suman, creando un nivel de vibración mucho más alto del que resultaría de la detonación independiente de cada barreno. Las normas para la vibración del terreno que se utilizan en los Estados Unidos, se basan en la velocidad pico de la partícula. La velocidad pico de partícula, es el nivel máximo de vibración alcanzado en cualquier instante durante una voladura. Desde un punto de vista operacional esto significa que no importando el número de barrenos en una voladura, ya sean 5 o 500, dos barrenos que se traslapen pueden crear un valor pico en la vibración, el cual puede exceder las normas y especificaciones. Si no se es cuidadoso con la barrenación, diseño o ejecución de la voladura, los niveles de vibración serán mucho más variables en esa operación que en una donde se mantenga una supervisión más estrecha en la ejecución del diseño en todos y cada uno de los barrenos de una voladura. En la mayoría de las operaciones es común encontrar barrenos que están de un 30 a un 50% fuera de la localización deseada. Ya que se está examinando la posibilidad de traslape de solo dos cargas en toda la voladura, los efectos del tiempo de iniciación proveen un grado mayor de variabilidad en las vibraciones que el terreno mismo.

Cuando una carga dispara, se genera una onda que se expande de manera casi circular. No es realmente un círculo ya que existen diferencias en las velocidades de propagación dependiendo de las condiciones del terreno. Para propósitos de esta discusión, consideraremos que dicha onda se expande de manera circular. La onda tiene un nivel de vibración pico pero no es un evento

instantáneo. Como una analogía, observe una onda en el agua y verá que después del pico de la onda existe un desplazamiento atrás de la onda por un período de tiempo corto. De forma muy similar, en la vibración del terreno existe un pico y vibraciones de magnitud menor a ambos lados del pico. Estas ondas están dibujadas de manera idealizada en la Figura 6.8. En la Figura 6.9, nótese que las dos ondas no están separadas por suficiente tiempo y se traslapan, la línea punteada indica la velocidad pico de partícula resultante que ocurre debido al traslape de dos ondas individuales. El pico de la resultante es mucho mayor que el pico de cada una de las ondas individuales. Recuerde que si dos cargas disparan al mismo tiempo, se permite que las ondas de vibración se traslapen y se obtendrán niveles de vibración mayores que los obtenidos si cada carga dispara individualmente. En este caso idealizado, se está considerando el traslape de las ondas generadas por solamente dos cargas. No es imposible tener traslapes de muchos barrenos en una voladura real.

#### **6.6.6 Efectos del tiempo y la distancia.**

Para complicar aún más las cosas, se debe estar consiente que este traslape puede ocurrir en una dirección desde la voladura y no en otras, por lo tanto, el traslape puede ocasionar un efecto direccional. ¿Qué tanta protección puede ofrecer el sismógrafo si se está midiendo la vibración en una dirección y, sin embargo, en otra dirección desde la voladura el nivel de vibración es significativamente más alto?

Figura 6.8 Dos ondas separadas

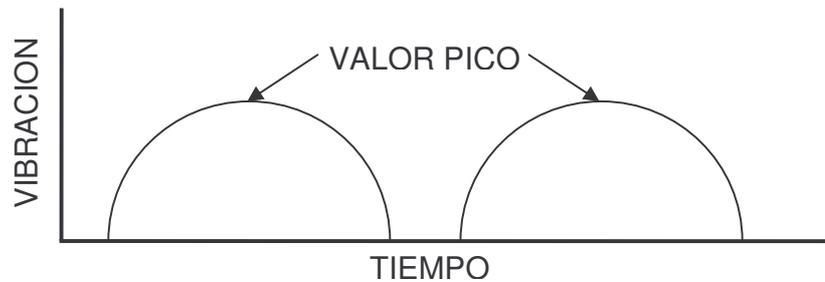
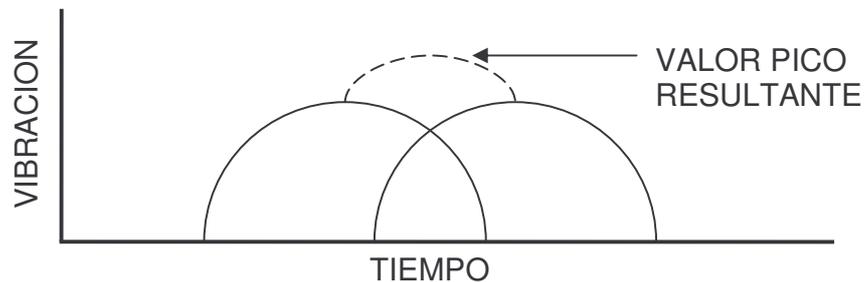
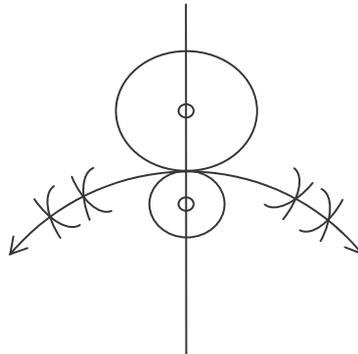


Figura 6.9 Ondas que se traslapan



Para comprender el efecto direccional de la vibración, observemos cuatro casos generales resultado de dos cargas que disparan dentro de una voladura. En el primer caso, la onda casi ha alcanzado el segundo barreno en el momento en que éste detona (Figura 6.10). Las ondas chocarán entre los barrenos, pero debido a que los círculos de onda son de diámetro diferente, la resultante formará una curva de niveles altos de vibración tal como lo indica la dirección de las flechas a ambos lados de la voladura (Figura 6.10). En otras direcciones, diferentes a esta curva de niveles altos de vibración, los niveles serán significativamente menores.

Figura 6.10 Direccionalidad de la vibración, caso general, abarca todos los posibles azimuts



En el segundo caso notamos una línea de niveles altos que remueven en forma perpendicular a la hilera de barrenos. Este caso es válido solamente si ambos barrenos detonan exactamente al mismo tiempo y las ondas generadas chocan a medio camino entre los barrenos. En direcciones diferentes a las mostradas por las flechas, los niveles de vibración serán significativamente menores (Figura 6.11).

En el tercer caso, la onda de vibración del barreno uno ha alcanzado a alcanzado al barreno dos al tiempo que éste detona. Cuando esto sucede, la onda de vibración del barreno dos y la energía del barreno uno se unirán para formar un nivel de vibración resultante de ambas energías, pero solo en la dirección que muestra la flecha, la cual resulta alineada con los barrenos (Figura 6.12). En otras direcciones, existirán dos eventos de vibración separados por suficiente tiempo donde los niveles de vibración no serán tan altos como lo serían en la dirección de la flecha.

Figura 6.11 Direccionalidad de la vibración perpendicular a la de la voladura

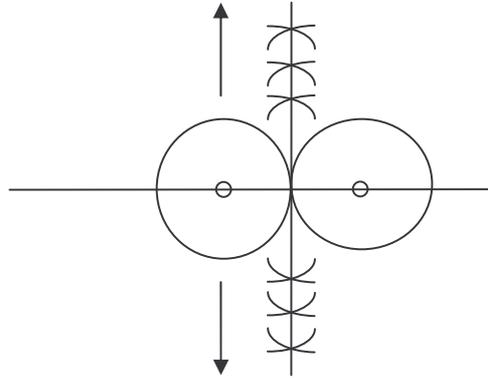
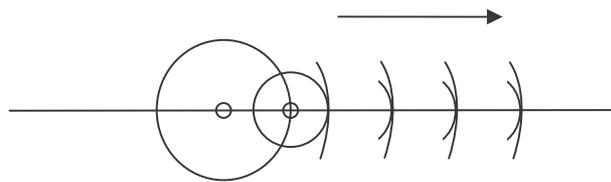
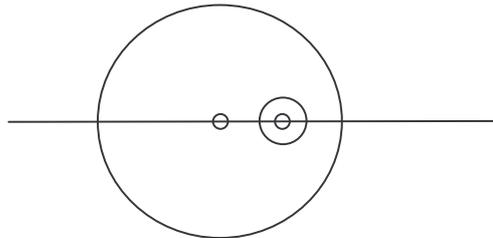


Figura 6.12 Direccionalidad de la vibración a lo largo de la hilera de barrenos



El caso cuarto representa los efectos ideales al utilizar retardos. Muestra la onda de vibración del barreno uno la cual ha pasado al barreno dos con suficiente tiempo antes que el barreno dos detone, de manera que se forma una sucesión de ondas de ambos barrenos las cuales no se unen (Figura 6.13). Por lo tanto, en todas las direcciones alrededor de la voladura, se generarán vibraciones similares donde no existirán sumas de vibraciones.

