

CAPÍTULO 16

NORMAS Y ASPECTOS GENERALES

La voladura de rocas se considera un trabajo de alto riesgo, si bien su índice de frecuencia en relación con otros tipos de accidentes es menor, su índice de gravedad es mucho mayor, generalmente con consecuencias muy graves que no solamente afectan al trabajador causante de la falla, sino también a las demás personas, equipos e instalaciones que le rodean.

Según estadísticas en el ámbito mundial, los accidentes con explosivos se producen mayormente por actos inseguros de los operarios, que por condiciones inseguras.

La inexperiencia o negligencia por un lado y el exceso de confianza por el otro han mostrado ser motivo del 80 a 90% de los accidentes.

Aunque no es razón primordial del presente tema tratar el aspecto personal, hay al menos 10 factores humanos que causan accidentes, los que en el caso especial del manipuleo de explosivos y voladura, deben ser tomados muy en cuenta por todos los involucrados, especialmente por los supervisores responsables de la voladura; éstos son:

A. Negligencia:

- Dejar de lado las normas de seguridad establecidas.
- No cumplir con las instrucciones recibidas.
- Permitir el trabajo de personas no capacitadas o dejarlas actuar sin supervisión.
- Dejar abandonados restos de explosivos o accesorios sobrantes del disparo.

B. Ira, mal humor; consumo de alcohol y drogas:

Contribuyen a que la persona actúe irracionalmente y que desafíe el sentido común.

C. Decisiones precipitadas:

El actuar sin pensar o muy apresuradamente conduce a actitudes peligrosas.

D. Indiferencia:

Descuido, falta de atención; no estar alerta o soñar despierto inducen a cometer errores en el trabajo.

E. Distracción:

Interrupciones por otros cuando se están realizando tareas delicadas o peligrosas, problemas familiares, bromas pesadas, mal estado de salud.

F. Curiosidad:

El hacer una cosa desconocida simplemente para saber si lo que pasa es riesgoso, siempre preguntar a quien sabe.

G. Instrucción inadecuada, ignorancia:

En este caso una persona sin entrenar o mal entrenada es un riesgo potencial de accidentes.

H. Malos hábitos de trabajo:

Persistencia en cometer fallas señaladas a pesar de las recomendaciones impartidas, no usar los implementos de norma, desorden.

I. Exceso de confianza:

Correr riesgos innecesarios por comportamiento machista, rebeldía o indisciplina, demasiado confiado o muy orgulloso para aceptar recomendaciones.

J. Falta de planificación:

Se resume en el actuar de dos o más personas, cada una de ellas dependiendo de la otra para realizar algo que nunca se realiza.

Todo supervisor debe tener presente que los accidentes ocurren inesperadamente, pero que son previsibles; que la capacitación constante y adecuada es condición *"sine qua non"* para la seguridad, y que el trabajo es de equipo, con responsabilidad compartida. Debe actuar siempre con criterio y responsabilidad, tener experiencia en el trabajo, buen trato al personal pero con posición de autoridad y ser perseverante en el seguimiento detallado de todas las etapas del trabajo.

Debe conocer las normas y reglamentos de trabajo y seguridad internos y oficiales vigentes, las características y especificaciones de los explosivos y demás insumos que emplea y las condiciones de los frentes de trabajo (ventilación, estabilidad, accesibilidad, vigilancia y demás).

En voladura una sola persona debe ser responsable de todo el proceso de disparo; delegará funciones, pero al final todos deben coordinar con él e informarle verazmente todos los detalles a su cargo.

UTILIZACIÓN DE EXPLOSIVOS COMERCIALES

El empleo de explosivos en minería, obras de construcción, demolición y otros casos especiales, están normados en todo el mundo por reglamentos específicos en cada país y para algunos casos, como el de transporte marítimo o aéreo internacional, por normas específicas como las de Bruselas (NABANDINA).

En el Perú corresponden a los del DICSCAMEC "Reglamento de Control de Explosivos de uso civil" DS 019-71/IN-26/08/71 con sus modificaciones y ampliaciones, como el DL 25707-21/8/92 (emergencia) el DL 25643-29/7/92 (Importación y comercialización) modificado por el DLEG 846-9/9/96, la RD 112-93-TCC/15-15-2/7/93 (transporte) y la circular 46-106-92 SUNAD-23/11/92 (verificación), más la Ley General de Minería 18880 DS 034-73 EM-DM, con su Reglamento de Seguridad e Higiene Minera, Título III, Capítulo I, Sección VI Explosivos (artículos 108 al 215 y anexos) aprobado por el DS 023-92 EM-9/19/92, que todo usuario debe conocer y aplicar, y sobre los que se hace los siguientes comentarios generales:

TRANSPORTE DE EXPLOSIVOS Y DETONADORES

En el transporte es fundamental reducir los riesgos de incendio, detonación, robo y manipuleo por personas no autorizadas; debe ser efectuado solamente por personas competentes con suficiente conocimiento de su sensibilidad y efectuarse sólo en vehículos en perfectas condiciones de rodaje, llevando los banderines, extintores y demás implementos de reglamento. Los explosivos transportados en camión abierto deberán cubrirse con una lona tanto para prevenir pérdidas como el deterioro por lluvia.

Se evitará el maltrato del material por los operarios encargados de cargar o descargar el vehículo, los que muchas veces por desconocimiento o apuro arrojan las cajas al suelo o las estiban desordenadamente. Los agentes de voladura tipo ANFO o emulsión a pesar de tener menor sensibilidad que las dinamitas y las emulsiones e hidrogeles (sensibilizados al detonador y explosiones fortuitas) por necesitar mayor energía para el arranque, no dejan de ser explosivos, y deben ser tratados con las mismas normas de cuidado.

Cualquier detonador o retardo independientemente de su construcción es muy sensible al daño mecánico y debe ser tratado con mucho cuidado.

Una de las más severas prohibiciones es la que señala que no se transportará ni almacenará explosivos junto con iniciadores de ningún tipo.

Existen tablas de compatibilidad de productos explosivos para su transporte y almacenaje, y símbolos pictóricos para el etiquetado y el rotulado de su embalaje (ITINTEC P-339.015; IATA/OACI; ONU; DOT/USA).

Por otro lado, el traslado de explosivos y detonadores con personal, desde las bodegas o polvorines de mina hasta los frentes de trabajo, debe efectuarse en forma separada, manteniendo prudencial distancia entre ellos; por ningún motivo los portadores se detendrán para observar cosas, ayudar a otros trabajadores o simplemente conversar; nunca deben dejar el material en otro lugar que el de trabajo. Los manojos de guías “armadas” no se deben golpear ni arrojar imprudentemente al piso.

No se debe transportar explosivos sobre las locomotoras, ni permitir que contacten con líneas eléctricas activas.

Durante la carga y descarga de vehículos debe apagarse el motor y sólo permanecerá alrededor el personal autorizado (mínimo 50 m para cualquier otra actividad).

ALMACENAJE DE EXPLOSIVOS EN LA MINA U OBRA

A. Polvorines

Los explosivos deben guardarse en locales adecuados, protegidos y con acceso limitado, denominados “polverines” que pueden ser construidos en superficie o excavados como bodegas subterráneas.

La regla principal es estar seguro de que su explosión fortuita no pueda causar daños a personas e instalaciones. Esto significa que explosivos y detonadores deben ser almacenados de tal modo que sean inaccesibles a personas no autorizadas y que estarán protegidos contra eventos adversos y desastres naturales e incendios. Varios factores influyen en el diseño y ubicación de los polvorines, entre ellos: la proximidad a áreas de trabajo o de servicios, a carreteras, vías férreas, líneas eléctricas troncales, áreas desoladas o de vivienda, disponibilidad de protección natural del terreno o necesidad de hacer parapetos adecuados. También la posibilidad de que estén planificadas futuras construcciones en el área propuesta para instalar el polvorín. Los de superficie deben ser construidos con materiales que, en caso de explosión, se desintegren fácilmente para no causar daños a otras instalaciones y en los parajes con frecuentes tempestades eléctricas deben contar con pararrayos permanentes.

Los subterráneos deben quedar lejos de los frentes de trabajo y de las instalaciones permanentes de subsuelo, estar protegidos contra filtraciones, inundación y desplomes. En caso de explosión no deberán colapsar los accesos a las zonas propias de laboreo.

La construcción y ubicación de polvorines y el transporte de materiales explosivos está generalmente especificado por reglamentos. En el Perú corresponden a los de la DICSCAMEC, cuyo Reglamento en su Capítulo 5 – Almacenaje, clasifica a los explosivos en 4 categorías y 5 grupos para determinar las distancias mínimas entre polvorines y otras instalaciones, de acuerdo a las cantidades máximas de explosivo depositadas.

Una vez ubicado el polvorín debe estimarse el grado de daño que podría ocurrir si se produce una explosión total del material almacenado. Si se trata de dos o más es importante que no estén ubicados muy cerca entre sí, ya que la detonación de uno puede muy fácilmente transmitirse a los otros, incrementando los daños.

B. Almacenaje

Normalmente se prohíbe almacenar juntos explosivos y detonadores, que deberán guardarse en depósitos independientes y separados a distancia prudencial, tanto si se trata de los polvorines principales como de los auxiliares o “bodegas de mina”, debiendo establecerse además que no se almacenarán combustibles ni otros materiales junto con los explosivos. Tampoco podrá efectuarse trabajos de ninguna clase en los polvorines, aparte de los de traslado y acomodo del material, refiriéndose esto especialmente al “encapsulado” o preparación de guías. No deben tenerse juntos el cordón detonante y los detonadores o retardadores.

Los polvorines deben ser instalados de tal manera que los explosivos almacenados queden protegidos del fuego, robo y deterioro. El ambiente debe ser seco,

limpio y bien ventilado; deben contar con extintor en buenas condiciones, con cerraduras inviolables y con vigilancia efectiva. No se permitirá fumar o hacer fuego en un polvorín o en su alrededor, debiendo tener los avisos de peligro correspondientes.

Cada producto deberá almacenarse de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y a los reglamentos vigentes; las cajas se apilarán por lotes, dejando espacios libres para ventilación (0,6 m a 1m).

