

## GENERALIDADES DE LOS EXPLOSIVOS

### - ENERGIA DE LOS EXPLOSIVOS -

#### DEFINICION DE EXPLOSIVO:

Un Explosivo es una sustancia o compuesto que al ser detonado es susceptible de desarrollar una descomposición química extremadamente rápida, generando como productos finales de la reacción gases a temperatura y presión muy elevadas, los cuales producen cuatro efectos básicos:

- 1).- Fragmentación de la roca.
- 2).- Desplazamiento de la roca.
- 3).- Vibración del suelo.
- 4).- Golpe de aire.

#### PROCESO DE DETONACION:

El Proceso de Detonación de un Explosivo se describe como la propagación de una onda de choque, que viaja a través de la carga explosiva y la velocidad a que se desplaza se le llama Velocidad de Detonación y se expresa en Ft/Seg. ó en Mt/Seg. La Fig. 1 Describe las etapas de éste Proceso.

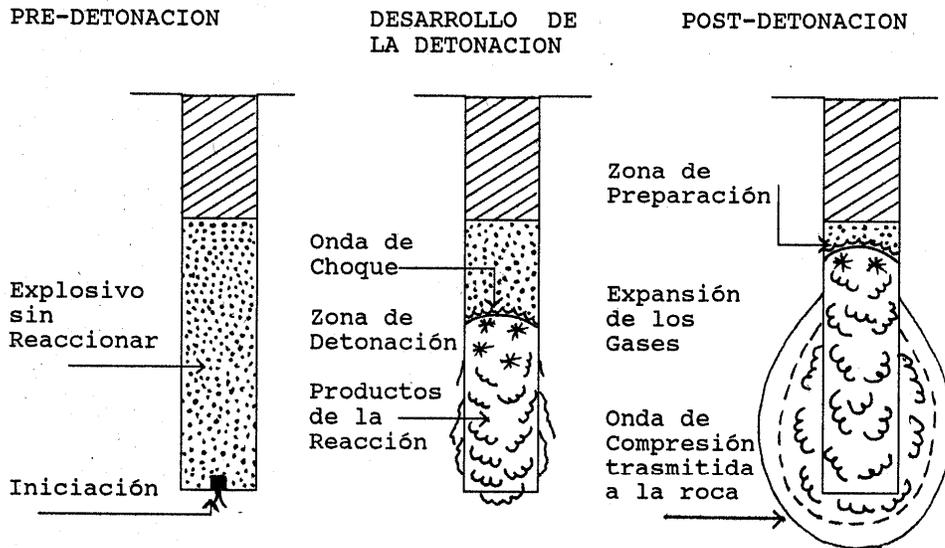


Fig. 1, ILUSTRACION DEL PROCESO DE DETONACION.

## ENERGIA PRODUCIDA POR LOS EXPLOSIVOS:

Durante una explosión muchos tipos de energía son liberados, Fig. 2, ésta energía se puede dividir en la energía útil capaz de dar trabajo y es aquella energía utilizada en el cumplimiento del objetivo de la voladura, llamada Energía de Trabajo y en la Energía de Desperdicio que no toma parte en el rompimiento de la roca y que se manifiesta en forma de Calor, Luz, Sonido y Energía Sísmica.

La energía de trabajo se debe en un 15% a la energía de choque del explosivo y en un 85% a la energía producida por los gases generados en la reacción del explosivo. En barrenos confinados son utilizados explosivos que producen una alta generación de gases y la presión se incrementa de acuerdo al volumen de gas liberado y a la temperatura de la reacción. En cambio los explosivos con alta energía de choque son utilizados principalmente en detonaciones no confinadas tales como plasteo, demoliciones, etc...

En cuanto a las formas en que la energía se desperdicia destacan dos principalmente:

### 1).- ENERGIA SISMICA.

Es producida por el movimiento de las ondas de choque a través del suelo y existen dos clases de energía sísmica: Ondas de Cuerpo y Ondas de Superficie. Las ondas de cuerpo producen compresión y dilatación en la dirección de la onda de choque - (similar a la acción de un resorte). Las ondas que producen compresión, denominadas en Sismología Ondas-P, son paralelas a la onda de choque y se transmiten en Sólidos, Líquidos y Gases. Las Ondas de Corte denominadas Ondas-S, son perpendiculares a la misma y no se transmiten en líquidos y Gases; las ondas de superficie se transmiten a lo largo de la superficie sin penetrar en la roca y a una velocidad más lenta que las ondas de Cuerpo.

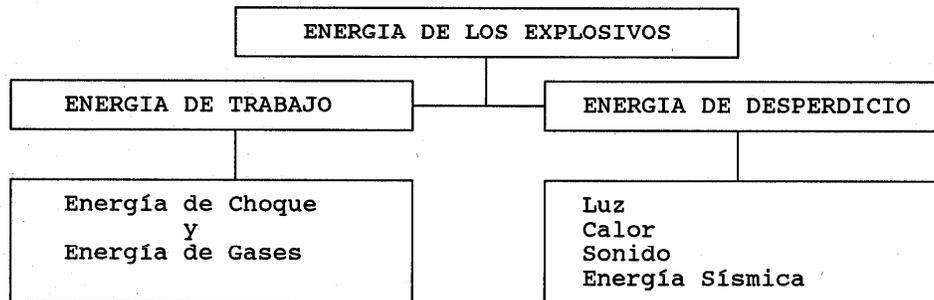


Fig. 2, ENERGIA PRODUCIDA POR LOS EXPLOSIVOS.

Las ondas sísmicas se crean debido a la deformación elástica de las rocas, que al volver a su estado original después de la deformación sufrida en la voladura se genera una onda vibracional que viaja a través del suelo, éstas ondas pueden ocasionar problemas en los alrededores por lo que deberán ser controladas.

## 2).- GOLPE DE AIRE.

El sonido es la transmisión de energía a través de la atmósfera, no se trasmite en el vacío ya que necesita un medio de transmisión. Las ondas del sonido de una explosión son ondas de compresión que tienen una velocidad en función de la temperatura del medio.

El ruido es la porción del golpe de aire que se encuentra en la parte audible del espectro, variando de 20 a 20,000 Hertz, en las voladuras realizadas en las áreas no urbanas el daño proviene principalmente de la concusión de aire y no del ruido, el nivel de concusión producido por una voladura a cielo abierto depende de la distancia al punto considerado y del peso de la carga explosiva máxima detonada por retardo. Debido a los valores generalmente altos del Bordo usados en muchas operaciones a cielo abierto, el golpe de aire generalmente contiene una gran cantidad de energía a frecuencias inferiores a los 20 Hz. Es entonces la concusión de aire la que puede producir daños a estructuras muy cercanas, principalmente a vidrios de gran tamaño y otros elementos poco estables. Así entonces para reducir el golpe de aire evite el uso de explosivos no confinados ( no plasteé ) y considere tanto las anomalías geológicas como las condiciones climáticas para el disparo de la voladura.

## IDENTIFICACION DE PROBLEMAS DE MEZCLAS.

Los gases liberados en las voladuras son indicadores de la eficiencia de la reacción y se asocian a la energía liberada. Cuando se produce un color gris claro de gases, está cerca el balance de oxígeno y se libera el máximo de energía, cuando son amarillos y/o rojizos indican una reacción deficiente. Estos indicadores visuales de mezclas deficientes pueden ser una clasificación sistemática para identificación de mezclas en el campo. La Fig. 3, es una guía fácil la cual muestra los elementos de los productos de la reacción; todos los explosivos comerciales podrían estar cerca del balance de Oxígeno, por consiguiente en una detonación ideal se producen humos de color gris claro. Desafortunadamente en el campo es muy común ver otros colores de humo después de que la detonación ha ocurrido. Donde no se vean humos en una voladura es signo de que la reacción del explosivo fue deficiente y la energía útil es muy poca; cuando esto ocurre los barrenos no liberan suficiente energía para quebrar la roca correctamente en el frente del barreno.

COMPONENTES DE LOS EXPOLOSIVOS.

