

B. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE VOLADURAS

B.1. Introducción

Bajo suposiciones generales, la complejidad de los registros de vibraciones (obtenidos en un sitio lejano al lugar de la explosión) generadas por voladuras se debe a varios aspectos, entre ellos: la fuente (proceso de voladura en si), el camino o trayectoria que las ondas recorren y el tipo de sensor con el que se miden. Aunque las vibraciones producidas por voladuras no son tan complejas como las producidas por un sismo (en el cual la fuente es desconocida y cuyos registros son obtenidos generalmente a grandes distancias y con trayectorias mucho mas complejas), estas vibraciones sí tiene algunas variables en el proceso de voladura –la fuente– que lo hacen no trivial.

Para entender los procesos de las voladuras que influyen en la generación de vibraciones, es indispensable el estudio, aunque sea a nivel básico, de de los materiales y métodos utilizados. En este anexo se presenta a manera de introducción y de forma muy general, el tema de los explosivos y sus propiedades, las clases de explosivos utilizadas en trabajos de minería superficial y algunos conceptos básicos sobre las técnicas utilizadas en voladuras.

B.2. Explosivos y sus propiedades

B.2.1. Reseña histórica

La sustancia más antigua utilizada como explosivo es la pólvora negra que consiste en una mezcla formada por 75 % de nitrato de potasio, 10 % de carbón y 15 % de azufre. Esta sustancia fue presumiblemente desarrollada por los chinos y en un comienzo era utilizada exclusivamente en exhibiciones pirotécnicas relacionadas con sus celebraciones.

Es probable que la pólvora se introdujera en Europa procedente del Oriente Próximo; la primera referencia detallada del proceso de fabricación de este explosivo en Europa data del siglo XII en escritos del monje Roger Bacon. Hacia el siglo XIV gracias al monje alemán Berthold Schwarz, este producto fue utilizado en actividades militares. Europa fue el lugar donde este material se utilizo por primera vez con fines benéficos en las areas de la construcción y la minería.

Un posterior desarrollo substituye el nitrato de potasio por clorato de potasio, y luego por nitrato de sodio, estos cambio resultaron en un explosivo mucho más potente. La pólvora puede fabricarse solamente con carbón y azufre, pero como es un explosivo combustible necesita oxígeno, por lo que para estallar en un barreno necesita una tercera substancia

(clorato de potasio, Nitrato de sodio o el nitrato de potasio) que con el calor se descomponga desprendiendo oxígeno.

La nitroglicerina fue descubierta hacia el año 1840 por el químico italiano Ascani Sobrero. Este explosivo (compuesto de glicerol, ácido nítrico y sulfúrico) resultó ser muy potente pero a la vez muy sensible a la presión y temperatura, lo que lo hace muy peligroso; unos años después de este descubrimiento, el químico Sueco Alfred Nobel resolvió el problema de sensibilidad de la nitroglicerina al mezclar esta con una sustancia inerte que puede ser una tierra dictomacea, a esta nueva sustancia se le llama dinamita nitroglicerina.

Durante los últimos 60 años el Nitrato de Amonio ha desempeñado un papel cada vez más importante en los explosivos. Se usó primeramente como ingrediente de la dinamita y, hace aproximadamente un cuarto de siglo, comenzó a emplearse en una sencilla y económica mezcla con el Diesel que ha constituido una revolución en la industria de los explosivos y que, hoy día, cubre aproximadamente el 80 % de las necesidades de los explosivos (Favela, 2001).

En los últimos 20 años se han desarrollado explosivos de geles de agua con base de nitrato de amonio. Estos explosivos contienen sensibilizadores, tales como los nitratos de amina, el *TNT* y el aluminio, así como agentes de gelificación y otros materiales, con el fin de alcanzar un grado de sensibilidad deseado.

Actualmente los explosivos se utilizan extensivamente en todo el mundo en canteras a cielo abierto, como el caso de la mina La Calera, minas en subterráneas y canteras de materiales. Los explosivos también se utilizan en diversas obras civiles como en la construcción de presas, sistemas de conducción eléctrica, gasoductos, oleoductos, sistemas de drenaje, vías, canales, túneles, compactación de suelos y muchas otras aplicaciones.

B.2.2. Propiedades de los explosivos

Cada tipo de explosivo tiene características propias definidas por sus propiedades, para el mismo tipo de explosivo las características pueden variar dependiendo del fabricante; el conocimiento de tales propiedades es un factor importante en el diseño de voladuras. Las propiedades más importantes de los explosivos son: fuerza, densidad de empaque, velocidad de detonación, sensibilidad, resistencia al agua, emanaciones e inflamabilidad, estas se tratarán a continuación.

B.2.2.1. Fuerza La fuerza es un término tradicionalmente usado para describir varios grados de explosivos, aunque no es una medida real de la capacidad de estos de realizar trabajo; a este término en ocasiones se le llama potencia y se origina de los primeros métodos para clasificar dinamitas (OCE, 1972; USACE, 1989; Favela, 2001).

