



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“DISEÑO Y CÁLCULO  
DE LA VOLADURA DE UNA GALERÍA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

Ana Guadalupe Jiménez Mújica

ASESOR

M.I. Jaime Saavedra Rosales

MORELIA, MICH., MARZO 2006



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
D.F.  
SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE  
INGENIERÍA CIVIL  
149/05-06

SE ACEPTA  
TEMA DE TESIS

Morelia, Mich., a 08 de Febrero de 2006

**C. P.I.C. ANA GUADALUPE JIMÉNEZ MÚJICA  
PRESENTE.-**

En contestación a su atenta solicitud de fecha 08 de febrero de 2006, respecto a la propuesta de tesis para sustentar examen profesional de **Ingeniero Civil**, me es grato comunicarle que se acepta el tema:

**"Diseño y cálculo de la voladura de una galería"** el cual deberá desarrollar con el índice siguiente:

- Introducción
- I. Generalidades.
- II. Explosivos y accesorios.
- III. Voladuras.
- IV. Diseño y cálculo de voladuras.
- V. Caso práctico de la voladura de una galería.
- Conclusiones.
- Bibliografía.
- Anexos.

De igual manera se le comunica que el **C. M.I. Jaime Saavedra Rosales**, ha sido designado asesor de su tesis.

Sírvase tomar en cuenta que, en cumplimiento a lo especificado por la Ley de profesiones, deberá prestar su servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar examen recepcional.

ATENTAMENTE

Ing. Felipe Sánchez Ramos  
Director de la Facultad de Ingeniería Civil

FACULTAD  
DE INGENIERIA  
CIVIL

U. M. S. N. H.

FSR\*JCM\*delc



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE  
SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE  
INGENIERÍA CIVIL  
167/05-06

SE DESIGNA MESA SINODAL

**C. MA. GUADALUPE RANGEL SUÁREZ**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**  
**P R E S E N T E.-**

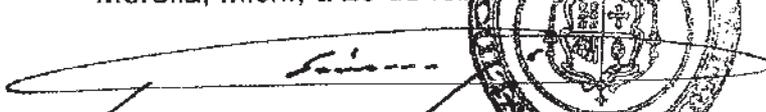
El **C. M.I. JAIME SAAVEDRA ROSALES**, catedrático de la Facultad de Ingeniería Civil, en escrito de fecha 22 de febrero de 2006, dice a esta Dirección lo siguiente

“...Por la presente, me permito comunicar a Usted que el **P.I.C. ANA GUADALUPE JIMÉNEZ MÚJICA**, me entregó su trabajo de tesis titulado “**DISEÑO Y CALCULO DE LA VOLADURA DE UNA GALERÍA**” para la presentación de su examen recepcional, el cual considero listo para su impresión...”

Lo que comunico a Usted para su conocimiento y fines consiguientes. Asimismo, le hago saber que el tema anterior corresponde al Departamento de **Vías Terrestres**, y es conveniente que se le designe la siguiente mesa.

<b>PRESIDENTE:</b>	M.I. Jaime Saavedra Rosales	8800069-9
<b>VOCAL:</b>	Dr. Carlos Chávez Negrete	9200248-0
<b>VOCAL:</b>	Dr. Jorge Alarcón Ibarra	0300107-5
<b>SUPLENTE:</b>	Ing. Efraín Márquez López	8700319-8
<b>SUPLENTE:</b>	Ing. Alejandro Peralta Aranda	9900049-0

ATENTAMENTE  
Morelia, Mich., a 23 de febrero de 2006

  
**ING. FELIPE SÁNCHEZ RAMOS**  
**DIRECTOR**

  
**FACULTAD  
DE INGENIERIA  
CIVIL**

U. M. S. N. H.

*Diseño y Cálculo  
de la  
Voladura  
de una  
Galería*

## **CONTENIDO**

INTRODUCCIÓN	Pag. 4
I.- GENERALIDADES.	Pag. 5
<i>I.1.-TIPOS DE EXCAVACIONES SUBTERRANEAS</i>	Pag. 5
<i>I.2.-EXCAVACIONES SUBTERRANEAS</i>	Pag. 6
II.- EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS.	Pag. 10
<i>II.1.-HISTORIA DE LOS EXPLOSIVOS</i>	Pag. 10
<i>II.2.-FUNCIONAMIENTO DE LOS EXPLOSIVOS</i>	Pag. 11
<i>II.3.-PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS</i>	Pag. 12
<i>II.4.-TIPOS DE EXPLOSIVOS</i>	Pag. 14
<i>II.5.-ACCESORIOS PARA VOLADURAS</i>	Pag. 17
III.- VOLADURAS.	Pag. 22
<i>III.1.- PREFRACTURADO</i>	Pag. 22
<i>III.2.-VOLADURAS CONTROLADAS</i>	Pag. 25
<i>III.3.- BARRENACIÓN EN LÍNEA, DE LÍMITE O DE COSTURA.</i>	Pag. 26
<i>III.4.-VOLADURAS AMORTIGUADAS</i>	Pag. 27
<i>III.5.-VOLADURAS PERFILADAS O DE AFINE.</i>	Pag. 29
IV.- DISEÑO Y CÁLCULO DE VOLADURAS.	Pag. 31
<i>IV.1.-FACTORES DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA VOLADURA A CIELO ABIERTO.</i>	Pag. 31
IV.1.1.-FACTORES IMPORTANTES QUE INFLUYEN EN UNA VOLADURA	Pag. 31
IV.1.2.-VOLADURA A CIELO ABIERTO	Pag. 35
<i>IV.2.-DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA VOLADURA SUBTERRANEA</i>	Pag. 39
IV.2.1.-FORMA COMO SE IDENTIFICA O DIVIDE UN TUNEL O GALERIA.	Pag. 39
IV.2.2.-ASPECTOS GENERALES.	Pag. 41
IV.2.3.-CONDICIONES PARA EL DISEÑO DE UNA VOLADURA	Pag. 42
IV.2.4.-FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LA VOLADURA SUBTERRANEA	Pag. 44
IV.2.5.-CÁLCULO SIMPLIFICADO PARA VOLADURAS.	Pag.53
V.- CASO PRÁCTICO DE LA VOLADURA DE UNA GALERÍA.	Pag. 55
<i>V.1.-DATOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE LA VOLADURA</i>	Pag. 55

<i>V.2.-CÁLCULO DE LA GALERIA.</i>	Pag. 56
<i>V.3.-CÁLCULO SIMPLIFICADO DE LA GALERIA.</i>	Pag. 59
CONCLUSIONES	Pag. 61
BIBLIOGRAFIA	Pag. 62
ANEXOS	Pag. 63

## ***INTRODUCCION***

En la excavaciones de las obras subterráneas en roca existen diferentes métodos, los cuales van desde la tecnología de punta con maquina TBM (Túnel Boeing Machine), maquinas de impacto y las voladuras.

Las características del proyecto determinan el empleo de estos sistemas, en si, tratándose de excavaciones de tipo portal o herradura, puede ser que las TBM que son de sección circular, no sean muy útiles , a demás la TBM no trabaja eficientemente cuando el terreno no es homogéneo o la roca es muy abrasiva; cuando se requiere un mínimo de transmisión de vibraciones se utilizan martillos hidráulicos , pero los avances son bajos, el consumo de pulquetas es alto, si olvidar que el desgaste del equipo es mayor; en las excavación por medio de voladuras no hay limites con respecto a las dimensiones o tipo de sección, solamente es necesario definir si la voladura es a una sección completa o por etapas.

En las excavaciones con voladura además de definir si la excavación será en sección completa o por etapas, hay que seleccionar el tipo de explosivo que se utilizara teniendo en cuenta las características del mismo, todo en base al diseño y los cálculos realizados para la voladura. Todo esto para tener un frente seguro y estable y no una mala voladura por los daños que causa el explosivo y culpar a la roca de una estabilidad insuficiente cuando no se tomaron las precauciones correspondientes.

El capitulo I esta enfocado a la importancia del tipo de la obra subterránea de acuerdo a la seguridad y estabilidad de la misma, que es algo que no se puede olvidar ya que de ello depende o es un factor importante para decidir el tipo de excavación que se realizara, enfocándonos a la excavación con explosivos que es la más utilizada en la excavación en roca.

El capitulo II esta enfocado a los explosivos, donde vemos la importancia del correcto uso de ellos, como han evolucionado y de que no es simple escoger un explosivo, que son muchas las características que hay que tener en cuenta, sin olvidarse de los accesorios para una voladura que son los que nos permiten iniciarlos explosivos.

En el capitulo III vemos la importancia de poner atención en la distribución de la barrenación, la secuencia de ignición y la cantidad de explosivo detonada en cada tiempo, y que el uso de la técnica o método correcto puede reducir el daño al macizo rocoso que rodea la excavación considerablemente.

En el capitulo IV se ve que el diseño y cálculo adecuado nos permite tener la estabilidad suficiente, porque las voladuras son un instrumento de corte.

En el capitulo V se refiere al diseño y cálculo de la voladura de la galería que es el fin de este trabajo, donde se manejan don tipos de cálculo (Método Sueco modificado y el Método simplificado) que son los que nos permiten ver el diseño de la plantilla de barrenación que se realizara y cargara.

## ***I . -GENERALIDADES***

Por muchos siglos se ha excavado el subsuelo en busca de minerales, con las exploraciones y a la profundidad que se desarrollaron estas, nuevas técnicas surgieron sin importar que en la minería la mayoría de las excavaciones son provisionales, pero recientemente al aumentar el tamaño de las operaciones mineras se introdujo el concepto de excavaciones permanentes, por lo tanto deben ser seguras a prueba de caídos u otras formas de inestabilidad.

En la ingeniería civil en pocas ocasiones las excavaciones son provisionales, los túneles, las casas de maquinas subterráneas, etc. deben de mantenerse estables por mucho tiempo, por lo cual los recursos que se destinan al sistema de refuerzo es excesivo en algunas ocasiones.

En general una obra subterránea es un espacio ganado al subsuelo mediante la excavación y remoción sistemática de la roca, para alojar una obra de uso civil.

### ***1.1.-TIPOS DE EXCAVACIONES SUBTERRANEAS***

La clasificación de las excavaciones subterráneas es de acuerdo al grado de estabilidad que se exige de la roca que se encuentra en la excavación. Barton Lien y Lunde proponen la siguiente clasificación:

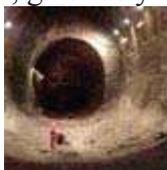
1. Minas provisionales.



2. Tiros verticales.



3. Minas permanentes, túneles de conducción de agua para proyectos hidroeléctricos, túneles de exploración, galerías y cortes parciales de grandes excavaciones.



4. Cámaras de almacenamiento, plantas de tratamiento de agua, túneles para carreteras secundarias o ferrocarriles pozos de oscilación y túneles de acceso en proyectos hidroeléctricos.



5. Casas de maquinas subterráneas, túneles grandes para carreteras o ferrocarril, refugios de defensa civil, portales y cruces de túneles.



6. Estaciones núcleo eléctricas subterráneas, estaciones de trenes, instalaciones deportivas y pública, fábricas subterráneas.



Aunque en diseño de taludes en roca la estabilidad del talud se expresa cuantitativamente en términos de factor de seguridad, en las excavaciones subterráneas no es práctico darles un índice de estabilidad cuantitativo, porque es evidente que las necesidades de estabilidad aumentan en condiciones geológicas iguales todo de acuerdo a la categoría de la excavación.

## ***1.2.-EXCAVACIONES SUBTERRANEAS***

En una excavación subterránea debe utilizarse como material estructural principalmente a la roca, esto quiere decir que hay que provocar la menor perturbación durante la excavación y añadir la menor cantidad de refuerzo metálico o concreto posible. Este propósito depende de

las condiciones geológicas existentes y de que tan consiente se este de ellas para tomarlas en cuenta ya que una interpretación exacta de la geología es esencial para un diseño lógico de la excavación.

Enfocándonos en la excavación, nos encontramos con diferentes sistemas como lo son el uso de TBM (Tuneling Borin Machine) o tuneleras, la excavación con máquina (maquinas rozadoras, excavadoras, martillos hidráulicos, etc.) y la excavación con explosivos (voladura) que es el método más empleado para excavar en roca.

Una excavación subterránea se presenta con frecuencia como una solución alternativa de otras a cielo abierto.

Para seleccionar la mejor alternativa o solución es necesario proceder sistemáticamente; primero un estudio previo, que permita recomendar una solución (a veces varias) y el año óptimo de su puesta en servicio. Luego viene la etapa de anteproyecto de la o las soluciones recomendadas y por último el proyecto de la obra completa. A continuación se indican las fases que se deben considerar:

- El objetivo de la obra subterránea
- La geometría del Proyecto: trazado y sección tipo
- La geología y geotecnia del macizo
- El sistema Constructivo
- La estructura resistente: el Cálculo
- Las instalaciones para la explotación

Tomando en cuenta lo antes mencionado y siendo el tema que nos interesa la voladura ese será el tipo de excavación en la que nos enfocaremos.

La excavación con voladura o con explosivos se compone de las siguientes operaciones:

- Levantamiento topográfico de la sección.
- Barrenación del frente de trabajo.
- Sopleteo de barrenos.
- Carga del explosivo.
- Conexión y disparo de la voladura.
- Ventilación del área de trabajo.
- Refuerzo de la sección excavada.
- Carga y transporte de la rezaga.

A continuación se indican la terminología que se utiliza en la excavación de roca:

- Barrenación y voladura.

Acción de perforar la roca, colocar un explosivo y detonar para excavar.

- Excavar en sección completa.

Es el procedimiento que contempla remover toda la roca de la sección transversal del túnel.

- Excavar la media sección superior.

Procedimiento que contempla solo la media sección superior del túnel.

- Excavar el banco inferior.

Procedimiento que contempla solo remover el banco.

- El frente del túnel.

Se refiere a la superficie expuesta de la roca, donde se realiza la excavación.

- Túnel piloto.

Socavación de sección transversal pequeña, que se utiliza como accesote exploración y queda comprendido dentro de la sección del total del túnel.

El proceso constructivo de una obra subterránea debe resolver cuatro aspectos fundamentales: excavar, estabilizar el frente, estabilizar las paredes y revestir.

1. Excavar.

Implica remover los materiales que se encuentran dentro del traza de la obra utilizando los métodos y equipos idóneos para ellos.

2. Estabilizar el frente.

Contempla detener los materiales que pudieran estar inestables en el frente de ataque, al momento de llevar a cabo la excavación.

3. Estabilizar paredes.

Se refiere a la colocación oportuna del soporte inicial, para detener la tendencia natural del terreno a cerrar el hueco vacío.

4. Revestir.

Es la colocación del acabado final que debe tener la obra subterránea para su funcionamiento.

Y los parámetros a tener en cuenta en la excavación con voladura son los siguientes:

- Tipo de roca.  
La propagación de las ondas provocadas por la detonación de un explosivo en un barreno es diferente para cada tipo de roca. La propagación de onda es más rápida en una roca dura que en una blanda. También es de importancia la composición de la roca ya que tiene que ver con la fragmentación de la misma.
- Tipo de explosivo.  
Cada explosivo cuenta con sus propias características que son de importancia para decidir el material explosivo.
- Factor de carga  
Es la cantidad de explosivo utilizado para fragmentar un metro cúbico de roca. El factor depende del tipo de roca del intemperismo de la masa rocosa y de la sección a excavar.
- Geología local.  
La geología de la masa rocosa a excavar es el factor más importante al determinarse el diseño total de una voladura. Las estructuras geológicas tales como fisuras, oquedades, fallas juegan un factor importante en los resultados de una voladura.
- Barrenación.  
Es importante que los barrenos sean dados en la posición y orientación correcta ya que los barrenos en el frente deben hacerse con exactitud ya que los errores en la barrenación representarían efectos significativos en las excavaciones subterráneas.

Cuando uno se enfrenta a la tarea de diseñar una obra subterránea, el ingeniero querrá contar con la experiencia de otros que ya pasaron por un aprendizaje similar, eso es algo que trata esta tesis y que en este primer capítulo trata de mostrar la importancia del tipo de obra de acuerdo a la seguridad o estabilidad de la misma, además de mostrar cuales son los aspectos generales a tomar en cuenta al momento de elegir el método de excavación al igual que en la construcción.

## ***II.-EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS***

Los explosivos son compuestos químicos capaces de almacenar una gran cantidad energía química y liberarla en un tiempo muy corto transformándola en energía mecánica y térmica.

### ***II.1.-HISTORIA DE LOS EXPLOSIVOS***

Los explosivos han evolucionado hasta llegar a ser una herramienta sofisticada, necesaria para extraer materias primas y construir nuestro entorno.

El origen de los explosivos se pierde en la historia. El crédito a su existencia fue otorgado a los chinos y árabes, quienes utilizaban los explosivos esencialmente para cohetes y fuegos pirotécnicos. El uso de los explosivos se registra en la historia alrededor del año 660 A.C. Una alusión posterior es la del fuego griego en el siglo VII.

La primera mención documentada del salitre o nitro, ingrediente básico de la pólvora negra se encuentra en escritos del siglo XIII D.C.

La pólvora negra rápidamente se convirtió en un promotor e impulsor de las armas y se empezó a usar también para las operaciones mineras comerciales. El primer trabajo de voladura de roca, se tiene conocimiento que fue efectuado en las minas reales de Hungría en el año de 1627.

La pólvora negra fue el principal explosivo militar mucho tiempo. Posteriormente fue reemplazada por la pólvora sin humo, también llamada pólvora de algodón o nitrocelulosa, la cual fue descubierta en 1838.

En 1846, Ascanio Sobrero, profesor de la Universidad de Turín, descubrió la nitroglicerina al mismo tiempo que Christian Frederick Shoenbein, un profesor de la Universidad de Basle en Suiza, produjo un nitro algodón llamado algodón pólvora.

En 1866 Alfredo Nobel, químico e industrial sueco, fabricó por primera vez la dinamita. A raíz de una explosión de nitroglicerina que mató a su hermano y 4 personas más, se concentró en la tarea de crear un procedimiento para manipular con seguridad la nitroglicerina. Esto lo logró al mezclar el explosivo líquido (nitroglicerina) con un material absorbente. La combinación resultante solo explotaba cuando se utilizaban detonadores eléctricos o químicos.

El descubrimiento y uso de la dinamita, desplazó a la antigua pólvora negra y logró que muchas actividades inherentes al mundo de la construcción y la minería.

A partir del siglo XX y los impresionantes avances científicos y tecnológicos realizados hasta nuestros días, el mundo de los explosivos también se vio involucrado. Las dinamitas han cedido terreno a los modernos explosivos como lo son los hidrogeles y emulsiones.

