

TEMA 6

VOLADURAS A CIELO ABIERTO



<http://www.miningweekly.com/article/improved-blasting-technology--coal-applications-2008-09-05>

Contenido

1. Propiedades y tipos de explosivos
2. Parámetros de voladura
3. Diseño de voladuras
4. Control de daños y voladuras controladas

Referencias recomendadas:

- ✓SME (1992) "*Mining Engineering Handbook*" Tomos I y II. EEUU.
- ✓SME (1990) "*Surface Mining*". EEUU.
- ✓Díaz del Río (2007) "*Manual de Máquinas de Construcción*". 2da. Edición. Mc Graw Hill. España.
- ✓ITGE (1994) "Manual de perforación y voladura de rocas". Serie: Tecnología y Seguridad Minera. España.
- ✓EDUMINE (s/f) "*Blast Design and Assessment for Surface Mines and Quarries*". Curso en línea disponible en: www.edumine.com
- ✓Portal de la Sociedad de Ingenieros Explosivistas: www.isee.org
- ✓UEE (2002) "Manual de empleo de explosivos". Unión Española de Explosivos, S.A.
- ✓Konya y Albarrán (1998) "Diseño de voladuras". Ediciones Cuicatli. México

ENTENDIENDO

PERFORACIÓN Y VOLADURA A CIELO ABIERTO

3



http://www.mch.cl/revistas/index_neo.php?id=1072

Proceso de rotura por explosión

(Díaz del Río, 2007)

- La rotura se origina por la gran cantidad de gases generados en una reacción química.
- El gas caliente generado y las fuertes presiones alcanzadas son el origen de las roturas que se producen después de la explosión.
- Las presiones de los gases llegan a alcanzar los 10^5 kg/cm^2 .



Proceso de rotura por explosión

(Díaz del Río, 2007)

- La razón fundamental de la energía de rotura de un explosivo no reside en el trabajo absoluto de la reacción desencadenada, sino en el brevísimo tiempo en que éste se produce, que pueden llegar hasta 7000 m/s.
- Además del explosivo, tienen gran importancia las condiciones geométricas y físicas en que se establece la voladura.



<http://www.ingenieriaebro.com/vol-ext.html>

EXPLOSIVOS

PROPIEDADES
TIPOS



Propiedades de los explosivos

(Díaz del Río, 2007)

- Estabilidad química. Permanece inalterado cuando se mantiene bajo ciertas condiciones de almacenamiento.
- Aptitud a la propagación. Aptitud de transmitir la detonación de un cartucho a otro yuxtapuesto o cuando entre ambos hay un medio ajeno.



<http://www.explotec.net/explosivos.html>

Propiedades de los explosivos

(Díaz del Río, 2007)

- Velocidad de detonación. Define la velocidad de la onda de detonación que pasa a través del explosivo (entre 2500 y 6000 m/s).
- Potencia explosiva. Capacidad de producir roturas mecánicas.



Propiedades de los explosivos

(Díaz del Río, 2007)

- Resistencia a la humedad. Esta capacidad es indicativo de la idoneidad de empleo del explosivo.
- Densidad de encartuchado. Es normal que la carga total no se haga con el mismo cartucho, la concentración por unidad de longitud es diferente.



http://www.explotec.net/explosivos_iniciacion.html

Propiedades de los explosivos

(Díaz del Río, 2007)

- Humos. Se busca eliminarlo con la ventilación, pero en trabajos confinados se buscan aquellos que produzcan la menor cantidad de humos y gases.
- Resistencia a las bajas temperaturas. La T de congelación de la nitroglicerina es a 8°C. Para evitar esto se le añaden aditivos como el nitroglicol.



http://www.explotec.net/explosivos_iniciacion.html

Condiciones para la elección de explosivos (Díaz del Río, 2007)

- ◎ **Tipo de roca a volar.** Constatar dureza y compactibilidad, así como estratificación y fisuras en la roca.
- ◎ **Fragmentación.** Dependerá del tipo de roca y la fragmentación deseada, la clase de explosivo a utilizar.
- ◎ **Humedad en el alojamiento de los barrenos.** Para evitar la posibilidad de fallos en las voladuras.
- ◎ **Toxicidad.** Sobre todo cuando se produce la voladura en zonas poco ventiladas.