La fuerza es generalmente expresada como un porcentaje que relaciona el explosivo estudiado con un explosivo patron (nitroglicerina). El porcentaje puede ser expresado de dos formas: 1) comparando los pesos del explosivo analizado y el patron ("Fuerza por peso"), 2) comparando los explosivos con un volumen base y que comunmente es un cartucho de explosivo ("Fuerza por cartucho").

Un ejemplo de como se comparan explosivos en fuerza por peso es: 1 kg de dinamita extra con 40 % de fuerza por peso es equivalente a 1 kg de gelatina amoniaca (En Colombia Indugel) con 40 % de fuerza por peso; la diferencia entre estas dos está en su diferente velocidad de detonación. Una comparación errada es suponer que un explosivo de 50 % en fuerza por peso es dos veces mas fuerte que uno de 25 % o cinco veces uno de 10 %, estas relaciones no son correctas debido principalmente a que los explosivos de mayor fuerza ocupan casi el mismo espacio en el barreno, pero producen más gases y por lo tanto las presiones son mayores y el explosivo resulta más eficiente (Favela, 2001).

El termino fuerza fue aplicado cuando las dinamitas eran una mezcla de nitroglicerina y un relleno inerte (normalmente diatomita o también llamada tierra dictomacea), entonces una dinamita al 60 % contenía 60 % de nitroglicerina por peso de dinamita y era tres veces mas fuerte que una dinamita de 20 %. Las dinamitas nuevas contienen rellenos activos tales como el nitrato de sodio, esto hace que ellas sean hasta 1,5 veces mas potentes que las antiguas.

Usualmente en las dinamitas se trabaja con la fuerza por peso, mientras que las gelatinas con la fuerza por cartucho. La fuerza no es una buena base para comparar explosivos, un mejor indicador que permite comparar explosivos es la presión de detonación (Dick, 1968)

B.2.2.2. Velocidad de detonación Es la velocidad con la cual la onda de detonación viaja por el explosivo, puede ser expresada para el caso de explosivos confinados como no confinados; por si misma es la propiedad más importante cuando se desea clasificar un explosivo. Como en la mayoría de casos el explosivo esta confinado en un barreno, el valor de velocidad de detonación confinada es el más importante.

La velocidad de detonación de un explosivo depende de: La densidad, de sus componentes, del tamaño de las partículas y del grado de confinamiento. Al disminuir el tamaño de las partículas dentro del explosivo, incrementar el diámetro de la carga o incrementar el confinamiento aumentan las velocidades de detonación (ver Figura B.1) Las velocidades de los explosivos inconfinados son generalmente del orden del 70 % al 80 % respecto a las velocidades de explosivos confinados.

La velocidad de detonación en un medio confinado para explosivos comerciales varia entre 1800 a 8000 m/s (USACE, 1989; OCE, 1972; Persson et al., 1994). La velocidad para algunos explosivos y agentes explosivos es sensible a cambios en el diámetro del cartucho y del barreno; cuando el diámetro se reduce, la velocidad se reduce hasta alcanzar un diámetro

Figura B.1. Propiedades relativas de los explosivos comerciales



Adaptado de Dick (1968)

critico en que no hay propagación de la onda de detonación y por lo tanto no hay explosión.

B.2.2.3. Densidad y gravedad específica La densidad del explosivo es usualmente indicada en términos de gravedad específica, la gravedad específica de explosivos comerciales varía de 0.6 a 1.7. Los explosivos densos usualmente generan mayores velocidades de detonación y mayor presión; estos suelen ser utilizados cuando es necesaria una fina fragmentación de la roca. Los explosivos de baja densidad producen una fragmentación no tan fina y son usados cuando la roca está diaclasada o en canteras en las que se extrae material grueso.

La densidad de los explosivos es importante en condiciones de alta humedad, ya que una densidad alta hace que el explosivo sea poco permeable. Un explosivo con gravedad específica menor a 1.0 no se entrapa en agua.

B.2.2.4. Presión de detonación La presión de detonación, depende de la velocidad de detonación y de la densidad del explosivo, y es la sobrepresión del explosivo al paso de las ondas de detonación. La amplitud de la onda –de esfuerzo– transmitida al medio (roca) en una explosión está relacionada con la presión de detonación. La reflexión del pulso de choque en la cara libre de la voladura es uno de los mecanismos que se utilizan para triturar la roca. La presión de detonación generalmente es una de las variables utilizadas en la selección del tipo de explosivo.

Existe una relación directa entre la velocidad de detonación y la presión de detonación; esto es, cuando aumenta la velocidad aumenta la presión. La relación entre la presión, velocidad

de detonación y densidad del explosivo se puede representar de la forma

$$P = 4,18 \times 10^{-7} \left(\frac{DC^2}{1 + 0,80D} \right) \quad (\text{B.1})$$

(Brown, 1956), donde P es la presión de detonación y sus dimensiones son en kbar, D es la densidad y C la velocidad de detonación en pies/s.