En la actualidad, el control y la precisión que se ha obtenido de los mismos, permite que sean aplicados con mayor seguridad y que se aumente su eficiencia y productividad.

## ***II.2.-FUNCIONAMIENTO DE LOS EXPLOSIVOS***

Es de gran importancia tener conocimientos profundos sobre la química y física de los explosivos, una revisión sobre estos temas nos ayudara a comprender como trabajan los explosivos.

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

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

Los explosivos son combustibles y oxidantes, en la lista siguiente se observan algunos componentes:

### **Combustibles**

**Aceites**  
**Carbón**  
**Aluminio**  
**T.N.T.**  
**Nitroglicerina**

### **Oxidantes**

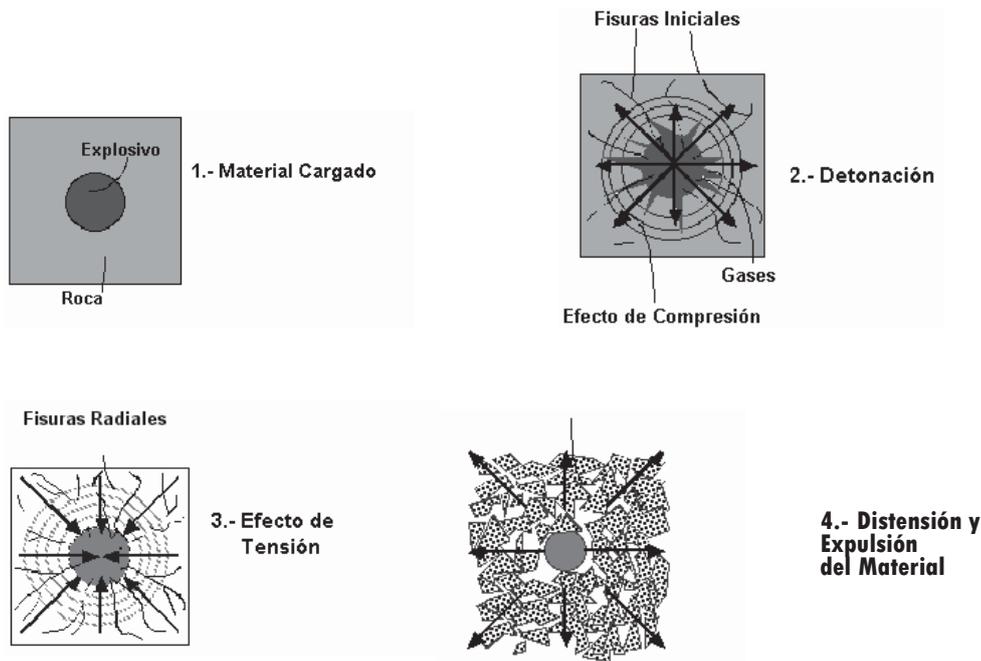
**Nitrato de Amonio**  
**Nitrato de sodio**  
**Nitrato de calcio**  
**Nitrato de Amina**

Para un correcto dimensionamiento de las cargas se debe tomar en cuenta que la carga detonante actúa en el medio circundante en dos fases. De una manera más sencilla, se puede decir que la primera fase del efecto de choque de la explosión produce en el material un esfuerzo por la onda, con una presión inicial del orden de 105 a 106 Kg. /cm<sup>2</sup>, lo que en un medio cerrado produce que dicha carga exceda la resistencia a la compresión del material.

Debido a que la energía de la onda disminuye rápidamente en la distancia con respecto al lugar de colocación de la carga, esta pierde rápidamente el efecto de compresión en el material, por lo que solo el esfuerzo cortante y el esfuerzo de tensión tienen efecto, en una onda de choque las ondas de esfuerzo son reflejadas y regresan en forma de onda de tensión; si esta energía ( que depende del tamaño de la carga ) es suficiente para sobrepasar la resistencia a tensión del material, ocurrirá una desintegración del material.

En la segunda fase, la presión de los gases de los explosivos (del orden de 104 Kg. /cm<sup>2</sup>) empuja al material hacia afuera del cráter ocasionando una segunda desintegración del material.

En conclusión, una gran presión ejercida por los gases a altas temperaturas después de la detonación, es lo que rompe el medio que contiene al explosivo.



### II.3.-PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS

Las características de los explosivos son importantes para entender la utilidad potencial de un explosivo específico para una utilidad en especial.

Cada explosivo tiene características específicas definidas por sus propiedades, el conocimiento de estas propiedades es un factor importante para el buen diseño de voladuras, además permiten elegir el más adecuado de ellos para algún caso específico.

- **Velocidad de detonación.** Es la velocidad expresada en metros por segundo, con la cual la onda de detonación recorre una columna de explosivo. La velocidad puede ser afectada por el tipo de producto, su diámetro, el confinamiento, la temperatura y el cebado.

Las velocidades de detonación de los explosivos comerciales fluctúan desde cerca de 1,525 m/seg. hasta más de 6,705 m/seg.. Pero la mayor parte de los explosivos usados tienen velocidades que varían de 3,050 a 5,040 m/seg.. Mientras mayor sea la rapidez de la explosión, mayor suele ser el efecto de fragmentación.

- **Densidad (Peso volumétrico).** Este dato nos sirve, al diseñar un barrenado, para estar seguro que el espacio destinado a los explosivos es suficiente para alojar los kilogramos calculados. Se mide en gr. /cm<sup>3</sup>, Kg. /lt ó Kg./m<sup>3</sup>.

- **Fuerza** .La fuerza suele considerarse como la capacidad de trabajo útil de un explosivo. También suele llamarse potencia y se originó de los primeros métodos para clasificar los grados de las dinamitas.
- **Inflamabilidad**. Se define como la facilidad con la cual un explosivo o agente de voladura puede iniciarse por medio de llama o calor.
- **Sensibilidad**. Es la medida de la facilidad de iniciación de los explosivos, es decir, el mínimo de energía, presión o potencia que es necesaria para que ocurra la iniciación. Lo ideal de un explosivo es que sea sensible a la iniciación mediante cebos para asegurar la detonación de toda la columna de explosivos, e insensible a la iniciación accidental durante su transporte, manejo y uso.
- **Emanaciones**. En este medio se le denominan emanaciones a los gases tóxicos. Los gases que se originan de la detonación de explosivos principalmente bióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, los cuales no son tóxicos en el sentido clásico de la palabra, pero también se forman en cualquier detonación gases venenosos como el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.
- **Resistencia al agua**. En forma general se define como la capacidad del explosivo para soportar la penetración del agua. Más precisamente, la resistencia al agua es el número de horas que el explosivo puede hallarse cargado en agua y aún ser detonado.
- **Presión de Detonación**. Es considerada como la presión en la zona de choque adelante de la zona de reacción. La presión que se crea repentinamente fragmentara por su condición al material en vez de solo desplazarlo y a esta capacidad se le denomina "Efecto Brissance". La presión de detonación de un explosivo aumentara dependiendo del grado de confinación en que se encuentre, es por eso que hay que evitar al máximo los huecos vacíos dentro del barreno.
- **Presión de Explosión**. Es la presión que ejercen los gases producto de la explosión inicial y se contempla como un 45% de la presión de detonación.
- **Energía**. Es la particularidad potencial del explosivo para realizar un trabajo.
- **Diámetro Crítico**. Es el diámetro mínimo al cual un explosivo puede ser detonado.

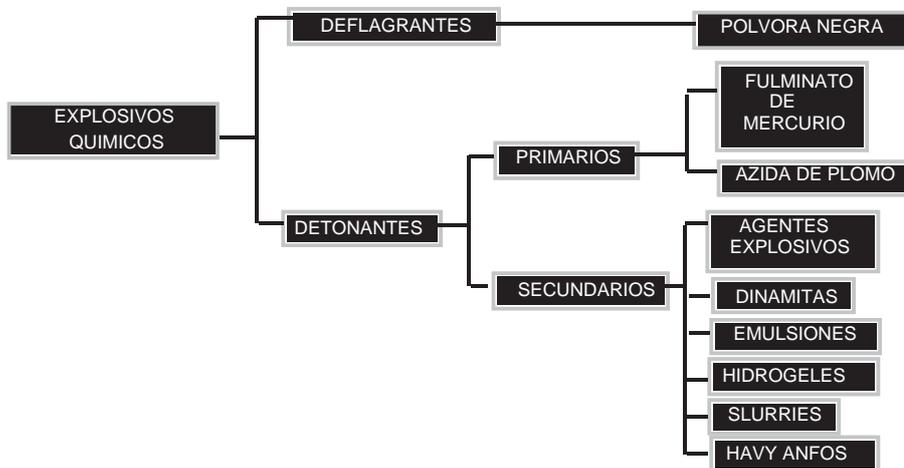
- **Sensitividad.** Es la propiedad que poseen los explosivos para ser detonados por iniciadores convencionales, ya sean cordones detonantes, fulminantes, iniciadores no-eléctricos (primadet), etc.
- **Estabilidad.** Es la propiedad de los explosivos para mantenerse en condiciones de uso durante un periodo determinado de tiempo manteniendo sus características inalterables.
- **Compresión.** Es la capacidad de un explosivo a ser comprimido manteniendo o aumentando sus características de eficiencia, velocidad de detonación, sensibilidad, sensibilidad, etc.

## II.4.-TIPOS DE EXPLOSIVOS

En la actualidad los explosivos son clasificados en tres tipos:

- **Químicos**
- **Mecánicos**
- **Nucleares**

Los explosivos químicos son la gama de explosivos utilizados en las aplicaciones constructivas y mayor interés para nosotros, y se clasifican en :



## EXPLOSIVOS

Siendo los explosivos químicos los que nos interesan a continuación se hace una descripción de cada uno:

- 1) Dinamitas.
- 2) Hidrogeles
- 3) Emulsiones.
- 4) Slurries.

- 5) Agentes Explosivos (ANFO).
- 6) Heavy Anfo (ANFO pesados).

1) Dinamitas.

Es el término genérico que cubre a los explosivos sensibilizados con nitroglicerina, este tipo es el más sensible de los productos comerciales.

A continuación se mencionan algunos tipos y la aplicación a que se dirigen:

<u>Tipo</u>	<u>Uso</u>
<b>Dinamita pura</b>	<b>Trabajos superficiales</b>
<b>Dinamita amoniaca</b>	<b>Canteras</b>
<b>Dinamita gelatinizada</b>	<b>Exploración Sismográfica</b>
<b>Semigelatina</b>	<b>Minas Subterráneas</b>
<b>Permisibles</b>	<b>Minas de Carbón</b>

2) Hidrogeles.

Un hidrogel es una mezcla de gelatinizador, un sensibilizador (explosivo o no-explosivo), nitrato de amonio, nitrato de sodio y agua. Existen en varios diámetros y son el sustituto de las dinamitas en el mundo, ya que realizan el mismo trabajo, eliminando riesgos y molestias ocasionadas por la nitroglicerina.

Los Hidrogeles se empezaron a desarrollar en 1940, sin embargo no se comercializaron, porque los barrenos usados eran en su mayoría inferiores a 10 cm. Empezando su verdadero desarrollo en los años cincuentas, hasta llegar a la actualidad.

3) Emulsiones.

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

Diversas son las formulaciones que se pueden fabricar de esta familia, desde Emulsiones encartuchadas de diámetro pequeño, sensibles al cápsul N° 8, hasta Emulsiones no sensitivas, ya sea encartuchadas o bombeables.

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

#### 4) Slurries.

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

Son compuestos que no llevan en su formulación ningún producto que sea de por sí explosivo; únicamente, reaccionan de forma explosiva en el momento que se inician con un detonador, cordón detonante o cualquier iniciador de potencia N° 6 o superior.

Todo el conjunto del explosivo va disuelto en una masa acuosa, la cual confiere al producto características de gran utilidad, entre las cuales se encuentran su excelente resistencia al agua, excelente resistencia a la presión hidrostática, su gran seguridad en el manejo y transporte, no producen dolores de cabeza, y por último los gases emanados de su detonación no representan peligro alguno para la salud, ya que el resultado de su detonación es vapor de agua, dando por resultado un producto superior tanto en energía como en velocidad de detonación, reduciendo al usuario costos más bajos no solo en la explotación de rocas sino también en fragmentación.

#### 5) Agentes Explosivos (ANFO).

El nitrato de amonio mezclado con materiales combustibles fue patentado en 1955 por H.B. Lee y R.L. Akre, dando origen al ANFO (Ammonium Nitrate-Fuel Oil).

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

Como su nombre lo indica, el ANFO, es una mezcla de nitrato de amonio en un 94.3% en peso y aceite combustible (diesel o aceite mineral) en un 5.7% en peso. Cuando el porcentaje de aceite combustible varía, ya sea positiva o negativamente, hay un efecto de pérdida de energía, y generación de gases nocivos, por lo cual es de suma importancia su proporcionamiento adecuado como se aprecia en la gráfica anterior.

#### 6) Heavy Anfo (ANFO pesados).

En los últimos años, se han venido aplicando en grandes explotaciones a cielo abierto mezclas “in situ” de emulsiones a granel y agentes explosivos, llamadas comúnmente Heavy ANFO.

Dependiendo de las proporciones de esta mezcla, las características del mismo las acercarán ya sea a un alto explosivo o a un agente explosivo, pudiéndose estas fabricar en formulaciones mezcladas en camiones y a su vez bombeadas y vertidas al barreno por gravedad. Una característica importante es que entre más elevado sea el porcentaje de agente explosivo utilizado en la mezcla, menor será la resistencia al agua.

## II.5.-ACCESORIOS PARA VOLADURAS

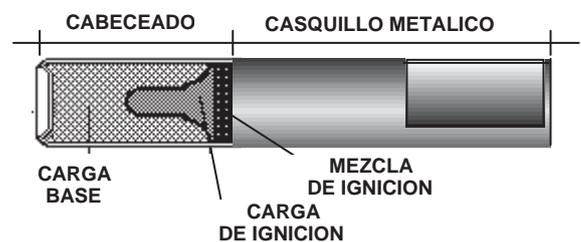
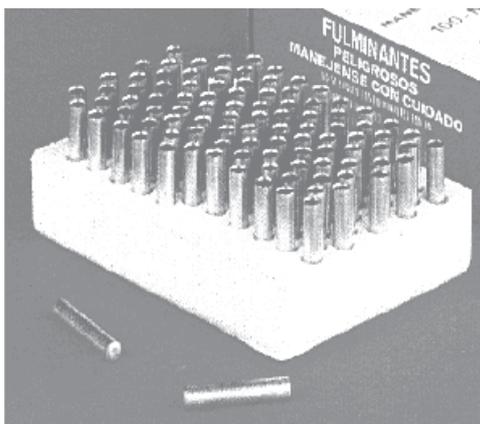
Son los dispositivos para cebar cargas explosivas, que transmiten una llama que inicie la explosión, llevan una onda detonante de un punto a otro y disparan los explosivos para que pueda llevarse a cabo una voladura.

### INICIADORES Y CONDUCTORES

#### 1) Fulminantes .

Los fulminantes o cápsul N° 6, N° 8 y N° 12, consisten en un casquillo de aluminio donde se encuentran colocadas tres cargas, la primera es la mezcla de ignición que asegura la captación de la flama proveniente de la mecha de seguridad, la segunda es la carga de iniciación que convierte la combustión en una detonación e inicia la tercera que es la carga base que a su vez inicia al alto explosivo, en esta última se encuentra la diferencia de la numeración (6, 8 y 12) que corresponde al número de granos de fulminato de mercurio o asido de plomo que contenga el cápsul.

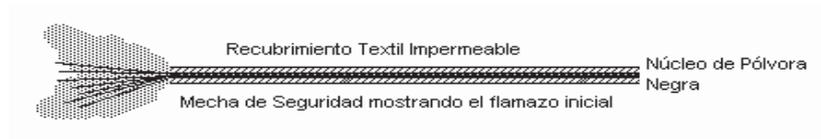
Dado que la mezcla de ignición esta expuesta en el extremo abierto del casquillo, los fulminantes no deberán de ser alterados o maltratados en ninguna forma; pues esto puede hacer detonar en forma prematura a la cápsula y provocar un accidente.



#### 2) Mecha de Seguridad .

La mecha para minas es un medio para transmitir el fuego a un fulminante o a una carga explosiva a una velocidad continua y uniforme. Consiste en un núcleo de pólvora negra elaborada especialmente para este propósito, cubierto y protegido por varias capas de materiales textiles e impermeabilizantes.

Los materiales textiles e impermeabilizantes que rodean y protegen el núcleo de pólvora, le proporcionan una excelente protección contra la abrasión, el maltrato o la contaminación por humedad.



Cuando arde la mecha, el fuego queda encerrado dentro de la estructura de la misma y solo emerge en cada extremo como pequeños chorros de flama; el flamazo inicial y el final.

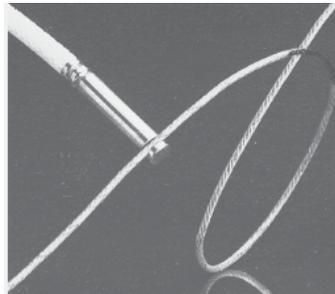


### 3) Cordón Encendedor (Thermalite ).

El Thermalite o Ignitacord tiene la apariencia de un cordón y consiste en un alambre central cubierto de una composición inflamable que arde progresivamente produciendo una flama corta y de intensidad más que suficiente para encender las mechas que estén conectadas al Thermalite por medio de conectores TH. Permite encender una serie de mechas de seguridad en un orden predeterminado "en rotación" con un grado de control imposible de obtener encendiendo las mechas por cualquier otro método.

El tipo "A" ( de color verde ) arde a una velocidad aproximada de 8 a 10 seg./pie ( 26 a 33 seg./metro ), el tipo "B" ( de color rojo ) a una velocidad de 16 a 20 seg./pie ( 52 a 65 seg./metro ), y el tipo "C" ( de color azul o negro ) a 4 seg./pie ( 13 seg./metro ).

Generalmente, tanto el uso del Thermalite como de los conectores TH son en trabajos de minería subterránea.



### 4) Cordón Detonante ( Primacord ).

El Primacord es un cordón detonante ( explosivo ) cuyo objeto principal es el de iniciar altos explosivos. Se puede describir como una cuerda flexible y muy resistente con un núcleo de explosivo llamado Pentrita. Cuando se inicia el Primacord con un fulminante, la explosión se propaga a lo largo del cordón a una velocidad de detonación de 7,200 m./seg.

Cuando detona el Primacord tiene en toda su extensión la energía iniciadora similar a la de un fulminante. Como línea troncal, puede iniciar un número cualquiera de tramos adicionales, extensiones o líneas descendentes por medio de conexiones sencillas de nudos. Como ramal o línea descendente cualquier tipo de Primacord (Reforzado, E-Cord o Deta-Cord ) iniciará a los explosivos con los cuales este en contacto.