También complementar con el capítulo 10 y 11, ITGE (1994)

Tipos de explosivos ITGE (1994)

- ⦿ Los explosivos químicos industriales se clasifican en dos grandes grupos según la velocidad de su onda de choque:
 - a) Explosivos rápidos y detonantes. Con velocidades entre 2000 y 7000 m/s (clasificados en primarios y secundarios); y
 - b) Explosivos lentos y deflagrantes. Con menos de 2000 m/s. (Pólvoras, compuestos pirotécnicos y compuestos propulsores en artillería y cohetería).

Tipos de explosivos

ITGE (1994)

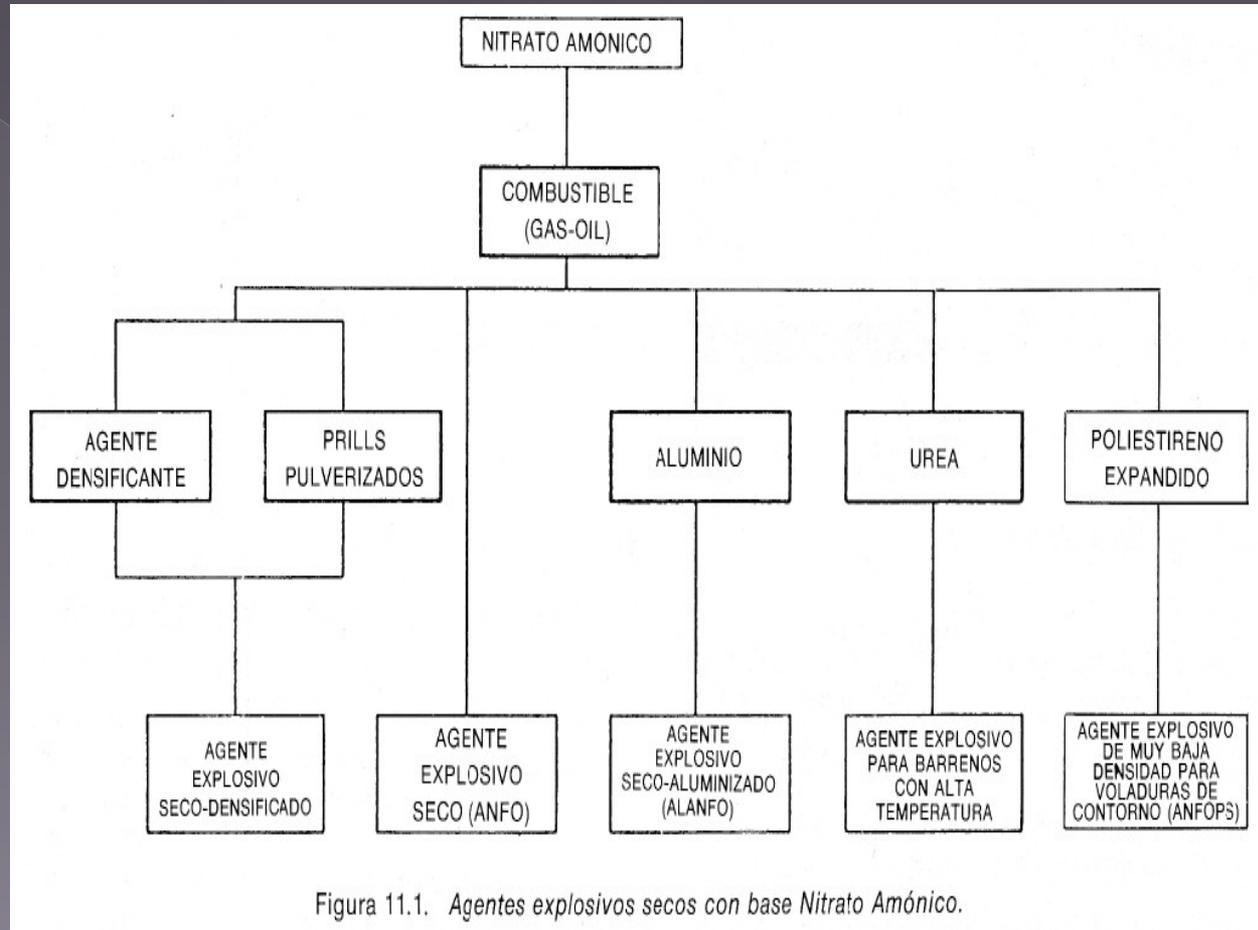
Agentes explosivos

Explosivos convencionales



Agentes explosivos secos ITGE (1994)