Una alta presión de detonación (alta velocidad de detonación) es utilizada para fragmentar rocas muy duras como el granito (7 en la escala de Mohs¹ y una densidad aproximada de 2.5), mientras que en rocas suaves como los esquistos (rocas sedimentarias y metamórficas con menos de 4 en la escala de Mohs) puede ser necesaria una baja presión de detonación (baja velocidad de detonación) para su fragmentación; la roca caliza, que es el material que extrae Cementos del Valle en la mina La Calera, tiene una propiedad importante y es la de tener diferente dureza en direcciones perpendiculares, con 4.5 a 5 en escala de Mohs en dirección longitudinal y 6.5 a 7 en la escala de Mohs en dirección lateral (Griem y Griem-Klee, 2001).

B.2.2.5. Sensibilidad Es la medida de la facilidad de iniciación de los explosivos, es decir, el mínimo de energía, presión o potencia necesaria para que ocurra la iniciación. Lo ideal de un explosivo es que sea sensible a la iniciación mediante cebos (estopines) para asegurar la detonación de toda la columna de explosivo, e insensible a la iniciación accidental durante su transporte y manejo.

Una prueba estándar utilizada para determinar la sensibilidad de un producto explosivo es la sensibilidad al fulminante (los fulminantes están catalogados del número 4 al 12 y se diferencia en las cantidades de fulminato de mercurio y clorato de potasio), para esto se utiliza un fulminante número 6 (2 gramos de una mezcla de 80 % de fulminato de mercurio y 20 % de clorato de potasio), si el producto estalla al quemar este fulminante se dice que el producto es un explosivo, de lo contrario se le denomina agente explosivo. Adicionalmente para comparar las sensibilidades entre diferentes productos se utilizan fulminantes de diferente potencias, cuanto más alto sea el número de la cápsula mayor será la sensibilidad del explosivo.

B.2.2.6. Resistencia al agua La resistencia al agua en un explosivo es medida como la habilidad de resistir el agua sin deterioro o pérdida de sensibilidad, más precisamente, es el número de horas que el explosivo puede estar sumergido en agua y aún ser detonado.

Si hay poca presencia de agua en el barreno o el tiempo entre la carga de los explosivos y la detonación es corto, entonces un explosivo con catalogación de resistencia al agua “Buena” puede ser suficiente; si el explosivo esta expuesto en un tiempo prolongado a el agua o esta

¹La escala de Mohs mide la dureza relativa de los minerales, va desde 1 en el mineral de yeso hasta 10 en el diamante

se percola al barreno se debe utilizar un explosivo con catalogación de resistencia al agua “Muy buena” o “Excelente”. En general los geles explosivos tienen la mejor resistencia al agua. Los explosivos de alta densidad tienen una buena resistencia al agua, mientras que los de baja densidad tienen baja o ninguna.

B.2.2.7. Emanaciones La detonación de explosivos comerciales produce vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno, los cuales, aunque no son tóxicos, forman gases asfixiantes como monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

B.2.3. Tipos de explosivos

Un explosivo es un compuesto químico o mezcla de componentes que, cuando es calentado, impactado, sometido a fricción o a choque, produce una rápida reacción exotérmica liberando una gran cantidad de gas y produciendo altas temperaturas y presiones en un breve instante de tiempo.

Los ingredientes utilizados en la fabricación de explosivos generalmente son: bases explosivas, transportadores de oxígeno, combustibles, antiácido y absolvedores, algunos ingredientes realizan más de una función en los explosivos. Una base explosiva es un líquido o sólido que al aplicarse suficiente calor, o al ser sometido a un choque fuerte, se descompone en gases con la liberación de una gran cantidad de calor. Los combustibles combinados con exceso de oxígeno previenen la formación de óxidos de nitrógeno. Los transportadores de oxígeno aseguran la oxidación completa del carbono para prevenir la formación de monóxido de carbono. La formación de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono no es deseable ya que produce gran cantidad de humo, pero también es indeseable por que resulta en un bajo calor de detonación y por consecuencia poca eficiencia de la voladura. Los antiácidos son utilizados como estabilizantes en el almacenamiento. Los absorbentes absorben líquidos en bases explosivas (OCE, 1972).

Existen varios tipos de explosivos que son utilizados en canteras y en minería superficial, entre ellos están (Otra catalogación más elaborada se encuentra en Persson et al., 1994):

Dinamitas En esta catalogación entran todas las mezclas de nitroglicerina, diotomita y otros componentes; existen varios tipos como: nitroglicerina dinamita, Dinamita amoniacal de alta densidad (dinamita extra), dinamita amoniacal de baja densidad.