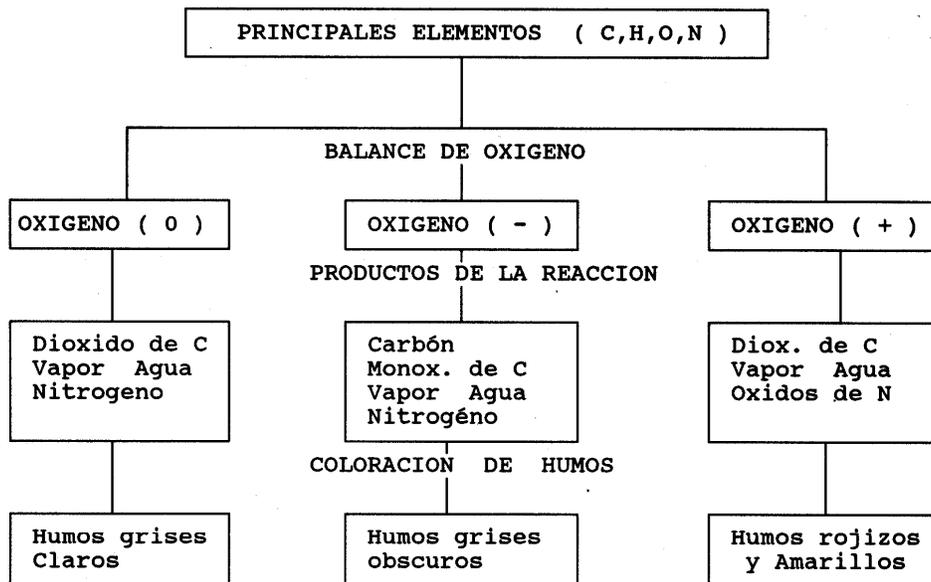


Fig. 3, IDENTIFICACION DE PROBLEMAS DE MEZCLAS.

La observación visual del color de los humos indican si existen problemas. Sin embargo, la magnitud de estos problemas no pueden ser juzgados solo por la intensidad del color de los humos, que pueden relacionarse a energía desperdiciada, aún por un explosivo muy utilizado, resultando mala fragmentación, así como llevar la vibración y ruido a niveles perjudiciales y con la correspondiente emanación de gases tóxicos en la voladura.

Tanto en operaciones subterráneas como a cielo abierto, es importante un estrecho control sobre la cantidad de aceite combustible en el anfo; para minimizar estos problemas que perjudican el medio ambiente en las áreas cercanas a la voladura, estos factores deben ser considerados junto con el tiempo de espera conveniente después de efectuada la voladura para contar con condiciones seguras de trabajo, la salud y seguridad de mineros y contratistas ya sea en operaciones subterráneas o a cielo abierto, así como el control sobre el medio ambiente, en éste renglón depende de la cuidadosa fabricación y uso del anfo y de los explosivos utilizados.

- MECANISMOS DE ROTURA -

TEORIA DE FRAGMENTACION DE LA ROCA.

Existen diferentes teorías a cerca del mecanismo de rompimiento de roca en la voladura. Muchas teorías proponen que la mayor parte del trabajo lo efectúa la onda de choque y la presurización del gas producto de la reacción, éstas teorías concluyen que las ondas de esfuerzos o energía de choque son responsables de la mayor parte del rompimiento y que el efecto de la presión de los gases apenas es considerable en la rotura del material. Otras teorías consideran a la presión de los gases la que domina que el proceso de rotura, con las ondas de esfuerzos causando apenas el rompimiento.

Parte de la confusión circundante en este proceso es porque éstos dos tipos de energía son producidos en la detonación de la carga explosiva. Los diferentes tipos de energía causan distintos efectos dependiendo de como sean aplicados los explosivos; confinados dentro del barreno o desconfiados en la superficie de la roca.

Cuando las cargas explosivas son detonadas bajo condiciones de campo en barrenos, el Dr. Konya propone los cuatro siguientes estados para el proceso del rompimiento de la roca:

ESTADOS DEL ROMPIMIENTO DE LA ROCA:

1).- Después de la detonación, la onda de choque (esfuerzo) generada rompe las paredes del barreno creando micro-fracturas y algunas discontinuidades entre el barreno y la cara de alivio, Fig. 4 (a), El efecto de la onda de choque es mínimo cuando se usan cargas confinadas en los barrenos.

2).- Después que la onda de choque ha pasado, la expansión de los gases causa presurización en el barreno produciendo fracturamiento radial que se incrementa hacia la cara de alivio, Fig. 4 (b), la dirección de éstos fracturamientos son controlados por la resistencia en frente del barreno. Un bordo normal, causará que se dirijan hacia el frente y un bordo excesivo, causa que se formen rompimientos simétricos alrededor del barreno. La mayoría de las fracturas son paralelas al eje de los barrenos durante éste estado del rompimiento.

3).- Después de que se forman las fracturas radiales la presión del gas penetra en la red de fracturas en aproximadamente un 60% de su extensión, Fig.4 (c), antes de que ningún movimiento ocurra en la cara.

4).- El movimiento de la cara se produce y una falla por flexión ocurre como el resultado del doblamiento de la masa de roca en dos planos; en el plano del diámetro de la carga explosiva y en el plano de la longitud de la misma. Estos movimientos son similares y se representan en la Fig. 4 (d).

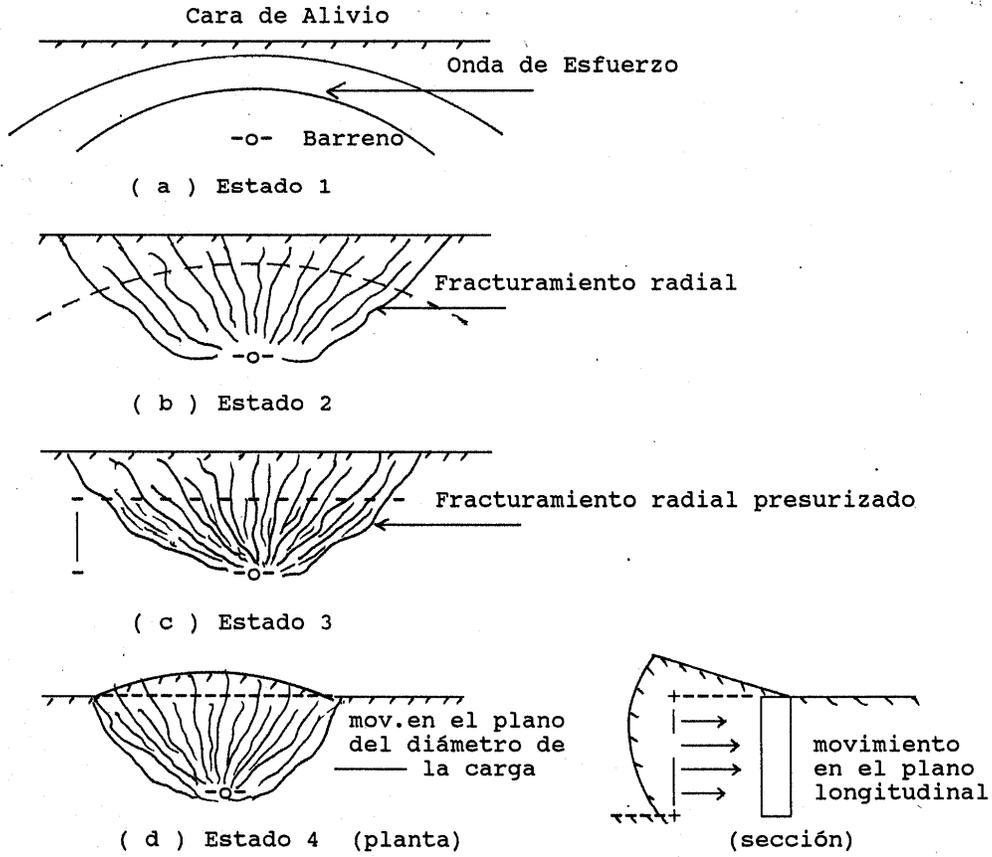


Fig. 4, ESTADOS DEL PROCESO DE ROMPIMIENTO.

Existen muchos factores como el choque de rocas en la voladura que contribuyen al rompimiento. Además, bancos altos con barrenos largos facilitan más al rompimiento que bancos bajos con barrenos cortos y rígidos. En el caso de voladuras de bancos, el primer movimiento de la cara existe cuando la cara libre se encorva en el centro de la columna; esto sucede más fácilmente si la altura del banco es varias veces mayor que el tamaño del bordo. En una mala voladura, el doblamiento de la cara puede ocurrir primero en la parte superior o en el fondo del banco; ésto puede suceder cuando las fisuras de los barrenos se entrelazan y los gases se escapan antes de haber completado su trabajo potencial. El mecanismo del doblamiento de la cara puede ser controlado mediante un adecuado espaciamento entre los barrenos, si la altura del banco disminuye el espaciamento deberá cambiarse (disminuirse) para evitar estos problemas.

## CARGAS CONFINADAS EN LOS BARRENOS.

Los mecanismos básicos que contribuyen a la fragmentación de la roca en cargas confinadas en los barrenos son tres. El primero y menos significativo mecanismo de rotura es causado por la onda de choque; ésta causa microfisuras en las paredes del barreno e inician las discontinuidades en el borde trascendiendo como pulsaciones a presión y disminuyen rápidamente a medida que se alejan del barreno, la velocidad de propagación de estas ondas de choque son aproximadamente de 2.5 a 5 veces de la máxima velocidad de propagación de las grietas.