## 5) Conectores MS .

Los conectores MS consisten en dos piezas de plástico moldeadas, unidas entre si por un tubo de plástico de diámetro reducido, la cual contiene en cada una de las piezas un elemento de retardo consistente en una cápsula de cobre la cual representa el intervalo del tiempo total del retardo, a cada una de estas piezas se le inserta la línea de Primacord a retardar por medio de un amarre en forma circular.

Los conectores MS están diseñados para provocar retardos en las líneas troncales sobre la superficie del terreno y estos como ya se señaló son iniciados por el cordón detonante. Se cuenta con intervalos de 9, 17, 25, 35, 65 y 100 milisegundos como promedio y se pueden obtener otros intervalos combinando dos o más de estos conectores en serie. Las cargas explosivas de los conectores son similares a las que se emplean en los estopines eléctricos de tal manera que pueden ser detonados por un impacto fuerte, por lo que hay que tener especial cuidado de colocarlos hasta el momento anterior a la detonación de la voladura.

Estos conectores eliminan el peligro de iniciaciones prematuras causadas por la electricidad estática o por corrientes eléctricas extrañas y, en este sentido, ofrecen marcadas ventajas de seguridad, en comparación de los dispositivos eléctricos de retardo como son los estopines eléctricos.

En las técnicas de disparos con retardos cortos se retrasan los barrenos una fracción de segundo. Este método ofrece varias ventajas sobre los disparos instantáneos, tales como la reducción de la vibración del terreno, mejor fragmentación, menos rompimiento atrás del plano de barrenaron, etc.



## 6) Iniciadores No-Eléctricos

### Primadet.

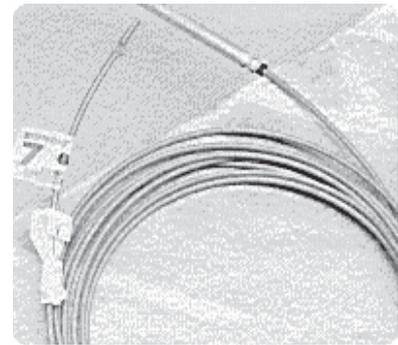
El Iniciador No-Eléctrico Primadet está formado por un conector de plástico o conector “j” (que sirve para insertar al cordón detonante), un tubo de plástico también llamado tubo de choque, flexible, de diámetro exterior de 3.0 mm. e interior de 1.5 mm. conteniendo en su cara interior una capa muy delgada de material reactivo (Pentrita), de tal manera que una libra de este material basta para 70,000 pies de tubo, y el último elemento lo compone el fulminante de alto poder, que es el que inicia al explosivo y contiene el retardo.

Cuando se usa el Primadet, confiablemente transmite una baja señal de energía de aproximadamente 2,000 m/seg. desde el conector (que ve sujeto al cordón detonante) hasta el fulminante de alto poder.

La gran ventaja que estos productos aportan se basa en que se puede colocar un retardo en cada barreno y así se pueden diseñar salidas barreno por barreno.

Tabla de Tiempos y Longitudes Disponibles

SERIE MS		SERIE LP	
Periodo Tiempo	Tiempo	Periodo	Periodo
1 seg.	25 ms	1	0.2
2 seg.	50 ms	2	0.4
3 seg.	75 ms	3	0.6
4 seg.	100 ms	4	1.0
5 seg.	125 ms	5	1.4
6 seg.	150 ms	6	1.8
7 seg.	175 ms	7	2.4
8 seg.	200 ms	8	3.0
9 seg.	250 ms	9	3.8
10 seg.	300 ms	10	4.6
11 seg.	350 ms	11	5,5
12 seg.	400 ms	12	6.4



### EZ Dets.

Los iniciadores no-eléctricos EZ Dets (así como los EZ TL) son los dispositivos de retardo más versátiles del mercado. Estos retardos tienen la particularidad de contener dos dispositivos de retardo en cada unidad de producto.

Este sistema no eléctrico de detonación está integrado por cuatro componentes fundamentales:

- 1.- Tubo de Choque, *que transmite la señal al fulminante.*
- 2.- Fulminante de alta precisión, *que detona la carga de fondo.*

3.- Retardo de superficie, *de exactitud muy confiable que esta diseñado para soportar la activación de 6 tubos de choque.*

4.- Etiqueta de retardo, *que esta codificada cromáticamente indicando el tiempo nominal de ignición o disparo.*

#### 7) Estopín Eléctrico.

Los estopines eléctricos son fulminantes fabricados de tal manera que encima de su carga de ignición se encuentra colocado un puente formado por un alambre que une a su vez los extremos de los alambres de conexión que salen del Estopín hacia la fuente de electricidad, que al ser aplicada, provoca que el puente se torne incandescente provocando la detonación del Estopín, estos tienen la desventaja de que pueden ser iniciados accidentalmente por una carga extraña como la corriente estática, por fricción o por golpe.

En este capítulo enfocado a los explosivos el elemento principal de una voladura, vemos la importancia del correcto uso de ella, como a evolucionado y de que no es simple escoger un explosivo si no que hay que tener en cuenta los factores que lo componen todo esto sin olvidarse de los accesorios para una voladura que son los que nos permiten iniciarlos explosivos de la manera y en el tiempo adecuado, siendo esto de vital importancia al diseñar una voladura como se ve en los siguientes capítulos.

### **III . -VOLADURAS**

Para una buena voladura no basta seleccionar correctamente el explosivo, ya que es necesario conocer también el método de aplicación indicado para cada clase de trabajo, obteniéndose con ello una máxima eficiencia, la cual se traduce en menor costo de obra. Generalmente los resultados óptimos en voladuras se adquieren a través de la experiencia.

Los objetivos de una voladura se deben tener en cuenta desde su diseño. Los principales objetivos son:

- *La roca debe tener la granulometría deseada.* Esto se refiere a los tamaños de los fragmentos de roca, muchas veces están limitados por ciertos factores tales como la clase y tamaño del equipo de excavación y acarreo, la abertura o boca de la trituradora primaria o simplemente por el uso al que se va a destinar el material.
- *Consumo mínimo de explosivos para fracturar la roca.* El tipo de explosivo a usar deberá ser aquel que tenga un menor costo por m<sup>3</sup> de roca volada. Ya elegido el explosivo, se procurará usar el mínimo de explosivos en la carga de los barrenos que produzca los resultados requeridos, esto redundará en el aspecto económico de la voladura.
- *Mínima barrenación posible.* Se debe perseguir hacer una distribución adecuada de los barrenos procurando tener una longitud de barrenación mínima, lo que conducirá a ahorrar tiempo y recursos influyendo también en la economía de la voladura.
- *Mínimas proyecciones de la roca.* Se entiende como proyección al lanzamiento de fragmentos de roca al aire, procedentes de la voladura. Es conveniente que las proyecciones de roca sean mínimas, pues son producto de un uso inútil de la energía del explosivo y además pueden ocasionar daños.
- *Fracturación mínima de la roca no volada.* Debe evitarse lo más posible las fracturaciones de roca atrás de la línea de corte o proyecto.

Cuando un explosivo se usa apropiadamente, consume mayor parte de su energía en forma útil, ya sea fracturando la roca o moviéndola de lugar para evitar trabazones entre sus fragmentos. Sin embargo, el resto de la energía se consume inútilmente, proyectando rocas, lo cual es muy peligroso. El control de la energía se puede llevar a cabo mediante el tamaño de los agujeros de perforación, las separaciones entre los mismos y por el tipo de explosivo.

Es importante hacer notar que todas las cifras anotadas en voladuras son aproximadas, se intenta sólo como una guía general y como una base para comenzar a hacer pruebas en cada caso particular.

### ***III.1.- PREFRACTURADO***

El prefracturado, también llamado precorte o pre-ranurado comprende una fila de barrenos a lo largo de la línea de excavación. Los barrenos son generalmente del mismo diámetro (2" a 4") y en la mayoría de los casos, todos cargados. El prefracturado difiere de la barrenación en línea, de la voladura amortiguada y de la voladura perfilada, en que sus barrenos se disparan antes que cualquier barreno de los de alguna sección de la excavación principal inmediata.

La teoría del prefracturado consiste en que cuando dos cargas se disparan simultáneamente en barrenos adyacentes, la suma de esfuerzos de tensión procedentes de los barrenos rompe la pared de roca intermedia y origina grietas entre los barrenos (Fig.III.1.1.). Con cargas y espaciamiento adecuado, la zona fracturada entre los barrenos se constituirá en una angosta

franja que la voladura principal puede romper con facilidad. El resultado es una pared lisa que casi o produce sobre excavación.

El plano prefracturado refleja parte de las ondas de choque procedentes de las voladuras principales inmediatamente posteriores, impidiendo que sean transmitidas a la parte terminada, reduciendo al mínimo la fracturación y la sobre excavación. Esta reflexión de las ondas de choque de las voladuras principales también tiende a reducir la vibración.

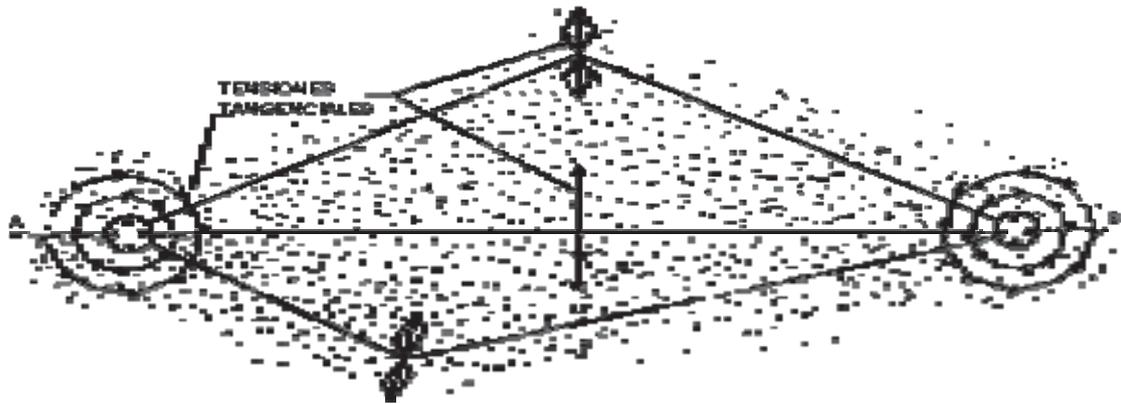


Fig III.1.1. Si pensamos en una roca de extensión infinita, dos barrenos tronados simultáneamente, sumarán las tensiones a la roca, especialmente en el plano que los une (A-B) ya que, además de ser el plano de menor resistencia, es el lugar geométrico de la máxima suma de las tensiones, por lo que la roca tiende a romperse por dicho plano.

#### Aplicación:

Trabajos a cielo abierto.- Los barrenos para prefracturar se cargan de manera similar a los barrenos para voladuras amortiguadas, esto es, se forman cargas "en rosario" de cartuchos enteros o partes de cartucho, de 1" o 1 ½" de diámetro, por 8" de largo, espaciados de 1 a 2 pies centro a centro.

Como en las voladuras amortiguadas, los barrenos se disparan generalmente en forma simultánea, usando una línea troncal de Primacord. Si se disparan líneas demasiado largas se pueden retardar algunos tramos con estopines MS o conectores Primacord MS.

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

Los espaciamientos promedio y las cargas por pie de barreno se dan en tablas y estas cargas anotadas son para las condiciones de rocas normales y pueden obtenerse utilizando cartuchos de explosivos convencionales, fraccionados o enteros, espaciados y ligados a líneas de Primacord.

La profundidad que puede prefracturarse de una sola vez, nuevamente dependen de la habilidad para mantener un buen alineamiento de los barrenos. Las desviaciones mayores a 6"

del plano de corte deseado, darán resultados negativos. Generalmente la máxima profundidad que puede utilizarse para barrenos de 2" a 3 ½" de diámetro sin una desviación considerable en el alineamiento es de 50 pies.

Teóricamente, la longitud de una voladura para prefacturar es ilimitada. En la práctica, sin embargo, el disparar muy adelante de la excavación primaria puede traer problemas pues las características de la roca pueden cambiar y la carga ser causa de un exceso de fractura en las zonas más débiles. Llevando el prefacturado adelante únicamente a la mitad de la voladura principal siguiente (Fig.III.1.2.), los conocimientos que se van obteniendo con las voladuras principales respecto a la roca, pueden aplicarse a los disparos de prefacturado subsecuentes. En otras palabras, las cargas pueden modificarse si es necesario y se corre un menor riesgo que si se dispara el total de la línea de excavación antes de avanzar con las voladuras principales.



Fig.III.1.2 Voladura principal de prefacturado.

El prefacturado puede realizarse simultáneamente a la voladura principal retrasando sus barrenos con retardadores MS, de manera que los barrenos de prefacturado estallen primero que los de la voladura principal.

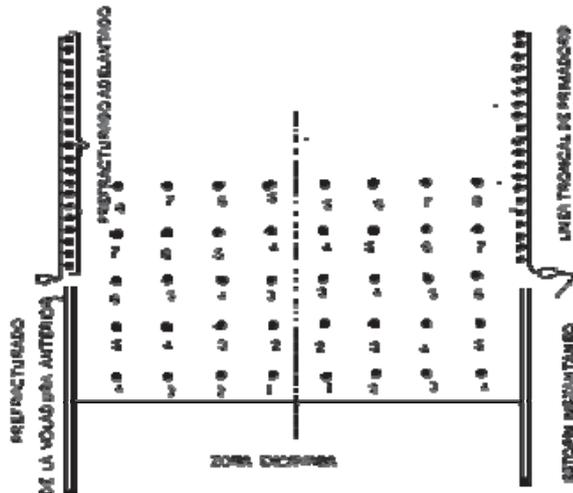


Fig.III.1.3 Procedimiento de explosiones retrasadas durante la voladura principal en el Prefracturado.

Ventajas:

Aumento en el espaciamiento de los barrenos-reducción de costos de barrenación. No es necesario regresar a volar taludes o paredes después de la excavación principal.

### III.2.-VOLADURAS CONTROLADAS

Se ha buscado y ensayado muchas maneras para reducir el exceso de rompimiento o sobre excavación de las voladuras. Por razones de seguridad, el rompimiento excesivo es inconveniente tratándose de taludes, bancos, frentes o pendientes inestables y es también económicamente inconveniente cuando la excavación excede la "línea de pago".

En voladuras controladas se utilizan varios métodos para reducir el exceso de rompimiento; sin embargo, todos tienen un objetivo común; disminuir y distribuir mejor las cargas explosivas para reducir al mínimo los esfuerzos y la fractura de la roca más allá de la línea misma de excavación.

Por muchos años la barrenación en línea fue el único procedimiento utilizado para controlar el rompimiento excesivo. La barrenación en línea o de límite simplemente consiste de una serie de barrenos en línea, vacíos, a corta distancia unos de otros y a lo largo de la línea misma de excavación, proporcionando así un plano de debilidad que la voladura puede romper con facilidad.

Las voladuras controladas difieren del principio de la barrenación en línea, esencialmente, en que algunos o todos los barrenos se disparan con cargas explosivas relativamente pequeñas y debidamente distribuidas. La detonación de estas pequeñas cargas tiende a fracturar la roca entre los barrenos y permite mayores espaciamientos que en el caso de la barrenación en línea. Por lo tanto, los costos de barrenación se reducen y en muchos casos se logra un mejor control del exceso de rompimiento.

### III.3.- BARRENACIÓN EN LÍNEA, DE LÍMITE O DE COSTURA.

La voladura con barrenación en línea involucra una sola hilera de barrenos de diámetro pequeño, poco espaciados, sin carga y a lo largo de la línea misma de excavación o de proyecto. Esto provoca un plano de menor resistencia, que la voladura primaria pueda romper con mayor facilidad. También origina que parte de las ondas de choque creadas por la voladura sean reflejadas, lo que reduce la fracturación y las tensiones en la pared terminada.

Aplicación:

Las perforaciones de la barrenación en línea generalmente son de 1 ½" a 3" de diámetro y se separan de 2 a 4 veces su diámetro a lo largo de la línea de excavación. Los barrenos mayores de 3" se usan poco en este sistema pues los altos costos de barrenación no pueden compensarse suficientemente con mayores espaciamientos.

La profundidad de los barrenos dependen de su buena alineación. Para obtener buenos resultados, los barrenos deben quedar en el mismo plano. Cualquier desviación en ellos, al tratar de barrenar más profundamente, tendrá un efecto desfavorable en los resultados.

Para barrenos de 1 ½" a 3" de diámetro las profundidades mayores a 9 metros son raramente satisfactorias.

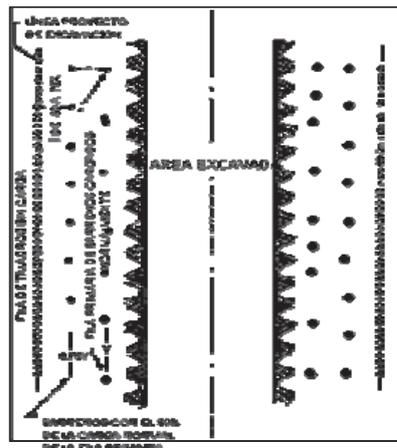


Fig.III.3.1 Plantilla típica del procedimiento de Barrenación en Línea.

Los barrenos de la voladura directamente adyacentes a los de la barrenación en línea, se cargan generalmente con menos explosivos y también a menor espaciamiento que los otros barrenos. La distancia entre las perforaciones de la barrenación en línea y los más próximos, cargados, es usualmente del 50 al 75% de la pata usual (Fig. III.3.1.).

Los mejores resultados con la barrenación en línea se obtienen en formaciones homogéneas en donde los planos de estratificación, juntas, fallas y hendiduras son mínimas.

Trabajos subterráneos.- La aplicación de la teoría básica del sistema de barrenado en línea, esto es, utilizando solamente barrenos vacíos, es muy limitada en trabajos subterráneos. Generalmente se usan barrenaciones cerradas, pero siempre cargadas aunque ligeramente. A este procedimiento hemos preferido llamarle voladura perfilada y será descrito posteriormente.

### **III.4.-VOLADURAS AMORTIGUADAS**

Las voladuras amortiguadas a veces denominada como voladura para recortar, lajear o desbastar. Al igual que la barrenación en línea, la voladura amortiguada implica una sola fila de barrenos a lo largo de la línea proyecto de excavación.

Las cargas para las voladuras amortiguadas deben ser pequeñas, bien distribuidas, perfectamente retacadas y se harán explotar después de que la excavación principal ha sido despejada.