Figura 6.13 La onda de vibración pasa el segundo barreno antes que éste dispare sin tener efectos direccionales



Las cuatro condiciones que pueden ocurrir son el resultado del tiempo de retardo entre dos cargas que detonan. ¿Existe entonces un tiempo de retardo ideal que pueda utilizarse para asegurar que resulte la condición óptima del caso cuatro? La colisión de estas ondas es dependiente del tiempo de retardo, pero también depende de la distancia entre las cargas y de la velocidad de propagación del terreno.

Para las mismas condiciones del terreno, entre más grande sea la distancia entre barrenos, mayor será el tiempo de retardo necesario para que estas condiciones de traslape no sucedan. Por lo tanto, con barrenos de diámetro grande y espaciamientos grandes, para obtener el tiempo de retardo apropiado, se deben tener intervalos de tiempo mayores que si están utilizando barrenos de diámetro menor aún cuando se trate de la misma roca. No existe un período de retardo óptimo para ser utilizado en cualquier tipo de roca o para cualquier diámetro de barreno. Uno debe conocer aproximadamente el rango de transmisión del terreno y también la distancia entre barrenos. Ya que no hay un tiempo de retardo que sea óptimo para todas las situaciones, el efecto del traslape para una voladura dada puede ser devastador, aunque en otro caso debido a distancias y rangos de transmisión diferentes, el efecto de traslape no sea tan severo y no produzca problemas.

### **6.6.7 Tolerancia de los iniciadores.**

Examinemos un problema típico. Se ha disparado una voladura, el superintendente ha regresado a su oficina y está esperando el reporte del sismógrafo obtenido por el personal de campo. Suena el teléfono y recibe el reporte de la vibración y la sobrepresión de aire. Para su desencanto, éstas resultan ser tres veces más altas de lo previsto. Al poco tiempo después, empieza a recibir llamadas de docenas de vecinos irritados. Este escenario es frecuente en operaciones donde se realizan voladuras ya sea en minería o en construcción.

¿Qué salió mal? La voladura se diseñó cuidadosamente, la barrenación era la apropiada y estuvo bien ejecutada. Se había estado utilizando la misma plantilla y el mismo patrón de retardos durante varios días con resultados bajos en vibración y aún así el nivel de vibración se triplicó. Cuando voladuras como está ocurren, el responsable de las voladuras con frecuencia creerá que la única variable no controlable es la condición del terreno y supone que no tiene forma de controlar estos sucesos aleatorios.

¿Tuvo razón el operador en suponer que no tenía nada que hacer ante estos tipos de variaciones en sus lecturas de vibración? ¿Fueron éstas causadas exclusivamente por condiciones del terreno sobre las cuales no se tiene control? La respuesta a ambas preguntas es absolutamente no. El operador no tiene razón, ya que normalmente los niveles altos de vibración y golpe de aire son causados ya por un diseño de voladura pobre, mala ejecución del diseño o como resultado de la tolerancia de los iniciadores.

El término tolerancia del iniciador puede ser nuevo para muchos. La tolerancia del iniciador es la desviación del tiempo real de disparo con respecto

al tiempo nominal de disparo. Mucha gente, en el pasado, ha asumido que los iniciadores dispararán precisamente en el tiempo nominal de disparo, de hecho, las normas indican que siempre y cuando haya una diferencia de por lo menos 8 milisegundos entre períodos de iniciadores (esto es entre tiempos nominales de disparo), se considera que los iniciadores disparan de manera retardada uno del otro. Uno debe estar consiente que estos iniciadores, ya sean eléctricos o no-eléctricos, no dispararán precisamente en el tiempo nominal de disparo. En general, uno puede asumir que dispararán con una distribución normal, donde la media estaría cercana al tiempo nominal de disparo. La distribución normal es la curva con forma de campana que se usa con frecuencia para definir la desviación acerca de un valor promedio. ¿Cual es entonces el efecto de la tolerancia del iniciador en el tiempo real de disparo de los iniciadores? Los iniciadores deben tener, bajo buenas condiciones, una desviación entre 1 y 15 por ciento del tiempo nominal de disparo, dependiendo de qué períodos de retardo se esté considerando. Ya que diferentes iniciadores tienen diferentes elementos pirotécnicos de retardo, la desviación entre 1 y 15 por ciento del período se mide en iniciadores nuevos al salir de la fábrica. ¿Qué sucede con iniciadores viejos que fueron fabricados uno, dos o hasta tres años antes de que fueran utilizados? Se sabe que el tiempo cámbiale período de retardo y de hecho, la mayoría de la gente probablemente ha sido testigo de iniciadores que disparan fuera secuencia. La tolerancia de los iniciadores puede provocar severos problemas en las voladuras. Ambos iniciadores de milisegundos, de precisión regular y de alta precisión, eléctricos o no-eléctricos pueden causar problemas.

Las desviaciones de los tiempos nominales pueden causar problemas y traslapes en el tiempo de retardo que son tanto inesperados como desapercibidos. Los traslapes pueden causar niveles de vibración altos, sin embargo, no necesariamente iguales en todas direcciones. En los diagramas

de la Figura 6.12, se puede ver que si hileras de barrenos fueron disparadas con estos tiempos de retardo se tendrían acumulaciones tremendas de energía en una dirección y las ondas no se traslaparían en otras. Esta técnica se ha utilizado en ocasiones de forma inversa para tratar de reducir la energía que pudiera llegar a una estructura cercana a una operación. La técnica puede ser efectiva si solamente existe una estructura en los alrededores, pero puede ser devastadora si hay otra estructura un poco más lejana en una dirección diferente. El traslape de las ondas sísmicas, en una dirección en particular puede, como ya se indicó anteriormente, causar puntos calientes de niveles de vibración mucho más altos en una dirección desde la voladura. El mismo fenómeno puede ocurrir también con las ondas en el aire si los barrenos se retardan de tal manera que la onda de sonido de uno alcance a la otra al tiempo que la segunda descarga su energía a la atmósfera.

#### **6.6.8 Sobre-rompimiento trasero y lateral.**

El rompimiento más allá de los límites de una excavación es común en muchos tipos de voladura. El incremento en el sobre-rompimiento trasero y lateral, en general, puede controlarse con la selección apropiada del tiempo de retardo. Es común, en ciertas operaciones, el dar a la última hilera y algunas veces a los últimos barrenos más tiempo de retardo para permitir que las hileras que disparan antes se muevan y dejen el camino libre. Esto reduce la resistencia de los barrenos en la última hilera y reduce la presión en la pared final, y por lo tanto, se obtendrán paredes con menor rompimiento lateral y trasero.

## **7 DISEÑO DE PLANTILLAS.**

### **7.1 Principios de las plantillas de voladuras de producción.**

Una plantilla de voladura consiste en colocar barrenos diseñados adecuadamente e individualmente dentro de una relación geométrica entre ellos y la cara libre. El espaciamiento entre los barrenos de una sola hilera depende de dos variables: el tiempo de iniciación de los barrenos adyacentes y la relación de rigidez, L/B.