Geles Entre estos se encuentran los geles explosivos, que son fabricados a partir de nitrocelulosa y nitroglicerina; el *straight* gel, fabricado a partir de los geles explosivos y combustibles gelatinizados. Este explosivo generalmente tiene una consistencia plástica y es de alta densidad; otro es el gel amoniacal (gel extra) y los semi-geles.

Agentes explosivos Son mezclas de combustibles y oxidantes, entre ellos tenemos los

agentes explosivos secos como el *ANFO* y las lechadas explosivas.

De la gran cantidad de explosivos, muchos de los cuales no se incluyen en la catalogación anterior, los más usados en canteras y minería son: los geles y los agentes explosivos; de estos se hablara a continuación.

B.2.3.1. Geles

B.2.3.1.1. Gel explosivo La gelatina (gel) explosiva es fabricada añadiendo nitrocelulosa a la nitroglicerina, también se le añade un antiácido para estabilizar la mezcla para su almacenamiento. Este explosivo tiene altas velocidades de detonación y un excelente comportamiento de resistencia al agua, pero emite un gran volumen de humo. Este es el explosivo comercial más potente, también es llamado "*oil well explosive*".

B.2.3.1.2. straight gel Es un explosivo plástico denso fabricado a partir de nitroglicerina (o explosivos con base en petróleo gelatinizado), nitrocelulosa, carbon combustible ² y sulfuro. Este tipo de geles tienen una excelente resistencia al agua (son a prueba de agua). Este explosivo es fabricado con una fuerza por peso (ver sección B.2.2.1 en la página 99) del 20 % al 90 %. Este tipo de explosivos es usado cuando se necesita fragmentar rocas muy duras, o en el fondo del barreno como inicializador de la un agente explosivo. El straight gel ha sido sustituido por el gel amoniacal, que es mas económico, aunque se sigue usando en trabajos que requieran un alto grado de resistencia al agua o en en trabajos bajo el agua.

Los straight geles tienen dos velocidades de detonación características, la más rápida ocurre cuando esta confinado mientras que velocidades mucho menores resultan de un confinamiento insuficiente o una presión hidrostática alta. Cuando existe una presión hidrostática externamente alta puede no inicializarse la voladura; también se han desarrollado geles de alta velocidad, que son iguales a los straight geles pero con una densidad ligeramente menor, más sensitivos a la detonación con velocidad de detonación constante aunque varíe el grado de confinamiento o la presión hidrostática aumente; este tipo de geles es utilizado particularmente en exploración geofísica.

B.2.3.1.3. Gel amoniacal En este tipo de gel explosivo es reemplazada una cantidad de nitroglicerina y nitrato de sodio por nitrato de amonio. Este gel explosivo se puede comparar con el *straight gel* en cuanto a su fuerza; el explosivo fue desarrollado como un reemplazo económico del *straight gel*. El gel amoniacal es fabricado con una fuerza por peso que varia entre 30 % y 80 %. Comparado con el anterior este tiene menor velocidades de detonación, menos resistencia al agua y genera menor cantidad de gases (lo que lo hace muy usado en minería subterránea). La gran fuerza (mayor a 70 %) hace que este explosivo sea un buen inicializador de los agentes explosivos.

²Combustible carbonaceo?

B.2.3.1.4. Semigeles La fuerza por peso de este tipo de explosivos varia entre el 60 % y 65 %. Este explosivo tiene las mismas propiedades que el gel amoniacal; los semigeles son usados como reemplazo de los geles amoniacales cuando es necesaria una mayor resistencia al agua; este explosivo es aun mas económico que el gel amoniacal. Los semigeles tiene velocidades de detonación entre 3200 y 3600 m/s, a diferencia de otros explosivos, este no se ve notoriamente afectado por el confinamiento.

En la tabla B.1 se incluyen algunas de las propiedades de los geles, tales como: Fuerza por peso y cartucho, gravedad especifica, velocidad de detonación en un medio confinado, resistencia al agua y calidad en emanaciones, conceptos que se explican en la sección B.2.2.

B.2.3.2. Agentes explosivos Los agentes explosivos consisten en una mezcla de combustible y agentes óxidantes, ninguno de los cuales se los considera explosivos (ver sensibilidad en la página 102). Un agente explosivo consiste de nitratos inorgánicos y combustible de carbon, puede contener otras sustancias no explosivas tales como polvo de aluminio o ferrosilicona, con el fin de aumentar su densidad. La adición de explosivos y calor de detonación, por ejemplo *TNT*, a este tipo de mezcla cambia la clasificación de agentes explosivos a explosivos. Debido a su incesibilidad los agentes explosivos deben ser inicializados por un explosivo.

B.2.3.2.1. Agentes explosivos secos El Agente explosivo seco mas utilizado es una mezcla de nitrato de amonio granuloso (similar al de los abonos) y combustible (diesel), a este explosivo se le llama *ANFO* por sus siglas en inglés "*Ammonium Nitrate – Fuel Oil*". Este producto ha reemplazado a las dinamitas y gelatinas explosivas en voladuras de minas y canteras. En la practica este producto se fabrica con 94 % de nitrato de amonio y 6 % de combustible Diesel.