Teniendo en cuenta que el tiempo afecta a la vida útil de todos los explosivos y accesorios de voladura, se recomienda despachar siempre los lotes más antiguos hasta agotarlos para reponerlos secuencialmente con los más recientes. Para esto es importante llevar un control de despachos detallado y actualizado.

APLICACIÓN DE EXPLOSIVOS

A. Riesgos predominantes

En los trabajos de voladura a cielo abierto, canteras, carreteras, obras civiles, demoliciones, etc. los riesgos predominantes son: La proyección de fragmentos volantes, vibraciones y onda de concusión. Mientras que en los de subterráneo son los desplomes y el gaseamiento por los humos de la explosión. En ambos tipos de operación pueden ocurrir fallas de disparo como tiros prematuros o retardados, tiros soplados y tiros cortados.

B. Perforación, preparación, carga y disparo

En subterráneo, los accidentes más serios que pueden ocurrir durante la perforación y carga de explosivos son: La detonación prematura de uno a todos los taladros de una tanda y colapso o desprendimiento de rocas del techo o paredes de la galería, razón por la que jamás se deberá iniciar un trabajo si la labor no ha sido previamente "desquinchada" y asegurada.

Durante la perforación se puede golpear o barrenar explosivo; por ejemplo, al perforar muy junto a un barreno cargado o a huecos quedados en un frontón anteriormente disparado y que contengan aún tacos de explosivo sin detonar.

Jamás se deberá reperfilar un hueco quedado por facilitar el trabajo, ya que este error ha costado muchas vidas. Los tiros cortados o fallados y los tacos quedados deberán ser limpiados totalmente con aire comprimido o chorro de agua antes de continuar el trabajo.

La preparación de los cebos en el frontón requiere cuidado; los detonadores no deben golpearse ni forzar su introducción en los cartuchos. El punzón será de madera o bronce. El trabajo debe efectuarse lejos de las perforadoras y de las cajas con explosivo.

El confinamiento de los cartuchos con el atacador no

tiene que ser violento. El cebo no debe atacarse, sólo empujarse suavemente.

Otro riesgo latente en la carga es en el empleo de equipos de carga con aire comprimido y manguera para el ANFO, ya que el rozamiento puede originar cargas electrostáticas lo suficientemente activas como para hacer estallar prematuramente al fulminante, por esta razón sólo deben emplearse mangueras antiestáticas o semiconductoras además de conectar al equipo cargador con línea a tierra.

En subterráneo, donde generalmente se tiene líneas de riel, cables eléctricos, tubos de aire comprimido y ductos de ventilación forzada, el riesgo se incrementa al tender descuidadamente los alambres de disparo eléctrico sobre estas instalaciones.

Antes del disparo el mayor riesgo es el de los tiros prematuros que pueden ocurrir por: maltrato del explosivo o de los detonadores; efecto de descargas eléctricas y corrientes vagabundas sobre detonadores eléctricos no aislados; encendido incorrecto, y uso de guías de seguridad de tramos muy cortos o por desconocer su real velocidad de quemado para controlar el tiempo de encendido de todos los taladros de la tanda y salir a tiempo del frontón.

En el Perú los límites de velocidad de la mecha oficialmente van de 150 a 200 s/m (51 a 53 s/pie) de modo que la costumbre de considerar "un minuto por pie" ha causado muchas víctimas por salidas prematuras.

En superficie, el tránsito de vehículos y personas sobre las líneas de cordón detonante y accesorios de disparo, aún sin llegar al extremo de una explosión, puede malograr una voladura bien planificada. Cortar tramos de cordón detonante golpeándolo con piedras a falta de navaja lo puede iniciar y causar un desastre, más aún si está conectado a taladros cargados. Igualmente riesgoso es golpear las mangueras de conducción de los detonadores no eléctricos de cualquier tipo.

En casos particulares se presentan riesgos específicos por alta temperatura en los taladros, ambiente inflamable con presencia de SO_2 o condiciones climáticas extremas, que requerirán de métodos y de explosivos adecuados para evitar tiros prematuros cuando el personal aún está trabajando en el área de voladura.

C. Descargas eléctricas

Un rayo es perfectamente capaz de activar a un detonador eléctrico, sea que éste se encuentre conectado o no. Por ello, en regiones susceptibles a tormentas eléctricas, se preferirá el empleo de accesorios no eléctricos, y suspenderse las operaciones de carga cuando se presenta una tormenta eléctrica.

D. Disparo

Antes de proceder al disparo se deben verificar todos los empalmes y conexiones del tiro, observar que no queden restos de explosivo, accesorios ni herramientas abandonados, y asegurar que todo el personal se haya retirado a un lugar protegido. En superficie comprobar que todos los accesos al área de la voladura queden controlados por vigías debidamente instruidos que deberán permanecer en su lugar hasta después de la voladura.

El riesgo de accidentes durante la explosión en subterráneo se obvia porque no queda personal cerca, mientras que en superficie la situación es diferente.

La proyección de fragmentos volantes representa un serio problema en la voladura superficial, no sólo por los hombres que pueden ser impactados y heridos, sino también por los equipos o instalaciones que puedan ser dañados. Puede originarse por exceso de carga explosiva, falta de taco, roca muy suelta o fisurada, burden irregular o muy corto, fallas geológicas u oquedades encubiertas, fallas en la perforación o también disparo con tiempos de retardo muy largos entre los taladros.

En la voladura de taladros de gran diámetro y poca profundidad denominada “voladura de cráter”, la menor proporción entre altura de banco y diámetro de hueco no permite mantener un “taco sin carga” de igual longitud que el “burden”, como en la convencional, ya que resultaría en muy bajo factor de carga y deficiente rendimiento del tiro. Esto obliga a compensar el factor cargando los taladros hasta muy cerca de la superficie, lo que lamentablemente produce fuerte proyección de fragmentos volantes. Por esta razón, como medida de precaución, se tratará de evitar su ocurrencia.

El mismo problema presenta la voladura secundaria de plastas y cachorros. Como los fragmentos volantes viajan a distancias y en direcciones impredecibles, se debe tener especial cuidado en la evacuación de personas y equipos a la mayor distancia de “seguridad” posible, y colocar vigías bien instruidos en todos los accesos al área de disparo.

Si bien la vibración y onda acústica no presentan problemas en las operaciones de minería, tienen que ser tomadas muy en cuenta cuando se trata de obras civiles cercanas a poblaciones o instalaciones industriales ya que serán motivo de reclamos, justificados o no, sobre daños a propiedad ajena.

Estos efectos pueden ser reducidos mediante el empleo adecuado de detonadores de retardo, el cálculo cuidadoso de la carga específica de explosivo por hueco, su orientación y buen taponado, habiendo casos incluso en que será necesario el empleo de mallas pesadas de retención para los fragmentos volantes.

El encendido y disparo de explosivos debe hacerse por norma en un horario determinado, conocido por todos los trabajadores.

EVALUACIÓN DE LA VOLADURA, SEGURIDAD

Después del disparo y solamente después de haber pasado un tiempo prudencial el encargado de la operación regresará al lugar de la voladura para efectuar su evaluación de la fragmentación, empuje, volumen removido y sobre rotura. Es en este momento que deberá tener presentes los riesgos de gases tóxicos remanentes, restos de explosivo o accesorios no detonados (tiros fallados) y el desprendimiento de bloques de roca capaces de causar daño. En estos casos se prohibirá el acceso al lugar hasta no haber conjurado el peligro.

Tiros Fallados

Son un punto especial en voladura. A pesar de todas las recomendaciones de preparación y disparo, todo usuario eventualmente se encontrará con este problema que por lo general afecta a uno o más taladros de un tiro, y debe estar preparado para solucionarlo. Se diferencian tres tipos:

a. Tiro retardado

Es el que no sale a su tiempo o junto con el resto de una tanda. Presenta grave riesgo para el personal que reingrese al frente del disparo sin haber dejado pasar un tiempo prudencial.

No es común y puede ocurrir por: defecto del detonador de retardo, por mecha de seguridad defectuosa o demasiado lenta y menos factible, por deterioro del explosivo, que no se inicie de inmediato y sólo arda lentamente hasta llegar a detonar.

b. Tiro soplado

Es un tiro que sale sin “fuerza”, no hay rotura ni empuje adecuado del material. El explosivo es expulsado del taladro o simplemente deflagra sin llegar a detonar.

Generalmente ocurre por mala dosificación de la carga o mala selección del explosivo respecto a la dureza de la roca, mal atacado, falta de potencia del iniciador, falta de taco inerte o uso de explosivo húmedo. También por excesiva distancia entre los taladros.

Los tiros se soplan también por los fenómenos de “efecto canal” o de sobre compresión, que terminan en desensibilización (**death pressing**).

c. Tiro cortado

Es un tiro que no sale por falla de cualquiera de los elementos principales: iniciador, guía o explosivo. Es muy peligroso porque deja “testigos” que deben eliminarse para poder continuar el trabajo.

Pueden originarse por:

1. **Falla de encendido con fulminantes:** pueden ser por falla de fábrica; falta de fuerza del fulminante, mal ajuste con la mecha; demasiada separación entre la pólvora de la mecha y la carga del fulminante; deterioro por humedad, extremos de la mecha deshilachados y falla del conector de mecha rápida que no encienda a la mecha lenta.

2. **Con detonadores eléctricos:** por malos empalmes, corto circuito o escapes a tierra, falta de fuerza del detonador, falta de potencia del explosor, detonadores defectuosos, circuitos mal diseñados o tiempos de retardo inadecuados, y por el empleo de detonadores de diferentes tipos o marcas en un mismo disparo.

3. **Con detonadores tipo Nonel (no eléctricos):** por falla de fábrica, malos empalmes, doblez o corte de la manguera transmisora.

Se ha demostrado experimentalmente que la detonación de un fulminante puede ser transmitida hasta 20 cm de distancia, detalle importante para prevenir detonación en masa de detonadores durante su ensamblaje y en el transporte de guías armadas.