Si los barrenos son iniciados simultáneamente, los espaciamientos deben ser mayores que si los barrenos se disparan con retardos. Si los barrenos están espaciados muy cerca uno del otro y disparan simultáneamente, un número de efectos no deseados ocurrirán. Las grietas de los barrenos muy cercanos se unirán prematuramente causando una zona quebrantada en la pared entre los barrenos (Figura 7.1). La unión prematura de las grietas formará un plano donde los gases escaparán prematuramente a la atmósfera provocando sobrepresión de aire y roca en vuelo. El proceso de escape de los gases reducirá la cantidad de energía disponible y de hecho los barrenos se volverán sobreconfinados. La condición de sobreconfinamiento causará un aumento en los niveles de vibración del terreno. A pesar del espaciamiento cerrado y de la gran cantidad de energía por unidad de volumen de roca, la fragmentación de la roca del bordo será pobre. A la inversa, es obvio que si los barrenos se encuentran demasiado separados tanto para iniciación retardada o instantánea, la fragmentación será más gruesa y se obtendrán paredes ásperas (Figura 7.2).

El espaciamiento de los barrenos debe ser normalizado para superar los problemas relacionados con la rigidez del banco. Por lo tanto, cuando los bancos son bajos comparados con el bordo, la rigidez es un factor que debe ser considerado. Cuando los bancos son altos, la rigidez deja de ser de consideración.

Por lo tanto, hay dos factores que deben considerarse. El primero es determinar si los barrenos disparan ya sea instantáneamente o con retardo. El segundo es si los bancos se consideran bajos o altos comparados con el bordo. La primera decisión respecto a si los barrenos disparan simultáneamente o retardados es obvia. La segunda decisión respecto a la clasificación de los bancos debe estar ligada a las dimensiones físicas tales como la altura del banco y el bordo. La relación de rigidez o  $L/B$  se utiliza para hacer esta determinación. Si  $L/B$  es menor a cuatro y mayor a uno, los bancos se consideran bajos y la rigidez debe ser considerada. Por otra parte, si  $L/B$  es mayor a cuatro, la rigidez deja de ser de consideración. Existe, por lo tanto, cuatro condiciones que deben ser discutidas por separado, iniciación instantánea y bancos bajos, iniciación instantánea y bancos altos, iniciación retardada y bancos bajos e iniciación retardada y bancos altos.

Figura 7.1 Zona quebrantada debido al espaciamiento cercano

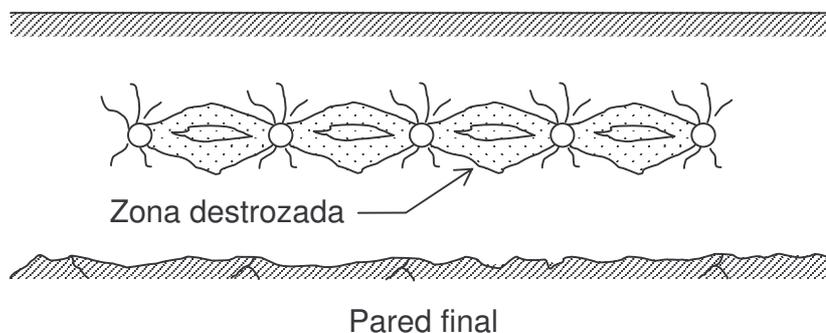
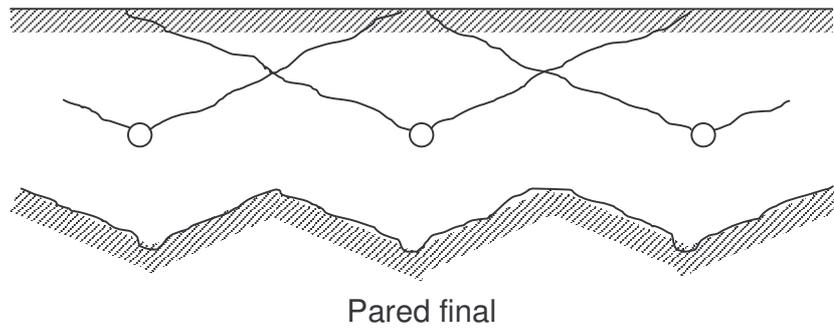


Figura 7.2 Paredes ásperas debidas al espaciamiento excesivo



### 7.1.1 Iniciación instantánea y bancos bajos.

Para poder revisar el plan de voladura y determinar si el espaciamiento se encuentra dentro de los límites normales, la siguiente ecuación puede ser utilizada:

$$S = (L + 2B) / 3$$

donde:

S = Espaciamiento (m)

L = Altura de banco (m)

B = Bordo (m)

Si las condiciones para una voladura en particular se substituyen en esta ecuación y si el espaciamiento real está dentro de un  $\pm 15\%$  del espaciamiento calculado, entonces se considera que el espaciamiento está dentro de los límites razonables. En ningún caso el espaciamiento deberá ser menor al bordo.

**Ejemplo:** Se utilizan barrenos de 100 mm de diámetro, cargados con ANFO a granel, se dispararán hilera por hilera con iniciación instantánea a lo largo de las hileras. La plantilla propuesta se barrena con bordos de 2.5 metros y espaciamentos de 4 metros. La altura del banco en una parte de la excavación es de 4.5 metros: ¿Es correcto el espaciamento propuesto?

Revisemos L/B para determinar un banco bajo o alto:

$$L / B = 4.5 / 2.5 = 1.8 \quad (\text{banco bajo})$$

Revisemos la iniciación: ¿Instantánea o retardada?

Respuesta: Instantánea

Por lo tanto:

$$S = (L + 2B) / 3 = [4.5 + (2 \times 2.5)] / 3 = 3.17 \text{ m}$$

El espaciamento propuesto de 4 metros es mayor que 3.17 m  $\pm$  15% (rango 2.69 – 3.64). El espaciamento es muy grande.

### **7.1.2 Iniciación instantánea y bancos altos.**

Para funcionar como un banco alto, la altura del banco dividida entre el bordo debe ser de cuatro o más. Con la iniciación instantánea entre barrenos, la siguiente relación puede ser usada para verificar si el espaciamento se encuentra dentro de límites razonables.

$$S = 2B$$

donde:

S = Espaciamiento (m)

B = Bordo (m)

Si el espaciamiento calculado con la ecuación anterior se encuentra dentro de un  $\pm 15\%$  del espaciamiento real, éste se encuentra dentro de los límites razonables.

**Ejemplo:** La plantilla de 2.5 x 4 metros del ejemplo anterior es considerada para una parte de la excavación donde la altura del banco está planeada para tener 10 metros de profundidad. ¿Es aceptable el espaciamiento?

Revisemos L/B para determinar un banco bajo o alto:

$$L / B = 10 / 2.5 = 4 \quad (\text{banco alto})$$

Revisemos la iniciación: ¿Instantánea o retardada?

Respuesta: Instantánea

Por lo tanto:

$$S = 2B = 2 \times 2.5 = 5 \text{ m}$$

El espaciamiento propuesto de 4 metros no se encuentra dentro de  $5 \text{ m} \pm 15\%$ .  
El espaciamiento no es aceptable.

### 7.1.3 Iniciación retardada y bancos bajos.

Cuando la relación de rigidez es entre uno y cuatro, y la iniciación es retardada entre los barrenos, se usa la siguiente relación para verificar el espaciamiento:

$$S = (L + 7B) / 8$$

donde:

S = Espaciamiento (m)

L = Altura de banco (m)

B = Bordo (m)

Cuando se usa la ecuación anterior y se substituyen los parámetros designados, si el espaciamiento se encuentra dentro de un  $\pm 15\%$  del espaciamiento real, entonces el espaciamiento se encuentra dentro de límites razonables.

**Ejemplo:** Barrenos de 100 mm de diámetro son cargados con ANFO a granel, el operador propuso usar una plantilla de barrenación de 2.5 x 2.5 metros (2.5 m de bordo y 2.5 m de espaciamiento). Suponiendo que el bordo fuese el correcto, ¿sería el espaciamiento razonable si la altura del banco es de 3.5 metros y cada barreno se dispara con un retardo diferente?

Revisemos L/B para determinar un banco bajo o alto:

$$L / B = 3.5 / 2.5 = 1.4 \quad (\text{banco bajo})$$

Revisemos la iniciación: ¿Instantánea o retardada?

Respuesta: retardada

Por lo tanto:

$$S = (L + 7B) / 8 = [3.5 + (7 \times 2.5)] / 8 = 2.63 \text{ m}$$

El espaciamiento propuesto de 2.5 se encuentra dentro del rango de 2.63 m  $\pm$  15%. El espaciamiento propuesto es aceptable.