Al ser volada la pata, el taco amortigua la vibración dirigida hacia la pared terminada, reduciendo así el mínimo la fractura y las tensiones en esta pared. Disparando los barrenos de amortiguamiento a pequeños intervalos, la detonación tiende a cortar la roca entre ellos dejando una superficie uniforme y con un mínimo de sobre excavación. Obviamente, a mayor diámetro de barreno, se obtiene mayor amortiguamiento.

Aplicación:

Trabajos a cielo abierto.- La pata o berma y el espaciamiento variarán de acuerdo con el diámetro de los barrenos que se hagan. Para efectos de un amortiguamiento máximo las cargas deben colocarse dentro de los barrenos tan próximos como sea posible a la pared correspondiente al lado de la excavación.

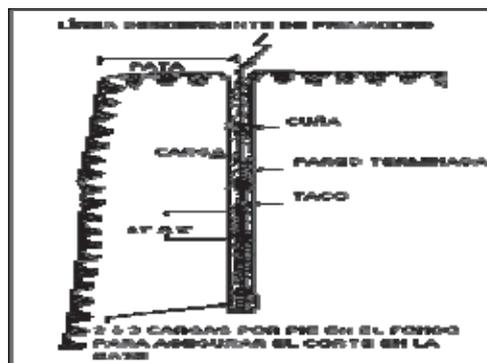


Fig.III.4.1 Colocación de las cargas de explosivos para Voladuras Amortiguadas.

El retardo mínimo entre la explosión de los barrenos amortiguadores proporciona la mejor acción de corte entre barreno y barreno; por lo tanto, normalmente se emplean líneas troncales de Primacord. En donde el ruido y la vibración resulten críticos, se pueden obtener buenos resultados con estopines de retardo MS.

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

Cuando se realizan voladuras por amortiguamiento en áreas curvas o en esquinas, se requiere menor espaciamiento que cuando se vuela una sección recta. Pueden también utilizarse ventajosamente taladros-guía cuando se vuelan caras no lineales. En esquinas de 90, una combinación de varios procedimientos para voladuras controladas (barrenación en línea, precorte, etc.), dará mejores resultados que la voladura amortiguada simple.

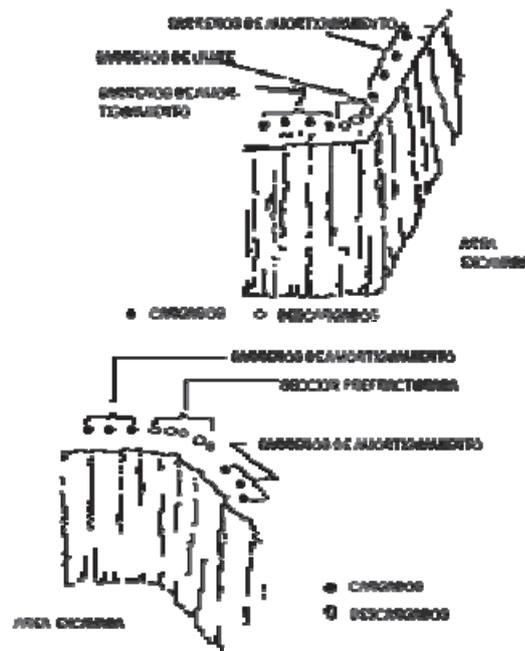


Fig.III.4.2 Voladuras Amortiguadas en frentes, en esquina o en rincón combinada con otro método de Voladura controlada.

Ventajas:

La voladura amortiguada ofrece ciertas ventajas, tales como: Mayores espaciamientos entre barrenos para reducir los costos de perforación.

Mejores resultados en formaciones no consolidadas.

El mejor alineamiento obtenido con barrenos de gran diámetro permite perforar barrenos más profundos.

### III.5.-VOLADURAS PERFILADAS O DE AFINE

El uso de este método en trabajos al descubierto es prácticamente idéntico a los de la voladura amortiguada, se tratará sobre su aplicación solamente en trabajos subterráneos.

El principio básico de la voladura de afine es el mismo que el de la voladura amortiguada: se hacen barrenos a lo largo de los límites de la excavación y se cargan con poco explosivo para eliminar el banco final. Disparando con un mínimo de retardo entre los barrenos, se obtiene un efecto cortante que proporciona paredes lisas con un mínimo de sobre excavación.

Aplicación:

Trabajos subterráneos.- En frentes subterráneos, en donde la roca del techo y de los contrafuertes se derrumba y desmorona por la falta de consolidación del material, el exceso de rompimiento es común debido a la acción triturante y al sacudimiento de las voladuras.

Empleando el método de la voladura perfilada o de afine con cargas ligeras y bien distribuidas en los barrenos perimetrales, se requieren menos soportes y resulta una menor sobre excavación. Aún en formaciones homogéneas más duras, este método proporciona techos y paredes más lisos y más firmes.

La voladura perfilada en trabajos subterráneos utiliza barrenos perimetrales en una relación, entre el ancho de la berma (Y) y el espaciamiento (X) usando cargas ligeras, bien distribuidas y disparadas en el último período de retardo de la voladura (Fig.III.5.1.). Estos barrenos son los últimos en dispararse para asegurar que la roca fragmentada se desplace lo suficiente para ofrecer el máximo desahogo a los barrenos de la voladura perfilada. Este franqueo permite la libre remoción del banco final y produce menos fractura más allá del límite de la excavación.

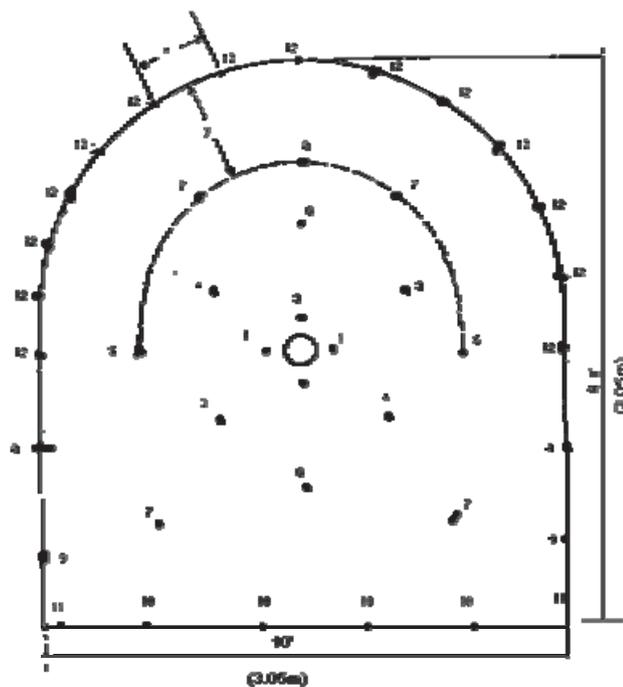


Fig.III.5.1. Plantilla típica para explosiones retardadas en galerías de avance.

Las cargas pequeñas bien distribuidas en los barrenos perimetrales usando plantillas y retardo convencionales, han producido regularmente resultados satisfactorios.

Puesto que no es conveniente ni práctico atar cargas a las líneas de Primacord en barrenos horizontales, la voladura perfilada se realiza cargando a carril cartuchos de explosivos de baja densidad de pequeños diámetros para obtener tanto cargas pequeñas como su buena distribución a lo largo del barreno.

A diferencia de las voladuras a cielo abierto, las voladuras subterráneas tienen una sola cara libre para el desplazamiento de la roca, por lo que será necesario facilitarle su salida; por ello los primeros barrenos en detonar tienden a crear un vacío hacia el cual se vuela sucesivamente la roca. Esta abertura llamada cuña o cuele es la llave de la voladura pues abre la roca aproximadamente en forma cilíndrica hasta la profundidad de barrenación. La cuña es la parte más importante de la voladura ya que el resto de los barrenos no pueden romper eficientemente a menos que la cuña haya sido removida.

Existen diversos tipos de cuñas, siendo las más usadas por su menor dificultad en la barrenación la cuña quemada. Esta cuña consiste en un grupo de barrenos cercanos entre sí, paralelos a la dirección de avance y ubicados generalmente al centro del frente de la excavación. Los barrenos que rodean el área de la cuña dispararán algunos milisegundos después según un plan previamente determinado.

Como puede observarse los barrenos vacíos de las cuñas quemadas pueden ser de igual o de mayor diámetro que los barrenos cargados; el que sean de mayor diámetro sólo se justifica cuando se dispone del equipo de barrenación necesario y que éste permita tener una mayor eficiencia en la barrenación.

El resultado de una voladura puede ser muy variable, de acuerdo a la relación entre centros y el diámetro de los barrenos vacíos. Cuando la distancia es mayor que el doble del diámetro del barreno vacío, la rotura puede no llegar a realizarse ya que la concentración de la carga necesaria es tan grande que hay una deformación plástica de la roca entre los dos barrenos.

Si se aproximan los dos barrenos y la carga se ajusta, el propósito de la verdadera rotura de la roca entre ambos está asegurado. Sin embargo, la rotura no es la única condición necesaria, ya que al mismo tiempo los gases de la explosión deben lanzar a través de la abertura la mayor cantidad posible de roca arrancada.

Ventajas:

La voladura perfilada o de afine ofrece dos ventajas principales:

Reduce el rompimiento excesivo que producen los métodos convencionales.

Requiere menos ademe.

Una buena voladura implica una atención cuidadosa a la distribución de barrenación, la secuencia de ignición y la cantidad de explosivo detonada en cada tiempo. Además, el uso de la técnica o método correcto puede reducir el daño al macizo rocoso que rodea la excavación considerablemente. Así tal vez ya no haya excusas para voladuras de mala calidad en la exacción subterránea.

## **IV.-DISEÑO DE VOLADURAS**

### **IV.1.-FACTORES DISEÑO Y CALCULO DE UNA VOLADURA A CIELO ABIERTO.**

#### **IV.1.1.-FACTORES IMPORTANTES QUE INFLUYEN EN UNA VOLADURA**

##### ***Control de Calidad***

Tener el cuidado necesario en los detalles de una voladura es la llave para asegurar un buen control de calidad y lograr trabajos eficientes, consistentes y seguros.

Para un conveniente Diseño de Voladuras es importante el esfuerzo de grupo. Cada paso importante debe ser completado lo más consistentemente posible, ya que cada operación controla la eficiencia de la otra.

Los procedimientos para el diseño de la voladura y su desempeño deben ser definidos, documentados, supervisados y evaluados para asegurar un buen sistema de control de calidad.

##### ***Comunicación***

Para propiciar la optimización de las voladuras se requiere mantener una buena comunicación entre los integrantes de cada grupo y así mismo una fluida retroalimentación entre grupos.

##### **Distribución de la Energía del Explosivo en la Masa Rocosa**

La energía debe ser distribuida uniformemente para lograr fragmentación uniforme.

Debe existir una relación adecuada entre el diámetro del barreno y la altura del banco.

Entre el bordo y el espaciamiento existirá una relación adecuada.

Implementar cuidadosamente los diseños convenientes.

##### **Confinamiento de la Energía del Explosivo**

Se debe asegurar que la energía del explosivo esté confinada suficiente tiempo después de la detonación inicial para asegurar la fragmentación y desplazar el material.

Los barrenos deben ser cargados de acuerdo a la geología del banco.

Utilice tacos de longitud y material adecuados.

Diseñe los tiempos de salida de la voladura de acuerdo a las condiciones del campo.

Use retardos adecuados.

## Nivel de Energía de los Explosivos

El nivel de energía debe ser suficiente para sobreponerse a la fuerza estructural y masa rocosa, y la vez proveer el desplazamiento adecuado.

Determine el nivel de energía de acuerdo al grado de fragmentación y desplazamiento obtenido.

Contemple explosivos de alta energía si las condiciones son adversas (bordes excesivos, patas grandes, malos pisos).

Mantenga el control de calidad de los explosivos mediante pruebas de rutina.

## Efectos Geológicos en la Efectividad de las Voladuras.

- Aspectos Geológicos

Los resultados de las voladuras son tienen mayor relación con las propiedades y estructuras geológicas de los mantos rocosos que por las propiedades de los explosivos.

- Propiedades de las Rocas

Entre las propiedades de las rocas se encuentran:

Resistencia a la Compresión

Resistencia a la Tensión (aprox. Un décimo de la Resistencia a la Tensión)

Resistencia al Esfuerzo Cortante.

Modulo de Young (Modulo de elasticidad, entre mas alto sea el rango, mas dura será la roca para fragmentarla).

Densidad

Velocidad Longitudinal de Onda (velocidad a la que la roca transmite las ondas de compresión).

- Aspectos Estructurales

La fragmentación de la roca es principalmente controlada por la estructura de la roca (estratos, juntas, fallas, etc.).

En rocas masivas existen poco o nada de estratos o juntas.

Estratos suaves o débiles pueden reducir el confinamiento de energía, y puede ser necesario utilizar tacos intermedios para maximizar el rendimiento de las voladuras.

Las rocas con muchas zonas de contacto o juntas requieren menor energía explosiva para obtener mayor fragmentación. En estos casos los explosivos como el ANFO que producen altas cantidades de gases son apropiados.

Patrones de barrenación menores minimizan los efectos adversos de masas rocosas que presentan muchos bloques o estratos.

Los espacios entre juntas o estratos pueden predecir el tamaño de la fragmentación.

La orientación de la cara libre a los planos de estratificación es una condición clave para determinar la fragmentación y controlar los taludes.

Los “boleos” o rocas duras grandes rodeadas de material suave requieren patrones reducidos y cargas con tacos intermedios para asegurar una mejor distribución de la energía a través de la masa rocosa.

- Dureza de la Roca

La dureza de la roca puede ser determinada en campo mientras se perfora, ya que la velocidad de perforación y la consistencia del detritus nos pueden orientar sobre la misma.

También se puede determinar la dureza de la roca golpeándola con un marro, y obtener resultados de acuerdo al daño causado.

Las rocas duras y de mayor densidad usualmente requieren factores de energía más altos para mejorar la fragmentación, a no ser que estén muy estratificadas o fragmentadas.

Las juntas que contienen arcilla o materiales blandos ofrecen planos de escape prematuros de energía.

El personal de barrenación debe proveer al poblador de la información necesaria sobre el comportamiento de la roca.

Es conveniente cargar los barrenos de acuerdo a las zonas de dureza.

- Cavidades

Las cavidades pueden representar un peligro importante para el personal y el equipo.

Estas pueden ser detectada y confiablemente dimensionadas por el perforista.

Los barrenos que presentan cavidades deben ser tratados de manera especial para evitar el sobrecargado de los mismos.

Para algunos casos, tubos de plástico o mangas de polietileno pueden ser utilizados para cargar la roca debajo de la cavidad.

Así mismo el uso de tacos intermedio favorece la detonación de estos barrenos.

- *Agua*

La presencia de agua tiene una mayor influencia en el tipo de explosivo utilizado y en los costos de la voladura.

Los niveles de agua estáticos generalmente se mantienen igual todo el tiempo, estos pueden ser desaguados y el agua no correrá dentro del barreno, ya que no existe movimiento de agua dentro de la roca.

Los niveles de agua dinámicos o en formaciones muy fisuradas pueden variar, por lo que al ser desaguados recuperan su nivel rápidamente.

Los barrenos saturados o llenos de agua pueden ser cargados con alto explosivo a granel o ANFO encartuchado.

Cebar el barreno en diferentes niveles del mismo es recomendado.

Las masas rocosas saturadas transmiten rápidamente altas presiones de detonación y pueden afectar adversamente el rendimiento de los explosivos.

- *Factor de Carga.*

Se define como la cantidad de explosivo utilizado para fragmentar un metro cúbico de roca y se expresa en grs/m<sup>3</sup>.

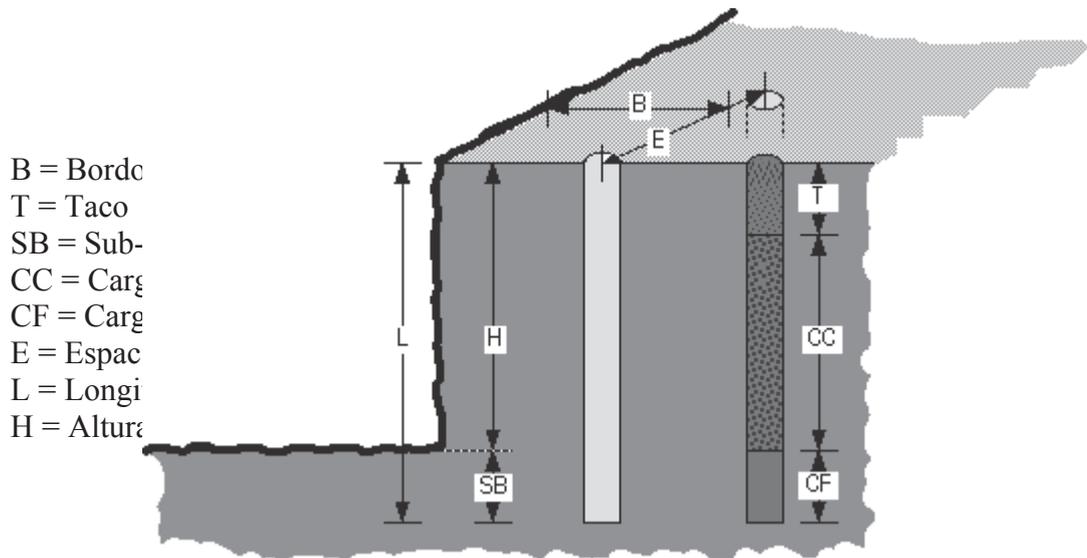
El factor de carga a utilizar varía de acuerdo al tipo de roca, pero aun en casos en los que se explota un mismo tipo de roca este factor puede cambiar, dependiendo del intemperismo, la geología del yacimiento o la capacidad del equipo de acarreo y trituración con que se cuenta.

En la tabla que se presenta a continuación, se muestran diferentes factores de carga recomendados para diferentes tipos de roca. Al inicio de una operación es recomendable utilizar el factor mas bien alto que corresponda al tipo de roca y se deberá de ajustar conforme se observen los resultados, ya que como mencionábamos con anterioridad un mismo tipo de roca puede responder de manera diferente, aunque dentro de un rango determinado.

Los factores de Carga proporcionados en la tabla anterior, tienen referencia a explotaciones con cara de banco libre, con alturas adecuadas (mayores a 6.00 mts.) y amplios (30 a 40 mts.). Para barrenaciones entre 2.5" y 5" de diámetro. Sin embargo estos nos dan una idea clara de los posibles factores de carga iniciales para una nueva explotación.

También estos factores de carga podrán variar de acuerdo a las necesidades de fragmentación vigentes, mismas que dependes de la capacidad tanto del equipo de rezagado como del equipo de trituración con que se cuenta.