El segundo y mayor mecanismo de rotura, resulta de la presurización de los gases en el barreno cuando el explosivo sólido es transformado en gas durante el proceso de detonación, el barreno actúa muy similar a un depósito cilíndrico a presión, semejante al agua en una línea hidráulica. Cuando el gas es presurizado ejerce presión perpendicular en las paredes del barreno causando fisuras que ocurren en los puntos débiles del mismo; En el caso de congelar el agua en la tubería ocurriría una ranura longitudinal paralela a su eje. La única diferencia entre la presurización del barreno y la tubería es la proporción del cargado, el barreno es presurizado rápida e instantáneamente, además, éste no falla solo en un punto a lo largo de toda la pared, sino que instantánea y simultáneamente falla en muchas partes. Cada fisura resultante será orientada paralela al eje del barreno, a éste fenómeno se le llama fisuramiento radial, la dirección y extensión de este sistema radial de fisuras pueden ser controladas por el tamaño del borde y penetran en función a la carga de columna soportada por el peso del borde.

El proceso del trabajo aún no es completado con la expansión del barreno con los gases a alta presión, el tercer mecanismo se presenta cuando estos gases penetran en la red de fisuramiento radial y forzan la roca actuando de manera perpendicular al eje del barreno, empujando hacia la cara de alivio o línea de menor resistencia. Si el alivio no se aprovecha y si el fisuramiento radial llega o entrelaza hasta el brocal del barreno los gases escaparán y el material del taco saldrá disparado ( conocido como barreno soplado ). En éste caso resultan problemas en la fragmentación e inseguridad en el área cercana a la voladura.

En una operación de voladura el primer movimiento exterior visible se presenta cuando la cara se dobla en el centro, en otras palabras la porción del centro de la cara libre del borde, deberá moverse antes que la cresta o pata del banco; éste tipo de acción no siempre se presenta. Si la parte superior o fondo del barreno se mueve primero, ocurre un movimiento en cantiliver ( inclinamiento ) que presenta fragmentación escasa y/o daño en la próxima cara del corte, La Fig. 5 representa estos movimientos.

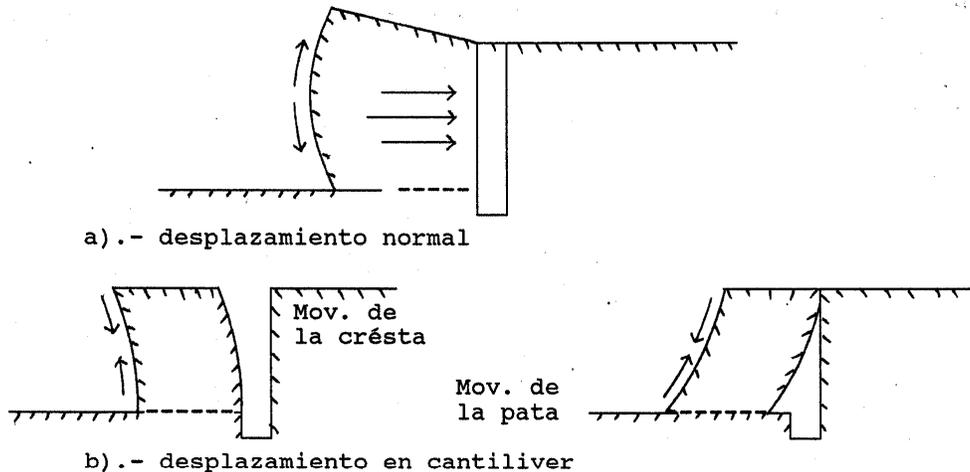


Fig. 5, FORMAS DEL MOVIMIENTO AL FRENTE DEL BARRENO.

#### EFFECTOS DE LA GEOLOGIA LOCAL.

Las condiciones de la Geología tiene un efecto determinante en los resultados de las voladuras y para tener éxito en cualquier programa de voladuras, el explosivo utilizado deberá ser compatible con las características de las rocas, algunos materiales que requieren de voladuras no son propiamente homogéneos en sus propiedades físicas. De éstas propiedades son esencialmente tres las que más tienen influencia predominante en los resultados de las voladuras de rocas: El rango estructural, la elasticidad y la resistencia al esfuerzo de compresión.

#### 1).- ESTRUCTURAS GEOLOGICAS.

El rango estructural de un material usualmente tiene la mayor influencia en los efectos de una voladura y de primer importancia es el grado de conexión estructural existente dentro de toda la masa rocosa. Cuando la roca presenta un estado característico de éstos sistemas de juntas y la nueva cara producida por la voladura es importante, debemos cuidar la manera en que las juntas se presentan dentro del macizo rocoso, la inclinación y dirección de éstos planos de juntas, deberán conocerse para dar la dirección de salida del material en el disparo, ya que dependiendo de la secuencia de iniciación del material volado se tiene:

- Resultados de la fragmentación.
- Pateo y condición de la próxima crésta.
- Condiciones resultantes de pisos.
- Depositación y apilamiento del material.

## INFLUENCIA DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS.

A pesar del número de patrones de juntas existentes en una masa rocosa, un sistema de juntas será dominante y controlará el proceso de rompimiento. La Fig. 6, es un esquema horizontal que muestra un barreno cargado hacia la cara libre de la roca influenciado por un sistema de juntas.

### 2).- ELASTICIDAD.

Comunmente llamada Tenacidad, referida a la elasticidad del material y es usada para expresar la habilidad de la roca a resistir esfuerzos y recuperar el estado original antes de la rotura, la roca deberá ser considerada en uno o en otro estado elástico de roca plástica:

ROCA ELASTICA.- Resiste altos esfuerzos de compresión.

Buen trasmisor de la onda de choque.

ROCA PLASTICA.- Presenta habilidad para absorber la onda de choque.

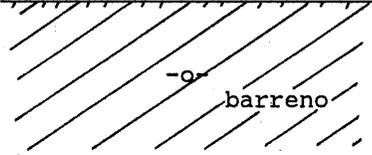
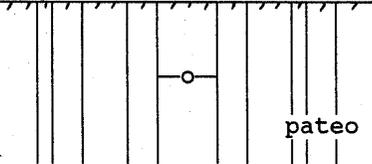
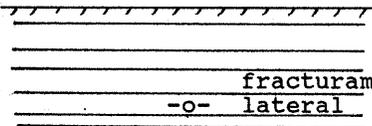
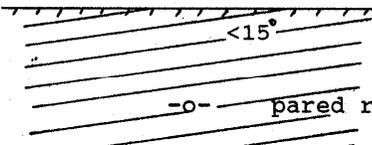
Es débil bajo esfuerzo de compresión.

### 3).- RESISTENCIA.

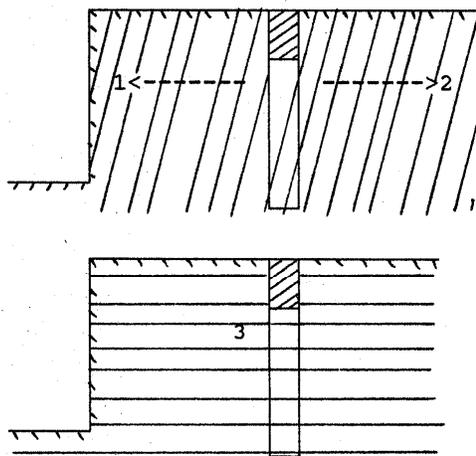
De las características de resistencia de materiales en voladuras solo concierne con la resistencia a la tensión, las rocas son muy débiles bajo tensión, presentan mayor resistencia al corte y esfuerzos en compresión; teniendo aproximadamente el 10 % de la resistencia a la rotura por tensión del esfuerzo por compresión. Esta escasa variación de el esfuerzo por tensión es llamado módulo de ruptura, en voladuras de producción debe ser excedido el esfuerzo a la compresión en la magnitud de tener un adecuado rompimiento, contrariamente en un programa para conservar los taludes la presión en los barrenos perimetrales, deberá ser cerca o igual al esfuerzo bajo tensión de la roca circundante.

## PRESENCIA DE AGUA.

Otro factor importante en el funcionamiento del explosivo es la presencia de agua en los barrenos, ésta causa cambios en la energía liberada de algunos explosivos y puede causar una mala detonación por pérdida del confinamiento ya que puede separar las mezclas o proporcionar una capa de lodo que cambia las características de detonación del explosivo y además ser responsable de barrenos quedados o cortados al cambiar prematuramente una porción de la columna explosiva. El diseño de la plantilla de barrenación y la selección del iniciador pueden intensificar los efectos negativos de la geología local.