#### **7.1.4 Iniciación retardada y bancos altos.**

Cuando la relación de rigidez L/B es igual a cuatro o más y los barrenos de una misma hilera están retardados, se utiliza la siguiente ecuación para verificar el espaciamiento:

$$S = 1.4B$$

donde:

S = Espaciamiento (m)

B = Bordo (m)

Si el valor del espaciamiento calculado se encuentra dentro de un rango de  $\pm$  15% del espaciamiento real, el espaciamiento está dentro de los límites razonables.

**Ejemplo:** La plantilla de 2.5 x 2.5 metros descrita en el ejemplo anterior es propuesta para una sección de la excavación donde la altura del banco es de 10 metros. ¿Es aceptable el espaciamiento propuesto?

Revisemos L/B para determinar un banco bajo o alto:

$$L / B = 10 / 2.5 = 4 \quad (\text{banco alto})$$

Revisemos la iniciación: ¿Instantánea o retardada?

Respuesta: retardada

Por lo tanto:

$$S = 1.4B = 1.4 \times 2.5 = 3.5 \text{ m}$$

El espaciamiento propuesto de 2.5 metros está demasiado cerrado, ya que está fuera del rango de  $3.5 \text{ m} \pm 15\%$  (rango 2.98 – 4.03 m).

## **7.2 Fragmentación máxima.**

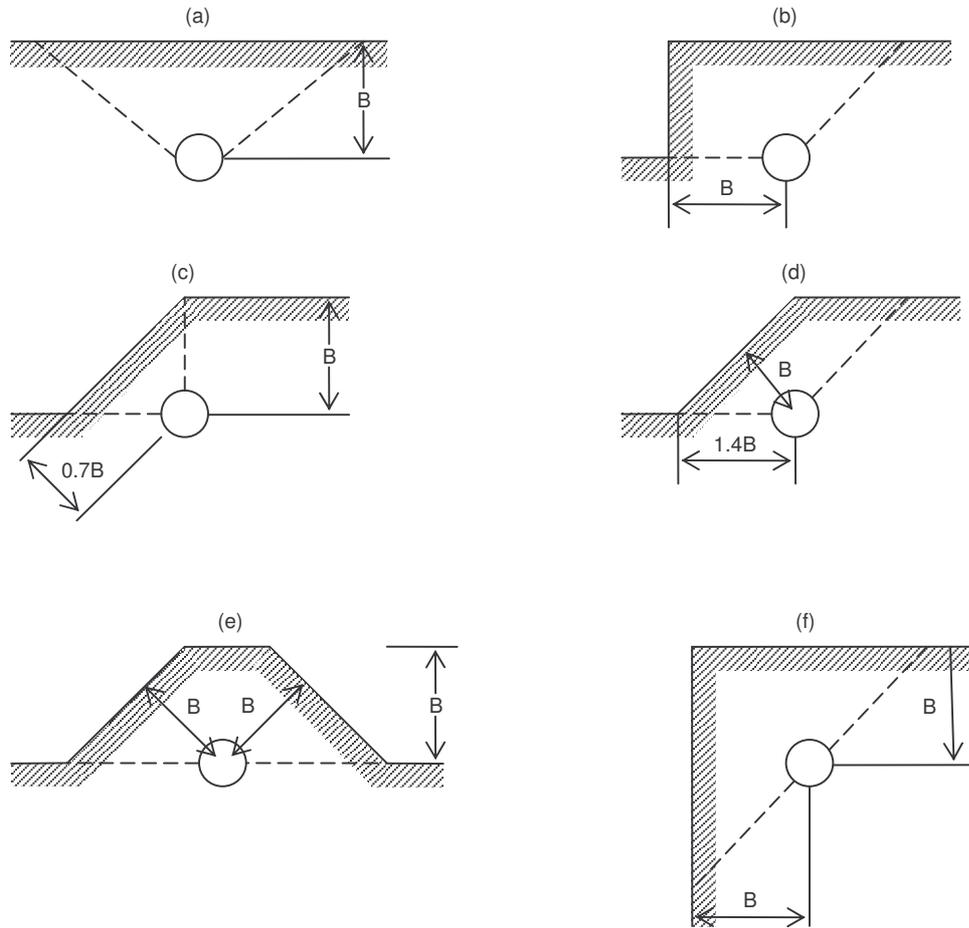
Para poder maximizar la fragmentación y minimizar los efectos secundarios no deseados en una voladura, las variables de diseño como bordo, taco, subbarrenación, espaciamiento y tiempo de retardo deben seleccionarse de tal manera que todas las variables trabajen en conjunto. Para comprender mejor la relación entre las variables, se usarán figuras para ilustrar los efectos al tener variables equiparadas apropiadas e inapropiadamente. A menos que se especifique lo contrario, se asumirá que no existen complicaciones geológicas y que las alturas de banco son por lo menos de cuatro veces el bordo.

Cuando se construye una plantilla de voladura, todos y cada uno de los barrenos debe ser analizado para determinar si éste responderá adecuadamente. El analizar los bordos y espaciamientos sin considerar el tiempo de iniciación produce una idea equivocada de lo que ocurrirá cuando

cada barreno dispara. Si una plantilla está diseñada correctamente, se notará una secuencia repetitiva en la forma de los cráteres producidos por cada barreno. Por ejemplo, dependiendo de la relación entre el barreno y la cara libre, se crearán diferentes formas de cráteres debido a los barrenos que disparan independientemente. Esto puede verse en la Figura 7.3. Para facilitar el análisis, se puede asumir que el ángulo de la línea de ruptura formada por la línea del bordo y el borde del cráter es de  $45^\circ$ . Si un barreno tiene más de una dirección de bordo al momento de su detonación, la distancia a la cara libre a lo largo de ambos bordos deberá ser igual. La Figura 7.3A ilustra el ángulo de rompimiento cuando una cara libre vertical está presente. Para los propósitos de este análisis, la cara libre horizontal o frente del banco no será considerada ya que de la discusión anterior es evidente que los explosivos funcionan preferencialmente en forma radial hacia fuera de los barrenos. En la Figura 7.3B están presentes dos caras libres que forman un ángulo de  $90^\circ$ , los patrones de ruptura serán diferentes que en la Figura 7.3A. En la Figura 7.3F un corte en esquina ilustra un área diferente de ruptura debido a la orientación de la cara. Si el barreno está en una esquina con dos caras libres, el área de ruptura es equivalente a dos cráteres del área mostrada en la Figura 7.3A. En la Figura 7.3E, el cráter será considerablemente mayor que aquellos de las Figuras 7.3A a la Figura 7.3D.

Es aparente que para la misma cantidad de explosivo utilizado en cada barreno en los ejemplos de la Figura 7.3, se fragmentan diferentes cantidades de roca dependiendo de la orientación hacia la cara libre. Este sencillo ejemplo muestra que el factor de carga o sea la cantidad de explosivo utilizada por volumen de roca explotada no es un número constante dentro de una misma voladura, aún cuando el tipo de roca y el explosivo sean idénticos.

Figura 7.3 Formas de cráteres típicas (vista en planta)



### 7.3 Fragmentación de roca y control de pared.

Para poder controlar la fragmentación, deben aplicarse correctamente dos principios importantes. La cantidad adecuada de energía debe aplicarse en lugares estratégicos dentro del manto rocoso. La energía debe liberarse también en un tiempo preciso para permitir que ocurran las interacciones adecuadas.

La distribución de la energía dentro del manto rocoso es dividida en dos áreas distintas. Primero se debe tener suficiente energía, utilizando la cantidad adecuada de explosivos. Para romper el manto rocoso, el explosivo debe ser colocado en una configuración geométrica donde la energía se aproveche al máximo para la fragmentación. Esta configuración geométrica es llamada comúnmente plantilla de voladura.