Un inadecuado cebado (proceso de inicialización del explosivo) en la carga de *ANFO* implica una baja velocidad de detonación inicial, esto lleva a fallo de la voladura. Para que esto no ocurra se utilizan explosivos de alta velocidad y presión distribuidos a lo largo del barreno que contiene *ANFO*. La velocidad de detonación en barrenos cargados con *ANFO* depende de el diámetro del barreno, a mayor diámetro mayor velocidad de detonación, como se observa en la tabla B.2. Diámetros menores a 7 cm no son recomendados (OCE, 1972).

La gravedad especifica del *ANFO* varia entre 0,75 y 0,95, dependiendo de la densidad y tamaño de las partículas del AN (Nitrato de Amonio). Las principales ventajas que tiene el *ANFO* sobre otros explosivos convencionales son: Es mas seguro por su baja sensibilidad, es fácil de cargar en los barrenos y tienen un precio muy bajo. En su forma fluida este agente explosivo tiene la ventaja adicional de llenar todos los espacios en el barreno, lo que asegura un eficiente uso del explosivo.

B.2.3.2.2. Lechadas explosivas Este tipo de agentes explosivos contiene nitrato de amonio en una solución acuosa. Dependiendo de los ingredientes pueden ser clasificados como agentes explosivos o como explosivos. Las lechadas explosivas (*slurry blasting*) contienen ingredientes no explosivos combustibles tales como carbon y aluminio, y por lo general no son sensitivos a detonación de cápsulas (ver sección sobre sensibilidad en la página 102) a menos que se incluya un explosivo como *TNT*.

La velocidad de detonación de este tipo de agentes explosivos varia entre 3700 y 5500 m/s, dependiendo del tipo de ingredientes utilizados, el diámetro del barreno, el grado de confinamiento y la densidad. Sin embargo, la velocidad de detonación de las lechadas explosivas no depende tanto de el diámetro del barreno como en el caso del *ANFO*.

La gravedad especifica de este tipo de agentes explosivos esta entre 1,1 y 1,6. La lechada explosiva tiene las mismas ventajas que los agentes explosivos tales como el *ANFO*, pero el rendimiento es mayor a ellos debido a que las velocidades de detonación y densidades son mayores.

B.3. Técnicas básicas utilizadas en voladuras

Las voladuras se realizan con varios propósitos, entre ellos: mover y remover roca, controlar superficies de las rocas en excavaciones y triturar la roca hasta un tamaño deseado; para alcanzar cada uno de estos propósitos se utilizan técnicas diferentes. En esta sección se muestran técnicas comúnmente empleadas en voladuras de minería superficial y excavaciones superficiales tales como patrones de voladuras y uso de retardos.

B.3.1. Patrones de voladuras

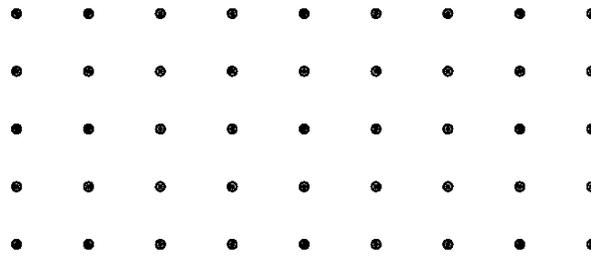
B.3.1.1. Distribución de barrenos - Plantillas - Mallas Las plantillas son configuraciones regulares de barrenos dispuesta en planta y en sección. Las configuraciones de barrenos pueden tener muchas formas, pero las mas usadas son: Fila única como se indica en la Figura B.3(a), arreglos rectangulares regulares como en la Figura B.3(b) y barrenos en patrón escalonado representado en la Figura B.3(c). También se utilizan patrones de arreglos semi-regulares o irregulares en áreas donde no se puedan utilizar patrones regulares.

Existen dos términos utilizados en los arreglos de barrenos: el primero, el “espaciamiento”, que es la distancia lateral entre centros de barrenos; el segundo, el “borde”, se define como la distancia desde una fila de barrenos y la cara de la excavación o la distancia entre filas que son detonadas en secuencia. Los arreglos de barrenos en perfil se caracterizan por la profundidad del barreno (o altura de barreno) y su inclinación (ver Figura B.3). En algunos casos se suelen mezclar barrenos a diferentes profundidades con el fin de obtener resultados

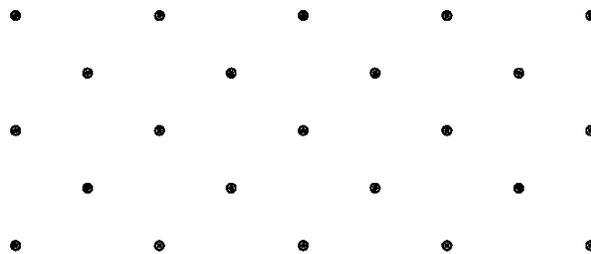
Figura B.2. Vista en planta de arreglos básicos de barrenos.