- 
- (a).- SISTEMA DE JUNTAS DIAGONAL A LA DIRECCION DE LA VOLADURA. Presenta buena fragmentación - con pateo y fracturamiento en límites aceptables.
- 
- (b).- SISTEMA DE JUNTAS PERPENDICULAR El corte resultante es influenciado por la debilidad de este patrón estructural, y puede ocurrir pateo significativo y producir bloques entre los barrenos.
- 
- (c).- JUNTAS PARALELAS A LA CARA LIBRE Los barrenos se uniran prematuramente causando fragmentación gruesa con fracturamiento severo en forma lateral.
- 
- (d).- JUNTAS EN ANGULOS AGUDOS  $< 15^\circ$  A LA CARA LIBRE. Este sistema causa problemas de fragmentación y estabilidad de la pared resultante, ésta será rugosa y quebrada.

I).- influencia de la dirección de las juntas.



- 1.- DISPARANDO HACIA EL BAJO DEL BUZAMIENTO (Izquierda) El desplazamiento del material encuentra menos resistencia, el corte del piso ocurre a profundidad hay oportunidad para pateo y deslizamiento de cresta.
- 2.- DISPARANDO EN CONTRA DEL BUZAMIENTO (Derecha). Apilamiento del material puede ser alto y cerca de la cara, hay poco pateo.
- 3.- ESTRATIFICACION HORIZONTAL Controla desplazamiento y apilamiento, problemas de fragmentación en la zona del taco, pateo aceptable.

II).- influencia del buzamiento.

Fig. 6, INFLUENCIA DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS.

- EXPLOSIVOS COMERCIALES -

TIPOS DE EXPLOSIVOS:

Los productos explosivos comerciales utilizados para cargar voladuras, pueden ser divididos en tres categorías:

- 1).- Dinamitas.
- 2).- Hidrogeles y Emulsiones.
- 3).- Anfos.

Existen muchos y diferentes tipos de explosivos en cada categoría y su selección depende de las condiciones de cada lugar en particular. De manera general, se describen en la Fig. 7 y pueden clasificarse por su tipo de iniciación en dos clases:

1).- ALTOS EXPLOSIVOS.- El término se refiere a los productos explosivos que reaccionan a una velocidad mayor que la velocidad del sonido en el material explosivo, ésta reacción es acompañada por una onda de choque por lo que son considerados como altos explosivos.

2).- AGENTES EXPLOSIVOS.- Este término no es referido para un explosivo que tiene la habilidad de detonar como un alto explosivo, éstos son menos sensibles a la iniciación y además, pueden ser almacenados y transportados por diferentes reglamentos legales que los usados por los altos explosivos.

Los agentes explosivos, son mezclas terminadas y empacadas para transportarse y no pueden ser detonadas por el fulminante número 6. Normalmente los agentes no contienen ingredientes sensibilizadores y algunos altos explosivos pueden ser clasificados como agentes, si requieren de un cebo para ser iniciados, así la única diferencia existente es la energía necesaria para iniciar la reacción, que sucede en dos formas:

- a).- Compresión directa ( fricción por golpe ).
- b).- Compresión AdiábatICA de un gas ( sin pérdida de calor para mantener la reacción ).

CRITERIO PARA LA SELECCION DE UN EXPLOSIVO.

De los diferentes tipos de explosivos usados en voladuras su selección generalmente la podemos basar en tres criterios:

- 1).- Habilidad de funcionamiento en el medio donde va a ser utilizado.
- 2).- Características de funcionamiento del explosivo.
- 3).- Costo.

Este criterio de selección deberá basarse en obtener un explosivo que funcione con las condiciones específicas de las voladuras y al más bajo costo posible.

Los explosivos en general, difieren de la siguiente manera:

- mínimo diámetro para detonarlos.
- habilidad de resistir la presencia de agua.
- clases de gases generados.
- flamabilidad.
- habilidad para funcionar a diferentes temperaturas.
- energía necesaria para iniciarlos.
- velocidad de detonación.
- densidad a granel.
- energía disponible.
- habilidad para mantener su estado original.

Para comprar un explosivo, debemos hacer una clasificación del funcionamiento de todas las categorías y usar el mas extenso. En ocasiones por lógica si el proyecto de barrenación y voladuras es seco, no es necesario usar un producto que presente resistencia al agua y sí está usando diámetros grandes de barrenos, no es importante que el explosivo seleccionado sea seguro en diámetros pequeños. Así, para la selección de un explosivo, debemos encontrar los requerimientos de trabajo donde va a ser utilizado, podríamos sacrificar algunas características y comprar un explosivo que funcione adecuadamente y al más bajo costo posible en las voladuras.

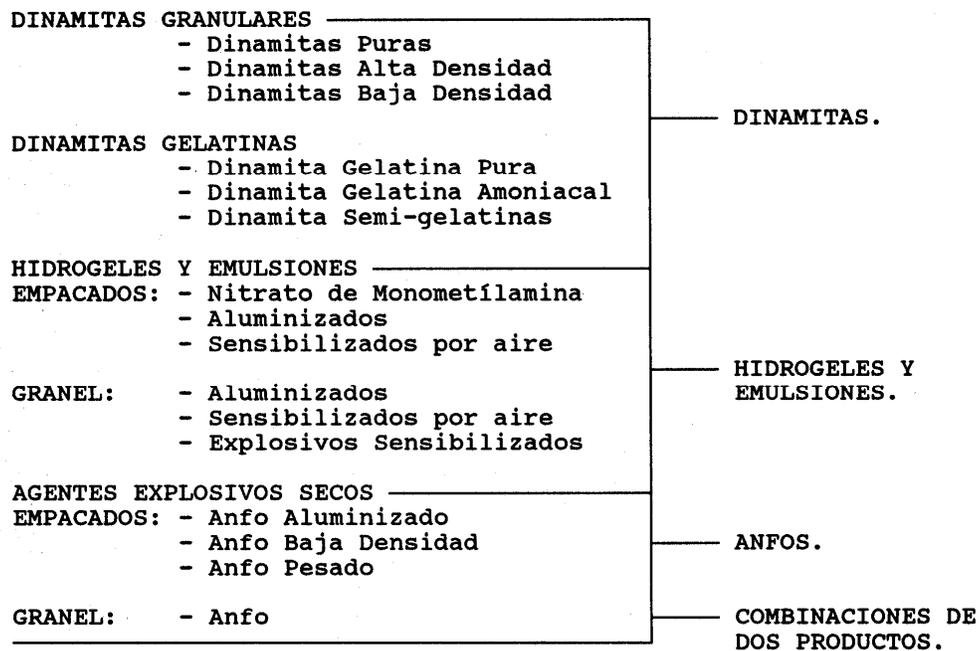


Fig. 7, CLASIFICACION DE LOS EXPLOSIVOS COMERCIALES.

## CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS EXPLOSIVOS.

Los explosivos deberan ser capaces de funcionar de manera segura y confiable con las condiciones locales del medio donde van a utilizarse, de las características consideradas en la selección de los explosivos en lo conserniente a los factores ambientales de trabajo podemos citar cinco principalmente:

1).- SENSIBILIDAD : Es la habilidad de un explosivo para propagar una detonación estable en toda la longitud de carga y se controla por el diámetro mínimo de uso. Se usa para determinar el diámetro crítico del explosivo.

2).- RESISTENCIA AL AGUA : Es la habilidad de un explosivo para soportar la penetración del agua. La resistencia al agua de un explosivo no solamente depende del empaque y de la habilidad inherente del producto para resistir la penetración del agua si no también, de las condiciones de presión del agua.

El agua puede disolver o separar los ingredientes de un explosivo y enfriar la reacción; así los productos de la detonación no estarán en balance de Oxígeno y la emisión de humos amarillos en las voladuras indican una reacción ineficiente muy común causado por la deteriorización por agua de un explosivo, esta condición puede ser remediada si se usa un explosivo con características de resistencia al agua.

3).- PRODUCCION DE GASES : La clase de gases de un explosivo es la medida de la cantidad de gases tóxicos producidos en la detonación. En explosivos comerciales, los gases resultantes son principalmente Dioxido de Carbono, Nitrógeno y Agua. Sin embargo, gases venenosos como Monóxido de Carbóno y Oxidos de Nitrógeno resultan, dependiendo de las condiciones del medio de la voladura. Pueden ocasionar gases tóxicos; el insuficiente diámetro de carga, la presencia de agua, un cebado inadecuado y el poco confinamiento del producto.

4).- FLAMABILIDAD : Referida a la facilidad con la cual un explosivo puede ser iniciado mediante calor o flama y es importante considerarla para seguridad en el almacenamiento, transportación y uso de los productos, aunque la mayoría de los explosivos comerciales no son un problema a la flamabilidad, todos deben tratarse con cuidado conservando las medidas de seguridad.