La liberación de la energía en el tiempo erróneo puede cambiar el resultado final, aunque la cantidad correcta de energía sea colocada estratégicamente a lo largo del manto rocoso en la plantilla apropiada. Si el tiempo de iniciación no es el correcto, pueden ocurrir diferencias en la fragmentación, golpe de aire, roca en vuelo y sobre-rompimiento trasero.

El estudio de los aspectos de la fragmentación se remonta a los primeros días del uso de explosivos. Los usuarios de explosivos se han dado cuenta que, en algunas voladuras, la energía fue utilizada muy eficientemente en el proceso de fragmentación. En otras ocasiones, se utilizó muy poca energía de manera eficiente y en su lugar resultaron una gran cantidad de ruido, vibración del terreno, golpe de aire y roca en vuelo con poca fragmentación. Han existido muchos métodos empíricos que han aparecido durante décadas, métodos de diseño que proponen como utilizar esta energía más eficientemente. Estos métodos de diseño también le daban al responsable de voladuras una forma de obtener consistencia en los resultados, al aplicar técnicas similares bajo diferentes circunstancias y en diferentes tipos de roca.

### **7.3.1 Fragmentación.**

La ecuación para determinar el tamaño medio de fragmentación es:

$$x = A [V/ Q]^{0.8} Q^{0.167}$$

donde:

x = Tamaño medio de fragmentación (cm.)

A = Factor de la roca (7 para rocas medias, 10 para rocas duras y altamente fisuradas, 13 para duras, rocas con fisuras débiles)

V = Volumen de roca (metros cúbicos, m<sup>3</sup>) explotado por barreno calculando bordo x espaciamiento x altura de banco.

Q = Masa (Kg.) de TNT equivalente en energía a aquella de la carga de explosivo en cada barreno

Normalmente el explosivo contenido en la sección de la sub-barrenación no se toma en cuenta, ya que esto rara vez contribuye de manera significativa a la fragmentación del área de la columna.

### **7.3.2 Resultados de Campo.**

Los estudios iniciales fueron hechos en modelos de diferentes materiales y aplicados posteriormente a operaciones de minería a cielo abierto. Había algunas diferencias entre las fragmentaciones medidas y las predichas, como era de esperarse, considerando la naturaleza del minado y la variabilidad de la roca. Se esperaba que la corrección fuese la mejor en los trabajos con los modelos, donde las propiedades de los materiales pueden ser controladas precisamente. Entre más grande fuese la operación minera y el diámetro de los barrenos y la roca fuese más variada, más grande sería la desviación esperada entre los resultados predichos y los medidos de la fragmentación. La medición real de la fragmentación de una voladura a gran escala es extremadamente difícil. Como resultado, solo hay unas cuantas mediciones de este tipo en

existencia, algunos dudan de la exactitud ya que estas mediciones fueron hechas con técnicas fotográficas. El mayor problema sería con la evaluación del contenido de los finos.

### **7.3.3 Efectos de la fragmentación en el control de la pared.**

Puede decirse, en general, que a mejor fragmentación obtenida y mejor desplazamiento en una voladura hilera por hilera, mejor control de la pared. Si no hay suficiente energía disponible para romper la roca apropiadamente en el bordo, la resistencia añadida del bordo contra el barrenado provoca un aumento en el confinamiento el cual causará más fracturación (sobre-rompimiento trasero) por detrás de la voladura. Si se producen piedras grandes en el área del taco, en vez de en el bordo, se incrementa el sobre-rompimiento trasero, especialmente en la parte superior del banco, resultará por ello, causa de problemas con el barrenado subsecuente de plantillas y la pared final será menos estable.

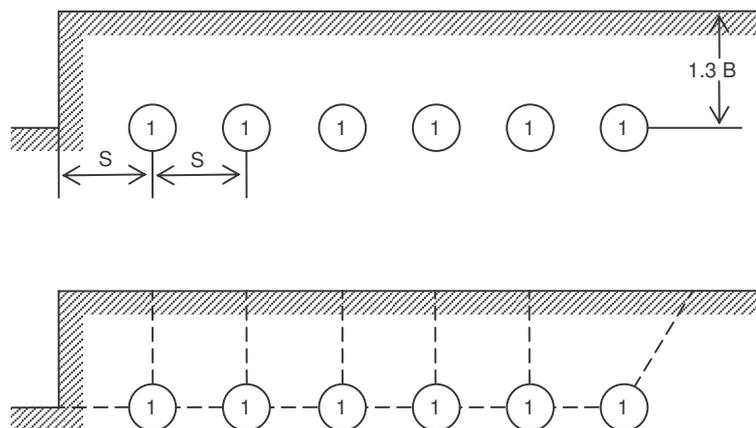
El modelo de fragmentación puede, por lo tanto, ser usado para dos propósitos: para determinar el tamaño de roca que resulta de una voladura y para comparar los efectos de una plantilla contra otra respecto a los problemas potenciales con el control de la pared.

## **7.4 Producción de Rip-Rap.**

El rip-rap es roca con un diámetro mayor que se utiliza normalmente para recubrir orillas de canales o laderas para protegerlas de los efectos del agua y la erosión. El rip-rap puede pesar unos cuantos kilogramos o unas cuantas toneladas dependiendo del uso final que se le dé al producto. El rip-rap chico puede ser generado en voladuras de producción incrementando la distancia del

bordo y reduciendo la distancia del espaciamento. El rip-rap grande, por otro lado, que pesa miles de kilogramos debe ser producido utilizando una técnica diferente. Las piedras grandes que se utilizan en escolleras o rompeolas deben estar intactas de manera que la acción de las olas y las temperaturas congelantes no deterioren la roca prematuramente. Deben extremarse los cuidados para producir roca sin fracturas. Esto se puede lograr con los principios de voladuras controladas combinadas con las voladuras de producción. Como ejemplo, los barrenos pueden hacerse con bordos excesivos y espaciamentos mínimos. Los barrenos se cargan ligeramente para prevenir un daño mayor al que ocurre alrededor del barreno. Cuando se dispara la voladura, se producen grandes pedazos de roca sin fracturar (Figura 7.4). No todas las rocas se pueden usar para la producción de rip-rap. Geológicamente hablando, la roca debe ser o masiva, o bien con estratos internos que tengan una cohesión considerable a lo largo de los planos de los estratos.

Figura 7.4 Producción de Rip-Rap Grande,  $S = B$

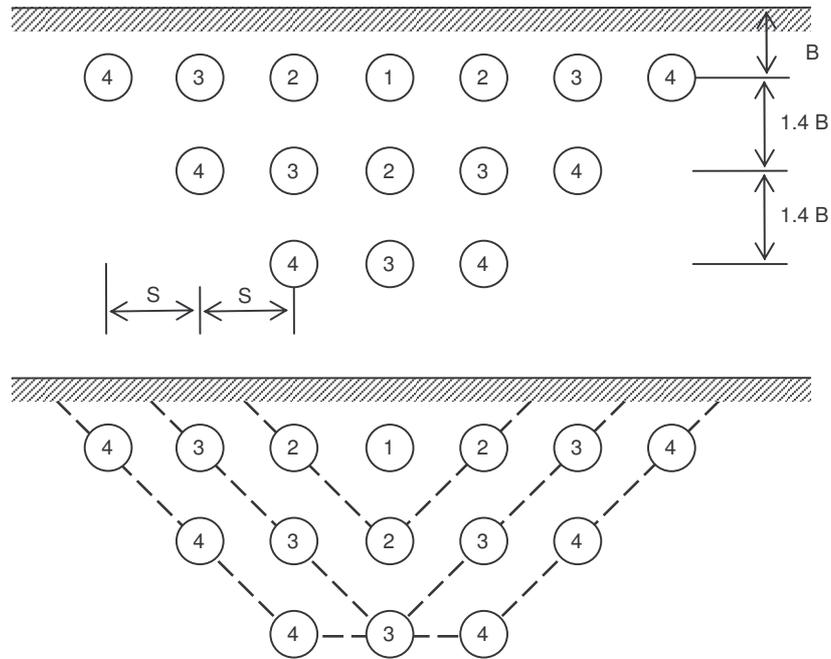


## **7.5 Consideraciones del apilamiento de la roca.**

La función de la plantilla de voladura no es solo el fracturar la roca en la distribución de tamaños deseada, sino también el apilar o colocar la roca de manera que resulte lo más económico el manejo en el siguiente paso de la operación. El tipo de equipo que se utilice para excavar el material explotado es una consideración importante cuando se diseña una voladura. Si los bancos son relativamente bajos y se utiliza una pala en el cargado, es deseable el amontonar la roca para asegurar un factor alto en el llenado del bote. Por otro lado, si los bancos son altos y se utiliza un cargador frontal para el retiro del material, es necesaria la diseminación intencional del material. Para asegurar el apilamiento adecuado del material, los siguientes principios deben ser considerados en el proceso del diseño:

1. El movimiento de la roca será paralelo a la dimensión del bordo.
2. La iniciación instantánea a lo largo de la hilera provoca más desplazamiento que la iniciación retardada.
3. Las voladuras retardadas de hilera a hilera dispersan más la roca que las voladuras disparadas en V (Figura 7.5).
4. Las voladuras diseñadas en V proporcionan el máximo apilamiento cercano a la cara.