4. **Fallas de la mecha y del cordón detonante:** falla por defecto de fabricación; por ejemplo: discontinuidad del alma de pólvora o de pentrita; velocidad de quemado irregular; fallas en la cobertura o forro que permitan el humedecimiento del explosivo; rompimiento bajo tensión al ser estirado e irregularidades en el diámetro exterior que no permitan el perfecto ajuste del fulminante. Fallas por maltrato: doblez o aplastamiento; corte con navajas sin filo o con golpe de piedras, y cortes de las líneas tendidas por piedras o fragmentos volantes durante el disparo.

5. **Fallas del explosivo:** son menos comunes, podrían ocurrir por uso de explosivo en malas condiciones, deteriorado o humedecido debido a almacenaje muy prolongado en ambiente inadecuado. Uso de explosivo inadecuado para determinado trabajo, por ejemplo ANFO para trabajo en taladros con agua.

Sensitividad

El uso de iniciador inadecuado o insuficiente para un determinado explosivo no permitirá su arranque, por ejemplo, un agente de voladura tratado de iniciar directamente con un fulminante común sabiendo que requiere un cebo.

La transmisión o simpatía puede interrumpirse por un **gap** excesivo entre cartuchos, o por un cuerpo extraño en el taladro, haciendo fallar a parte de la columna explosiva.

Condiciones ambientales

Se observa que algunos explosivos tienden a perder sensibilidad y capacidad de transmisión en lugares elevados y muy fríos, otros se descomponen en ambientes calurosos y húmedos. También se ha mencionado que un atacado exagerado o un fenómeno de sobre compresión en el taladro pueden insensibilizar al explosivo al incrementar la densidad en forma excesiva.

TRATAMIENTO DE FALLAS

Medidas generales

- A. Esperar un tiempo prudencial antes de acercarse al frontón (usualmente 30 minutos).
- B. Retirar a todo el personal no necesario o no vinculado al trabajo de eliminación de tiros fallados.
- C. Dar parte inmediato del problema al Departamento de Seguridad, al Jefe de Sección o Administración Superior, y a todo el personal que trabaja en el sector. Dar instrucciones precisas a los vigías y dinamiteros para efectuar una labor coordinada.
- D. Examinar el frente disparado con cuidado en su totalidad, ubicar los "tacos quedados", buscar los restos de explosivo y accesorios no explotados entre los escombros de la voladura, recogerlos si es factible y llevarlos a lugar seguro para eliminarlos (los que se vean peligrosos se podrán plastear *in situ*).
- E. Eliminar los tacos quedados con chorro de agua, o colocarles un nuevo cebo y volverlos a disparar, en último caso con una plasta o parche encima.
- F. Jamás se tratará de extraer el explosivo de un taco quedado mediante el cucharón o atacador. Antes que ingrese el equipo de limpieza para cargar el material disparado asegurarse de recoger todo resto de explosivo y accesorios remanentes, ventilar y regar el frente disparado y asegurar los techos o taludes para evitar desprendimientos de la roca.

Después de terminada la operación de limpieza, al iniciarse la nueva perforación se debe asegurar que el personal no vuelve a taladrar en las "cañas" de taladros anteriores aunque no se vea explosivo en ellos.

DESTRUCCIÓN DE EXPLOSIVOS

Referencias

DICSCAMEC: DS 019-71-IN. Capítulo IX – Artículo 157-166. LGM-Reglamento de Seguridad Minera – Anexos 1 y 2. Para deshacerse de explosivos y accesorios deteriorados deben seguirse las recomendaciones de los fabricantes y las normas de seguridad vigentes, con personal experimentado, en lugares apropiados, guardando las distancias prescritas. Usualmente se aplican tres métodos: por combustión, por explosión y por agua o compuestos químicos. Jamás aplicar el método de simple entierro.

- A. La destrucción por combustión consiste en quemar los residuos extendidos sobre papel o cartón, rociándolos con un poco de petróleo y encendiéndolos a distancia. Cada montón a quemar no debe exceder de 15 kg, no utilizando el mismo emplazamiento para otras quemas.
- B. La destrucción por explosión consiste en confinar el material deteriorado en un taladro de voladura o en un hoyo bajo tierra o arena, para detonarlo con una carga explosiva, también en lotes pequeños.
- C. La destrucción por agua se aplica para disolver al ANFO y otros nitratos. Algunos explosivos se descomponen con productos químicos como la acetona, mayormente al nivel de laboratorio.

La combustión por ejemplo es aplicable a las dinamitas y mecha de seguridad; las emulsiones hidrogeles y detonadores se destruyen sólo por explosión; el agua disgrega a los nitratos y algunas dinamitas, no a las emulsiones o hidrogeles.

El papel, cartón y otros materiales de embalaje no deben usarse para otros fines y se destruirán por quemado en capas delgadas, situándose a no menos de 30 m del punto de destrucción.

GASES Y POLVO

Toda voladura genera cierto volumen de gases y polvo, que se mantienen en el ambiente durante un tiempo determinado hasta ser disipados mediante la ventilación natural o forzada de las labores disparadas, por lo que sólo se ingresará a una labor disparada después de que se hayan disipado los humos.

Entre las características técnicas de los explosivos se menciona su categoría de humos como 1^{ra}, 2^{da} o 3^{ra},

establecida en base a la concentración temporal de CO, NO y NO₂, señalando que en su generación, grado de toxicidad, persistencia y disipación intervienen directamente varios factores: la composición del explosivo y su balance de oxígeno en la detonación; la carga y el encendido; las características de la roca o del mineral disparado; el tiempo y el flujo de aire de ventilación en las labores.

En cuanto a su implicancia sobre la seguridad y salud del personal es importante señalar los siguientes aspectos:

Los gases según su naturaleza pueden ser: inocuos, irritantes, nocivos o venenosos, y generan los siguientes riesgos:

- Asfixia, por anoxia, al desplazar al aire.
- Intoxicación, envenenamiento y muerte, según sus características letales.

Estos efectos están condicionados por el tiempo de exposición de la persona y por el nivel de concentración del gas en el ambiente, que determinan el grado de intoxicación, calificándolo desde leve, notable, severo, grave hasta mortal. Tan inconveniente es un largo tiempo de permanencia en un ambiente con baja concentración, como un corto tiempo, en uno con elevada concentración.

Los límites permisibles de concentración de gases para una jornada de 8 horas de exposición (por debajo de los cuales el trabajador podrá laborar sin problema) se han establecido en el Perú por el DS 034-73 EM/ DGM del 16/08/75 Artículo 277 del Reglamento de Seguridad Minera y por el DS 00258-75 del 22-09-75, Artículo 1 – Tabla 1 “Valores límites permisibles para agentes químicos en el ambiente de trabajo”, resumidos en el siguiente cuadro, donde:

MAC = VALORES MÁXIMOS DE CONCENTRACIÓN ADMISIBLES PARA UNA JORNADA DE 8 HORAS DE TRABAJO			
VL = VALOR LÍMITE (MÁXIMA EXPOSICIÓN DE 15 MINUTOS)			
GASES	MAC	PROPORCIÓN VOLUMÉTRICA	VL
Monóxido de carbono (CO)	= 50 ppm	0,005% máximo	100 ppm
Dióxido de carbono (CO ₂)	= 0,5% max	-	1,5%
Óxidos nitrosos: (NO)	= 25 ppm	-	25 ppm
	(NO ₂)= 5 ppm	0,0005% máximo	20 ppm
Anhidrido sulfuroso (SO ₂)	= 5 ppm	0,0005% máximo	10 ppm
Oxígeno puro (O ₂)	= 19,5 % mínimo	-	16%
Hidrógeno (H)	= 0,5 % máximo	-	-
valores que tienen como base lecturas a 20 °C y 760 mm Hg (1 013 bar)			
donde: ppm = partes por millón			
1 ppm = 1 cm ³ (gas o vapor) en 1 millón de dm ³ (1 m ³) de aire y			
10 000 ppm = 1% en volumen			

Se sobreentiende que en el momento del disparo los valores pico sobrepasan estos límites, manteniéndose elevados corto tiempo, ya que conforme se disipan los gases, éstos tenderán paulatinamente a cero. El tiempo de limpieza varía para cada condición de trabajo en particular y debe ser controlado periódicamente por el departamento de seguridad, con equipos e instrumentos adecuados y aprobados.

Según el Artículo 282 del RSM, está prohibido ingresar a una labor recién disparada mientras que no se haya verificado que la contaminación ambiental esté dentro de los límites establecidos por el Artículo 277.

Respecto a la ventilación en subsuelo la cantidad mínima de aire necesaria por hombre es de 3 m³/min en 1 500 lugares de trabajo hasta 1 500 m de altitud (100% más sobre 4 000 m) Artículo 304 y la velocidad del aire no debe ser menor de 15 m/min, Artículo 306-307.

En la minería metálica subterránea los gases preponderantes son CO, CO₂ y los óxidos nitrosos NO, NO₂, Nx, Oy, eventualmente algo de AlO₂ y en menor escala SO₂, SO₃ y SH₂ en zonas con abundancia de pirita y sulfuros metálicos. Como información general se menciona lo siguiente:

A. Peligrosidad

a. Monóxido de carbono (CO), densidad 1,25 kg/m³

El CO es incoloro, inodoro e insípido y ha causado el mayor porcentaje de accidentes fatales por gaseamiento en minería. Sin hacerse notar actúa directamente sobre la sangre, saturándola en forma gradual y continua, privando a los tejidos del oxígeno necesario.

Se combina con la hemoglobina 300 veces más rápidamente que el oxígeno formando la carboxihemoglobina (COHb) que bloquea la transferencia del oxígeno produciendo síntomas típicos de asfixia interna. El envenenamiento es gradual, exteriorizándose por dolores de cabeza, náuseas, vómitos, sopor, atonía, vértigo, inconsciencia y finalmente muerte (cuando la saturación con COHb llega al 80%); la víctima presenta enrojecimiento de la piel. A elevada concentración (>1%) provoca la muerte en 1 a 2 minutos por paralización del centro respiratorio y colapso cardíaco subsecuente.