#### IV.1.2.-VOLADURA A CIELO ABIERTO



##### 1. Altura de Banco

Las alturas de banco son normalmente determinadas por los parámetros del banco.

Si la altura no es predeterminada entonces deberá ser mayor en metros, que el diámetro de la carga en milímetros dividida entre 15.

Puede presentarse desviación en los barrenos si la altura de banco es mayor a cuatro veces la dimensión del bordo.

##### 2. Diámetro de Barrenación

La selección adecuada del diámetro de barrenación es un factor determinante en el buen resultado de las voladuras.

El diámetro de barrenación máximo sugerido, en milímetros, para una altura de banco conocida, deberá ser igual a la altura del banco, en metros, multiplicado por 15.

El uso de diámetros de barrenación mayores al sugerido puede derivar en una distribución inapropiada de la energía.

Al usar cargas de explosivo de diámetro menor al del barreno, debe tomarse en cuenta el efecto de desacoplamiento.

Normalmente, el diámetro del barreno será más grande que el diámetro efectivo de la broca, resultando en una densidad de carga real mayor.

A medida que es aumentado el diámetro de barrenación, los costos de perforación, cargado y explosivos generalmente bajan.

Los barrenos pequeños permiten distribuir más uniformemente la energía que los barrenos mayor diámetro.

### 3. Bordo

El bordo se considera como la distancia que existe de la cara del banco a la primera línea de barrenación (paralela al mismo).

El bordo en metros, es normalmente igual al diámetro de la carga en milímetros, multiplicado por un rango de 20 a 40.

Otros factores que deben ser considerados son la altura del banco, dureza de la roca, estratificación, explosivo utilizado, desplazamiento deseado y fragmentación requerida. Para algunas canteras se utiliza la siguiente regla: Bordo = 32 diámetros en roca de densidad menor a 3.3 grs/cc y 26 diámetros en roca superior a 3.3 grs/cc.

### 4. Factor de Rigidez

Este es igual a la altura del banco dividida por el bordo.

Si el factor es menor a 2, la masa rocosa será muy rígida, más difícil de fracturar y requerirá mayor sub-barrenación.

Factores de rigidez bajos requieren factores de energía poco más altos para producir fragmentación uniforme.

El factor de rigidez puede ser mejorado usando diámetros de carga más pequeños o bancos más altos.

### 5. Espaciamiento

Espaciamiento es la distancia entre barrenos de manera perpendicular al bordo.

Normalmente se estima en un rango de 1 a 1.8 veces la distancia del bordo.

La distribución de la energía óptima puede obtenerse cuando el espaciamiento es igual 1.15 veces el bordo y el patrón de barrenación es en tresbolillo.

Estratos paralelos a la cara del banco permiten espaciamientos más amplios.

## 6. Taco

Taco es el material inerte colocado en el barreno encima del explosivo, y sirve para confinar la energía.

Este se determina entre 20 a 30 veces el diámetro del barreno (dependiendo de la carga y roca).

Es importante tener en cuenta los factores relativos de confinamiento (presentamos la tabla anterior que ilustra dicha relación).

La utilización de grava triturada angulosa como material para taqueado favorece la contención de la presión del explosivo dentro del barreno. La dimensión del agregado debe ser de 1/10 del diámetro de barrenación.

Utilizar el detritus producto de la barrenación no asegura un buen confinamiento del taco.

## 7. Sub-barrenacion

La sub-barrenacion es la longitud adicional a la que debe ser perforado el barreno debajo del piso del banco.

Esta puede ser igual al diámetro de carga multiplicado por 7.

Si la mitad de la distancia del bordo aun deja un piso disparejo, el bordo deberá ser reducido.

Estructuras con orientaciones inclinadas afectarán adversamente el rendimiento de las voladuras.

Para mejorar la fragmentación, se puede optar por colocar el cebo en o cerca del nivel del piso.

## 8. Barrenación

La estabilidad inherente de la formación es el factor controlante de seguridad en la selección de la altura de bancos, esto es que no se debe de operar a mayor altura que lo que permitan los rangos de estabilidad del material a explotar.

El paralelismo entre barrenos, así como la simetría del patrón de barrenación, son factores que intervienen en la homogeneidad de la fragmentación de una voladura.

Cuando no se tiene en cuenta este factor los resultados que se obtienen no son homogéneos, pudiendo presentar en algunos lugares excelentes resultados y en otros malos resultados dentro de una misma voladura, debido a las diferentes concentraciones de carga explosiva provocados por la desviación de los barrenos.

De la plantilla de barrenación depende el buen resultado de una voladura, ya que la distribución de los barrenos dentro del área a volar es fundamental para lograr que la roca se fragmente adecuadamente y la distribución del explosivo en toda la voladura sea el pertinente. Las plantillas de barrenación más comunes son tres; cuadradas o reticulares, rectangulares y en tresbolillo.

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

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

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

Observando en la superficie del banco, las áreas fracturadas alrededor de los barrenos pueden ser representadas como círculos. Es lógico asumir que todos los puntos en la superficie deben caer dentro de uno de esos círculos para que ocurra una fragmentación efectiva. En la figura anexa nos podemos dar idea de lo que sucede cuando tenemos una plantilla rectangular y los barrenos dispuestos uno detrás de otro, la relación bordo - espaciamiento es de 1:1.25.

Patrón de barrenación reticular en el cual se notan áreas entre los círculos de influencia del explosivo que no se cubren y otras con sobrerrompimiento.

Comparado con lo que sucede en una plantilla de barrenación con los barrenos dispuestos en tresbolillo.

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

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

## 9. Diseño de Tiempos

Aunque se cuenta con dos vías de desalojo del material en una explotación de tajo (el frente y la parte superior de este), la velocidad de la roca al volarse con explosivos es un factor muy importante a considerar.

Esto es más importante en voladuras de varias hileras de barrenos. Para una cantera típica de espaciamientos de 3.00 mts., el movimiento inicial en la cara libre ocurre en 10 a 12 milisegundos, pero el bordo únicamente se mueve alrededor de 15 cm. cada 10 milisegundos, esto nos da como resultado que conforme se detonen las líneas posteriores el vuelo de las rocas producto de estas líneas tenderá a la vertical.

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

La utilización de retardos entre línea y línea o entre barrenos, nos dan la oportunidad de provocar ese desahogo necesario para que la voladura nos presente dos ventajas; la primera una reducción de la roca en vuelo hasta niveles mínimos o nulos y la segunda, un control de la roca al rezagar, ya que con una adecuada distribución de estos tiempos se puede dirigir la voladura de tal manera que puede quedar apilada hacia el centro del frente de la voladura o en todo el ancho del mismo.

La practica mas recomendable en la actualidad para retardo de voladuras es la utilización de Iniciadores No Eléctricos, ya sean Primadets o Ez Dets. Todavía existen explotaciones donde la secuencia de retardo se realiza con conectores MS (retardos de superficie de dos vías que se utilizan conjuntamente con cordón detonante), en capítulos anteriores nos hemos referido a las desventajas del uso de líneas descendentes de cordón detonante, en los casos en los que se utilizan retardos de superficie se puede elegir entre usar retardos de un mismo tiempo o combinar dos o mas.

Es recomendable utilizar un tiempo mas largo en la última línea de barrenos con el propósito de incrementar el alivio en esta hilera ya que así se evita el agrietamiento o “pateo” de la nueva cara del banco al momento de la voladura.

En el caso de los iniciadores no-eléctricos o Primadet por sus características nos proporcionan resultados palpablemente buenos ya que nos permite retardar cada uno de los barrenos con bastante seguridad y diseñar la voladura dando salidas alternativas a la misma, y pudiendo superar la limitante de los tiempos disponibles (del 0 al 15) con la combinación de conectores MS de superficie traduciéndose a una infinita posibilidad de tiempos.

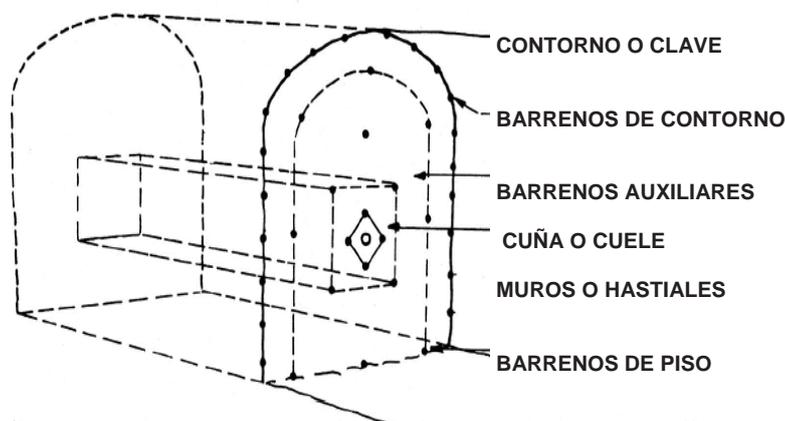
La secuencia de tiempos en los EZ Dets es prácticamente ilimitada, ya que el retardo es acumulativo de línea a línea.

## **IV.2.-DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA VOLADURA SUBTERRANEA**

### **IV.2.1.-FORMA COMO SE IDENTIFICA O DIVIDE UN TUNEL O GALERIA.**

Para estos cálculos es conveniente identificar las diferentes zonas en las que se divide la sección

Como se observa las zonas de Muro o Hastiales, la Clave o Corona y el Piso o Zapatara nos definen la geometría de la Galería.



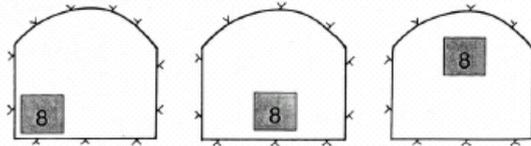
La zona donde se ubican los barrenos auxiliares de Muros o Hastiales y Clave o Corona es la zona de Destroza, los consumos específicos de Explosivos son elevados comparados con las voladuras de Banco.

Los barrenos que irán en la zona de Piso o Zapatera es una zona donde se presentan las acciones negativas de la gravedad por lo que sus consumos de explosivo deben ser correctamente calculados.

**UBICACIÓN DE LA CUÑA O CUELE.**

La zona de Cuña o Cuele es la base del éxito de la voladura y su correcta ubicación nos dará la proyección de la roca y: la fragmentación requerida, por lo que la Cuña o Cuele nos dará como resultado el número de barrenos y secciones a calcular, Se debe tener presente que la Cuña puede ubicarse en tres posiciones.

- En los lados de la Galería.
- Centrada en la Parte Inferior.
- Centrada en la Parte Superior.

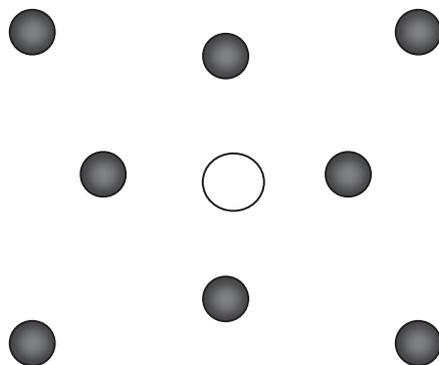


La ubicación de la Cuña en cada posición tiene sus ventajas y desventajas, por ejemplo si la ubicamos en la parte superior, se evitaría la caída libre del material, existe menos apelmazado o compactado, una buena fragmentación y su proyección hace que se tienda más la rezaga o marina, esto último implicaría, que las instalaciones de los servicios deben de mantenerse muy alejadas para evitar daños a las mismas .

**TIPOS DE CUÑAS O CUELES.**

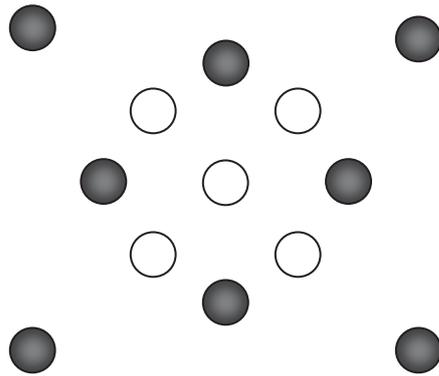
Existen varios tipos de Cuñas o Cuele, siendo los mas comunes los siguientes:

- 1 . - Con un barreno vacío o hueco al centro en este caso de 3" Ø



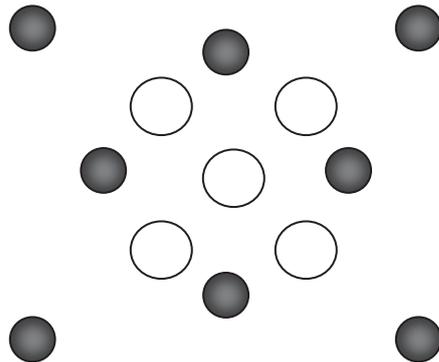
-  **Barrenos Huecos de 3"**
-  **Barrenos Cargados**

2 . - Con cinco barrenos huecos, vacíos o de expansión del mismo diámetro de los barrenos de carga.



- **Barrenos Huecos**
- **Barrenos Cargados**

3 . - Con cinco barrenos huecos, vacíos o de expansión en este caso de 3 “ Ø.



- **Barrenos Huecos de 3”**
- **Barrenos Cargados**

**IV.2.2.-ASPECTOS GENERALES.**

Como se observa existen una gama de formas calculadas para las cuñas o cueles que han sido comprobadas en campo en las diferentes construcciones de las Obras Subterráneas, en base a esto debemos tener presente que:

- 1. - Las voladuras en los túneles y galerías son mucho más complejas que una voladura de banco.
- 2. - El consumo específico de explosivos es elevados y el confinamiento de las cargas es alto.

3. - Las distancias entre barrenos de cuña o cuele son pequeñas, por lo que los explosivos deben ser insensibles para evitar la transmisión de la detonación por Simpatía.

Ser capaz de iniciar por simpatía a otro tramo del cordón detonante, al interponer entre ambos, cartulinas cuyos espesores sumen un mínimo de 0,5 mm, Aplicable a los cordones detonantes con gramajes iguales o mayores a 3 g/m.

4. - Los explosivos que utilizemos deben tener una velocidad de detonación superior a los 3,000.00 m/seg. para evitar, el efecto canal con los explosivos encartuchados en los barrenos de mayor diámetro, en nuestro caso no existe este problema porque los cartucho de Emulsión son superior a este ya que la velocidad de detonación que tiene es de 5,200.00 m/seg.

El efecto canal es cuando los gases de la explosión empujan el aire alojado entre la columna de explosivos y la pared del barreno, comprimiendo los cartuchos por delante del frente de la onda de choque, disminuyendo así la concentración de la temperatura y aumentando excesivamente la densidad del explosivo, da como resultado que la voladura se sople.

La correcta cantidad de explosivo en cada barreno debe ser el camino para reducir o evitar al mínimo el exceso de rompimiento o sobre excavación de la voladura; por lo que nuestra visión debe esta dirigida en, disminuir y distribuir mejor las cargas explosivas, para reducir al mínimo los esfuerzos y el fracturamiento de la roca más allá de la línea de excavación, En las obras subterráneas se debe tener Presente que la roca, en la zona de clave y hastiales se derrumban o desmoronan por falta de consolidación del material, presentando un exceso de rompimiento debido a la acción triturante y al alto índice de sacudimiento de la voladura, es por eso que nuestro enfoque es; Reducir, Disminuir y Distribuir las cargas en cada voladura Evitando el exceso de sobre excavación en los Túneles y Galerías.

Todas las formulas obtenidas sobre las teorías de los explosivos, son reglas empíricas, que dan resultado de la practica en campo, por lo que son factibles de modificación en base a las características de cada lugar donde se utilizará y del conocimiento del uso y manejo de los explosivos.

#### ***IV.2.3.-CONDICIONES PARA EL DISEÑO DE UNA VOLADURA***

El calculo de las voladuras, se contempla el diseño de la Cuña o Cuele, el Piso o Zapatera, el Muro o Hastial y la Clave del Túnel o Galería, estas reglas empíricas a lo largo de la realización de las voladuras, se irán ajustando en función de los resultados obtenidos.

Como en este tipo de Excavaciones no se cuenta con una salida para las voladuras, como en los bancos a cielo abierto, es necesario formar esta salida por medio de una Cuña o Cuele constituida de barrenos huecos, vacíos o de expansión, cuyo diseño podrá ser desde uno o más barreno de diámetro variable.

Se debe tener presente que:

- El diámetro del barreno podrá ser igual o mayor a los de carga dependiendo de varios factores.

- Siendo el equipo de perforación uno de estos factores, así como las características geológicas.
- Los barrenos huecos, vacíos o de expansión son para que los barrenos cargados rompan escalonadamente y formar una cara libre.

Para lograr esto, es necesario contar con las bases técnicas, las cuales en su mayoría se han apoyado en lo siguiente:

- En el diseño de cuñas calculadas con las teorías Suecas de Langefors y Kihlström (1963).
- En las Modificaciones de las teorías Suecas por Holmberg (1982).
- Y en las Actualizaciones de Oloffsso (1990).

La aplicación y la experiencia en voladuras, nos permiten proponer los avances que se requieren para cumplir las metas de un determinado proyecto puesto que:

1. - Se ha visto que los avances de cada voladura están directamente ligados en la relación de los de los barrenos huecos, vacíos o de expansión con los diámetros de los barrenos de carga.
2. - Lo anterior esta ligado con el paralelismo de los barrenos huecos, vacíos o de expansión y de carga durante su ejecución.
3. - Cuando no se cumple con el paralelismo y la desviación de los barrenos es mayor al 2% será difícil tener un avance en la voladura del 95%.

#### ***IV.2.4.-FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LA VOLADURA SUBTERRANEA***

*Nomenclatura:*

L = Longitud de Barrenación (m).

$D_v$  = Diámetro del barreno vacío, hueco o de expansión.

$Q_b$  = Carga por barreno

$D_c$  = Diámetro del barreno de carga (m).