5).- RESISTENCIA A LA TEMPERATURA : Los compuestos explosivos pueden sufrir cambios en el funcionamiento si son almacenados bajo condiciones extremas de frío o de calor. Bajo condiciones de calor en el almacenamiento arriba de los 62 grados Centigrados muchos compuestos se descomponen lentamente y cambian sus propiedades disminuyendo el período de vida útil.

Las condiciones del medio por su consideración, pueden eliminar el uso de cierto tipo de explosivo en un proyecto.

## CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS EXPLOSIVOS.

Después que las condiciones del medio de trabajo de un explosivo, deberán ser consideradas también las características de funcionamiento primarias:

1).- SENSITIVIDAD : Se define como la cantidad de energía mínima necesaria para la iniciación. Es llamada como el requerimiento mínimo de cebo y es expresada en potencia al fulminante número 6. Muchos factores afectan y disminuyen la sensibilidad como el agua en el barreno, diámetro inadecuado de carga, temperaturas bajas, etc...

2).- VELOCIDAD DE DETONACION : Es la velocidad a la cual la onda de detonación viaja a través de la columna del explosivo, debe ser una consideración importante para aplicaciones de explosivos no confinados; como en plasteos y corte de miembros estructurales. Además, es una variable muy significativa en el uso de explosivos en barrenos para determinar la presión de detonación en los mismos, usualmente es medida en Kbares ( $K_b=14,454$  PSI). Esta presión es importante ya que está relacionada con el nivel de esfuerzo del material de la voladura, es un factor que influye en la fragmentación y también en el cebado para una iniciación efectiva y confiable.

3).- DENSIDAD : Es normalmente expresada en terminos de la gravedad específica y es importante, ya que los explosivos son comprados, almacenados y se usan en base al peso del producto, la densidad de un explosivo determina la cantidad de carga que puede ser usada en un diámetro específico de barreno por unidad longitudinal. Además, es usada como una variable para determinar una aproximación de la potencia en peso del explosivo en los parámetros de diseño con explosivos de manufacturas y familias genéricas diferentes.

4).- POTENCIA : Este término se refiere a la energía contenida en un explosivo, la cual es una medida de la fuerza que puede desarrollar para hacer trabajo útil. Es medida en base al Peso y/o en base al Volumen por algunos fabricantes de explosivos comparandola con la potencia teórica relativa del anfo ( $P_{Ri}=100$ ) usada satisfactoriamente para propósitos de diseño de voladuras.

Teóricamente la energía liberada en el barreno no representa el trabajo desarrollado, esta energía liberada varía de un tipo de explosivo a otro y para un mismo explosivo cambia en diámetros de barrenos diferentes. En general, los rangos de potencia son una guía, no se puede comparar acertadamente la eficiencia de fragmentación de la roca con distintos explosivos y se puede decir, que los rangos de potencia son solamente una herramienta usada para identificar los resultados finales asociados a ellos con un producto específico.

5).- COHESIVIDAD : Es definida como la habilidad de un explosivo para mantener su estado original. En ocasiones se requiere mantener al explosivo en su envase y en otras puede ser depositado a granel para aplicarlo a las condiciones del terreno.

La Tabla 1, presentada a continuación, muestra algunas de las principales características de los explosivos.

TIPO	DENSIDAD	VEL. DET. Km/Seg.	CALIDAD DE LOS HUMOS
Din. Granular	0.8 a 1.4	2.1 a 5.8 *	Pobres a Buenos
Din. Gelatina	1.0 a 1.6	3.6 a 7.6 *	Regular a MB
Hidrogeles	1.1 a 1.6	3.2 a 7.6 *	Buenos
Emulsión empacada	1.1 a 1.3	4.2 a 5.8 **	Buenos a MB
Emulsión a Granel	1.1 a 1.6	4.2 a 5.8 **	Regular a Buenos
Anfo Baja Densidad	0.6 a 0.9	2.7 a 3.4 **	Buenos (1)
Anfo a Granel	0.8 a 0.9	3.2 a 4.5***	Buenos (1)
Anfo Pesado	1.1 a 1.4	3.6 a 4.5***	Buenos (1)
Anfo Prefabricado	0.9 a 1.1	3.6 a 4.6***	Buenos a MB (1)

\* en diámetros de 1,1/4"

\*\* en diámetros de 3"

\*\*\* en diámetros de 9"

(1) pueden ser malos bajo condiciones adversas.

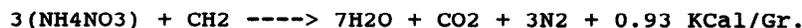
#### ANFO Y BALANCE DE OXIGENO.

El principio del balance de Oxígeno se aprecia fácilmente al ilustrar la reacción del nitrato de amonio y el aceite combustible conocido como ANFO. Esta mezcla es la más comúnmente usada en los agentes explosivos secos, partiendo de las ecuaciones de reacción del Anfo se puede observar la relación entre el balance de Oxígeno, la producción de gases y la liberación de energía.

Las siguientes ecuaciones suponen una detonación ideal; una mezcla homogénea de ingredientes, un tamaño de partícula adecuado, un grado de confinamiento de carga normal, un iniciador adecuado y sin presencia de humedad o protegida de ella.

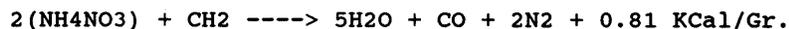
Analizando las ecuaciones siguientes podemos observar la liberación de energía en cada caso:

CASO 1.- 94.3% de N. de AMONIO + 5.7% de DIESEL.



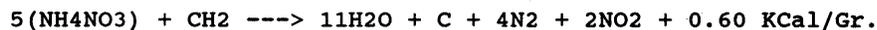
Esta ecuación representa una reacción con balance de Oxígeno CERO, ningún gas producido es venenoso y se producen 0.93 KCal/Gr de anfo.

CASO 2.- 92.0% de N. de AMONIO + 8.0% de DIESEL.



En ésta ecuación se tiene exceso de aceite combustible, provoca una deficiencia de Oxígeno, ocasionando que el Carbón contenido en el aceite combustible se oxide como monóxido de Carbono que es un gas tóxico y debido al bajo calor de formación de éste gas solamente 0.81 KCal/Gr de Anfo, es liberado.

CASO 3.- 96.6% de N. de AMONIO + 3.4% de DIESEL.



En esta ecuación se ocasiona por la falta de aceite combustible condiciones de exceso de Oxígeno en la reacción, donde parte del nitrato de amonio se combina con éste exceso de Oxígeno para formar Dioxido de Nitrógeno, que es extremadamente tóxico, el calor absorbido en la formación de éste gas ocasiona que se produzcan únicamente 0.60 KCal/Gr. de Anfo. Que es considerablemente menor al producido por una mezcla con exceso de aceite combustible. También, el monóxido de Carbono de éste tipo de mezcla es menos tóxico que los Oxidos de Nitrógeno producidos en éste caso.

Por lo tanto, la energía teórica de un Anfo es optimizada con una mezcla de 94.3% de N. de Amonio y 5.7% de aceite combustible como se muestra en la Fig. 8 y es donde presenta la máxima velocidad teórica de detonación. En barrenos con diámetros mayores a 9", se acerca a los 4,600 Mt/Seg. Menor porcentaje de aceite combustible reduce la energía liberada a un rango más rápido que los excesos moderados, por otra parte el Anfo es más sensible entre 2 y 6 % de aceite combustible y decrece rápidamente al variar hacia arriba o hacia abajo de éste rango.

En un explosivo los elementos que son considerados generalmente como combustibles, son típicamente el Carbono y el Hidrógeno todos los explosivos usan el Oxígeno como agente oxidante, el Nitrógeno es un componente común de los explosivos porque causa un ligamiento con el Oxígeno y provee un enlace molecular con el resto de la estructura del explosivo. Además, representa una fuente de poder de ganancia o pérdida de energía contenida en el explosivo, dependiendo del estado final de la reacción.

Los elementos combustibles y oxidantes pueden ser ligados en el interior de la configuración molecular con enlaces sencillos. Semejante, como en el caso de TNT y Nitroglicerina, los cuales son explosivos base y pueden presentarse como substancias en mezclas de agentes explosivos, al igual que el anfo, el cual puede ser físicamente mezclado en el momento del cargado de la voladura.

Los enlaces químicos de los explosivos deberán de conocerse en la cadena molecular y muchas veces los requerimientos conflictivos de éstos, de ellos dependen que tengan estabilidad al calor, manufactura segura al ser golpeados y presionados para transportarse, almacenarse y trabajarlos. Ellos además, demandan una detonación rápida, completa y eficiente con el máximo de energía liberada para fragmentar la roca.