(a) Fila única



(b) Patron regular

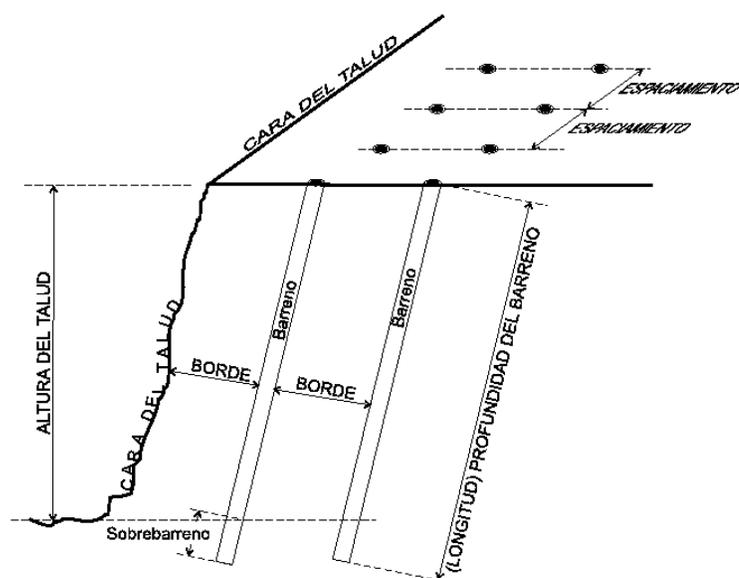


(c) Patron escalonado

particulares.

B.3.1.2. Voladuras de una sola carga En las voladuras con una sola carga existen dos técnicas usadas, la primera es realizar pequeñas voladuras de un solo barreno en bloques de roca medianos con el fin de fragmentarla para un mas fácil transporte, se muestra en la Figura B.5(a), a esta técnica de voladuras se le comúnmente “Volo”. La otra técnica de una sola carga es usada en grandes movimientos de masa, consiste en usar una gran cantidad de explosivos dispuestos generalmente en túneles. Esta ha sido usada para la construcción de represas (Adushkin et al., 1995), sus dos principales configuraciones son: el “Hueco de serpiente”, Figura B.5(b), que es un túnel con una sola cavidad para los explosivos y el “Túnel coyote” tiene forma de T como se muestra en la Figura B.5(c).

Figura B.3. Vista en perfil de un arreglo de barrenos.



B.3.2. Patrones de retardo

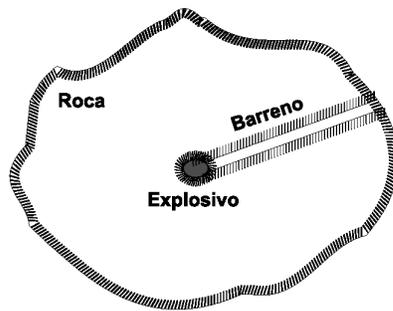
Las secuencia de retardo (secuenciación) consiste en detonar los barrenos en secuencias de tiempo predeterminados. Para obtener una secuencia de retardo se utilizan detonadores eléctricos, no eléctricos (micro-retardados), o cordón detonante. Los patrones de retardos más utilizados son: retardo por fila, retardo por columna y retardo escalonado. Algunas secuencias típicas de retardo se muestran en la Figura B.6, la última de las cuales es usada en "La Calera" (ver secuencia en Figura B.5).

En minería superficial se usan plantillas de barrenos con patrones de retardo, el fin de mover y remover roca, conseguir una fragmentación de roca adecuada y controlar el nivel de vibraciones.

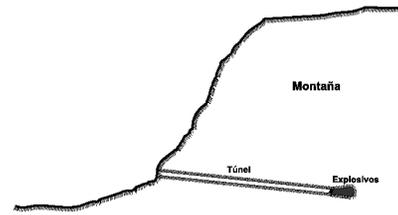
B.4. Explosivos y técnicas y su relación con las vibraciones

En el caso de las voladuras la energía (capacidad de realizar trabajo) es usada en el fracturamiento y movimiento de las rocas, así como en la generación y transmisión de vibraciones y ondas en el suelo y el aire. El trabajo realizado en el proceso de la voladura depende de la cantidad (peso) del explosivo utilizado. Para propósitos prácticos, puede suponerse que

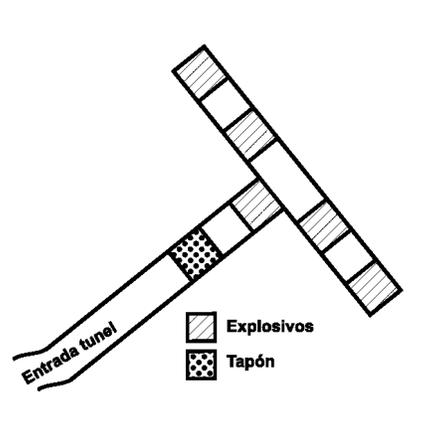
Figura B.4. Técnicas de voladuras con una sola carga.