Figura 7.5 Corte en V, retardos progresivos,  $S = 1.4B$



## **8 MEDIDAS DE SEGURIDAD.**

### **8.1 Medidas de seguridad en el almacenaje de explosivos.**

Para la mejor conservación y seguridad de los explosivos y evitar pérdidas innecesarias de ellos, daños y perjuicios de toda índole, en el almacenamiento de los explosivos se deben cumplir con toda eficacia las siguientes reglas:

1. No se deben almacenar en el mismo local fulminantes o estopines con los demás explosivos.
2. Los explosivos debe colocarse en estanterías cuyo primer entrepaño o estante, debe estar siempre a una altura no menor de 50 centímetros del suelo.
3. Cuando el ambiente del polvorín sea muy cálido, los grupos de cajas de explosivos, deben separarse por medio de reglas de madera de 1" de grueso, a fin de que haya buena circulación de aire.
4. La dinamita debe guardarse única y exclusivamente en polvorines cuya construcción esté a pruebas de balas.
5. En todo polvorín donde haya explosivos, no debe almacenarse otras materias inflamables, pinturas de aceite, carbón, carburo, clorato, metales, herramientas de metal, maquinaria u otros objetos que no sean explosivos.

6. La mecha debe siempre almacenarse en un lugar seco, fresco y seguro.
7. Los explosivos no deben dejarse, guardarse o almacenarse en lugares, locales o polvorines en donde personas extrañas o animales tengan acceso.
8. Evitar que los explosivos queden expuestos a los rayos directos del sol.
9. No deben guardarse los explosivos en casas de habitación, oficinas, granjas, salas de calderas, talleres u otros locales donde vivan o laboren personas.
10. Evitar que los explosivos comerciales que absorben humedad, estén en contacto con ésta, ya que pierden potencia.
11. No se deben portar fósforos al entrar a los polvorines.
12. No ingresar con zapatos u otros instrumentos que puedan causar chispas o producir rozamientos con explosivos que estén en el suelo.
13. Limpiar constantemente el piso de los polvorines para recoger toda clase de explosivos que se hubieren caído por descuido o por causa de su manipuleo.
14. No se debe fumar dentro ni a inmediaciones de los polvorines.
15. Siempre se deben utilizar o egresar los explosivos más viejos y cuando se reciban nuevas remesas, deben colocarse las cajas de tal manera que el resto de las existencias anteriores quede fácilmente accesible.

16. Las cajas de los explosivos violentos como la dinamita, deben colocarse siempre de manera que los cartuchos o candelas queden de plano y no de punta.
17. Los cuñetes de pólvora pueden colocarse indistintamente horizontal o verticalmente, en ambos casos, conviene que tanto el tarugo como la juntura queden abajo, a efecto de que la pólvora se conserve seca. Para evitar que se apelmace la pólvora, se deben sacudir los cuñetes con las manos o rodarlos cada mes o cada dos meses, por lo menos.
18. Las basuras que estén dentro de los cuñetes deben enterrarse por lo menos a un metro de profundidad o destruirlas, lo más lejos posible de los polvorines.
19. No deben dejarse cartuchos de los explosivos o fulminantes sueltos en el polvorín, siempre se deben guardar en cajas de madera tapadas.
20. Los polvorines para mayor seguridad, deben estar lo más retirado posible de los centros urbanos, de los depósitos de leña, yerbas, maleza y hojas secas.

## **8.2 Medidas de seguridad en el transporte de explosivos.**

En general las mismas medidas reglas determinadas para el almacenaje de explosivos, son aplicables también para su transporte, y además:

1. No permitir que se fume dentro ni a inmediaciones de los camiones, vagones u otros medios de transporte que lleven explosivos.

2. Cuando por razones inevitables sea necesario estacionarse, debe hacerse, a la sombra de árboles, a excepción, si hubiese una tormenta eléctrica.
3. No debe permitirse que personas extrañas se acerquen a los camiones, vagones, etc.

### **8.3 Cosas que no deben hacerse en el manejo de explosivos.**

1. No se dejen los explosivos sino en polvorines limpios, secos bien ventilados, convenientemente situados, sólidamente contruidos y bien cerrados.
2. No se abran los cuñetes o cajas de madera de explosivos con herramientas de metal. Use una cuña de madera y un mazo de madera, goma o fibra. Pueden usarse abridores de metal para abrir las cajas de cartón de fibra, siempre que no lleguen a tocar los flejes metálicos de la caja.
3. No se usen las cajas de madera que hayan contenido explosivos, como leña para el fuego.
4. No se usen explosivos que muestren indicios de estar en mal estado.
5. No se trate de aprovechar ni usar explosivos que hayan estado empapados de agua aunque después estén secos. Consúltese previamente a un experto.
6. No se lleven explosivos en los bolsillos.

7. No se preparen los cebos de explosivos dentro del polvorín o cerca de grandes cantidades de explosivos.
8. No se fuerce a los cartuchos de cualquier clase de explosivos a entrar en un barreno, o se les fuerce a pasar un obstáculo dentro del mismo.
9. No se permita que los explosivos, o los barrenos que se estén cargando con explosivos, queden expuestos a chispas provenientes de palas mecánicas, locomotoras o de cualquier otro origen.
10. No se ensanche un barreno cerca de otro cargado de explosivo.
11. No se cargue un barreno ensanchado con otra carga de explosivos hasta que se haya enfriado suficientemente.
12. No se ataque un barreno con barras o herramientas de metal. Use Solo atacadores de madera que no tengan expuesto metal alguno.
13. No se use materiales combustibles para atacar un barreno.
14. No se permita estar dentro del área de peligro a ninguna persona que no sea necesaria en las operaciones de voladura.
15. No se dispare ninguna carga explosiva hasta que todo el resto de los explosivos haya sido retirado a un lugar seguro y todas las personas y vehículos estén a distancia fuera de peligro o bajo cubierta suficiente, y hasta que se haya dado el aviso correspondiente.

16. No se vuelva al lugar de la explosión hasta que el humo y emanaciones se hayan disipado por medio de una adecuada ventilación.
17. No se trate de investigar demasiado pronto una carga que ha fallado. Obsérvese todas las disposiciones y ordenanzas del caso, y de no haberlas, espérese por lo menos una hora.
18. No se taladre, perfore o se use pico para sacar una carga de explosivos que haya fallado. Los barrenos fallados deben manejarse Solo por una persona competente y experimentada.
19. No se dejen abandonados los explosivos. Dispóngase de ellos o destrúyase.
20. No se lleve a los trabajos más de la cantidad necesaria que se puede usar a un tiempo. Estos explosivos se deterioran rápidamente en una atmósfera anormal.
21. No se use en una misma carga explosiva, distintas clases de explosivos.
22. No se dejen los fulminantes ordinarios y eléctricos expuestos a los rayos directos del sol.
23. No se introduzca un alambre, clavo u otro instrumento en el extremo abierto de un fulminante para sacarlo de la caja.
24. No se golpeen los fulminantes ordinarios o eléctricos, se juegue con ellos, ni se trate de investigar su contenido.