El único método para salvar a una persona con síncope por CO es llevarla al aire libre, proporcionarle respiración artificial con oxígeno puro, abrirla e inyectarle un estimulante cardíaco si el pulso es débil. EL nivel de CO en subsuelo se incrementa con el humo de los motores diesel mal regulados.

b. Bióxido o anhídrido de carbono (CO₂)

Por otro lado, el CO₂ al ser incombustible puede causar la muerte sólo por sofocación; su densidad es de 1,97 kg/m³ ubicándose en las partes bajas de las labores; es incoloro; a elevada concentración es irritante para

las mucosas de la nariz y ojos y tiene un olor ligeramente ácido.

c. Gases nitrosos NO y NO₂

Estos gases son fácilmente percibidos por el olfato y por ser fuertemente irritantes para los ojos y vía respiratoria. Su densidad (NO: 1,34 kg/m³ y NO₂: 1,45 kg/m³) hace que tiendan a permanecer en mayor proporción en el piso y paredes que en el techo de las labores; incluso quedan remanentes entre los escombros de la voladura que sólo al palearlos se van disipando poco a poco.

El NO es inodoro e incoloro, pero se combina rápidamente con oxígeno para formar NO₂, que es de color pardo, amarillo-naranja a rojizo según el rango de combustión en la detonación, tiene olor persistente a amoníaco o ácido nítrico. Como agente oxidante energético se diluye en el agua formando ácido nitroso y nítrico.

El NO₂ aspirado inflama los tejidos del tracto respiratorio y pasa directamente a los alvéolos, formando en ellos ácido nítrico que ataca los tejidos blandos. Los síntomas iniciales son cefalea y ligero malestar, luego tos y vértigo. Si la persona no recibe atención médica, estos síntomas se agravan como bronquitis aguda con angustia respiratoria, disnea, cianosis y edema pulmonar, que puede producir la muerte entre 6 y 48 horas después de haber respirado alta concentración de estos gases.

La persona afectada debe ser sacada rápidamente al aire fresco y recibir asistencia médica, preferentemente hospitalizada como mínimo 48 horas para control, ya que en muchos casos, después de los primeros auxilios presenta un cuadro de aparente recuperación, engañosa, y se va a su domicilio donde, después de algunas horas le sobreviene un malestar general que culmina en edema pulmonar e hipotensión, que sin atención médica produce la muerte al segundo o tercer día. A concentraciones sobre 300 ppm causa muerte súbita.

El exceso de gases nitrosos en los disparos se debe primordialmente a:

- Deficiente detonación; cuando por falta de confinamiento o por el empleo de un iniciador débil, el explosivo del taladro no detona completamente y sólo llega a deflagrar.
- Mala mezcla de los agentes explosivos, como el ANFO y similares.
- Degradación del explosivo durante el almacenamiento (*shelf life*).
- Disparo de taladros anegados con explosivo no resistente al agua.
- Sobrecarga de los taladros.

Los gases sulfurosos se presentan muy eventualmente y en menor escala, más por descomposición de materia orgánica que por disparo, pero se mezclan con los demás, son densos, malolientes e irritantes de las mucosas. La piel y sangre de las víctimas toma color

verdoso, también pueden ser letales a elevada concentración.

B. Polvo

El volumen de polvo producido por las voladuras es menor al normalmente resultante de las demás operaciones de explotación y se debe controlar mediante el riego del frontón, antes y después del disparo (RSM Artículos 278-280-281-283). Los más perniciosos son los de sílice y carbón que por fijación de partículas muy finas en los alvéolos durante largo tiempo de exposición producen silicosis y antracosis.

Se clasifican en:

a. De primera clase:

Contienen más del 30% de sílice libre, sulfuros minerales, talco. Límite permisible: 2 mg/m³.

b. De segunda clase:

Contienen menos del 30% de sílice libre, óxidos de hierro y otros. Límite permisible: 5 mg/m³.

c. De tercera clase:

Otros polvos. Límite permisible: 10 mg/m³.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, conviene señalar que en muchos casos para la prevención de gases sólo se tiene en cuenta a la categoría de humos señalada por el fabricante, e incluso se compara y selecciona el tipo de explosivo a usar sobre la base de esta premisa, cuando en realidad muchos más determinantes son las condiciones de ventilación del frente de trabajo y el asegurar una completa detonación de toda la carga explosiva. Así una labor ciega va a retener mayor tiempo a los gases de un disparo efectuado con igual carga y tipo de explosivo que otra abierta y bien ventilada.

En el fondo todos los explosivos comerciales generan de origen los mismos gases, por la similitud de su composición, con ligeras variaciones en porcentajes, que se acentúan por las condiciones ambientales y por el cuidado empleado en el trabajo o del disparo. Como referencia se muestra un cuadro simplificado de la composición básica de los grupos de explosivos actualmente empleados en voladura de rocas:

GRUPO	OXIDANTE	COMBUSTIBLE	SENSIBILIZADOR
Dinamitas:	Nitrato de Amonio (molido)	Harina de madera	Nitroglicerina (orgánico)
Hidrogeles:	Nitrato de Amonio (en solución)	Petróleo y gomas	Aminas (orgánico)
Emulsiones:	Nitrato de Amonio (en solución)	Petróleo y aceites emulsificantes	Aire (microbalones)
ANFO:	Nitrato de Amonio	Petróleo (granular)	Aire (poros)
ANFO Pesado:	Nitrato de Amonio granular (ANFO) y en solución (emulsión)	Petróleo	Aire y los prills de Nitrato de Amonio

Estos explosivos generan, en general, los siguientes gases: NO, NO₂, CO, CO₂.

En resumen, el concepto de seguridad en el empleo de explosivos para voladura subterránea enfoca a dos fases:

- La de preparación del disparo.
- La de evaluación de los resultados.

En la primera fase, el objetivo es evitar la ocurrencia de tiros prematuros en el frontón.

En la segunda fase, evitar el reingreso del personal a la labor disparada antes de que se hayan disipado totalmente los gases del disparo, se haya estabilizado el techo para evitar la caída de rocas y se prevenga la ocurrencia de tiros retardados.

C. Proyección de rocas (fly rocks, proyectiles o galgas como se denominan en algunos lugares del Perú)

Roca volante en voladura es simplemente un fragmento de roca arrojada al aire con violencia como resultado de una explosión, por tanto con gran potencial de causar daños".

La inesperada, incontrolada e indeseada proyección de fragmentos a distancias más allá de las estimadas como límite normal de desplazamiento de los detritos de una voladura, representan el más serio problema de seguridad en razón de que el impulso de lanzamiento aumenta con el mayor diámetro del taladro empleado, el riesgo es serio en minas y obras donde se trabaja con diámetros grandes de taladro y con agentes explosivos que generan alto volumen de gases.

El riesgo es naturalmente mayor para personas y edificaciones cercanas a disparos en áreas urbanas tanto así que algunos reglamentos de construcción prohíben efectuar disparos de excavación sin mantas protectoras pesadas (**blasting mats**).

D. Aspectos determinantes en la generación de rocas volantes

a. Geología

En términos generales, las rocas altamente fisuradas y alteradas que muestran planos de debilidad notorios y definidos, así como las de conformación heterogénea tales como brechas y conglomerados con matriz débil, tienen mayor propensión a ocasionar proyecciones que las rocas homogéneas y compactas.

Un taladro localizado muy cerca a una fractura abierta encontrará una zona de debilidad por la cual soplarán los gases lanzando fragmentos, igual caso ocurre cuando un taladro es abandonado y un segundo taladro de corrección se perfora al lado, en este caso el abandonado debe ser llenado para no quedar vacío.

Una cavidad natural, grietas, oquedades y cavidades de disolución se traducen en zonas de debilidad.

b. Diseño

La calidad de perforación es primordial, comprende al burden correcto, espaciamiento, sobreperforación, alineamiento de los taladros y diámetro, acordes con la altura del banco.

Un burden corto, con amplitud menor a 25 veces el diámetro del taladro proporcionará un elevado factor de carga hacia la cara libre (igual ocurre cuando la cara frontal presenta oquedades), mientras que un burden excesivo creará violencia en la zona del collar, especialmente si el taco es insuficiente, generando efecto de craterización y proyecciones hacia arriba.

c. Explosivos

Un incremento de la carga específica resultará en una fragmentación promedio más reducido y en una mayor velocidad de impulsión. Las cargas explosivas

concentradas más cercanas a la superficie (collar) y a la cara libre del banco tienden a proyectar más, por lo que se debe tener especial cuidado con la cantidad y distribución del explosivo por taladro. Los disparos simultáneos de varios taladros presentan mayor probabilidad de proyección que los secuenciados en los que se aplica encendido con retardos escalonados.

d. Falta de cuidado

El descuido o negligencia en cualquier etapa del diseño, del replanteo del trazo de perforación, de la carga y taponado de taladros o del ensamble del sistema de encendido secuenciado, puede motivar una situación peligrosa.

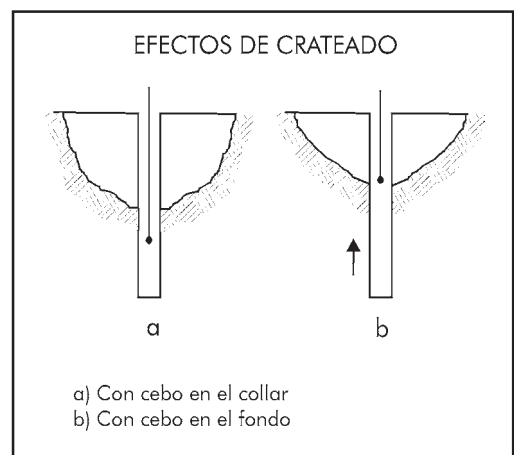
e. Tipo de voladura

El lanzamiento de esquirlas se presenta tanto en subterráneo como en superficie.

En superficie se tiene dos categorías de voladura: primaria o de producción, con dos tipos de trazo (de banco y de cráter) y secundaria, para eliminación de pedronería.

1. Primaria

- De banco con taladros profundos con relación a su diámetro. En ella los parámetros de taladro son proporcionales y normalmente constantes la parte sin carga explosiva en los taladros suele ser igual a un burden máximo en longitud, procurándose que no llegue a ser menor al 50% del burden. La carga explosiva es columnar.
- De cráter. Se caracteriza por tener taladros poco profundos en relación a su diámetro grande. La carga explosiva se define como carga concentrada, puntual o esférica (**point charge**), de una longitud sólo equivalente hasta de 6 diámetros del propio taladro. Presenta la situación más peligrosa por su gran tendencia a expulsar fragmentos hacia la cercanía de la carga explosiva a la superficie.