- Este grupo engloba, todos aquellos que no son sensibles al detonador y en cuya composición no entra el agua.
- El factor común de todos ellos es el Nitrato de Amonio o Nitrato Amónico (NA)



Agentes explosivos secos

ITGE (1994)

ANFO

El producto que mas se utiliza es el *gas-oil*, cuya ventaja es no tener un punto de volatilidad tan bajo y con menor riesgo de explosiones de vapor

Es un explosivo que puede considerarse de bajo precio

Nitrato Amonio

NH_4NO_3 es una sal inorgánica de color blanco

El tamaño de partículas está en el rango de 1 a 3 mm

Las características explosivas del ANFO varían con la densidad. Conforme esta aumenta la velocidad de detonación de eleva

Cualquier sustancia combustible puede usarse con NA para producir un agente explosivo

La higroscopicidad es muy elevada, pudiendo convertirse en líquido en presencia de aire con humedad superior al 60%

La densidad poroso o a granel es de aprox. $0,8 \text{ g/cm}^3$

El tamaño de los granos de NA influye en su explosividad. Pasante de la malla 100 reduce su densidad a $0,6 \text{ g/cm}^3$ viéndose comprometida sus características de detonación

La sensibilidad del ANFO disminuye conforme aumenta el diámetro de los barrenos

El NA es estable a temperatura ambiente, pero si se calienta a más de 200°C en condiciones cerradas puede llegar a detonar

La densidad de los cristales no porosos es de cerca de $1,72 \text{ g/cm}^3$

Agentes explosivos secos

ITGE (1994)

Hidrogeles

Los hidrogeles son agentes explosivos constituidos por soluciones acuosas saturadas de NA

Los sensibilizadores son a base de aluminio, el cual aumenta proporcionalmente

Dada que su composición no es intrínsecamente explosiva es seguro tanto en su fabricación como en su manipulación

Poseen una aptitud a la detonación muy buena que hacen que algunos hidrogeles se inicien solo con detonadores convencionales

La resistencia al agua es excelente y las calidades de humo mejores que las obtenidas con explosivos convencionales

Las energías desarrolladas oscilan en el rango de las 700 a las 1500 cal/g

Emulsiones

Es el grupo de explosivos relativamente más recientes en el mercado

Dos características lo hacen mejor que los anteriores: potencia y resistencia al agua

Las emulsiones explosivas son del tipo "agua en aceite", donde el líquido son sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua y el aceite es un combustible líquido del tipo hidrocarbonado

La sensibilidad de la emulsión aumenta la densidad

Elevadas velocidades de detonación entre 4000 a 5000 m/s

Excelente resistencia al agua

Otros tipos de explosivos

Díaz del Río (2007) y ITGE (1994)

Cebos explosivos

- Detonadores normales: son dispositivos usados como cebo para producir la detonación.
- Detonadores eléctricos: se diferencian de los anteriores porque su explosión se produce al pasar una corriente eléctrica de determinada intensidad

Mechas

- Llamadas también mechas de seguridad
- Cerdón detonante

Cerdón detonante

- Cordones que disponen de un núcleo de pentrita en cantidad variables

Iniciadores

- Primer: explosivo sensible al detonador y al cordón detonante.
- *Booster*: carga de explosivo potente que completa el trabajo explosivo comenzado por el primer (detonador)

CORDON DETONANTE (g/m)	APLICACIONES
1,5-3	<ul style="list-style-type: none"> • Iniciación de multiplicadores y explosivos muy sensibles.
6	<ul style="list-style-type: none"> • Líneas maestras conectando barrenos.
12-20	<ul style="list-style-type: none"> • Iniciación de explosivos convencionales y de baja sensibilidad.
40	<ul style="list-style-type: none"> • Prospecciones sísmicas.
100	<ul style="list-style-type: none"> • Voladuras de contorno y demoliciones.