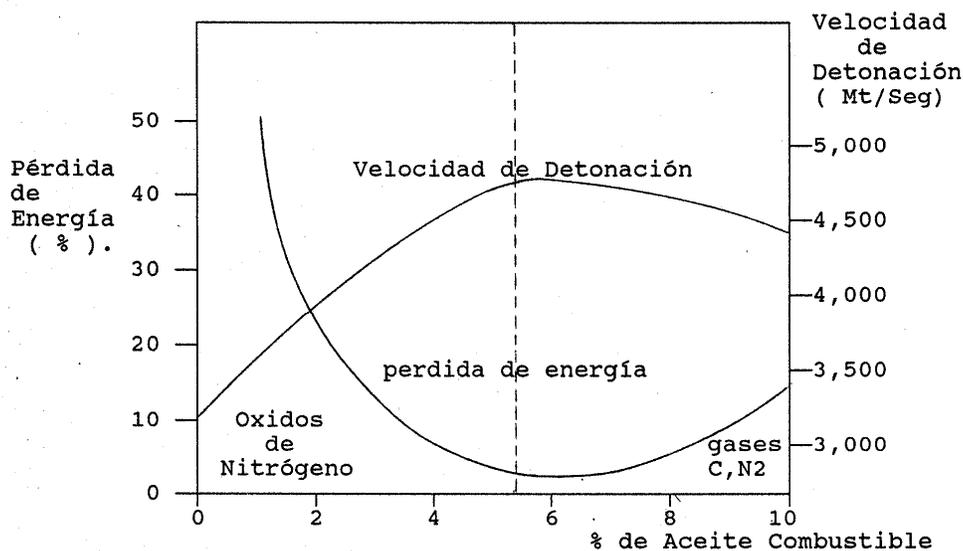


Fig. 8, PERDIDA DE ENERGIA Y VELOCIDAD DE DETONACION PARA EL ANFO CONTRA EL (%) DE ACEITE COMBUSTIBLE.

- INICIADORES -

SISTEMAS DE INICIACION.

Los sistemas de iniciación disponibles en el mercado de los explosivos, transfieren la señal de detonación de barreno a barreno en el tiempo preciso en una voladura de roca. Únicamente se pueden lograr buenos resultados en una operación de voladura cuando los dispositivos de iniciación para detonar la carga de los explosivos, se eligen y utilizan cuidadosa y adecuadamente.

Los dispositivos comerciales de iniciación caen dentro de dos categorías dependiendo de su fuente de iniciación primaria y pueden enlistarse de la manera siguiente:

1).- SISTEMAS DE INICIACION ELECTRICOS.

- a).- Estopines eléctricos.
- b).- Detonador eléctrico magnadet y primer magna.
- c).- Estopines electrónicos.

2).- SISTEMAS DE INICIACION NO ELECTRICOS.

- a).- Sistema detaline.
- b).- Cordón detonante y retardos compatibles.
- c).- Sistema hércudet.

La selección de un sistema de iniciación es un suceso crítico, no solamente controlan la secuencia de disparo de los barrenos, sino que también afectan la vibración generada por la voladura, el grado de fragmentación producida y además, el pateo y la violencia con que ésta ocurre.

El costo de un sistema de iniciación, debería ser una consideración secundaria en la selección; específicamente si el sistema más económico causa problemas de pateo, vibración y mala fragmentación.

SISTEMA DE CORDON DETONANTE Y RETARDO COMPATIBLE.

EL cordón detonante, es un cordón redondo y flexible que contiene un núcleo de alto explosivo, usualmente Tetranitrato de Pentaeritritol (PETN), recubierto con materiales textiles y plásticos a prueba de agua; que lo protegen de maltratos físicos, humedad y de la exposición a temperaturas extremas, proporcionándole además características esenciales de manejo.

Debido a que el cordón detonante es relativamente insensible requiere de un detonador adecuado, tal como el fulminante Número 6 para su iniciación y tiene una velocidad de detonación de aproximadamente 5,700 Mt/Seg.

El cordón detonante, inicia altos explosivos sensibles al fulminante y su habilidad depende de la densidad del núcleo de PETN, los más utilizados contienen de 25 a 60 Granos/Pie ó de 5.3 a 12.8 Gramos/Metro de Cordón, la Tabla 2 nos da una breve descripción de algunos cordones usados en minas a cielo abierto.

El cordón detonante es insensible al choque ordinario y de fricción y puede usarse tanto en superficie como en el interior de barrenos unido a mecanismos no eléctricos de retardo. Su mayor desventaja de uso en superficie es el fuerte ruido que produce al detonar y puede prender fuego a malezas y hojarascas presentes en áreas secas.

TIPO DE CORDON	DENSIDAD DEL NUCLEO		RESISTENCIA A LA TENSION ( PSI )	USO PRINCIPAL
	Gn/Ft	Gr/Mt		
Detacord	25	5.3	140 a 160	Líneas de Superficie.
E-cord	40	8.5	170 a 200	Líneas troncales y descendentes para cebos y voladuras de moneo.
Reforzado	60	12.8	200 a 300	Reemplaza al anterior donde las condiciones de carga son severas.

TABLA 2, CORDONES DETONANTES Y SUS APLICACIONES.

#### MECANISMOS DE RETARDO.

Los retardos de superficie Bickford o tipo americano consisten de dos unidades plásticas que contienen un tubo de aluminio con el elemento de retardo en milisegundos (ms), en el centro, los dos elementos se relevan unidos por un tubo plástico de Nonel de 18" de longitud. Cada unidad está hecha de tal manera que el cordón pueda ser lazado y asegurado en el conector, la conexión es bi-direccional y su instalación es en los extremos del corte del cordón detonante en el lugar donde se requiere.

Los mecanismos de retardo primadet (Nonel) para usarse en el interior de los barrenos, que son compatibles con el cordón detonante, consisten de un cápsula de aluminio que contiene el fulminante y el elemento de retardo no eléctrico conectado a un extremo a un tubo plástico, el cual contiene una densidad de carga de 4 Granos/Pie, distribuida en una película por la pared interior del tubo y es sellado en su otro extremo, en donde trae un conector para unirse con el cordón detonante.

EFFECTOS DEL CORDON DETONANTE EN LA ENERGIA LIBERADA.

Los explosivos sensibles al fulminante son iniciados por el cordón detonante, sin embargo aquellos explosivos que no sean iniciados por éste, tal como el anfo, hidrogeles y emulsiones no sensibles al fulminante, pueden ser severamente dañados por la acción del cordón detonante que pasa a través de la carga de columna. Este causa que el explosivo que lo rodea deflagre disminuyendo parcialmente la energía liberada de la carga, como se ilustra en la figura 9, y también, puede causar el rompimiento de las esferas de aire o microbalones sensibilizantes de algunos explosivos, evitando que detonen; a éste fenómeno se le denomina pre-compresión y es causa de barrenos quedados en el disparo o de mala fragmentación al quemarse la carga.

Para prevenir que la máxima carga de explosivo se quemara deberá ser usado un cordón detonante de acuerdo al tamaño de barreno como indica la Tabla 3 presentada a continuación:

Diámetro de Bno.	Densidad del Cordón (Gn/Ft).
2 a 6	10
6 a 10	25
10 a 15	50

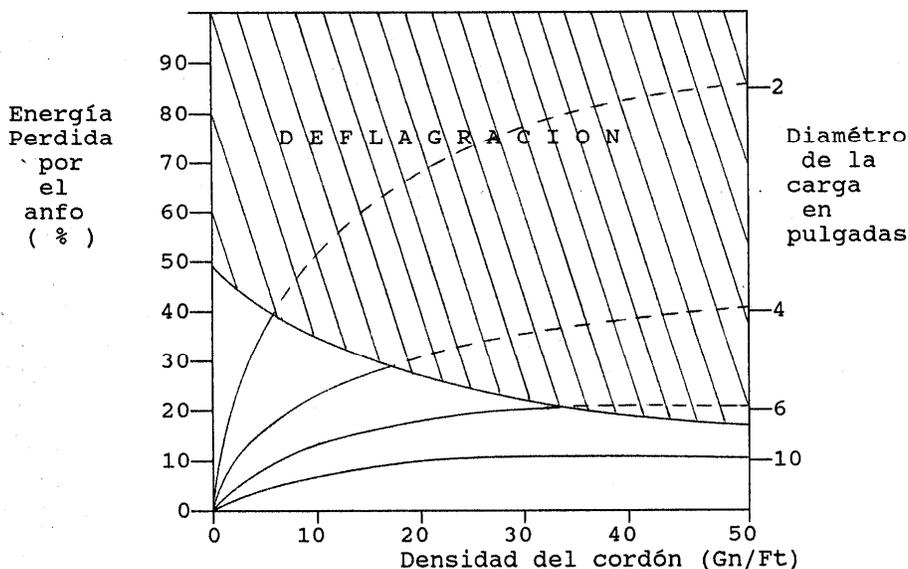


Fig. 9, DEMOSTRANDO LA ENERGIA PERDIDA POR EL ANFO DAÑADO POR EL CORDON DETONANTE, LAS EMULSIONES SUFREN UN DAÑO SIMILAR.