(a) Barreno para fragmentación de roca



(b) Vista en perfil de un túnel hueco de serpiente



(c) Vista en planta de un túnel Coyote

todos los explosivos comerciales utilizados en la actualidad tienen la misma energía por por unidad de peso. La cantidad de explosivos detonados por instante de tiempo (definido generalmente como 8 ms) es la que determina la energía total liberada en la explosión. En física la energía es una cantidad que se expresa en unidades de fuerza por distancia, aunque no es estrictamente cierto pero es útil en voladuras la energía se relacionada con el peso del explosivo utilizado.

El grado de confinamiento de un explosivo determina la fracción de energía aprovechada en el fracturamiento de la roca y la magnitud de las vibraciones transmitidas al suelo y al aire. A mayor confinamiento, mas energía es utilizada en el fracturamiento de la roca y generación de vibraciones y menos en la generación de ondas acústicas. Adicionalmente el espaciamiento y la secuenciación de la voladura influyen en el grado de confinamiento de los explosivos.

El tipo de roca tiene una débil influencia en la velocidad de partícula máxima. Cuando la

Figura B.5. Fotos de la secuencia una voladura en la mina La Calera



densidad de las rocas es mayor (mayor velocidad de onda compresional -P-), es también mayor la velocidad de partícula cerca a la voladura, sin embargo, a grandes distancias puede ocurrir lo contrario.

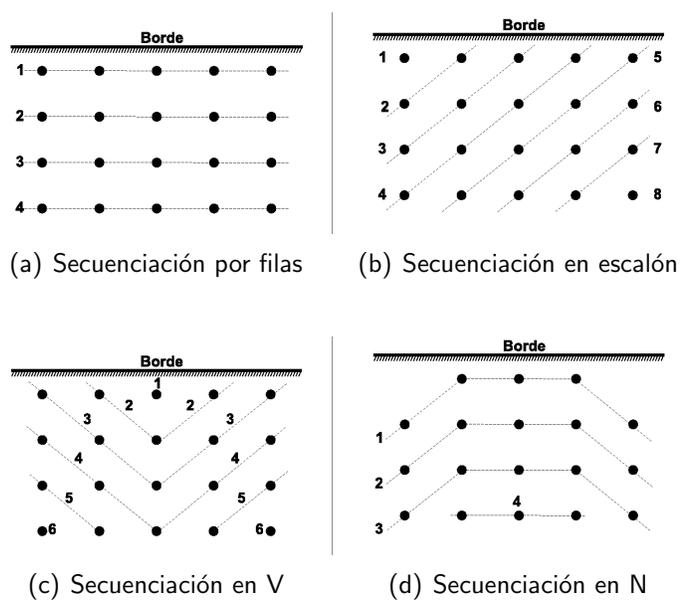
La atenuación es la variación de la velocidad de partícula pico con la distancia, para las voladuras generalmente se expresa como

$$V_{\text{res}} = K \left(\frac{R}{W^m} \right)^{-n} \quad (\text{B.2})$$

(Persson et al., 1994; Dowding, 2001), donde A y n son parámetros estimados (denominados α o β en secciones anteriores), R es la distancia de la voladura a un sitio determinado (sitio de medición), W es la carga por unidad de tiempo (8 ms), y V_{res} es la máxima velocidad de partícula en el sitio de medición. Para una explosión totalmente confinada y esférica en un medio infinito y elástico, la teoría indica que $m = 1/3$ y $n = 1$ ó 2 dependiendo de la distancia desde la explosión. Las cargas usadas en la practica son cilíndricas y no esféricas, además el medio no es infinito por que hay una superficie libre que en muchos casos es vertical. Por medio de un análisis dimensional se puede llegar a un valor de $m = 1/2$ para cargas cilíndricas, mientras que el valor de n varia entre 1.4 y 1.8.

Las vibraciones del suelo causadas por una explosión dada varían en frecuencia así como en amplitud con respecto a la distancia (R). Como resultado de una explosión un rango amplio

Figura B.6. Secuenciación típica de mallas.



de frecuencias se presentan en las vibraciones del suelo, pero algunas frecuencias o rangos de frecuencias se presentan predominantemente. Estas frecuencias dominantes decrecen con la distancia desde la explosión. El rango de frecuencias registrados en vibraciones inducidas por voladuras esta entre 0.5 y 200 Hz. En algunos casos la frecuencia predominate esta asociada con el borde (Figura B.3, B) y la velocidad de onda P (C_P), estando definida como

$$f_1 = \frac{C_P}{2B}, \quad (\text{B.3})$$

o el también se puede relacionar con la altura (H) de la cara y la velocidad de ondas S (C_S), en cuyo caso será

$$f_2 = \frac{C_S}{4H}; \quad (\text{B.4})$$

estas ecuaciones se derivan de observaciones de vibraciones en el suelo (OCE, 1972; USACE, 1989). Cuando las mediciones se hacen en afloramiento de roca, la frecuencias predominantes usualmente están entre 10 y 100 Hz; cuando las mediciones se realizan sobre un deposito de suelo de mas de 3 metros la frecuencia predominante esta en el rango de 1 a 40 Hz. Un gran número de voladuras secuenciales micro-retardadas incrementan el contenido de bajas frecuencias en las vibraciones.