Complemente con el capítulo 13 y 14 ITGE (1994)

VOLADURAS A CIELO ABIERTO

18

PARÁMETROS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO



<http://rockblastdesign.com/es/>

Propiedades del macizo rocoso

ITGE (1994)



http://fotos.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/mineria/advent-international-toma-el-49-9-del-capital-del-fabricante-de-voladuras-maxam_3oB4z0eI0g1RJMujJ3fAb5/

Propiedades de las rocas

Densidad

- Las rocas de baja densidad se deforman y rompen con facilidad
- Las rocas de altas densidades requieren: aumento en el \varnothing de perforación, reducir el esquema y modificar la secuencia de encendido, mejorar el retacado y utilizar explosivos con alta energía

Resistencias dinámicas de las rocas

- Resistencias estáticas a compresión y a tracción
- El consumo de explosivo requerido en las voladuras de banco puede correlacionarse con la resistencia a la compresión

Porosidad

- Existen dos tipos: intergranular de formación y la de disolución-formación
- Provoca dos efectos: atenuación de la energía de choque y reducción de la resistencia dinámica a la compresión (aumento de la trituración y % de finos)

Ficción interna

- Es una capacidad de amortización específica, es la capacidad de atenuar las ondas de tensión generadas por las voladuras

Conductividad

- Cuando el macizo rocoso tienen cierta conductividad pueden hacer fugas de corriente que pueden causar fallas en las voladuras

Propiedades de los macizos rocosos

Litología

- Provoca variaciones de las propiedades resistentes de las rocas, ejemplo: estéril-mena

Fracturas preexistentes

- Todas las rocas en la naturaleza presentan algún tipo de discontinuidad, micro y macrofisuras, que influyen de manera decisiva en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, y por supuesto en los resultados de las voladuras

Tensiones de campo

- Las tensiones de campo residuales, tectónicas y/o gravitacionales (no hidrostáticas), afectan el esquema de fracturas generado alrededor de los barrenos

Presencia de agua

- Las rocas porosas y los macizos intensamente fracturados saturados de agua presentan los siguientes problemas: requieren explosivos resistentes al agua, pueden ocurrir hundimientos internos, entre otros

Temperatura del macizo rocoso

- Los yacimientos que contienen pirita suelen presentar problemas de altas temperaturas de la roca por efecto de oxidación lenta del mineral, lo cual puede causar una reacción exotérmica del ANFO con el mineral. La sensibilidad del hidrogel depende también de las temperaturas de la roca

VOLADURAS A CIELO ABIERTO

22

VARIABLES DE DISEÑO EN VOLADURAS A CIELO ABIERTO



<http://www.cat.com/cda/layout?m=255741&x=9>

VARIABLES DE DISEÑO ITGE (1994)

Diámetro de perforación

La elección depende de la producción horaria o el ritmo de excavación

Hay que considerar que los costos de perforación aumentan con el diámetro

Inclinación

Los barrenos inclinados pueden hacer que el material se proyecte hacia arriba y hacia adelante

Se recomienda que las inclinaciones no superen los 30°

Esquemas de perforación

Los esquemas pueden ser cuadrados o rectangulares y tresbolillo

El patrón en tresbolillo es el mas usado debido a que corrige insuficiencias de empujes causados por dispersiones de la energía explosiva

VARIABLES DE DISEÑO

ITGE (1994)

Piedra y espaciamiento

La relación Espaciamiento/Piedra "S/B" es el parámetro más importante de las voladuras

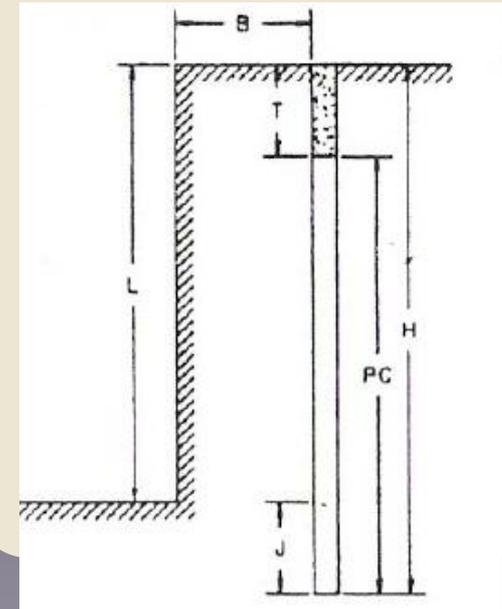
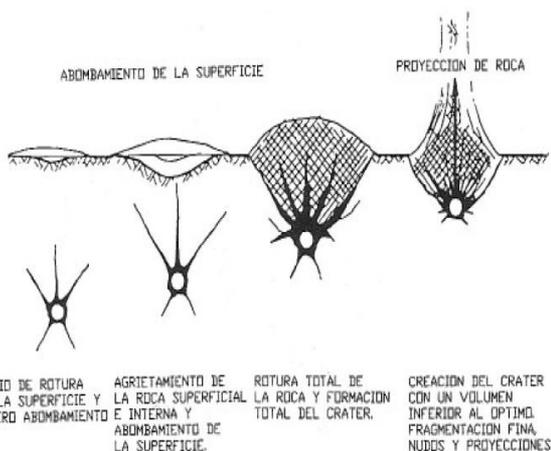
Sobre-perforación