2. Voladura secundaria con plastas y cachorros

Son una fuente típica y habitual de proyección en razón de su mínimo confinamiento y protección natural, representando un alto factor de riesgo. Normalmente los fragmentos vuelan lejos, por lo que es recomendable disparar los pedrones en áreas donde no estorbe la operación de rutina, y lo suficientemente cercanas a las paredes o taludes de los bancos para aprovechar al menos en parte su efecto de pantalla.

f. Tipo de proyectil

Los fragmentos de roca volante tienen diferentes tamaños y formas y viajan tan lejos como pueden con el rumbo y ángulo con el que salen orientados.

Referencialmente, se tienen dos tipos de proyectiles:

1. Tipo 1: son los que ocurren directamente sobre, o al cercano alrededor de la voladura. Por lo general tienen elevado ángulo de trayectoria parabólica, como un proyectil de mortero de infantería, cuyo alcance en altura varía desde unos pocos a más de cien metros, pero que normalmente no viajan a gran distancia horizontal desde su punto de origen. Usualmente están asociados a disparos con poco recubrimiento sobre la carga explosiva, a sopladuras o voladuras de cráter.
2. Tipo 2: los fragmentos de roca de este tipo actúan como un proyectil de artillería, recorriendo gran distancia desde su punto de origen, con una trayectoria relativamente baja y tendida, viajando a gran velocidad según su impulso, tamaño y peso. Normalmente este tipo es el más peligroso por lo impredecible de su rumbo y alcance, y pueden ocurrir en todo tipo de voladura, saliendo tanto de la cara libre frontal como del interior de la voladura.

CAUSAS DIRECTAS

Podemos considerar entre ellas a:

A. Sobrecarga de los taladros; esto puede ocurrir:

- a. Cuando por garantizar el resultado de un disparo se exagera la dosis de explosivo por m^3 a romper.
- b. Cuando un taladro se bloquea, por ejemplo con una piedra atracada, es común que los operadores compensen la deficiencia sobrecargando la parte libre, a veces hasta la misma boca del taladro.
- c. Cuando con un diámetro grande de taladros se ajusta demasiado la malla de perforación, con burden y espaciado muy cortos.

B. Burden muy corto

Un burden muy corto resulta como consecuencia de error de cálculo en el diseño del trazo de perforación, o también eventualmente cuando por efecto de excesiva sobrerotura hacia atrás del disparo anterior la nueva cara frontal resulta excesivamente fisurada y debilitada, al extremo de

crearse concavidades que reducen el espesor del burden en determinados sectores.

La existencia de pequeñas cavernas de disolución internas, capas o diques de material suave y débil, o fallas estructurales también en muchos casos dan lugar a burden muy corto.

Una sobrecarga excesiva al fondo de los taladros de la primera fila creará una situación similar a "burden corto" en la base del banco.

Un frente que ha perdido parte del material del burden por debajo de la cresta puede originar proyecciones si no se compensa la deficiencia reduciendo el factor de carga, o si no se coloca un **deck** (puente) sin carga en la columna explosiva al nivel del sector debilitado.

C. Burden excesivo

Un burden demasiado largo generalmente resulta de un mal diseño del trazo de perforación, o de una incorrecta distribución del orden de salida de los taladros. También de un factor de carga demasiado bajo asociado a un taco inadecuado, lo que generalmente repercute en craterización con proyección de fragmentos hacia arriba.

D. Distribución de la carga explosiva

Tanto en cada taladro como en la voladura en conjunto, una mala distribución de la energía aplicada sobre la roca propenderá a crear presiones excesivas en determinados puntos originando "centros de proyección excesiva", digamos por ejemplo: en un taladro cargado casi hasta el tope habrá proyecciones desde la boca y cuello del taladro; o en un taladro que haya atravesado a una oquedad del terreno, a una falla, o a una capa de material suave estando cargado a columna completa (sin **deck**) producirá proyección desde ese punto.

El mejor remedio en estos casos es: para el primero, reducir la carga o aumentar el taco para el segundo, intercalar un taco inerte en el sector problema de la columna explosiva.

- a. La carga de cada taladro en la primera fila se calculará individualmente en base al burden real, que puede haber sido reducido por efectos del disparo anterior, por fisuras o defectos de la roca, o por taladros inclinados erróneamente.
- b. La carga por metro cúbico de roca no deberá ser excesiva.
- c. Toda grieta, fisura o área de debilidad de la roca deberá ser cuidadosamente registrada y tomada en consideración.

E. Error en la secuencia de encendido

Un tiro fuera de secuencia es igual a un tiro con burden excesivo. Ejemplo: si un taladro de segunda fila sale antes que otro de primera fila provocará proyecciones hacia arriba.

La secuencia de encendido se planeará de manera que el retardo de encendido entre los taladros adyacentes no sea mayor que 100 m. A profundidades de taladros menores a 1,5 m el retardo entre taladros adyacentes no debería exceder de 50 a 60 m.

F. Geometría de perforación

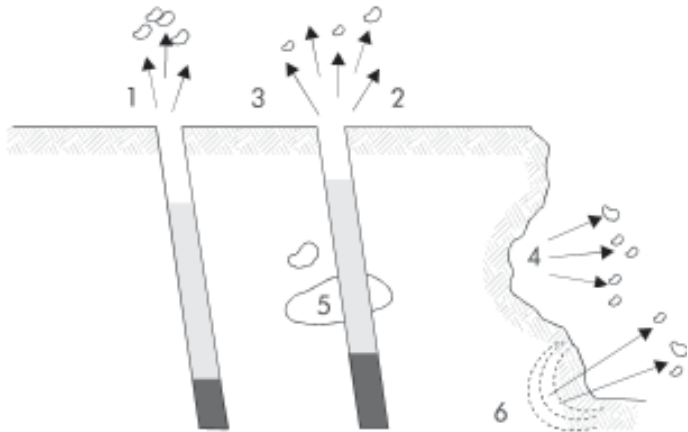
Es muy importante comprobar que las variantes geométricas de la voladura coincidan con las de diseño. Muchas veces hay errores o fallas que no se notan, como un mal alineamiento de taladros de la primera fila o insuficiente burden al pie del banco.

En la superficie es fácil comprobar las distancias de taladro a taladro, pero si estos se perforan desalineados o tienen excesiva deflexión pueden presentar discrepancias inconvenientes abajo, de hueco a hueco, con un “incremento circunstancial de la carga” en determinado sector.

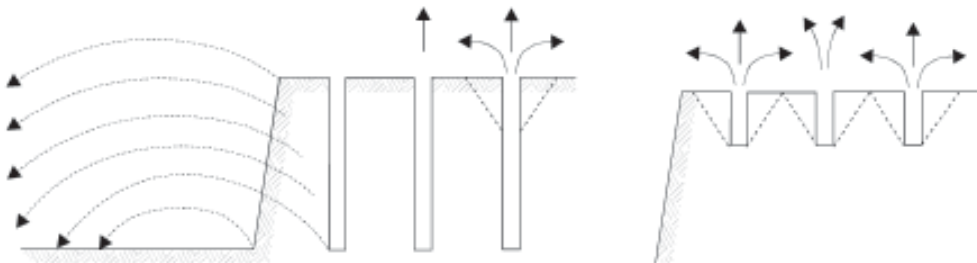
Si un taladro se acerca mucho a la cara libre el burden resultará insuficiente. Un taladro de segunda fila muy cerca del de la primera incrementará la carga base con excesivo factor que puede generar soplos y proyección a nivel del piso; en este caso los fragmentos provendrán del núcleo de la voladura.

FUENTES DE PROYECCIÓN EN BANCO

- 1.- SOPLADURA
- 2.- CRATERIZACIÓN POR SOBRECARGA O EXCESIVO BURDEN
- 3.- TIRO FUERA DE SECUENCIA (TALADRO POSTERIOR ANTES QUE EL PRIMERO)
- 4.- BURDEN MUY CORTO (POR DESPLOME)
- 5.- BURDEN MUY CORTO POR CAVIDADES
- 6.- BURDEN MUY CORTO POR SOBRECARGA EXCESIVA AL FONDO DEL TALADRO DE PRIMERA FILA



TIPOS DE PROYECTIL (PIEDRAS VOLANTES)



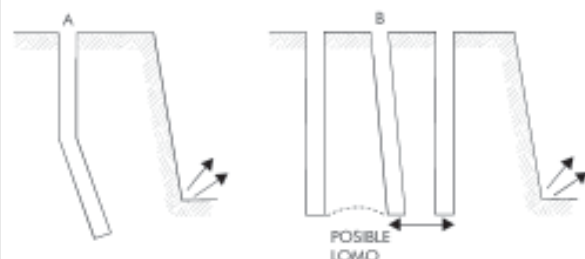
TIPO 1: DE BANCO

TIPO 2: DE SOPLADURAS

TIPO 3: DE CRÁTER

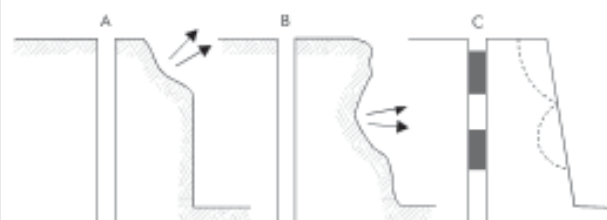
CAUSAS USUALES DE PROYECCIONES EN BANCOS, POR:

PERFORACIÓN



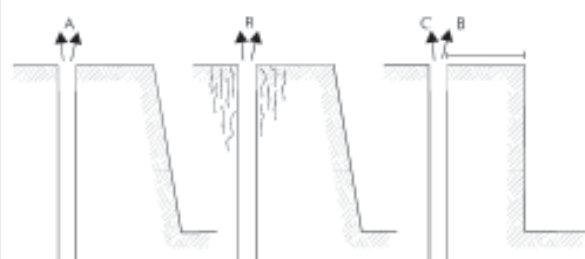
- A) MAL ALINEAMIENTO DE TALADROS DE LA PRIMERA FILA O INSUFICIENTE BURDEN AL PIE DEL TALADRO (SOPLO A NIVEL DEL PISO)
- B) DESVIACIÓN DE TALADROS DE LA SEGUNDA FILA MUY CERCA DE LA PRIMERA, LO QUE INCREMENTA LA CARGA EN LA BASE (EXCESIVO FACTOR DE CARGA QUE PUEDE GENERAR SOPLO A NIVEL DEL PISO)

BURDEN INSUFICIENTE



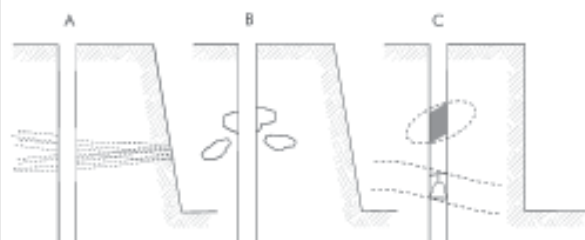
- A) BURDEN INSUFICIENTE EN LA CRESTA DEL BANCO O EXCESIVA CARGA, HASTA LA BOCA DEL TALADRO
- B) PÉRDIDA DE MATERIAL DE LA CARA LIBRE DEBAJO DE LA CRESTA, LO QUE DISMINUYE LA LONGITUD DEL BURDEN
- C) CORRECCIÓN: EMPLEO DE TACOS INERTES (DECKS) EN LAS ZONAS DE PROBLEMA RECONOCIDAS

TACO INSUFICIENTE



- A) TACO INSUFICIENTE, INADECUADO O INEXISTENTE
- B) EXCESIVA SOBREPERFORACIÓN DEL DISPARO SUPERIOR ANTERIOR, O SOBRECARGA DE MATERIAL SUELTO
- C) BURDEN EXCESIVO, CORRECCIÓN: MAYOR LONGITUD DEL TACO, CON MATERIAL ADECUADO

PROBLEMAS GEOLÓGICOS



- A) CAPAS DE ROCA DÉBIL, HISURADAS, MANTOS DE ARCILLA, VETILLAS Y OTRAS ESTRUCTURAS MENOS COMPETENTES QUE LA ROCA DEL BANCO
- B) OQUEDADES NATURALES, HUECOS DE DISOLUCIÓN O TRABAJOS SUBTERRÁNEOS ABANDONADOS
- C) CORRECCIÓN: DECKS EN LAS ZONAS DE PROBLEMA IDENTIFICADA

MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

Las rocas volantes son un riesgo latente y la mejor protección es una distancia segura y cobertura adecuada. Todo operador debe ser instruido al respecto y saber hacia donde dirigirse para protección.

Es muy importante evitar tiros prematuros, pues estos no avisan ni dan tiempo a escapar.

No correr riesgos innecesarios ni permitir que otros los corran por ignorancia, desconocimiento del disparo o incluso machismo, razón por la que es de primera importancia montar un eficiente sistema de vigilancia para alertar a las personas ajenas y evitar que se acerquen al área de voladura en el momento del disparo.

La voladura secundaria de bolones preferentemente se debe hacer simultáneamente con la primaria. Si se efectúan en forma separada se tendrá dos fuentes de proyecciones.

Una forma de prevenir los lanzamientos es evitar el

efecto de crateo y otra es cubrir las voladuras.

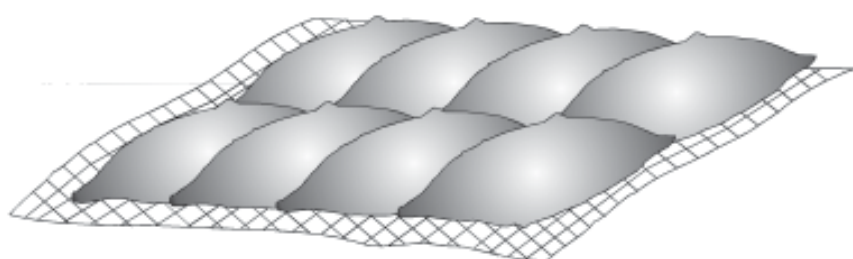
La cobertura de un disparo en obras civiles tales como zanjas, excavaciones para cimentación, y demoliciones, especialmente en áreas pobladas o de daño a instalaciones, deberá adaptarse a las condiciones y tipo de voladura a efectuar. Las mantas de jebe para voladura (**blasting mats**) usualmente confeccionadas con llantas usadas entramadas, o con trozos de banda transportadora solapados y unidos con cable de acero o cadenas, con dimensiones usuales de 10 a 12 m² y que se fijan al terreno sobreponiéndoles sacos de tierra o arena, son el medio más utilizado.

Para la práctica se recomienda que el peso del recubrimiento sea igual al peso de la roca a detonar, lo que resulta impracticable para voladura de gran volumen.

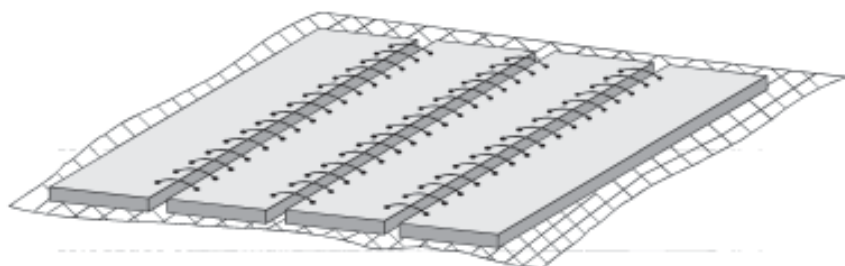
En estos casos es preferente el disparo de cargas reducidas bien secuenciadas y disponer de un ambiente protegido, cubierto y suficientemente resistente para impactos (**blasting shelter**).

TABLA DE CANTIDADES Y DISTANCIAS PARA ALMACENAJE DE EXPLOSIVOS				
Escala práctica, para mayor detalle debe revisar el reglamento del Discamec DSO19-71IN Capítulo V.				
EXPLOSIVOS				
Cantidad en kg		Distancia en metros cuando el depósito está barricado		
Más de	Separación entre depósitos	Edificios habitados	Ferrocarriles de pasajeros	Carreteras
10 kg	Metros	Metros	Metros	Metros
10	2,7 a 3	40 a 41	20,0 a 20,5	40 a 41
20	3,4 a 4	55 a 57	27,5 a 28,5	55 a 57
40	4,3 a 5,1	64 a 68	32 a 34	64 a 68
60	4,9 a 6	73 a 80	36,5 a 40	73 a 80
80	5,4 a 6,4	79 a 89	39,5 a 44,5	79 a 89
100	5,8 a 7	83 a 95	41,5 a 47,5	83 a 95
150	6,7 a 8	98 a 112	49 a 56	98 a 112
200	7,3 a 9	104 a 120	52 a 60	104 a 120
400	9,2 a 11	122 a 141	61,5 a 70,5	123 a 141
500	10 a 12	138 a 158	69 a 79	138 a 158
600	11 a 13	144 a 166	72 a 83	144 a 166
800	12 a 15	154 a 178	77 a 89	154 a 178
1 000	13 a 16	178 a 204	89 a 102	178 a 204
2 000	16 a 20	226 a 254	113 a 127	226 a 254
4 000	20 a 25	270 a 300	135 a 150	270 a 300
5 000	22 a 27	286 a 304	143 a 152	286 a 304
6 000	23 a 29	299 a 317	149,5 a 158,5	299 a 317
8 000	25 a 32	312 a 330	156 a 165	312 a 330
10 000	27 a 35	326 a 344	163 a 172	326 a 344
20 000	34 a 45	341 a 360	170,5 a 180	341 a 360

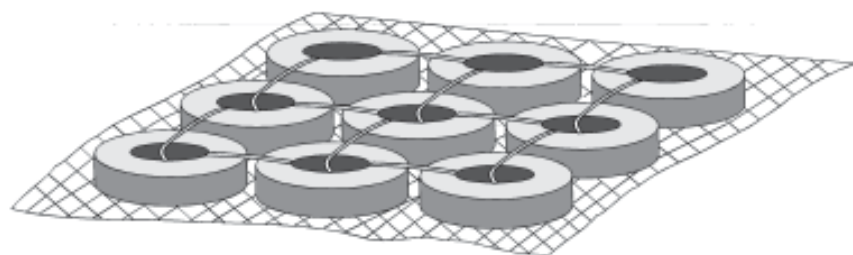
EJEMPLOS DE MALLA DE VOLADURA (BLASTING MATS) RÚSTICAS QUE PUEDEN PREPARARSE EN EL LUGAR DE LA VOLADURA



1.- Sacos de arena o tierra sobre malla de alambre para cerco



2.- Trozos de faja transportadora de jebe usados, amarrados con cable y colocados sobre malla de acero



3.- Llantas viejas amarradas con cable resistente colocadas sobre malla de acero

VIBRACIONES EN VOLADURAS

A. Parámetro de las ondas

El paso de una onda sísmica por un medio rocoso produce en cada punto de éste un movimiento que se conoce por vibración. Las vibraciones generadas por las voladuras se consideran entonces como ondas de tipo sinusoidal, donde los parámetros básicos de análisis son:

- Amplitud: es el desplazamiento máximo de un punto del terreno desde su posición de reposo, en pulgadas o milímetros.
- Velocidad de partícula es la velocidad a la que se desplaza el punto, en pulg/s o en mm/s.
- Aceleración: Es el ritmo de cambio de la velocidad, en pies/s² o m/s².
- Frecuencia: Es el número completo de oscilaciones en ciclos por segundo.

En voladura, la amplitud es definida usualmente en términos de velocidad (pulg/s) y la frecuencia en Hertz, o ciclos por segundo.

B. Origen de las vibraciones

Generalmente las vibraciones excesivas del terreno son causadas ya sea por colocar demasiada carga explosiva dentro del taladro o por el inapropiado diseño de la voladura, especialmente en lo referente a la secuencia de las salidas, de modo que parte de la energía que no es utilizada en fragmentar y desplazar la roca producirá vibraciones (por término medio un 40% de la energía del explosivo se gasta en generar ondas sísmicas en el entorno).