25. No se trate de arrancar los alambres de un fulminante eléctrico.
26. No se trate de disparar un circuito de fulminantes eléctricos sino cuando esté seguro de que la capacidad de la corriente eléctrica es adecuada.
27. No se use en un mismo circuito fulminantes eléctricos de distinta fabricación.
28. No se usen explosivos cuando se avecina una tormenta eléctrica. Todos deben retirarse a un lugar seguro a tiempo.
29. No se haga ninguna conexión eléctrica sin antes asegurarse que los extremos de los alambres están limpios y brillantes.
30. No se permita que los alambres de conducción se pongan en contacto con otras conexiones, alambres descubiertos, rieles, tuberías, el suelo, u otra fuente posible de corriente o escape.
31. No se tengan alambre o cables eléctricos de ninguna clase cerca de fulminantes eléctricos o de barrenos cargados excepto al tiempo y con el fin de disparar el barreno.
32. No se empleen fulminantes eléctricos en un terreno muy mojado a no ser que tengan adecuada resistencia al agua y los alambres estén debidamente aislados.

33. No se use sino un galvanómetro para voladuras que contengan una celda de cloruro de plata para probar los fulminantes eléctricos, tanto por separado como cuando estén conectados en circuito.
34. No se use en conexiones eléctricas alambres que evidentemente están en mal estado.
35. No se use alambre conductor doble, sino solamente para voladuras de un tiro.
36. No se usen mechas cortas. Córtese lo bastante largas, de modo que sobresalgan bastante de los bordes de un barreno o una carga explosiva para que deje tiempo para apartarse a un sitio seguro. No se emplee nunca una mecha de menos de 60 centímetros.
37. No se corte la mecha hasta momentos antes de introducirla en el fulminante. Córtese de 2 a 5 centímetros para asegurarse que el extremo que se introducirá está seco.
38. No se use nunca una mecha sin antes probarla.
39. No se corte la mecha de sesgo. Córtese perpendicularmente, con una cuchilla limpia y afilada. Póngase la mecha ligeramente contra la carga del fulminante y evítese retorcerla después que esté en su sitio.
40. No cierre el extremo abierto del fulminante con los dientes ni con un instrumento que no sea el alicate especial para este trabajo.

41. No introduzca un cebo dentro de la carga explosiva sin asegurarse que el fulminante está firme.
42. No se pase la mecha a través de cartuchos de explosivos. Evítese retorcimientos en la mecha.
43. No se tenga en la mano un cartucho de cebo al encender la mecha.
44. No se encienda una mecha en un barreno antes de haber colocado el adecuado taco, para que las chispas que salten del fósforo o del extremo encendido de la mecha no lleguen a los explosivos.
45. No se encienda la mecha con papel, material inflamable o antorcha improvisada.
46. No se encienda la mecha cerca de fulminantes o explosivos fuera de los que se van a usar en la voladura.



## CONCLUSIONES

1. Los colores de los gases que se liberan en una voladura son indicadores de la eficiencia de la energía liberada. Cuando aparece un vapor gris claro, se libera el máximo de energía y los resultados en el tamaño de la fragmentación de la roca son los deseados. Cuando los gases son de color ocre o amarillo la liberación de energía es ineficiente produciendo una voladura insegura con niveles de vibración y golpe de aire altos y resultados inesperados.
2. El tamaño medio de fragmentación puede tener pequeñas variaciones en relación al tamaño deseado, esto debido a que es poco probable que el diámetro de barreno calculado, concuerde, exactamente, con los diámetros de barrenos existentes en el mercado.
3. Queda a criterio del responsable de voladuras colocar un segundo cebo por barreno, aunque, técnicamente, no se necesita, es comúnmente usado como sistema de respaldo en caso de que el primero falle o no dispare la carga completa.
4. Cuando obtenemos resultados no deseados en una voladura, por lo general es debido a errores humanos y los más comunes son: mal diseño de una plantilla de voladura, barrenación inadecuada, la carga en los barrenos no concuerda con el diseño o porque no se evaluó la geología del banco.



## RECOMENDACIONES

1. Antes de explotar un banco de material es necesario, una evaluación adecuada de las condiciones geológicas del banco. La evaluación incorrecta puede producir resultados pobres en la voladura.
2. El encargado de la voladura debe revisar que la ejecución de la barrenación sea la adecuada, así como, también, que el llenado de los barrenos se lleve acabo, según el diseño propuesto.
3. Revisar cuidadosamente el cálculo y diseño de las plantillas de voladuras, ya que, es uno de los principales factores en la obtención de resultados no deseados.
4. Para evitar accidentes en la ejecución de voladuras, es necesario la capacitación continua del personal que de una u otra forma esté involucrado en el almacenaje, transporte, uso y manejo de material explosivo.
5. Aunque se cuente con suficiente experiencia en voladura de rocas, siempre hay que poner en práctica las medidas de seguridad, referente al material explosivo.
6. Que se incluya en la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, un curso sobre explosivos aplicados a la construcción, en virtud que en la actualidad muchos de los problemas que presentan los proyectos de ingeniería se resuelven utilizando material explosivo.



## REFERENCIAS

1. ASA Organización Industrial, S.A. DE C.V. **Manual de Explosivos.** Guadalajara, Jalisco, México.
2. Ejército de Guatemala, Ministerio de la Defensa Nacional. **MANUAL DE EXPLOSIVOS Y DEMOLICIONES.** Centro de Estudios Militares, Guatemala, 1974.
3. Ejército de Guatemala, Ministerio de la Defensa Nacional. **MANUAL PRINCIPIOS GENERALES SOBRE USO, TRANSPORTE Y ALMACENAJE DE EXPLOSIVOS.** Editorial del Ejército, Guatemala, 1958.
4. Figueroa Mérida, Helberth Alfredo. **Los explosivos y su aplicación en el movimiento de tierras.** Tesis de graduación de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 1998.
5. Konya, C. J. y Albarrán, E. **Diseño de Voladuras.** Ediciones Cuicatl. Primera Edición, México 1998.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Gallego Guerra, Antonio. **Artefactos explosivos que deben ser conocidos por las Autoridades y sus Agentes.** Imprenta y Librería de Hijos de Francisco Núñez, Salamanca, Madrid, España, 1934.
2. Gómez Rojas, Oscar Arturo. **Excavación en rocas en bancos para usos múltiples y elección de explosivos.** Tesis de graduación de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 1980.
3. Holmberg, R. y Lee, J. **Rock Blasting and Explosives Engineering.** Boca Ratón, Florida, 1994.
4. Instituto Tecnológico Geominero de España. **Manual de Perforación y voladura de rocas.** Segunda edición, Madrid, España, 1994.
5. Langefors, U. y Khilström, B. **Técnica moderna de voladura de rocas.** URMO, S.A. DE EDICIONES. Segunda edición, Bilbao, España, 1987.
6. Oficiales del 12º Regimiento Ligero de Artillería. **Artefactos Explosivos y bombas. Sus características, efectos, precauciones y peligro.** Boletín Oficial de la Guardia Civil. Madrid, España, 1934.
7. Sanchidrián, J. y Muñiz, E. **Curso de tecnología de explosivos.** Fundación Gómez Pardo, Madrid, España, 2000.
8. Suchini Paiz, Carlos Humerto. **Uso de explosivos en la excavación de túneles.** Tesis de graduación de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 1976.

**ANEXO**

## **CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA PLANTILLA DE VOLADURA PARA EXTRAER PIEDRA DE UN BANCO DE MATERIAL.**

**Ejemplo:** Se necesita llenar con piedra 600.00 cajas de gaviones de 2.00 m<sup>3</sup> cada una, para proteger los estribos de un puente ubicado en la aldea “El Naranja”, La Libertad, El Petén. Dichos estribos se están socavando, debido a la erosión que la corriente del río produce todos los años en época lluviosa. En virtud, que no se encuentra piedra en el área, se pretende explotar una cantera de piedra caliza ubicada a 200.00 metros del puente, utilizando material explosivo.