B.4.1. Reducción de niveles de vibración

B.4.1.1. Reducir la carga por retardo Para reducir el daño debido a vibraciones del suelo, es necesario reducir la relación carga/retardo a un valor en el cual la maxima velocidad

de partícula sea menor al criterio de daño. Para lograr la fragmentación deseada, es necesario tener un factor de fragmentación a un nivel mínimo. El factor de fragmentación esta definido como el peso de explosivo (W_t) entre el volumen total de roca extraída. Dependiendo del tipo de roca, el borde, y el máximo tamaño de fragmentos necesario, el factor de fragmentación adecuado estará en el rango de 0.3 a 0.6 kg/m³. Para lograr ambos objetivos (factor de fragmentación y nivel de vibraciones) es necesario incrementar el número de barrenos.

B.4.1.2. Intervalos de retardo Existe una relación inversa entre el tiempo de retardo de la voladura y el nivel de vibración que esta genera. El hecho de cambiar el intervalo de retardo de 5 ms a 9 ms implica una reducción de las vibraciones de 2 a 3 veces en su magnitud (Lutton, 1976). Una causa de tal disminución se debe a que si la onda de presión de un barreno viaja desde éste hasta la cara libre de la voladura y de aquí a otro barreno que esta a punto de detonar, entonces el segundo barreno estará mas confinado y por lo tanto el explosivo suministrara una mayor cantidad de energía, la cual se utilizara en fragmentación.

Los intervalos de retardo pueden producir interferencia destructiva, esta previene la superposición de picos de vibración fuera del área de la voladura. La interferencia constructiva dentro del área de voladura y contigua produce un mayor grado de fracturamiento de la roca, efecto buscado en muchas minas y canteras.

B.4.1.3. Reducción del borde Reduciendo el borde se reduce la duración del confinamiento y menos energía es utilizada en vibraciones del terreno, pero, mas energía es convertida a ondas acústicas.

Tabla B.1. Propiedades de los geles explosivos.

Fuerza peso [%]	Fuerza cartucho [%]	Gravedad especifica	Velocidad det. confinada [m/s]	Resistencia Agua	Emanaciones
Gel Explosivo					
100	90	1.3	7500 - 8000	Excelente	Pobre
Straight gel					
90	80	1.3	7000	Excelente	Pobre
70	70	1.4	6400	Excelente	Pobre
60	60	1.4	6000	Excelente	Bueno
50	55	1.5	5600	Excelente	Bueno
40	45	1.5	5000	Excelente	Bueno
30	35	1.6	4400	Excelente	Bueno
20	30	1.7	3300	Excelente	Bueno
Gel amoniacal					
80	72	1.3	6000	Excelente	Bueno
70	67	1.4	5800	Excelente	Muy Bueno
60	30	1.4	5300	Excelente	Muy Bueno
50	52	1.5	5000	Excelente	Muy Bueno
40	45	1.5	4800	Excelente	Muy Bueno
30	35	1.6	4200	Excelente	Muy Bueno
Semigeles					
63	60	1.3	3600	Muy bueno	Muy Bueno
63	50	1.2	3600	Muy bueno	Muy Bueno
63	40	1.1	3500	Bueno	Muy Bueno
63	30	0.9	3200	Aceptable	Muy Bueno

Adaptado de OCE (1972)

Tabla B.2. Velocidad de detonación y concentración de carga de ANFO con relación al diámetro del barreno

Díámetro barreno [cm]	Velocidad det. confinada [m/s]	Concentración carga en barreno [kg/m]
3,8	2100 – 2700	0.9 – 1.0
5,1	2600 – 3000	1.6 – 1.9
7,6	3000 – 3300	3.7 – 4.5
10,2	3400 – 3600	6.6 – 7.7
12,7	3500 – 3800	10.3 – 12.2
15,2	3700 – 3900	14.7 – 17.4
17,8	3800 – 4000	19.8 – 23.5
20,3	3800 – 4100	26.2 – 31.0
22,9	3900 – 4100	32.8 – 39.9
25,4	4000 – 4100	40.5 – 48.6
27,9	4000 – 4100	49.2 – 58.7
30,5	4050 – 4100	59.0 – 69.7

Adaptado de OCE (1972)