Por tanto los primeros factores a considerar son los parámetros geométricos del disparo, entre ellos:

- Diámetro del taladro: el aumento de diámetro es negativo para el efecto de vibración, pues la cantidad de explosivo por taladro es proporcional al cuadrado del diámetro resultando en cargas en ocasiones muy elevadas.
- Altura de banco: debe mantener una relación óptima $H/B > 2$ para mejor fragmentación y reducir las vibraciones al estar la carga menos confinada.
- Burden y espaciamento: si el burden es excesivo, los gases de explosión encuentran resistencia para fragmentar y desplazar la roca, por lo que parte de la energía se transforma en sísmica, incrementando las vibraciones.

Este fenómeno es más notorio en las voladuras de precorte, donde pueden registrarse vibraciones cinco veces superiores a las de voladuras convencionales si no se mantiene un adecuado control.

La intensidad de la vibración en una localidad específica se determina mediante la siguiente relación empírica,

usualmente denominada "Ley de Propagación", que relaciona la velocidad de vibración máxima con la carga de explosivo y la distancia:

$$PPV = K \left(\frac{DH}{W^{1/2}} \right)^n \quad (\text{Peak Particle Velocity})$$

donde:

- PPV = velocidad pico de partícula, en pulgadas por segundo (o en mm/s).
- K = constante empírica de transmisión de la roca (factor local), 800 para roca suave a 1 200 para dura.
- DH = distancia horizontal entre la voladura y el punto de medición o registro, en pies o metros.
- W = máximo peso de carga explosiva permisible por retardo (mínimo de 8 milisegundos) o carga de explosivo detonado instantáneamente, en libras o kilos (W también se indica con la letra Q en diversa literatura).
- n = constante empírica determinada por las condiciones geológicas existentes en el lugar, usualmente 1,6

Las variables desconocidas K y n para un lugar específico se determinan por pruebas de disparo de pequeñas cargas en la vecindad, previas al disparo principal que se quiere controlar. Estas pruebas determinan las propiedades de transmisión de las rocas y sobre la base de ellas se definirá el tamaño de las cargas en el disparo principal, para prevenir eventuales daños.

Las variaciones de los valores de K y n están condicionadas por fenómenos de absorción de altas frecuencias, por irregularidades geológicas que provocan la refracción y reflexión de las ondas, el tipo de roca, la geometría del disparo y el tipo de explosivo utilizado.

El exponente de W varía según la simetría de la carga explosiva:

A) Para carga esférica (cráter)

$$PPV = K \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-n}$$

B) Para carga cilíndrica (convencional)

$$PPV = K \left(\frac{DH}{W^{1/2}} \right)^{-n}$$

Para aclaración, la "velocidad pico de partículas" se refiere al mayor valor de una o más de las velocidades determinadas por un sísmógrafo para los componentes mutuamente perpendiculares de la vibración en el terreno: horizontal, vertical y transversal. La máxima PPV permisible es de 1,92 pulg/s (USBM), sobre este

valor pueden ocurrir daños a estructuras o construcciones.

Otros autores no consideran una simetría de carga particular y utilizan la siguiente expresión general:

$$V = K \times W^a \times D^b$$

donde K, a y b son constantes empíricas estimadas para un lugar determinado mediante un análisis de regresión múltiple.

Como referencia, la constante K puede variar desde 0,57 para rocas duras competentes hasta 3,40 para suelos no consolidados.

En general la amplitud de vibración en estructuras asentadas sobre roca será mayor que en estructuras asentadas en otras formaciones menos consolidadas; sin embargo, las frecuencias pueden ser más altas, lo cual reduce la posibilidad de daños.

d. La carga explosiva y los tiempos de retardo

Una voladura con múltiples taladros disparados simultáneamente produce un violento efecto de concusión y vibración.

Los retardos dentro de una voladura mayor fraccionan a ésta en una serie de pequeñas y muy cercanas voladuras de taladro individuales, minimizando este efecto, tanto así que la mayoría de los esquemas de tiro propuestos por entidades especializadas, recomiendan pautas o espacios de intervalo de 8 ó 9 m, como los retardos mínimos que deben ser intercalados entre cargas que van a ser consideradas como separadas, con el fin de controlar las vibraciones.

Sin embargo, esta regla no es rígida ya que para voladuras pequeñas y muy cercanas, el empleo de retardos más cortos puede resultar mucho más adecuado, lo que tendrá que comprobarse en cada caso.

Por otro lado, en voladuras efectuadas a grandes distancias de estructuras, se requerirá de retardos mayores para obtener verdadera separación de vibraciones, porque la vibración producida por cada carga individual se mantiene latente por mayor tiempo.

Los tiempos de retardo entre cargas se pueden estimar con la siguiente ecuación:

$$T = Kd \times B$$

donde:

- T = tiempo de retardo
B = burden
Kd = factor (3 a 5 ms/m)

e. Sobreconfinamiento

Así como una carga con burden apropiadamente diseñado producirá mucha menos vibración por kilo de explosivo que una carga con un burden demasiado amplio, también una excesiva sobreperforación, da lugar a un extremado confinamiento de la carga explosiva, particularmente si el **primer** o cebo se coloca en la zona de sobreperforación.

Otro caso ocurre en las voladuras con varias filas de taladros, donde existe la tendencia de que la última fila resulte naturalmente sobreconfinada. Para evitar esto, es aconsejable emplear períodos mayores de retardo entre estas últimas filas para darles mayor cara libre, pero teniendo en cuenta que en algunos tipos de terreno estos períodos mayores de tiempo pueden dar lugar a la posibilidad de tiros cortados.

Otro aspecto a tener presente es que si la secuencia se efectúa en una fila de taladros, las vibraciones serán mayores en la dirección en la que se está produciendo la secuencia de salida, debido al efecto acumulativo de ondas denominado efecto de “bola de nieve”.

Estudios recientes han demostrado que los retardos de milisegundo en detonadores comerciales son menos precisos de lo que se creía. Ello puede resultar en tiempos demasiado cercanos entre retardos adyacentes o aunque menos frecuentes, en traslapes de tiempos, así que donde sea “condición crítica” que un taladro deba detonar antes que el adyacente para proveer alivio seguro, puede ser una buena idea saltarse un número de la secuencia de retardo entre los dos taladros.

El monitoreo de las vibraciones producidas por voladuras de rocas en minas de tajo abierto y obras civiles es importante cuando están cerca a poblaciones o a instalaciones delicadas y para controlar deslizamientos de taludes en los bancos de explotación, donde es preciso un riguroso control basado en cargas mínimas por taladro y encendido con microretardos.

La mayoría de minas subterráneas detonan tandas relativamente pequeñas y no tienen problemas notables de vibración.

C. Equipos para el monitoreo de vibraciones

Un equipo de control de vibraciones se compone básicamente de:

- Unos captadores electrodinámicos o piezoeléctricos (geófonos, anteriormente descritos).
- Un equipo que amplifica las señales que vienen de los captadores, generalmente acoplado a un sistema de registro que permiten visualizar y tratar los datos para su interpretación, denominados sismógrafos para voladuras.

Los equipos de registro más simples sólo graban el dibujo de la onda en un papel, sirviendo para verificar esporádicamente si el valor pico de vibración sobrepasa un determinado nivel.

Los equipos más completos para la realización de estudios, llevan incorporados sistemas de grabación analógicos o digitales para el análisis de los valores recepcionados en el campo, proporcionando mayor información (frecuencia, nivel de energía, etc.).

Existen por tanto diversas opciones para la medición de vibraciones directamente en el terreno. Los que registran sólo la velocidad pico son baratos, fáciles de usar y adecuados en muchos casos para asegurar el cumplimiento de normas y regulaciones. Sin embargo, los sismógrafos que registran el evento total son más útiles para el mejor entendimiento e investigación de los problemas de vibración.

D. Distancia escalada

Donde la vibración no es un serio problema, los reglamentos permiten emplear la ecuación del "factor de escala" o "distancia escalada" en lugar de las mediciones de vibración con un sismógrafo. Para determinar las cargas permisibles por retardo la ecuación de distancia escalada es:

donde:

D_s = distancia escalada

D_i = distancia del área de disparo a la estructura a proteger (en pies).

$W^{1/2}$ = máxima carga explosiva en libras por cada período de retardo en 8 m.

Ejemplo

Si el punto a proteger está a 500 pies del disparo y la voladura tiene una carga máxima de 100 libras por cada período de 8 milisegundos, la distancia escalada debe ser 50.

Una distancia de 50 o más protegerá contra vibraciones mayores a 2 pulg/s según esto, para una distancia de 500 pies, podrán detonarse 100 lb. de explosivo: para 1 000 pies, 400 lb; para 1 500 pies, 900 lb, etc.

Otros parámetros empleados son:

RELACIÓN DE ENERGÍA (R.E.): Cuyo límite debe ser 1,0

$$R.E = (3,29 fA)^2$$

donde:

f = frecuencia en ciclos/s

A = amplitud en pulgadas

y también:

$RE = 1 \text{ PPV} = 1,92 \text{ pulg/s}$

ENERGÍA DE VIBRACIÓN (E.V.): en cuyo caso el rango de 3 a 6 es aceptable (más de 6 es peligroso)

$$E.V = a^2 / f^2$$

donde:

a = aceleración pico en pulg/s².

f = frecuencia/s o ciclo/s

Los registros sismográficos de la operación de voladura, describiendo el trazo, carguo, cantidad de explosivo, encendido, y otros aspectos pertinentes sobre la voladura, son esenciales para casos legales o para investigación técnica.

CRITERIO LÍMITE PARA VIBRACIONES OSM (OFFICE OF SURFACE MINING USA)

Criterio de velocidad de partícula:

de 0 a 300 pies	1,25	pie/s
de 301 a 5 000 pies	1,00	pie/s
de 5 001 a más	0,75	pie/s

Criterio de distancia escalar:

de 0 a 300 pies	50
de 301 a 5 000	55
de 5 001 a más	60

Daños a estructuras por vibraciones:

No existe un nivel de referencia sobre el cual los daños empezarán a ocurrir. Este nivel dependerá entre otros aspectos del tipo, condición y edad de la estructura, del tipo de terreno sobre el cual se ha construido la estructura a proteger, y de la frecuencia de la vibración en Hertz.