D = Distancia perpendicular de la primera línea a la segunda línea de los barrenos de carga

c = constante de la roca

$PRP_{ANFO}$  = Potencia relativa en peso del explosivo referida al ANFO

$d_1$  = Distancia del eje del barreno vacío al centro del eje del barreno de carga

$D'_v$  = Diámetro equivalente de los barrenos vacíos o huecos

$NB_v$  = Número de barrenos huecos o vacíos

NB = Número de barrenos

$\sqrt{\quad}$  = Raíz Cuadrada

d = Distancia entre barrenos huecos y de carga

$E_p$  = Error de emboquillamiento en (m)

$\alpha$  = Desviación angular en (m)

e' = Error por emboquillamiento en (m)

$q_1$  = concentración lineal de carga en el barreno  
 $A_h$  = Anchura formada por unos huecos rectangulares  
 $d_2$  = Distancia corregida entre barrenos huecos de carga  
 $S/b$  = Relación de espaciamentos, se suele tomar igual a 1  
 $f$  = Factor de fijación.  
 $\acute{c}$  = Constante de la roca corregida.  
 $A_T$  = Ancho del túnel  
 $\gamma$  = Angulo de realce o inclinación necesario para alojar el equipo de perforación, por lo general se considera para un avance de 3m., un ángulo de 3° que equivale a 5cm/m lógicamente este depende de las características del equipo.  
 $S_{cc}$  = Espaciamiento entre barrenos de contorno en la clave (m).  
 $d_{cc}$  = Distancia entre barrenos de contorno en la clave (m).  
 $q_{cc}$  = Concentración de carga en (Kg. /m.)  
 $Q$  = Concentración de carga del barreno (Kg. /m.)  
 $Q_b$  = Carga del barreno (Kg.)  
 $Q_{lc}$  = Concentración lineal de carga (Kg.)  
 $P_c$  = Desarrollo de la clave perímetro (m).  
 $l_{mq}$  = Longitud que queda para los muros o sección (m).  
 $H$  = Altura de los hastiales o muros (m).  
 $d_z$  = Distancia práctica de zapatera (m).  
 $d_m$  = Distancia corregida por factor de volatibilidad (m).  
 $l_f$  = Longitud de carga de fondo del barreno (m).  
 $S_R$  = Espaciamiento de contorno (m).  
 $l_c$  = Longitud de carga de columna del barreno (m).  
 $l_f$  = Longitud de carga de fondo del barreno (m).  
 $q_c$  = Concentración de carga de columna.  
 $q_f$  = Concentración de carga de fondo.  
 $T$  = Taco de los barrenos de carga (m).  
 $l_{amcq}$  = Longitud que queda para la sección (m).

## A.-FORMULAS PARA EL CÁLCULO DE LA CUÑA O CUELE:

### *A.1.- Cálculo de la Cuña o Cuele:*

En este Cuña consideraremos el cálculo de cuatro secciones por lo que inicialmente obtenemos la longitud de barrenación de acuerdo a lo siguiente:

En este cálculo es importante conocer el diámetro de los barrenos Huecos que emplearemos.

1 . - Cuando la Cuña está formada por un barreno vacío utilizaremos la fórmula siguiente.

$$L = 0.15 + 34.1 D_v - 39.40 (D_v)^2$$

2 . - Cuando son más de un barreno vacío, hueco o de expansión se hace intervenir el diámetro equivalente y utilizaremos la fórmula siguiente.

$$D_v = D'_v \times \sqrt{NB_v}$$

*A.2.-Calculo de la distancia entre el barreno hueco y los barrenos de carga de la primera sección:*

1 . - Se debe tener presente de acuerdo a las teorías Suecas esta distancia no debe exceder de:

$$d_1 = 1.7 D_v$$

Si la distancia no excede de  $1.7 D_v$  se logrará una fragmentación y voladura satisfactoria, esta condición podrá variar por el tipo de explosivo empleado y las características de la roca.

$$d_1 = 2 D_v$$

Si se tuvieran distancias mayores a  $2 D_v$  se tendría un ángulo de salida demasiado pequeño, presentando la roca deformaciones plásticas entre los dos barrenos.

$$d_1 = D_v$$

Si se tuvieran distancias inferiores a  $D_v$  se tendría una concentración de carga muy elevada presentando la sinterización de la roca fragmentada y que la voladura de la cuña falle.

La sinterización, es el proceso por medio del cual con el aumento de la temperatura, las partículas de los cuerpos sólidos se unen, y la presencia del calor hace que estas se compriman y la tensión superficial se incremente expulsando los gases y fallando la voladura.

Por lo que es recomendable que de acuerdo a la experiencia de campo, las distancias se calculen sobre la base de:

$$d = 1.5 D_v$$

Como en el campo de acuerdo a las condiciones del terreno y del equipo, se presenta el problema de que la perforación guarde el paralelismo esperado, lo que nos da una desviación angular, que en este caso por el equipo es de 10 mm y un error de emboquillamiento de 20 mm con estos datos aplicaremos la siguiente fórmula:

$$d_1 = 1.5 D_v - E_p$$

*A.3.-El error de emboquillamiento se calcula con la siguiente fórmula:*

$$E_p = \alpha \times L + e'$$

Para determinar el número de secciones ( $n_c$ ) se aplica la regla práctica relacionada con la longitud del último lado de la sección ( $d_v$ ) que no sea menor que la raíz cuadrada del avance.

$$d_n < \sqrt{\text{avance}}$$

*A.4.-Calculo de la de la concentración lineal de carga para los barrenos de la primera sección*

$$q_1 = 55(D_c)(d_1/D_v)^{1.5}X(d_1-D_v/2)X(c/0.4)X(1/PRP_{ANFO})$$

#### A.5.-Determinación del taco de los barrenos

$T=10D_c$       Formula practica para taquear los barrenos con carga

#### A.6.-Carga por barreno

$$Q_b = (L-T) \cdot (q_1)$$

A.7.-Para el cálculo del resto de las secciones, se considera lo siguiente:

$$D = 8.8 \times 10^{-2} (\sqrt{A_h} \times q_1 \times PRP_{ANFO} / D_c \times c)$$

$$A_h = (2)^{0.5} \times d_1$$

En el campo, de acuerdo a las condiciones del terreno y del equipo, se presenta el problema de que la perforación guarde el paralelismo esperado, lo que nos da una desviación angular, que en este caso por el equipo es de 10mm y un error de emboquillamiento de 20mm con estos datos aplicaremos la siguiente formula:

$$d_2 = 1.5 D_v - E_p$$

A.8.-El error de emboquillamiento se calcula con la siguiente formula:

$$E_p = \alpha \times L \times e'$$

En la segunda sección se deben cumplir las siguientes condiciones

$$d_2 \leq 2 A_h$$

Si esta condición no se cumple se presentan las deformaciones plásticas en la roca por lo que se debe modificar la concentración lineal de carga.

$$q_1 = (540 \times D_c \times c \times A_h) / PRP_{ANFO}$$

Formula para modificar la concentración de carga, si después de aplicar esta formula no se cumple se debe elegir un explosivo de menor potencia, para optimizar la fragmentación.

Hacemos las correcciones por error de paralelismo en la barrenación

$$A_h = (\sqrt{2}) \times (d_1 - E_p)$$

#### A.9.-Determinación del taco de los barrenos

$T = 10 D_c$       Formula práctica para taquear los barrenos con carga.

## B.-FORMULAS PARA EL CÁLCULO DEL PISO O ZAPATERA

### *B.1.-Cálculo de la distancia entre barrenos de carga del piso o zapatera*

También es factible emplear las formulas de voladuras de banco, ya que tomamos la longitud de avance como si fuera la altura del banco.

Se debe considerar que cartuchos se utilizaran de alto explosivo, su densidad gr./cc y concentración de carga Kg./m.

$$d = 0.90 (\sqrt{q_1 \times PRP_{ANFO} / \acute{e} \times f (S / b)})$$

S/b = Relación de espaciamientos, se suele tomar igual a 1

f = Factor de fijación, generalmente se toma 1.45 para tener en cuenta el efecto gravitacional y el tiempo de retardo entre barrenos.

$$\acute{e} = c + 0.05 \quad \text{para} \quad d \geq 1.40 \text{ m}$$

$$\acute{e} = c + 0.07 / d \quad \text{para} \quad d < 1.40 \text{ m}$$

### *B.2.-Para el número de barrenos se emplea la formula:*

En el contorno es complicado hacer la barrenación en paralelo por las características del equipo empleado ya que toda perforadora requiere el espacio necesario para colocarla y esta se despegaría de la geometría de la sección de la galería o túnel, por lo que debemos considerar el ángulo de realce ( $\gamma$ ).

$$NB = ((A_T + 2L \times \text{Sen. } \gamma) / d) + 2$$

### *B.3.-Espaciamiento práctico para los barrenos de esquinas o de rincón.*

$$S_R = d - L \times \text{Sen. } \gamma$$

### *B.4.-Distancia práctica para los barrenos*

$$d_z = d - L \times \text{Sen. } \gamma - E_p$$

B.5.-El error de emboquillamiento se calcula con la siguiente fórmula:

$$E_p = \alpha \times L \times e'$$

### *B.6.-Longitud de la carga de fondo del barreno*

$$l_f = 1.25 \times d$$

*B.7.-Longitud de la carga de columna del barreno.*

$$l_c = L - l_f - 10 D_c$$

*B.8.-Carga total del Barreno.*

Se debe considerar que cartuchos se utilizarán de alto explosivo, su densidad gr./cc y concentración de carga “ qcc “ Kg./m.

$$Q = 0.7 \text{ qcc}$$

$$Q_b = ( l_c + l_f ) \times Q$$

*B.9.-Determinación del taco de los barrenos.*

$$T = 10 D_c$$

De manera práctica se utiliza esta formula, pero esta se obtiene como resultado del cálculo de la carga por barreno. Debe cumplir con la condición  $d \leq 0.6 L$

### C.-FORMULAS PARA EL CÁLCULO DE CONTORNO CLAVE Y HASTIALES

Cálculo de la distancia entre barrenos de contorno en la clave y muros, tabla o hastiales.

También es factible emplear las formulas de voladura de banco, ya que tomamos la longitud de avance como si fuera la altura del banco.

*C.1.-Espaciamiento entre barrenos de contorno en la clave.*

$$S_{cc} = 15 \times D_c$$

*C.2.-Distancia entre barrenos de contorno en la clave.*

$$d_{cc} = (S_{cc} / 0.80) - L \times \text{Sen. } \gamma - E_p$$

*C.3.-Concentración lineal de carga en barrenos de contorno de clave.*

Se debe considerar que cartuchos se utilizaran de alto explosivo, su densidad gr./cc. y concentración de carga “ qcc “ Kg./m.

$$Q_{lc} = 90 \times D_c^2$$

Se debe cumplir con la relación :

$$Q_{lc} < q_{cc}$$

C.4.-Número de barrenos en el contornó de la clave.

$$NB = (P_c / S_{cc}) + 2$$

C.5.-Carga del barreno de contorno en clave.

$$Q_b = (L - T) \times q_{cc}$$

## D.-CALCULO DE BARRENOS DE CONTORNO DE MURO O HASTIALES.

D.1.-Cálculo de la distancia entre barrenos de contorno en muros, tabla o hastiales.

Se hace intervenir la distancia de clave y piso para obtener que quedara para los hastiales o muro

$$l_{mq} = H - d_z - d_{cc}$$

Se debe considerar que cartuchos se utilizaran de alto explosivo, su densidad gr./cc. y concentración de carga “ qcc “ Kg./m.

En los barrenos de contorno la aplicación de esta formula solo varían los factores de fijación y la relación de espaciamentos.

$$d = 0.90 (\sqrt{q_1 \times PRP_{ANFO} / \acute{c} \times f (S / b)})$$

S/b = Relación de espaciamentos, se suele tomar igual a 1

f = Factor de fijación, generalmente se toma 1.20 para tener en cuenta el efecto gravitacional y el tiempo de retardo entre barrenos.

$$\begin{aligned} \acute{c} &= c + 0.05 && \text{para } d \geq 1.40 \text{ m} \\ \acute{c} &= c + 0.07 / d && \text{para } d < 1.40 \text{ m} \end{aligned}$$

$$d_m = 0.90 (\sqrt{q_1 \times PRP_{ANFO} / \acute{c} \times f (S / b)})$$

D.2.-Para el número de barrenos se emplea la formula:

$$NB = (l_{mq} / (d_m \times S / b) + 2)$$

S/b = Relación de espaciamentos, se suele tomar igual a 1.25.

D.3.-Espaciamento de contorno en muros.

$$S_R = l_{mq} / 2$$

D.4.-Longitud de la carga de fondo del barreno.

$$l_f = 1.25 \times S_R$$

*.5.-Longitud de carga de columna del barreno.*

$$l_c = L - l_f - (10 D_c)$$

*D.6.-Carga del barreno.*

Se debe considerar que cartuchos se utilizaran de alto explosivo, su densidad gr./cc. y concentración de carga “  $q_{cc}$  “ Kg./m.

Obtenemos la concentración de la longitud de carga mínima.

$$Q_b = (l_c + l_f) \times q_{cc}$$

*D.7.-Determinación del taco de los barrenos.*

$$T = 10 D_c$$

*D.8.-Formula para calcular la carga de columna del barreno cuando no se diseña recorte o poscorte en el contorno.*

$$q_c = 0.5 q_f$$

La concentración de carga de columna debe ser el 50% de la carga de fondo.

*D.8.1.-Determinación del taco de los barrenos.*

$$T = 10 D_c$$

De manera práctica se utiliza esta formula, pero esta se obtiene como resultado del cálculo de la carga por barreno. Debe cumplir con la condición  $d \leq 0.6 L$

## E.-FORMULAS PARA EL CALCULO DE DESTROZA MUROS O HASTIALES.

*E.1.-Calculo de destroza muros o hastiales.*

Cuando se necesite de voladuras de contorno, poscorte o recorte se aplica el mismo criterio solo teniendo las variaciones siguientes:

Se hace intervenir la distancia de la cuarta sección de cuña y el espaciamiento de contorno en muro o hastiales para obtener que quedara para ancho de la sección.

$$l_{amcq} = A_T - A_h - d_m$$

Se debe considerar que cartuchos se utilizaran de alto explosivo, su densidad gr./cc. y concentración de carga “  $q_{cc}$  “ Kg./m.

En los barrenos de contorno la aplicación de esta fórmula solo varían los factores de fijación y la relación de espaciamientos.

$$d = 0.90 (\sqrt{q_1 \times PRP_{ANFO} / \acute{e} \times f (S / b)})$$

S/b = Relación de espaciamientos, se suele tomar igual a 1

f = Factor de fijación, generalmente se toma 1.20 para tener en cuenta el efecto gravitacional y el tiempo de retardo entre barrenos.

$$\begin{aligned} \acute{e} &= c + 0.05 && \text{para } d \geq 1.40 \text{ m} \\ \acute{e} &= c + 0.07 / d && \text{para } d < 1.40 \text{ m} \end{aligned}$$

$$d_m = 0.90 (\sqrt{q_1 \times PRP_{ANFO} / \acute{e} \times f (S / b)})$$

*E.2.-Para el número de barrenos se emplea la fórmula:*

$$NB = (l_{amcq} / (d_m \times S / b) + 2)$$

S/b = Relación de espaciamientos, se suele tomar igual a 1.25.

*E.3.-Espaciamiento de contorno en muros.*

$$S_R = l_{amcq} / 2$$

*E.4.-Longitud de la carga de fondo del barreno.*

$$l_f = 1.25 \times S_R$$

*E.5.-Longitud de carga de columna del barreno.*

$$l_c = L - l_f - (10 D_c)$$

*E.6.-Carga del barreno.*

Se debe considerar que cartuchos se utilizaran de alto explosivo, su densidad gr./cc. y concentración de carga “ $q_{cc}$ ” Kg./m.

Obtenemos la concentración de la longitud de carga mínima.

$$Q_{lc} = 90 \times D_c^2$$

*E.7.-Carga del barreno.*

$$Q_b = (l_c + l_f) \times q_{cc}$$

*E.8.-Determinación del taco de los barrenos.*

$$T = 10 D_c$$

Formula para calcular la carga de columna del barreno cuando no se diseña recorte o poscorte en el contorno.

$$q_c = 0.5 q_f$$

La concentración de carga de columna debe ser el 50% de la carga de fondo.

## F.-CALCULO DE BARRENOS DESTROZA DE CONTORNO DE CLAVE O CORONA.

### *F.1.-Calculo de destroza de contorno de clave o corona.*

Cuando se necesite de voladuras de contorno, poscorte o recorte se aplica el mismo criterio solo teniendo las variaciones siguientes:

Se hace intervenir la distancia de la cuarta sección de cuña y el espaciamiento de contorno en muro o hastiales para obtener que quedara para ancho de la sección.

$$l_{mq} = A_T - A_h - 2S_R$$

Se debe considerar que cartuchos se utilizaran de alto explosivo, su densidad gr./cc. y concentración de carga “  $q_{cc}$  “ Kg./m.

En los barrenos de contorno la aplicación de esta formula solo varían los factores de fijación y la relación de espaciamientos.

$$d = 0.90 (\sqrt{q_l \times PRP_{ANFO} / \acute{c} \times f (S / b)})$$

S/b = Relación de espaciamientos, se suele tomar igual a 1

f = Factor de fijación, generalmente se toma 1.20 para tener en cuenta el efecto gravitacional y el tiempo de retardo entre barrenos.

$$\begin{aligned} \acute{c} &= c + 0.05 && \text{para } d \geq 1.40 \text{ m} \\ \acute{c} &= c + 0.07 / d && \text{para } d < 1.40 \text{ m} \end{aligned}$$

$$d_m = 0.90 (\sqrt{q_l \times PRP_{ANFO} / \acute{c} \times f (S / b)})$$

### *F.2.-Para el número de barrenos se emplea la formula:*

$$NB = (l_{mq} / (d_m \times S / b) + 2)$$

S/b = Relación de espaciamientos, se suele tomar igual a 1.25.

### *F.3.-Espaciamiento de contorno en muros.*

$$S_R = l_{mq} / 2$$

### *F.4.-Longitud de la carga de fondo del barreno.*

$$l_f = 1.25 \times S_R$$

F.5.-Longitud de carga de columna del barreno.

$$l_c = L - l_f - (10 D_c)$$

F.6.-Carga del barreno.

Se debe considerar que cartuchos se utilizaran de alto explosivo, su densidad gr./cc. y concentración de carga “  $q_{cc}$  “ Kg./m.

Obtenemos la concentración de la longitud de carga mínima.

$$Q_{lc} = 90 \times D_c^2$$

F.7.-Carga del barreno.

$$Q_b = (l_c + l_f) \times q_{cc}$$

F.8.-Determinación del taco de los barrenos.

$$T = 10 D_c$$

Formula para calcular la carga de columna del barreno cuando no se diseña recorte o poscorte en el contorno.

$$q_c = 0.5 q_f$$

La concentración de carga de columna debe ser el 50% de la carga de fondo.

#### IV.2.5.-CÁLCULO SIMPLIFICADO PARA VOLADURAS.

Cálculo simplificado para las voladuras en la Galerías y Túneles con barrenación en paralelo y considerando cuatro secciones:

Fórmulas para el cálculo de la Cuña o Cuele.