En materiales blandos puede causar pulverización del material (generación de finos)

Recatado

Se recomienda: dimensiones del retacado entre 18 y 20 D

En materiales consolidados se consigue una rotura buena a nivel de piso y permite el buen desplazamiento de la roca hacia adelante



VARIABLES DE DISEÑO ITGE (1994)

Forma de la voladura

La relación longitud/ ancho debe ser lo máximo posible, ya que las fuerzas de cizalla laterales pueden restringir el movimiento hacia delante de la roca

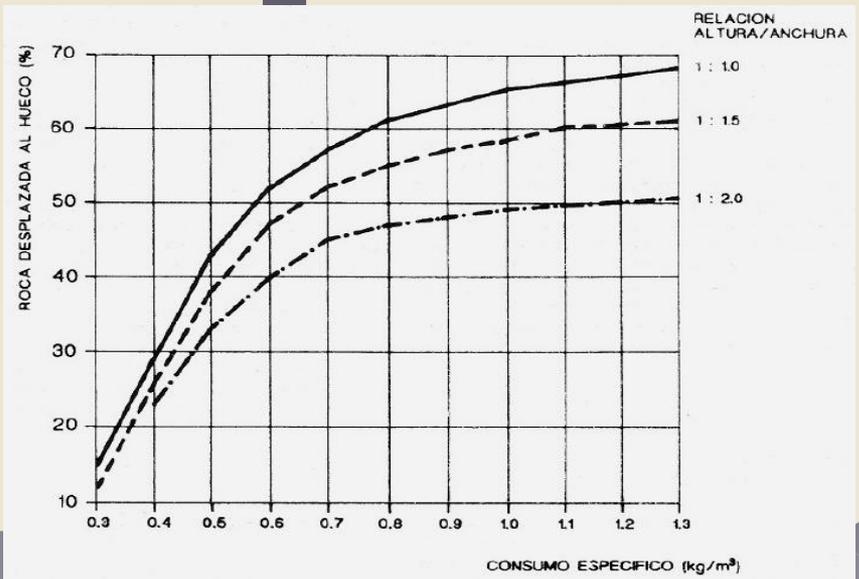
Altura de banco

Los factores a tener en cuenta son: geológicos, condiciones operativas y seguridad

Relación altura de banco/ancho de barreno

Determinación de costos por metro cúbico movido

ALTURA DE BANCO	DESPLAZAMIENTO RELATIVO
< 1,5 B	Malo
1,5 B - 2,5 B	Normal
> 2,5 B	Bueno



VARIABLES DE DISEÑO

ITGE (1994)

Tiempos de retardo y secuencias de encendido

Hay que garantizar que la dirección principal del movimiento de la roca sea normal al frente libre

Las cargas de una fila de barrenos deben detonar de forma tan simultánea como sea posible

Tipo de explosivo

Utilizar explosivos correctos, tanto por energía explosiva como por costos

Se pueden utilizar mezclas de ANFO con otros explosivos, para aumentar la potencia del primero, pero considerar el costo asociado

Cebado

Se requiere para estimular la explosividad del agente explosivo

Para que el rendimiento sea mejor, el cebo debería estar realmente en el centro de la columna de explosivo

Consumo específico o factor de energía

El consumo específico se expresa en kg/t (explosivo/roca)

La energía por unidad de peso varía con la composición química del explosivo

Para el logro de los objetivos propuestos se requiere la realización de las siguientes

27

Actividades



Asignación 6

1. Diseñe para una mina (material: caliza, altura de banco: 8 metros) un patrón de voladura que considere: terraza de trabajo a partir de la cresta a pared final: 30 metros.
2. Considere: todos los parámetros vistos en clase y calcule la cantidad de material volado.
3. Preparar para discutir en clase.