El mayor daño ocurre con una VPP de 7,6 pulg/s y de acuerdo al USBM una de 2 pulg/s es razonable para separar una zona relativamente segura de una probablemente peligrosa para una estructura.

La vibración puede llegar a una edificación por los cimientos, y en función de su frecuencia y de su velocidad, la estructura responderá a esta vibración con otra mayor o menor, en función de sus propias características elásticas.

La peor situación se produce cuando la frecuencia producida coincide con la frecuencia natural de vibración de la propia estructura, fenómeno conocido como RESONANCIA, muy destructivo, ya que acumula tensiones que afectan a los enlucidos, vidrios, y crea grietas de distintas magnitudes.

Igualmente sensibles son ciertas estructuras naturales o condiciones del terreno que pueden ser desestabilizadas con riesgo de desplomarse (taludes en minas o en carreteras, cornisas de hielo o nieve que pueden caer en avalancha, etc.).

En obras de ingeniería cercanas a centros poblados debe tenerse en cuenta que las personas tienden a quejarse de vibraciones muy por debajo de los niveles dañinos. El grado de tolerancia de un individuo depende de su salud, del temor a los daños, de su actitud hacia la operación minera u obra en trabajo.

Un ejemplo del “Rango de Percepción a las Vibraciones” por personas en reposo es el siguiente:

- Apenas perceptible:
PPV = 0,02 mm/s ($f = 3$ a 25 Hz)
- Incómoda:
PPV = 0,5 mm/s ($f = 30$ Hz y 50 mm/s a 5 Hz)
- Fuertemente perceptible:
PPV = 25 mm/s ($f = 2,5$ a 25 Hz)
para un tiempo de 5 segundos.

Onda sónica:

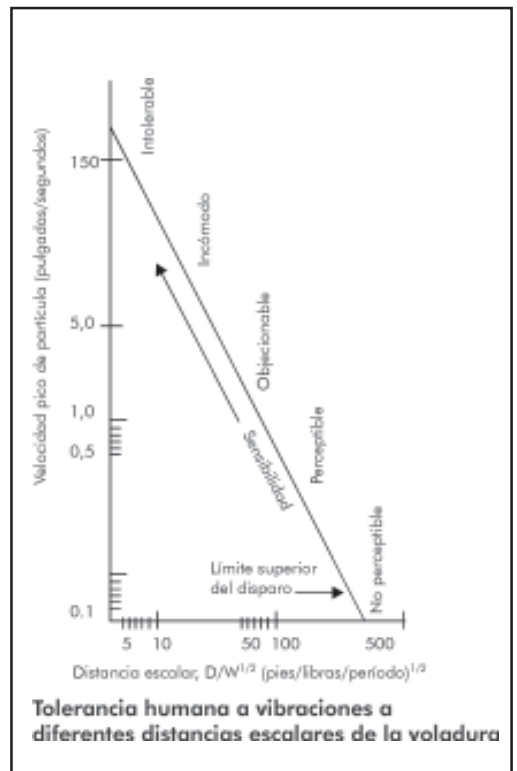
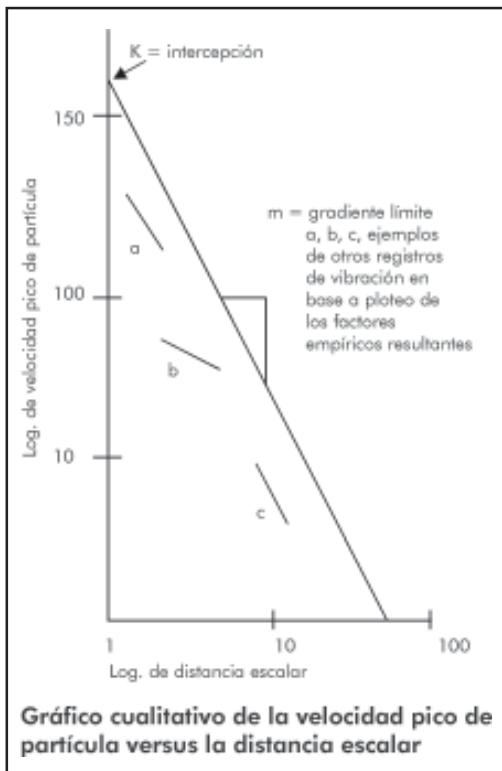
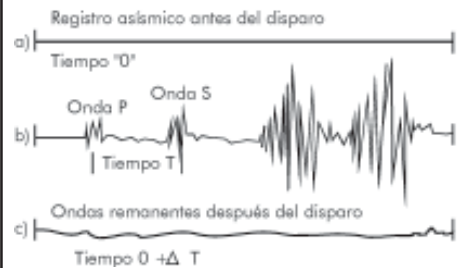
La onda sónica de la explosión producirá desde sobresalto hasta rotura de vidrios, según la distancia y circunstancias en que se produce, lo que también puede ser motivo de queja en disparos en zonas pobladas.

Esta onda entre otras razones se produce por compresión del aire al desplazarse la cresta o burden del disparo, por explosivo no confinado (cordón detonante superficial, taladros no taponados) y por sobrecarga de explosivo.

Cuando sea necesario reducir el nivel de la onda sónica se recomienda:

- Evitar el empleo de cordón detonante expuesto, cubrirlo con unos 10 cm de tierra suelta.
- Seleccionar esquemas y secuencias de tiro que eviten el reforzamiento de ondas.
- No dejar taladros sin taquear.
- No disparar la voladura cuando la dirección del viento sea crítica hacia la zona a proteger. Tampoco es recomendable disparar muy temprano o en la noche, por la temperatura ambiente que favorece su desplazamiento y por la condición de quietud a esas horas.

Ejemplo de registro de ondas de disparo

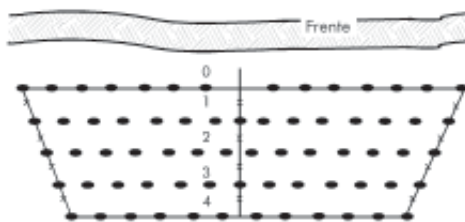


Reducción de niveles de vibración del terreno por voladuras

Un excesivo nivel de vibración en una voladura de producción señala una sobrecarga o una inadecuada secuencia de tiempos de salida. Aunque cada caso requiere un análisis particular, se sugieren algunas medidas para aminorarlo:

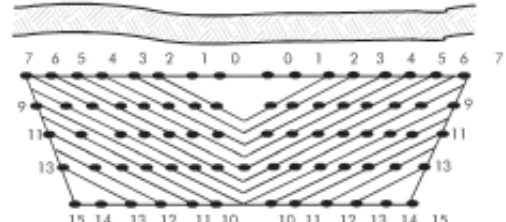
1. Minimizar la carga de explosivo por unidad de microretardo:
 - a. Reduciendo el diámetro de perforación.
 - b. Acortando la longitud de los taladros.
 - c. Seccionando y espaciando las cargas dentro de los taladros, e iniciándolas en tiempos escalonados (decks).
 - d. Utilizando el mayor número de detonadores o tiempos de retardo posibles (con explosores secuenciales de microretardo si se supera la serie comercial de detonadores eléctricos o no eléctricos disponibles, esto naturalmente en voladuras con gran número de taladros o con muchas cargas espaciadas).
2. Reducir el número de taladros con detonadores instantáneos, ya que éstos producen más impacto.
3. Elegir un tiempo de retardo entre barrenos y filas efectivas que evite una fuerte superposición de ondas y permita un buen desplazamiento de la roca disparada.
4. Disponer la secuencia de iniciación de modo que ésta progrese desde el extremo más próximo a la estructura a proteger alejándose de la misma.
5. Utilizar el consumo específico adecuado, ya que un consumo excesivo da lugar a una sobrecarga innecesaria acompañada de grandes efectos perturbadores.
6. Disponer el esquema de taladros con una relación "H/B > 2".
7. Controlar la perforación para que las mallas reales coincidan con las nominales.
8. Emplear sobreperforaciones con las longitudes mínimas necesarias para un buen arranque.
9. Disponer los frentes con la mayor superficie libre posible.
10. Crear pantallas o discontinuidades entre las estructuras a proteger y las voladuras, por ejemplo con una cortina de taladros de precorte.

EJEMPLO DE VOLADURAS MÚLTIPLES CON EL MISMO NÚMERO DE TALADROS (70)



a. ALTERNADOS EN LÍNEA

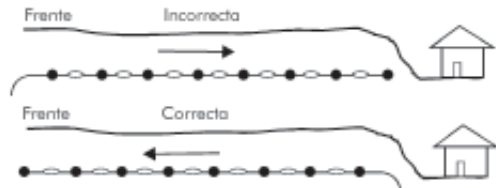
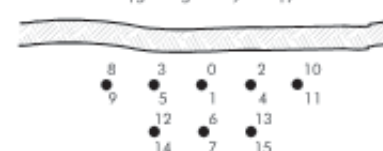
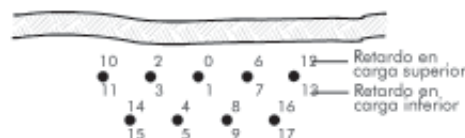
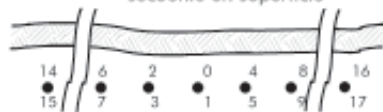
Salidas longitudinales por filas (5 tiempos)



b. ALTERNADOS EN V

Salidas por filas en "V" (16 tiempos)

Voladuras con cargas seccionadas dentro de los taladros (dos cargas separadas y retardadas entre sí) además de que cada taladro sale en orden secuente en superficie



Sentido de las secuencias de encendido en relación a la estructura a proteger

Como referencia para limitar los efectos de vibración y proyección en disparos junto a propiedades se sugiere las siguientes distancias por máxima carga explosiva por retardo.

Distancia a la estructura [m]	Máxima carga por retardo [kg]
1	0,05
5	0,9
7	1,5
10	2,5
15	4,5
20	7,0
25	10,0
30	13,0