Calcular y diseñar la plantilla de voladura, tomando en cuenta las condiciones siguientes:

1. existen viviendas a una distancia de 60.00 metros del banco de material;
2. la altura del banco (L) es de 7.50 metros;
3. se desea un tamaño medio de fragmentación (x) de 8 pulgadas.

### **Solución:**

1. Criterios que el diseñador debe proponer.
  - 1.1 Se utilizará explosivo ANFO vaciado.
  - 1.2 Se dispararán hilera por hilera con iniciación instantánea a lo largo de las hileras.
  - 1.3 Como hay viviendas cerca del banco de material, se debe evitar la roca en vuelo y la sobre presión de aire y ya que la fragmentación debe ser uniforme (8 pulgadas) se seleccionará una rigidez de 3 (ver Tabla XV).

2. Cálculo del Bordo (B).

$$\text{Si } L / B = 3 \text{ entonces } B = L / 3 = 7.50 / 3 = 2.50 \text{ metros.}$$

3. Cálculo del Taco (T).

$$T = 0.70B = 0.70 (2.50) = 1.75 \text{ metros.}$$

4. Cálculo de la Sub-barrenación (J).

$$J = 0.30B = 0.30 (2.50) = 0.75 \text{ metros.}$$

5. Cálculo del Espaciamiento (S).

Como  $1 < L / B < 4$  el banco se considera bajo entonces  $S = (L+2B) / 3$

$$S = [7.50+2(2.50)] / 3 = 4.17 \text{ metros } \pm 15\%$$

Rango = 3.54 metros – 4.80 metros

Se utilizará un espaciamiento de 4.00 metros.

6. Cálculo del No. de Barrenos.

$$\text{Volumen de material por barreno} = V = BSL = 2.50 (4.00) 7.50 = 75.00 \text{ m}^3$$

Para llenar las 600.00 cajas de gaviones se necesitan 1,200.00 m<sup>3</sup> de roca

$$\text{No. de Barrenos} = 1,200.00 / 75.00 = 16 \text{ Barrenos.}$$

7. Cálculo del Diámetro del Explosivo (De) = Diámetro del Barreno por ser ANFO vaciado.

$$x = A [V/ Q]^{0.8} Q^{0.167} \text{ despejando } Q = [(AV^{0.8}) / x]^{1/0.633}$$

donde:

x = Tamaño medio de fragmentación (cm.) = 8" (2.54) = 20.32 cm.

A = Factor de la roca (7 para rocas medias, 10 para rocas duras y altamente fisuradas, 13 para duras, rocas con fisuras débiles) = 7

V = Volumen de roca (metros cúbicos, m<sup>3</sup>) explotado por barreno calculando bordo x espaciamiento x altura de banco = 75.00 m<sup>3</sup>.

Q = Masa (Kg.) de TNT equivalente en energía a aquella de la carga de explosivo en cada barreno

$$Q = [(7(75)^{0.8}) / 20.32]^{1/0.633} = 43.51 \text{ Kg. de TNT por barreno}$$

$$43.51 \text{ Kg. de TNT por barreno} = 51.19 \text{ Kg. de ANFO por barreno}$$

$$\text{Peso por barreno} = 51.19 \text{ Kg.} = 51,190 \text{ g}$$

$$0.25 \pi \text{ De}^2 (\text{PC}) (\text{SGe}) = 51,190 \text{ g}$$

donde:

De = Diámetro del explosivo (cm.) = Diámetro de barreno

PC = Longitud de la columna de explosivo (cm.)

SGe = Densidad del explosivo (g/cm<sup>3</sup>) (ver Tabla IX)

$$0.25 \pi \text{ De}^2 (650) (0.85) = 51,190$$

$$433.93 \text{ De}^2 = 51,190$$

$$\text{De} = \sqrt{(51,190 / 433.93)} = 10.86 \text{ cm.} = 4.28''$$

Utilizar barrenos de 4½" de diámetro.

8. Chequear el tamaño medio de fragmentación con este diámetro de barreno.

$$\text{Peso por barreno} = 0.25 \times 10^{-3} \pi D_e^2 (PC) (SGe) = \text{Kg. de ANFO}$$

$$0.25 \times 10^{-3} \pi (11.43)^2 (650) (0.85) = 56.69 \text{ Kg. de ANFO}$$

$$56.69 \text{ Kg. de ANFO} = 48.19 \text{ Kg. de TNT}$$

$$x = A [V/Q]^{0.8} Q^{0.167} = 7 [75/48.19]^{0.8} 48.19^{0.167} = 19.05 \text{ cm.} = 7\frac{1}{2}''$$

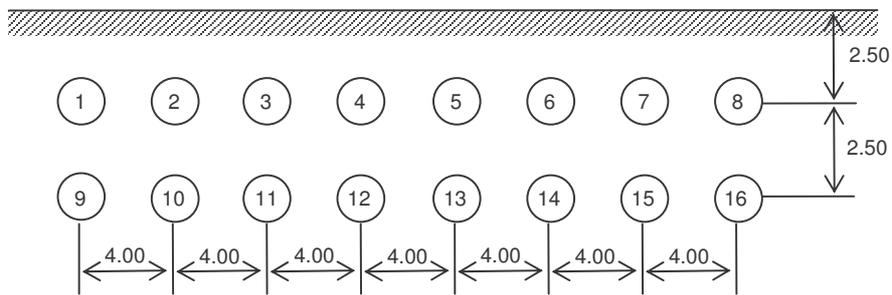
El tamaño medio de fragmentación vario  $\frac{1}{2}''$  en relación al tamaño deseado, al utilizar un diámetro de barreno de  $4\frac{1}{2}''$ ; esto debido a que es poco probable que el diámetro de barreno calculado ( $4.28''$ ), concuerde con los diámetros de barrenos existentes en el mercado.

9. Resumen de los Datos de Fragmentación:

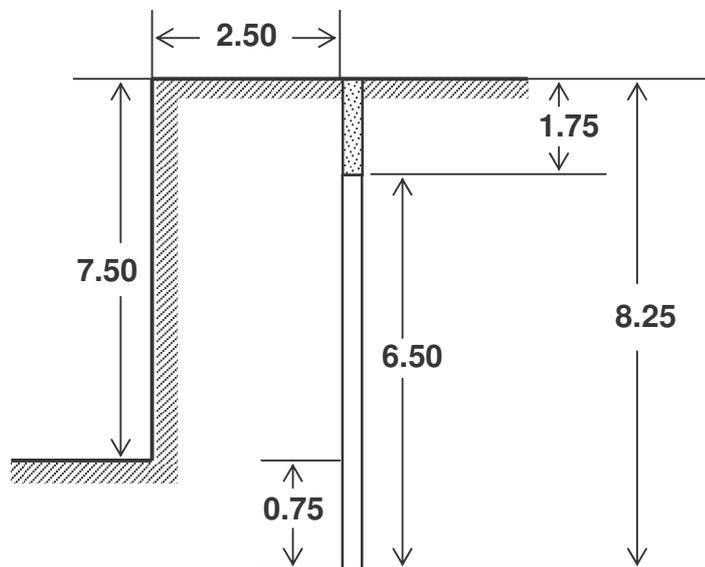
No. de Filas	2
No. Total de Barrenos	16
Diámetro del Barreno	$4\frac{1}{2}''$
Bordo	2.50 metros
Espaciamiento	4.00 metros
Taco	1.75 metros
Altura del Banco	7.50 metros
Sub-barrenación	0.75 metros
Profundidad de Barreno	8.25 metros
Tipo de Roca	Caliza
Densidad de Roca	$2.60 \text{ g/cm}^3$ (ver Tabla XI)
Tipo de Explosivo	ANFO vaciado
Densidad del Explosivo	$0.85 \text{ g/cm}^3$ (ver Tabla IX)
Diámetro del Explosivo	$4\frac{1}{2}''$
Largo de la Carga de Columna	6.50 metros

Peso por Barreno	56.59 Kg.
Peso Total de Explosivo	905.44 Kg.
Total Explotado	1,200.00 m <sup>3</sup>

10. Diagrama de la Plantilla:



PLANTA



ELEVACION