### SELECCION DEL CEBO O PRIMER.

El cebo es la porción de carga explosiva que consiste de un explosivo sensible al fulminante dentro del cual se inserta un detonador o el cordón detonante con el propósito de iniciar la carga principal de explosivo.

Existen algunos agentes explosivos, emulsiones e hidrogeles que no son sensibles al fulminante y para su iniciación requieren de un cebo o primer. Los cebos pueden variar mucho en su composición o tamaño, sin embargo, deberá cuidarse mucho la selección de éste, ya que tiene gran influencia en los resultados de la voladura.

La composición del cebo y su medida son dos criterios muy importantes en su selección, ya que la velocidad de detonación del mismo deberá ser mayor que la velocidad en estado estable del explosivo receptor en la carga de columna. La Fig. 10, demuestra el efecto que tiene el cebo debido a distintos diámetros con una misma composición, en la velocidad de detonación del anfo. La energía de choque es proporcional a la velocidad de detonación por lo que el cebo deberá ser de una longitud adecuada para que alcance su máxima velocidad de detonación.

CURVA	DIAMETRO DEL CEBO en Pulg.	PRESION DE DETONACION en Kbars.
A	3.0	240
B	2.5	240
C	2.0	240
D	1.0	240

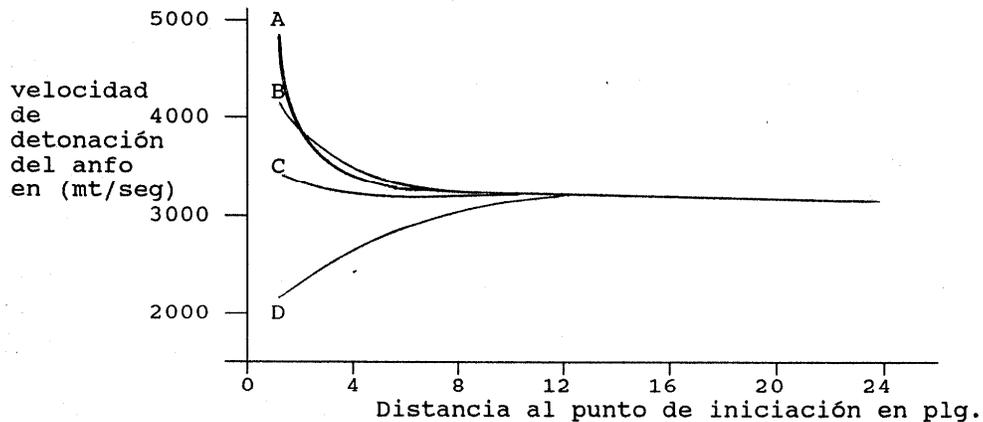


Fig. 10, DIAMETRO DEL CEBO Y FUNCIONAMIENTO DE LA CARGA.

#### GUIAS PARA LA SELECCION DE UN CEBO.

Algunas reglas generales se pueden observar para la selección adecuada de un cebo.

- 1).- La presión de detonación del cebo debe ser mayor que la del explosivo receptor.
- 2).- El diámetro del cebo, deberá ser lo más cercano posible al diámetro usado en la carga y de una longitud igual aquella donde alcance su máxima velocidad.
- 3).- El cebo debe ser sensible, sea o no eléctrico para asegurar la detonación de la carga de columna.
- 4).- Debe tener una buena consistencia física que permita que el iniciador quede bien fijo y centrado en su interior.
- 5).- Además, deberá ser seguro para su almacenamiento, transporte y uso en el campo y de fácil identificación para minimizar los riesgos.

#### ECONOMIA EN EL CEBADO.

El tipo, cantidad y manera de cebado son necesidades importantes, las cuales se deben basar en conocimientos técnicos adaptados a las condiciones particulares de cada lugar.

- Es muy importante la calidad y cantidad del cebo para asegurar una iniciación adecuada de los explosivos. En base a la inversión total de la voladura, el costo del cebo es pequeño y es compensado por la seguridad adicional de que los explosivos reaccionen en toda su carga de columna con eficiencia.

- Los pequeños ahorros obtenidos por un cebado marginal pueden ser muy costosos en términos de la reducción de la capacidad de cargado y flujos reducidos de material a través de la quebradora con aumentos en el mantenimiento de equipo.

- Los resultados confiables y consistentes que pueden obtenerse por un cebado adecuado, resultan en ahorros a largo plazo con buenas voladuras; consiguiendo un mayor control en la fragmentación, así como en las vibraciones y disminución o eliminación de barrenos quedados. Además que se puede conseguir un menor daño en la siguiente cara de la voladura.

En base a todo lo anterior un cebo inadecuado puede resultar costoso, tanto en rendimiento como en seguridad; si las cargas no son iniciadas apropiadamente las plantillas de barrenación tendrían que cerrarse más que lo normalmente necesario y el tamaño de la fragmentación podría ser también grande.

## CEBADO DEL ANFO.

El nitrato de amonio es un ingrediente esencial en casi todos los explosivos comerciales, incluyendo dinamitas e hidrogeles. Los productos de anfo son los explosivos más comúnmente usados en una gran variedad de aplicaciones tanto en minería como en la construcción. su popularidad se ha incrementado debido a su economía y conveniencia de manejo; sus limitaciones que no tiene resistencia al agua y su baja densidad deben considerarse como deficiencias del producto antes de introducir el anfo en un programa de voladuras. Además, la velocidad de detonación del anfo vaciado depende de diámetro del barreno y del grado de confinamiento con el cual se inicia, la Fig. 11 muestra como la velocidad para el anfo aumenta al aumentar el diámetro de barreno; el tipo de confinamiento circundante al anfo materialmente afecta su velocidad de detonación y su habilidad para sostener una detonación en diámetros menores.

Para cebar un anfo, un cebo de alta energía es el recomendado. El rendimiento del cebo es optimizado cuando su diámetro es lo más aproximado al diámetro del barreno, por lo que cebos de diámetro grande y con una velocidad de detonación muy por encima de la velocidad del anfo, aseguran que éste alcance su velocidad normal a una distancia mínima del punto de iniciación.

El cebo puede ser un explosivo encartuchado en una forma que sea adecuada, segura y eficaz de manejar con las condiciones operantes del lugar. Un cebado indirecto; aplicado en el fondo del barreno es el más usual y recomendable para el anfo.

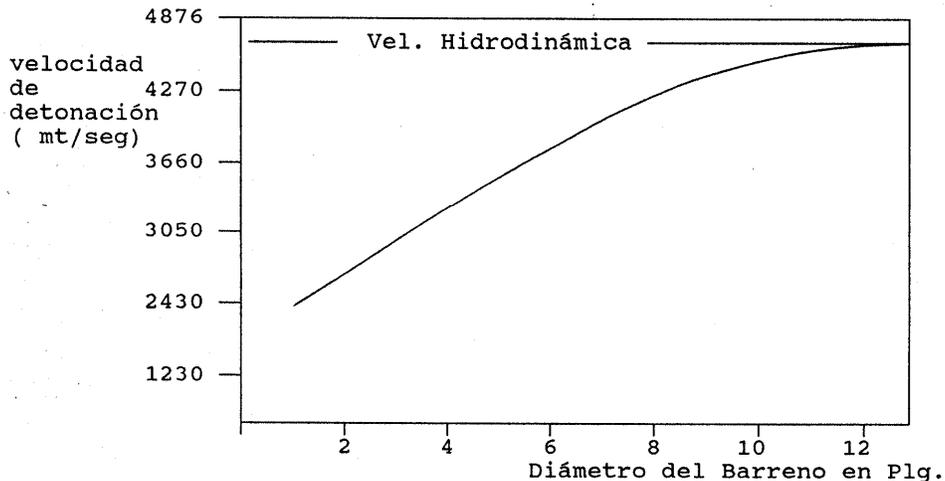


Fig. 11, VELOCIDAD DE DETONACION PARA EL ANFO.

- MECANISMOS DE RETARDO -

TIEMPOS DE RETARDO EN LA VOLADURA.

En general tenemos dos opciones de iniciación al diseñar nuestra voladura: iniciación instantánea e iniciación retardada. Al disparar una Voladuras secuencialmente usando fulminante con retardo, es muy importante tomar en cuenta el rango de variabilidad de los fulminantes, éstos alcanzan el retardo deseado mediante una carga pirotécnica, por lo tanto su exactitud no puede ser garantizada y siempre presentan un rango de variabilidad de más-menos 10% del tiempo nominal para retardos de milisegundos estandar.