Secciones Cuña	Distancia entre Barrenos Vacío.	Distancia lado De la Sección.
Primera	$d_1 = 1.5 D_v$	$d_1 \sqrt{2}$
Segunda	$d_2 = d_1 \sqrt{2}$	$1.5 d_2 \sqrt{2}$
Tercera	$d_3 = 1.5 d_2 \sqrt{2}$	$1.5 d_3 \sqrt{2}$
Cuarta	$d_4 = 1.5 d_3 \sqrt{2}$	$1.5 d_4 \sqrt{2}$

Para el cálculo de las demás zonas de la Galería o Túnel, se parte de la distancia entre barrenos y la concentración lineal en el fondo “ $q_f$ ” para explosivo y diámetro utilizado de acuerdo a las siguientes formulas:

$$q_r = 7.85 * 10^4 D_{ce}^2 * p$$

$p$  = Densidad del Explosivo Kg./m<sup>3</sup>

$D_{ce}$  = Diámetro del cartucho del explosivo mm

$$d = 0.88 * q_f^{0.35}$$

Zonas de Voladura	Distancia	Espaciamento	Longitud de carga de fondo	Concentración de Carga		Taco
				Fondo	Columna	
	m	m	m	Kg./m	Kg./m	m
Piso	d	1.1 d	L/3	$q_f$	$q_f$	0.2 d
Hastiales	0.9 d	1.1 d	L/6	$q_f$	0.4 $q_f$	0.5 d
Clave	0.9 d	1.1 d	L/6	$q_f$	0.36 $q_f$	0.5 d
Aux. Clave	d	1.1 d	L/3	$q_f$	0.5 $q_f$	0.5 d
Aux. Muro	d	1.2 d	L/3	$q_f$	0.5 $q_f$	0.5 d

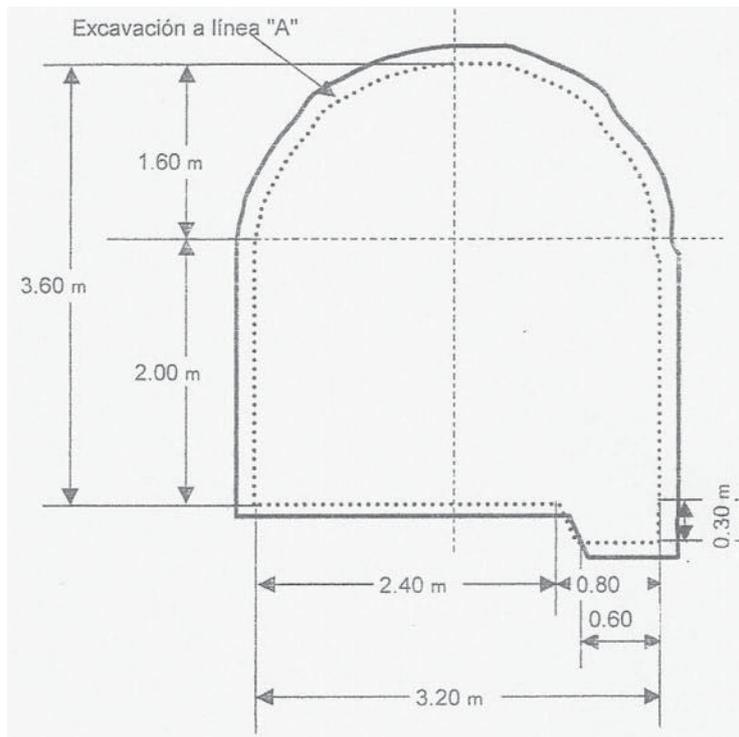
Las voladuras para fines de excavación son un instrumento de corte no un bombardeo, esto es lo que se intenta comunicar en este capítulo. Una buena voladura debe ser diseñada y calculada adecuadamente tomando en cuenta los factores que la afectan todo esto para que no se acuse de estabilidad insuficiente ala roca a causa de un mal diseño de voladura.

#### V.-CASO PRÁCTICO DE LA VOLADURA DE UNA GALERÍA

Diseño de una voladura de una galería, aplicando las formulas y reglas obtenidas en los temas anteriores.

### V.1.-DATOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE LA VOLADURA

El proyecto contempla excavar una galería de inspección y drenaje en una roca con coeficiente de volatibilidad de  $c=0.040$  mediante voladuras de barrenación paralela con los siguientes datos:



Ancho total de la cuneta		0.8 m
Ancho galería	$A_T=$	3.2 m
Altura del muro o hastial	$H=$	2 m
Radio de la clave o corona	$R=$	1.6 m
Diámetro del barreno de carga	$D_c=$	1 7/8 "
Diámetro del barreno hueco	$D_v=$	3 "
Lateral cuneta		0.3 m
Ancho cuneta		0.6 m
No de barrenos vacíos	$NB_v=$	5
Potencia relativa en peso del explosivo ref. al ANFO	$PRPANFO=$	1
Áng. de inclinación por equip empleado	$g=$	3 °
Desviación angular	$a=$	0.01 m
Error de emboquillamiento	$e'=$	0.02 m

Excavación a línea A= 10.63 m<sup>2</sup>

El explosivo a utilizar tiene una potencia relativa en peso de ANFO de 1 y los cartuchos existentes tienen un diámetro de 1" y 1 1/2" con unas concentraciones lineales de carga para una densidad de 1.10 gr./cc de 0.56 KG/m y 1.27 Kg./m respectivamente.

Partiendo de la condición de cálculo de cuatro secciones y una cuña formada por cinco barrenos huecos siendo para estos las opciones de 1 7/8" y 3" de diámetro.

## **V.2.-CÁLCULO DE LA GALERIA.**

Con las formulas que se tienen el capitulo anterior obtenemos los siguientes datos :

*Para barrenos de 1 7/8" Ø*

A.- Cuña o cuele.

- 1.- Secciones= 4
- 2.- Separaciones o distancias = 0.11 m. Primera sección.  
0.18 m. Segunda sección.  
0.20 m. Tercera sección  
0.22 m. Cuarta sección.
- 3.- Diámetro de barrenos de carga = 0.0476 m. 1 7/8"
- 4.- Cantidad de barrenos de carga = 16
- 5.- Diámetro e barrenos vacíos = 0.0762 m. 1 7/8"
- 6.- Cantidad de barrenos vacíos = 5

B.- Piso o Zapatera.

- 1.- Cantidad de barrenos de carga = 5
- 2.- Diámetro de barrenos de carga = 0.0476 m. 1 7/8"
- 3.- Separaciones o distancias = 1.03 m.
- 4.- Distribución ancho de galería = 0.87 m

C.- Muro o Hastial y Clave.

- 1.- Muro cantidad de barrenos de carga = 4
- 2.- Clave cantidad de barrenos de carga = 9
- 3.- Diámetro de barrenos de carga = 0.0476 m. 1 7/8"
- 4.- Separación o distancia de clave = 0.78 m.
- 5.- Separación o distancias de muro = 0.72 m.
- 6.- Distribución en clave = 0.72 m.
- 7.- Distribución en muro = 0.67 m.

D.- Auxiliares de Muro o Hastiales y Clave.

- 1.- Muro cantidad de barrenos de carga = 4
- 2.- Clave cantidad de barrenos de carga = 4
- 3.- Diámetro de barrenos de carga = 0.0476 m. 1 7/8"
- 4.- Separación o distancia de clave = 0.79 m.
- 5.- Separación o distancias de muro = 0.79 m.

E.- Total de barrenación.

1.- Cantidad de barrenos de carga = 42

2.- Cantidad de barrenos vacíos = 5

Zonas de voladura.	No de bar.	Tamaño del cartucho	Peso por cartucho.	No . de car	Total Alto Explosivo Kg.	Agente Explosivo ANFO	Columna	Total alto explosivo Kg.
Cuña	16	1" x 8"	0.117	1	1.87	1.38	1.27	20.27
Piso	5	1 1/2"x16"	0.505	3	8.35	2.42	0	0
Hastiales	4	1" x 8"	0.117	1	0.47	1.53	1.41	5.63
Clave	9	1" x 8"	0.117	1	1.01	1.51	1.40	12.05
Aux. Clave	4	1" x 8"	0.117	1	0.47	1.53	1.41	5.64
Aux. Muro	4	1" x 8"	0.117	1	0.45	1.53	1.41	4.89
<b>Total</b>	<u>42</u>				<u>12.62</u>			<u>48.48</u>

Cantidad de barrenos = 42

Total de carga = 61.10Kg.

Área de sección = 10.63 m<sup>2</sup>

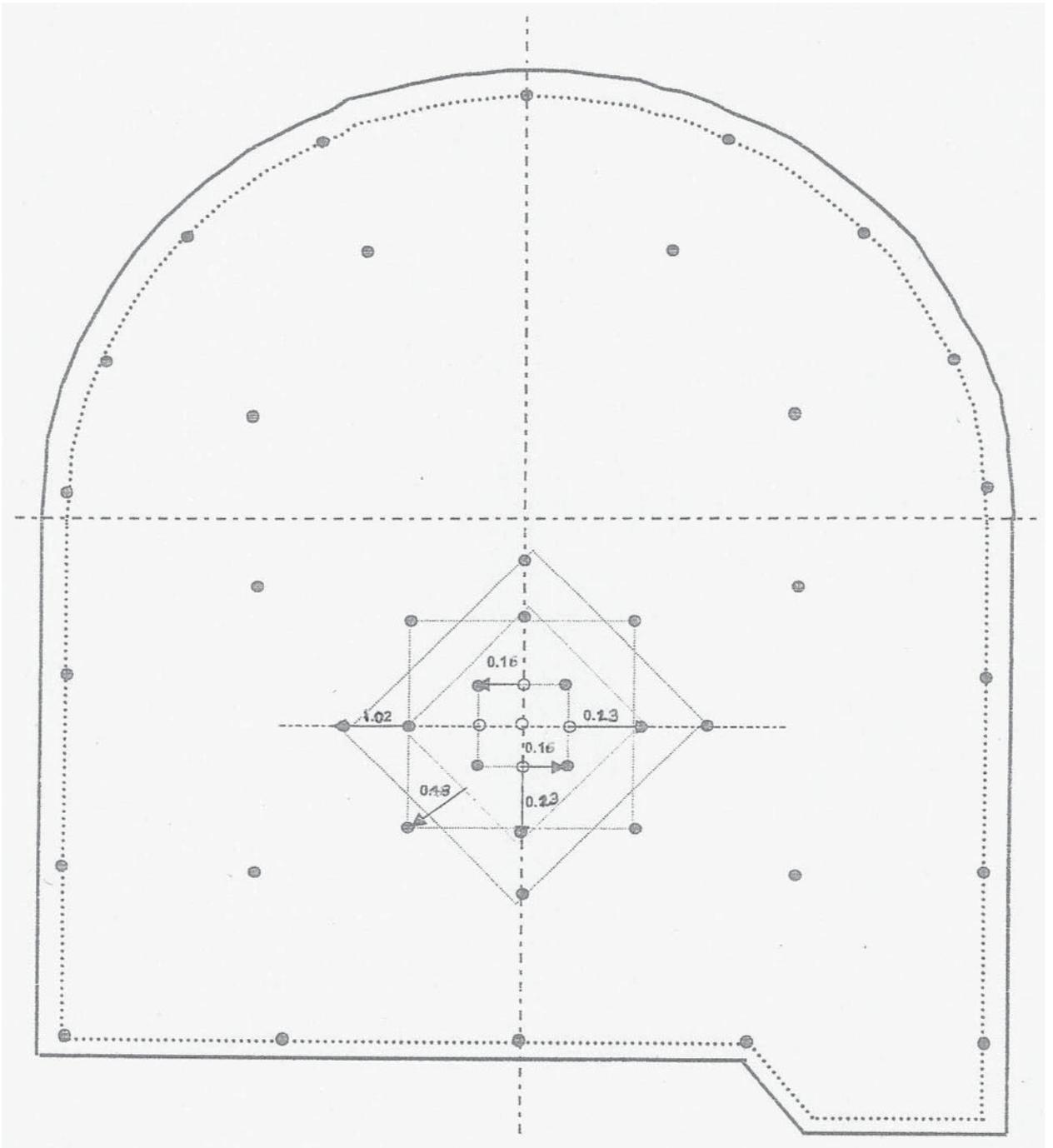
Longitud de barrenación= 3.20 m

Volumen excavado =34.02m<sup>3</sup>

Densidad de carga = 2.38 Kg./m<sup>3</sup>

Relación	Agente Explosivo	Alto Explosivo	Total porcentaje
ANFO – Emulsión	84%	16%	100%

Distribución grafica:



### V.3.-CÁLCULO SIMPLIFICADO DE LA GALERIA.

Cálculo simplificado para las voladuras en la Galerías con barrenación en paralelo y considerando cuatro secciones:

Fórmulas para el cálculo de la Cuña o Cuele.

Para barrenos de 1 7/8" Ø

Secciones Cuña	Distancia entre Barrenos Vacío.	Distancia lado De la Sección.
Primera	0.16 m.	0.23 m.
Segunda	0.23 m.	0.32 m.
Tercera	0.48 m.	0.68 m.
Cuarta	1.02 m.	1.44 m.

Para el cálculo de las demás zonas de la Galería, se parte de la distancia entre barrenos y la concentración lineal en el fondo "q<sub>f</sub>" para explosivo y diámetro utilizado de acuerdo a las siguientes formulas:

$$q_f = 7.85 * 10^4 D_{ce}^2 * p$$

$$q_f = 1.25 \text{ Kg./cm}^3$$

p = Densidad del Explosivo Kg./m<sup>3</sup>

D<sub>ce</sub> = Diámetro del cartucho del explosivo mm

$$d = 0.88 \times q_f^{0.35}$$

$$d = 0.95 \text{ m.}$$

Zonas de Voladura	Distancia m	Espacia miento m	Longitud de carga de fondo m	Concentración de Carga		Taco m
				Fondo Kg./m	Columna Kg./m	
Piso	0.95	1.05	1.07	1.25	1.25	0.19
Hastiales	0.86	1.05	0.53	1.25	0.50	0.43
Clave	0.86	1.05	0.53	1.25	0.45	0.43
Aux. Clave	0.95	1.05	1.07	1.25	0.63	0.48
Aux. Muro	0.95	1.14	1.07	1.25	0.63	0.48

Zonas de voladura.	No de bar.	Tamaño del cartucho	Peso por cartucho.	No. de car	Total Alto Explosivo Kg.	Agente Explosivo ANFO	Columna	Total alto explosivo Kg.
Cuña	16	1" x 8"	0.117	1	1.872	1.52	1.25	30.484
Piso	4	1 1/2"x16"	0.505	3	6.605	1.52	1.25	8.307
Hastiales	5	1" x 8"	0.117	1	0.546	1.52	0.50	3.556
Clave	12	1" x 8"	0.117	1	1.372	1.52	0.45	8.044
Aux. Clave	2	1" x 8"	0.117	1	0.273	1.52	0.63	2.223
Aux. Muro	5	1" x 8"	0.117	1	0.546	1.52	0.63	4.446
<b>Total</b>	<u>44</u>				<u>11.214</u>			<u>57.060</u>

Cantidad de barrenos = 44  
 Total de carga = 68.27 Kg.  
 Área de sección = 10.63 m<sup>2</sup>  
 Longitud de barrenación= 3.20 m  
 Volumen excavado =34.02m<sup>3</sup>  
 Densidad de carga = 2.01 KG/m<sup>3</sup>

Relación	Agente Explosivo	Alto Explosivo	Total porcentaje
ANFO – Emulsión	84%	16%	100%

En la realización de esta galería se utilizaron dos tipos de cálculo para el diseño de la plantilla de barrenación y la carga, siendo notable la diferencia entre el método sueco y el método simplificado y dando así la responsabilidad al ingeniero de juzgar adecuadamente cual será el utilizado en el frente o si se necesita de modificaciones.

## CONCLUSIONES

En la mayoría de las excavaciones en roca, la excavación por voladura constituye el medio más económico, pues ayudan a realizar el trabajo con mayor rapidez, facilidad y eficacia que cualquier medio mecánico.

Los explosivos son una herramienta muy útil dentro de la ingeniería civil, y su uso es muy amplio como resultado de la constante evolución en la tecnología, gracias a ello se tienen nuevos productos, accesorios y técnicas de voladura. Sin olvidar que para lograr el éxito de una voladura es necesario seleccionar correctamente el explosivo.

En una voladura es imprescindible conocer la materia prima que es la roca y el estado en que se encuentra, es decir el grado de agrietamiento, fallas, intemperismo, etc., ya que evidentemente pueden variar los resultados si desconocemos alguno de ellos, siendo esta a la primera que se le culpa cuando falla una voladura.

Otro factor a tomar en cuenta es la granulometría que se desea obtener de la roca ya que está se encuentra íntimamente ligada al uso al que se le va a destinar, no siempre lo más recomendable es la fragmentación más pequeña como suele creerse, todo depende del tipo de roca.

No hay que olvidar que la voladura de rocas no es un arte sino una técnica basada en principios lógicos y razonables.

En el diseño de la voladura para una galería planteado existe una hay una diferencias en el numero de barrenos y la carga entre el diseño sueco y el simplificado, ese son de los puntos a tomar en cuenta al momento de elegir que plantilla se utilizara, ya que los métodos empleados son empíricos, siendo el criterio del ingeniero el más importante, en el cual la experiencia será de vital importancia ya que cuando uno se enfrenta a la tarea de diseñar una obra subterránea, querrá contar con la experiencia de otros que ya pasaron por un aprendizaje similar, para tomar la decisión correcta; igualmente nos damos cuenta de la importancia de saber de los explosivos nos permiten tomar una mejor decisión al momento de realizar una excavación.

Debemos tener presente siempre que todos los explosivos son peligrosos si se hace mal uso de ellos, por eso deberán ser manejados por personas experimentadas y que conozcan las normas y medidas de seguridad establecidas.

## **BIBLIOGRAFIA**

- AGUIRRE, Mario "Uso y aplicación de explosivos en operaciones a tajo abierto". Artículo sin referencia.
- APUNTES "Movimiento de Tierras" Editado por la U.N.A.M.
- DU PONT "Manual para el Uso de Explosivos"  
Editado por DU PONT, Julio 1991
- DU PONT "Manual para el Uso de Explosivos"  
Edito C.E.C.S.A.
- DYNO NOBEL "Seguridad en voladuras a cielo abierto". Edito. DYNO NOBEL, Mayo 2001
- GALINDO, R. "Uso de explosivos en minería a cielo abierto". Artículo sinreferencia.
- HARDY, V. "Túneles y Excavaciones Subterráneas 1 y 2", Curso: Víctor Hardy 87, México DF .Junio de 1987
- HOEK, D. "Excavaciones Subterráneas en Roca", Edito McGRAW-HILL 1980.
- Encarta "Explosivos, Voladuras, Túneles". Artículo en Internet (<http://mx.encarta.msn.com>).
- "Conceptos básicos sobre voladuras" Artículo en Internet (<http://osso.univalle.edu.co/doc>)
- "Voladuras controladas". Artículo en Internet ([http://www.arquitectura-tecnica.com/vola\\_contro.htm](http://www.arquitectura-tecnica.com/vola_contro.htm))

## **ANEXOS**

### **A.1.-CONSIDERACIONES AMBIENTALES EN EL USO DE EXPLOSIVOS**

### **A.2.-CARACTERISTICAS DE LOS PRODUCTOS DYNO**

### **A.3.-TABLA DE PESO DE LOS MATERIALES**

### **A.4.-VALORES DEL COEFICIENTE DE VOLATIBILIDAD PARA ROCAS**

### **A.5.-FACTORES DE CARGA PARA ROCAS SEDIMENTARIAS**

### **A.6.-FACTORES DE CARGA PARA ROCAS IGNEAS**

### **A.7.-FACTORES DE CARGA PARA ROCAS METAMORFICAS**

### **A.8.-TABLA DE VELOCIDAD DE ONDA PARA LOS VALORES TIPICOS DE “P” Y “S”**

### **A.1.-CONSIDERACIONES AMBIENTALES EN EL USO DE EXPLOSIVOS**

- 1- Controlar la generación de vibraciones y ruido
- 2- Limpiar el sitio de voladura de cualquier desperdicio
- 3- Recuperar cualquier exceso de explosivo
- 4- Si se elimina el exceso de explosivo introduciéndolo a un tiro cargado, asegurarse de que éste no quede sobrecargado
- 5- Controle cualquier derrame de explosivo
- 6- Controle el curso del agua que entró en contacto con explosivo
- 7- Minimice el tiempo de exposición del explosivo al agua
- 8- Evite exponer el explosivo a la lluvia
- 9- Asegúrese que todo el explosivo detonó correctamente
- 10- Maneje los residuos de contenedores y empaque de acuerdo a la reglamentación local.

## A.2.-CARACTERISTICAS DE LOS PRODUCTOS DYNO

### EMULSIONES DYNO 42 ENCARTUCHADAS

Diámetro en pulgadas	Peso por cartucho en gramos	Densidad gr/cc	# Cartuchos por caja	Velocidad de detonación m/seg	Presión de detonación Kbars	Potencia relativa a peso RWS (a)	Potencia relativa a volumen RBS (a)	Energía cal/cc	Gases tóxicos	Resistencia al agua	Mínimo iniciador requerido	Vida útil (condiciones normales de almacenamiento)
1 x 5"	72	1.10	330	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 x 8"	117	1.10	226	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 x 10"	132	1.10	172	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 x 16"	215	1.10	113	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 x 39"	500	1.10	50	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 1/4 x 8"	175	1.10	147	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 1/4 x 16"	360	1.10	70	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 1/4 x 39"	880	1.10	29	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 1/2 x 8"	240	1.10	98	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 1/2 x 16"	505	1.10	49	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 1/2 x 39"	1,260	1.12	20	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
2 x 8"	470	1.16	49	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
2 x 16"	950	1.16	26	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
3 x 8"	1,000	1.16	24	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
3 x 16"	2,100	1.16	12	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
3 1/2 x 16"	3,050	1.16	8	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
4 x 16"	3,870	1.16	6	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
5 x 17"	6,250	1.16	4	5,200	80	86	125	916	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses

### EMULSION DYNO 42 B.D. PARA PRECORTE

1 x 39"	435	0.90	58	4,000	40	81	99	720	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 1/4 x 39"	852	0.90	29	4,000	40	81	99	720	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
1 1/2 x 39"	1,250	0.90	20	4,000	40	81	99	720	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses

### EMULSION DYNO 42 PRIMER PARA PLASTEADO

2 x 16"	1,000	1.14	25	5,500	103	90	121	720	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses
3 x 8"	1,060	1.14	23	5,500	103	90	121	720	Clase 1	Excelente	Fulminante # 6	10 Meses

Se considera que el peso de los cartuchos varía +/- 10%, siendo el peso final 25 kg por caja.

### ANFO DYNO

ANFO DYNO Saco 25 kg	0.83	No aplica	3,900	31	100	100	720	Clase 1	Nula	Emulsión DYNO	3 Meses
ANFO DYNO BD Saco 25 kg	0.70	No aplica	3,100	16	196	82	700	Clase 1	Nula	o Booster	3 Meses

Se consideran a los dos tipos de ANFO para uso subterráneo y/o superficial, según necesidades del usuario.

### EMULSIONES A GRANEL DYNO-G

Emulsión a granel, mezclada con nitrato de amonio a granel y diesel

DYNO-G %	N.A. %											
20	80	1.10		4,000	44	98	132	900	Clase 1	Pobre	Booster 1lb	3 Meses
30	70	1.17		4,100	49	96	138	940	Clase 1	Regular	Booster 1lb	3 Meses
50	50	1.26		4,200	56	94	144	980	Clase 1	Regular	Booster 1lb	3 Meses
70	30	1.32		4,500	67	91	146	1,000	Clase 1	Excelente	Booster 1lb	3 Meses
100	0	1.36	No aplica	4,900	69	86	149	1,060	Clase 1	Excelente	Booster 1lb	3 Meses

(a) ANFO = 100 con densidad de 0.82 gr/cc

**DIAMETRO DE BARRENACION**

Pulgadas	Milímetros	0.5	0.8	0.85	.09	1	1.1	1.14
1	25.40	0.26	0.41	0.43	0.46	0.51	0.56	0.58
1 1/8	28.58	0.32	0.51	0.54	0.58	0.64	0.70	0.7
1 1/4	31.75	0.40	0.63	0.67	0.71	0.79	0.87	0.90
1 3/8	34.93	0.48	0.76	0.81	0.86	0.95	1.06	1.08
1 1/2	38.10	0.58	0.92	0.98	1.04	1.15	1.27	1.31
1 5/8	41.28	0.67	1.07	1.14	1.21	1.34	1.47	1.53
1 3/4	44.45	0.78	1.24	1.32	1.40	1.55	1.71	1.77
1 7/8	47.63	0.90	1.43	1.52	1.61	1.79	1.97	2.04
2	50.80	1.01	1.62	1.72	1.82	2.02	2.22	2.30
2 1/2	63.50	1.59	2.54	2.69	2.85	3.17	3.49	3.61
2 3/4	69.85	1.91	3.06	3.25	3.44	3.82	4.20	4.36
3	76.20	2.28	3.64	3.87	4.10	4.55	5.01	5.19
3 1/2	88.90	3.11	4.97	5.28	5.59	6.21	6.83	7.08
4	101.60	4.06	6.49	6.89	7.30	8.11	8.92	9.25
4 1/2	114.30	5.13	8.20	8.71	9.23	10.25	11.28	11.69
5	127.00	6.33	10.13	10.76	11.39	12.66	13.93	14.43
5 1/2	139.70	7.67	12.26	13.03	13.80	15.33	16.86	17.48
6	152.40	9.13	14.60	15.51	16.43	18.25	20.08	20.81
6 1/4	158.75	9.90	15.83	16.82	17.81	19.79	21.77	22.56
6 1/2	165.10	10.71	17.14	18.21	19.28	21.42	23.56	24.42
7	177.80	12.41	19.86	21.10	22.34	24.82	27.30	28.29
7 1/2	190.50	14.25	22.80	24.23	25.65	28.50	31.35	32.46
8	203.20	16.22	26.94	27.57	29.19	32.43	35.67	36.97
8 1/2	215.90	18.31	29.29	31.12	32.95	36.61	40.27	41.74
9	228.60	20.52	32.83	34.88	36.94	41.04	45.14	46.79
9 1/4	234.95	21.68	34.68	36.85	39.02	43.35	47.69	49.42
9 1/2	241.30	22.87	36.58	38.87	41.16	45.73	50.30	52.13
9 7/8	250.83	24.71	39.53	42.00	44.47	49.41	54.35	56.33
10	254.00	25.36	40.58	43.11	45.65	50.72	55.79	57.82
10 1/2	266.70	27.94	44.70	47.49	50.28	55.87	61.46	63.69
10 5/8	269.88	28.61	45.77	48.63	51.49	57.21	62.93	65.22
11	279.40	30.66	49.05	52.11	55.18	61.31	67.44	69.89
12	304.80	36.99	59.18	62.87	66.57	73.97	81.37	84.33
12 1/4	311.15	38.02	60.82	64.63	68.63	76.03	83.63	86.67
12 1/2	317.50	39.59	63.34	67.29	71.25	79.17	87.09	90.25

Nota: Los Valores anteriores están redondeados a dos decimales después del punto.

**DENSIDADES**

1.18	1.2	1.25	1.3	1.35	1.36	1.4	1.45	1.5
0.60	0.61	0.64	0.66	0.69	0.69	0.71	0.74	0.77
0.76	0.77	0.80	0.83	0.86	0.87	0.90	0.93	0.96
0.93	0.95	0.99	1.03	1.07	1.07	1.11	1.15	1.19
1.12	1.14	1.19	1.24	1.28	1.29	1.33	1.38	1.43
1.36	1.38	1.44	1.50	1.55	1.56	1.61	1.67	1.73
1.58	1.61	1.68	1.74	1.81	1.82	1.88	1.94	2.01
1.83	1.86	1.94	2.02	2.09	2.11	2.17	2.25	2.33
2.11	2.15	2.24	2.33	2.42	2.43	2.51	2.60	2.69
2.38	2.42	2.53	2.63	2.73	2.75	2.83	2.93	3.03
3.74	3.80	3.96	4.12	4.28	4.31	4.44	4.60	4.76
4.51	4.58	4.78	4.97	5.16	5.20	5.35	5.54	5.73
5.37	5.46	5.69	5.92	6.14	6.19	6.37	6.60	6.83
7.33	7.45	7.76	8.07	8.38	8.45	8.69	9.00	9.32
9.57	9.73	10.14	10.54	10.95	11.03	11.85	11.76	12.17
12.10	12.30	12.61	13.33	13.84	13.94	14.35	14.86	15.38
14.94	15.19	15.83	16.46	17.09	17.22	17.72	18.36	18.99
18.09	18.40	19.16	19.93	20.70	20.85	21.46	22.23	23.00
21.54	21.90	22.81	23.73	24.64	24.82	25.55	26.46	27.38
23.35	23.75	24.74	25.73	26.72	26.91	27.71	28.70	29.69
25.28	25.70	26.78	27.85	28.92	29.13	29.99	31.06	32.13
29.29	29.78	31.03	32.27	33.51	33.76	34.75	35.99	37.23
33.63	34.20	35.63	37.05	38.48	38.76	39.90	41.33	42.75
38.27	38.92	40.54	42.16	43.78	44.10	45.40	47.02	48.65
43.20	43.93	45.76	47.59	49.42	49.79	51.25	53.08	54.92
48.43	49.25	51.30	53.35	55.40	55.81	57.45	59.51	61.56
51.15	52.02	54.19	56.36	58.52	58.96	60.69	62.86	65.03
53.96	54.88	57.16	59.45	61.74	62.19	64.02	66.31	68.60
58.30	59.29	61.76	64.23	66.70	67.20	69.17	71.64	74.12
59.65	60.66	63.40	65.94	68.47	68.98	71.01	73.54	76.08
65.93	67.04	69.84	72.63	75.42	75.98	78.22	81.01	83.81
67.51	68.65	71.51	74.37	77.23	77.81	80.09	82.95	85.82
72.35	73.57	76.64	79.70	82.77	83.38	85.83	88.90	91.97
87.28	88.76	92.46	96.16	99.86	100.60	103.56	107.26	110.96
89.72	91.24	95.04	98.84	102.64	103.40	106.44	110.24	114.05
93.42	95.00	98.96	102.92	106.88	107.67	110.84	114.80	118.76

**TABLA 1**

### A.3.-TABLA DE PESO DE LOS MATERIALES

MATERIAL	PESO ESPECIFICO gr/cc	PESO DE MATERIAL kg/m <sup>3</sup>	PORCENTAJE DE ABUNDAMIENTO	FACTOR DE ABUNDAMIENTO (b)	PESO DE MATERIAL SUELTO kg/m <sup>3</sup>
Cenizas: carbón	0.64-0.72	640-720	8	.93	593-670
Basalto	2.80-3.00	2882-3000	-	-	-
Bauxita	1.60-2.50	1601-2564	33	.75	1198-1921
Arcilla, densa y húmeda	1.7	1779	33	.75	1334
Antracita (carbón)	1.3	1304	35	.74	966
Carbón bituminoso	1.1	1127	35	.74	830
Mineral de cobre	2.2	2253	35	.74	1660
Diabasa	2.60-3.00	2490-3009	-	-	-
Diorita	2.80-3.00	2882-3009	-	-	-
Dolomita	2.80-2.90	2802-2882	-	-	-
Tierra seca	1.6	1660	25	.80	1328
Tierra húmeda	2.0	1998	25	.80	1601
Tierra con arena y grava	1.8	1838	18	.65	1565
Tierra con roca mixta	1.40-1.70	1482-1779	30	.77	1138-1370
Gneiss	2.60-2.90	2562-2882	-	-	-
Granito	2.7	2668	50-80	.67-.56	1779-1494
Grava seca	1.9	1927	12	.89	1720
Grava húmeda	2.1	2135	14	.68	1898
Yeso	2.30-3.30	2322-3282	-	-	-
Hematita (min. de hierro)	4.50-5.30	4483-5218	-	.45	2016-2476
Limonita (min. de hierro)	3.60-4.00	3602-4000	-	-	-
Magnetita (min. de hierro)	4.90-5.20	4898-5203	-	-	-
Galerita (min. de plomo)	7.5	7442	-	-	-
Caliza	2.6	2490	67-75	.60-.57	1423-1494
Mármol	2.7	2728	67-75	.60-.57	1554-1638
Marga	1.6	1601	20	.83	1328
Mica esquisito	2.50-2.90	2482-2882	-	-	-
Roca Fosfórica	3.2	3202	-	-	-
Cuarcita	2.00-2.80	1998-3009	-	-	-
Roca dura, barrenado	2.4	2372	50	.67	1589
Conglomerado	1.90-2.10	1921-2324	35	.74	1423-1720
Halita	2.10-2.60	2081-2562	-	-	-
Arena seca	1.9	1927	12	.89	1720
Arena húmeda	2.2	2135	-	-	-
Arenisca	2.5	2455	40-60	.72-.63	1767-1548
Pizarra	2.40-2.80	2401-2802	33	.75	-
Pizarra	2.70-2.80	2722-2882	30	.77	2593-2218
Talco	2.60-2.80	2562-3009	-	-	-
Roca ignea	3.0	3009	50	.67	2016

(a) Estos valores son aproximados y son presentados sólo como información general. Los usuarios deben ajustarse a estos pesos para usar el equipo adecuado en aplicaciones de campo.

(b) Cuando cargamos con feinería aumentamos el factor aproximadamente 10% más que el presentado, debido a carga más compacta.

#### A.4.-VALORES DEL COEFICIENTE DE VOLATIBILIDAD PARA ROCAS

Tipo de roca	Coefficiente de volabilidad	Observación
<b>Basalto</b>	0.62	Roca Ignea Extrusiva
<b>Feldespató</b>	0.57	Mineral común
<b>Gneiss</b>	0.54	Roca Metamórfica
<b>Esquistos</b>	0.53	Roca Metamórfica
<b>Magnetita</b>	0.48	Mineral común
<b>Granito</b>	0.46	Roca Ignea Intrusiva
<b>Dolomita</b>	0.44	Roca Sedimentaria
<b>Caliza</b>	0.40	Roca Sedimentaria
<b>Pizarra</b>	<b>0.38</b>	<b>Roca Metamórfica</b>
<b>Lutita</b>	<b>0.38</b>	<b>Roca Sedimentaria</b>
<b>Calcita</b>	<b>0.36</b>	<b>Ca CO<sub>3</sub></b>
<b>Antracita</b>	<b>0.36</b>	<b>Carbón Mineral</b>
<b>Mármol</b>	<b>0.36</b>	<b>Roca Metamórfica</b>
<b>Carbón bituminoso</b>	<b>0.30</b>	<b>Depósito Mineral</b>
<b>Mica</b>	<b>0.28</b>	<b>Mineral común</b>
<b>Yeso</b>	<b>0.24</b>	<b>Roca Sedimentaria</b>

#### A.5.-FACTORES DE CARGA PARA ROCAS SEDIMENTARIAS

Roca	Factor de carga kg/m <sup>3</sup>
Conglomerado	0.350 a 0.660
Brecha	0.350 a 0.600
Arenisca	0.475 a 0.770
Caliza	0.230 a 0.475
Dolomita	0.290 a 0.475

## A.6.-FACTORES DE CARGA PARA ROCAS IGNEAS

Roca	Factor de carga kg/m <sup>3</sup>
Riolita y dacita	0.530 a 0.715
Granodiorita	0.590 a 0.800
Andesita	0.530 a 0.715
Diorita	0.530 a 0.770
Basalto	0.590 a 0.770
Gabro, dolerita o diabasa	0.530 a 0.715

## A.7.-FACTORES DE CARGA PARA ROCAS METAMORFICAS

Roca No Foliada	Factor de carga kg/m <sup>3</sup>
Mármol	0.475 a 0.770
Hornfels	0.475 a 0.715
Taconita	0.475 a 0.770
Gneiss	0.475 a 0.715
Roca Foliada	Factor de carga
Pizarra	0.290 a 0.475
Esquisto de clorita	0.350 a 0.600
Micaesquisto	0.350 a 0.600

A.8.-TABLA DE VELOCIDAD DE ONDA PARA LOS VALORES TIPICOS DE  
 “P” Y “S”

Material	Velocidad m/seg (P)	Velocidad m/seg (S)	Densidad
Granito	3900-6100	2100-3350	2.67
Gabro	6500	3450	3.20
Basalto	5600	3050	3.00
Dunita	8000	4100	3.28
Arenisca	2400-4300	900-3050	3.10
Caliza	3000-6100	2750-3200	2.90
Lulita	1800-4000	1050-2300	2.90
Sal	4400-6400	3200	1.40
Yeso	2100-3600	1100	1.20
Pizarra	3600-4450	2850	2.50
Mármol	5800	3500	3.20
Cuarcita	6000	3600	3.40
Esquisto	4500	2900	2.80
Gneiss	4700-5600	3600	3.20
Aluvión	500-2000	700	2.40
Arcilla	1100-2500	580	1.40
Suelo residual o vegeta	150-750	90-550	1.1-2.0
Material acarreo glacial	400	800	1.5-2.0
Arena	1400	450	1.93
Agua	1450	0	1.00
Hielo	3350	2500	0.90
Aire	340	0	
Hierro	5800	3200	3.6-3.0
Concreto	3570	2150	2.7-3.0
Goma, caucho, hule	1040	27	1.15