Las pruebas indican que períodos de retardo muy cortos pueden causar problemas de traslape de tiempos, especialmente cuando se utilizan retardos no eléctricos de corto período en superficie y un mismo fulminante de alto período dentro del barreno. Esta práctica común pretende ser justificada por el usuario dado que quiere tener todos los barrenos iniciados en el fondo, antes de que el primero detone, con la finalidad de eliminar la posibilidad de cortes en alguna iniciación de superficie. Sin embargo, si consideramos el tiempo que tarda la roca en moverse, los cortes de iniciación en barrenos debido a roca en vuelo es virtualmente imposible. De manera general se puede señalar que es preferible usar retardos largos a retardos cortos en superficie dado que se disminuye la posibilidad de traslape de tiempos originada por la variabilidad de los fulminantes.

Una solución mejor a éste problema de traslape en los tiempos de los fulminantes, sería utilizar retardos largos en la superficie y retardos cortos dentro del barreno. Una regla común dice que si el barreno adyacente en cualquier dirección ha sido iniciado antes de que el barreno detone, entonces no deben existir problemas de corte en la iniciación.

Con la finalidad de eliminar los problemas de variabilidad de los fulminantes de los retardos, al conocer los tiempos precisos de iniciación podemos calcular la probabilidad de traslape de barrenos o cargas adyacentes de acuerdo al rango de variabilidad y rediseñar el disparo si ésta probabilidad es muy alta. Una manera de solucionar el riesgo de traslape, donde hay problemas de dispersión de los tiempos en el disparo; si los valores de tiempo de encendido y dispersión son obtenibles, primero se asume que el tiempo de encendido del retardo, esta muy cerca de la nominación, usando éste criterio se puede calcular la probabilidad de traslape de cargas adyacentes.

Muy comunmente los diseños de tiempos de retardo tienen una probabilidad entre 45 y 48% , dado que esto es un valor alto de la probabilidad de traslape de la voladura y ésta nunca está en función de como se diseño en gabinete, es una solución práctica asumir el tiempo nominal de los retardos como exacto.

## EFFECTOS DE LOS RETARDOS EN LA FRAGMENTACION.

Considerando las opciones de diseño de iniciación de una voladura, al iniciar estas instantáneamente se pueden dejar mayores distancias de espaciamento entre barrenos que al iniciarlas con retardo, por lo tanto, la voladura presenta menor costo por tonelada quebrada. Sin embargo, al iniciar instantáneamente la voladura tendremos una desventaja se presentan altos índices de vibración y se producen más roca de sobre tamaño al incrementar los espaciamentos de los barrenos, que comparando con una voladura retardada.

A través de los años se ha comprobado por los investigadores en la materia que para controlar los efectos de una voladura, al disparar los barrenos secuencialmente se producen mejores resultados, que al hacer el disparo instantáneo.

Los resultados en pruebas en plaxíglas efectuados entre disparos geométricos demuestran que es muy grande el porcentaje de material de sobre tamaño producido con la iniciación instantánea, como lo ilustra la Fig. 12, considerando la razón de bordo-espaciamento entre 1 y 2, usados muy comunmente en voladuras de campo. Los modelos de iniciación instantánea producen un 100% más material de sobre tamaño que disparos idénticos donde se usa retardación de los barrenos.

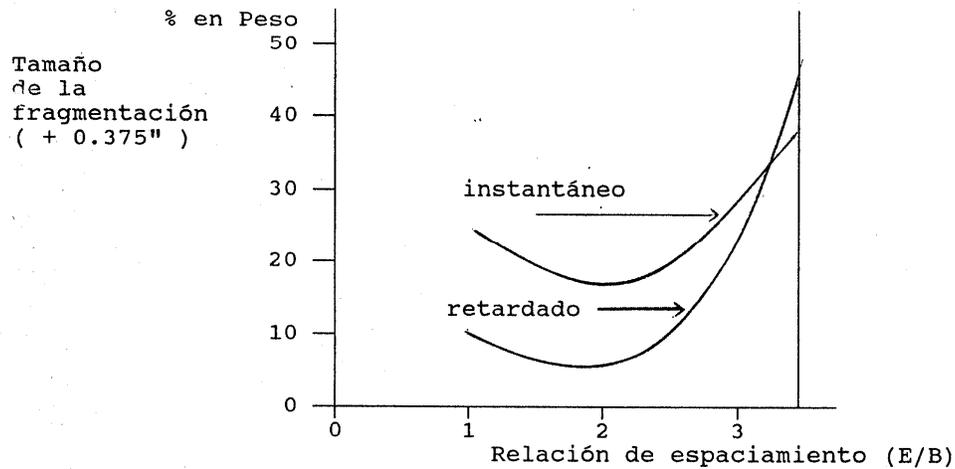


Fig. 12, PORCENTAJE EN PESO DE LA FRAGMENTACION + 0.375" PARA LA RELACION DE ESPACIAMIENTO ( E/B ), EN PLAXIGLAS CON BORDO IGUAL A 0.5".

#### CRITERIO PARA LA SELECCION DE UN TIEMPO ADECUADO.

Para controlar los efectos de una voladura se deben disparar los barrenos dentro de un cierto período de tiempo; denominados "ventanas de tiempo", el tiempo seleccionado dependerá de dos factores básicamente:

- 1).- Tipo de roca.
- 2).- Dimensiones físicas de la voladura.

Un problema que ocurre, es que cuando se conoce el retardo ideal para una voladura, debemos ajustarnos a los retardos manufacturados por los fabricantes.

El procedimiento que el Dr. Konya propone para calcular el tiempo de retardo entre barrenos y líneas, se basa en seis criterios:

1).- ¿ Es la altura del apilamiento de la rezaga una consideración ? si es así, ¿ Se trata de apilar, esparcir o programar la caída del material ?

2).- ¿ Es el control de la pared, importante ? si es así, ¿ Es más importante que la disposición de la rezaga ?

3).- ¿ Es la fragmentación de la roca, importante ? ¿ Es la uniformidad de la granulometría importante ?

4).- ¿ Entra en consideración la roca en vuelo ? especialmente en las líneas de atrás.

5).- ¿ Entra en consideración el golpe de aire ? si es así, ¿ Se considera el disparo de barrenos traseros causando golpe de aire o consideramos el incremento de concusiones en la roca quebrada debido al tiempo de disparo ?

6).- ¿ Es la vibración máxima un problema ? estamos alejados de construcciones ¿Así que no tenemos que preocuparnos de los niveles de la vibración ?

De acuerdo a las respuestas que tengamos para cada una de éstos criterios, asignamos una clave denominada "ventana de control de tiempo".

Las funciones de control de tiempo pueden ser identificadas para cada sitio de voladuras específico y los problemas potenciales, deberán ser direccionados y priorizados, considerando la lista de la Fig. 13 que coincida con el tiempo para cada función.

FUNCION DE CONTROL	TIEMPO POR VENTANA EN ms/ft.
<b>1.- CONSIDERACION DE LA DISPOSICION DE LA REZAGA.</b>	
a).- Pila alta junto a la cara	2 a 3 en el B.*
b).- Pila promedio	3 a 4
c).- Pila esparcida	4 a 6
d).- Programar la caída de material	7 a 14
-----	
<b>2.- CONTROL DE LA PARED.</b>	
a).- ¿ Es importante ?	13 a 14 en el B.
-----	
<b>3.- TAMAÑO DE LA FRAGMENTACION.</b>	
a).- Promedio	0 a 5 en el E.**
b).- Lo mejor posible	2 a 4
-----	
<b>4.- CONSIDERACION DEL GOLPE DE AIRE.</b>	
a).- causado por barrenos traseros	2 ó Más en el B.
b).- concusión por caída de material.	0.8 a 1 en el E.
-----	
<b>5.- CONTROL DE LA ROCA EN VUELO.</b>	
a).- ¿ Es importante ?	2 ó Más en el B. si es < 25 Ms en E.
-----	
<b>6.- CONSIDERACION DEL NIVEL DE VIBRACION.</b>	
a).- Disposicion Legal de 8 Ms,	8 Ms entre retardos.
b).- Habitaciones muy cerca	1 Ms para B. o E. el que sea s <span>í</span> gnificante
c).- Habitaciones circundantes	> 1 Ms/Ft para el barreno más proximo.

Nota: El tiempo de línea a línea deberá ser mínimo el doble que entre barrenos, para que el alivio sea aprovechado por las siguientes líneas.

- \* B = bordo  
\*\* E = espaciamiento

Fig. 13, FUNCIONES DEL CONTROL DE TIEMPO Y SELECCION DEL TIEMPO POR VENTANA.