

Ciencia e Ingeniería Neogranadina
Universidad Militar Nueva Granada
revistaing@umng.edu.co
ISSN (Versión impresa): 0124-8170
ISSN (Versión en línea): 1909-77350
COLOMBIA

2003
Wilmer Julián Carrillo León
USO DE EXPLOSIVOS EN DEMOLICIONES PARA VOLADURAS CONTROLADAS
Ciencia e Ingeniería Neogranadina, julio, número 013
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia
pp. 109-118

Uso de explosivos en demoliciones por voladuras controladas

WILMER JULIÁN CARRILLO LEÓN*

INTRODUCCIÓN

Los consumidores de explosivos han buscado y ensayado muchas maneras para reducir el exceso de rompimiento o sobreexcavación de las voladuras. Por razones de seguridad, el rompimiento excesivo es un inconveniente tratándose de taludes, bancos, frentes o pendientes inestables, estructuras y es también económicamente inconveniente cuando la excavación excede la "línea de pago" (implica concreto extra y los taludes fracturados requieren un mantenimiento costoso).

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

* Ingeniero civil, Universidad Militar Nueva Granada – mayo de 2002. Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras y sísmica, Universidad de los Andes. Investigador del Centro de Investigaciones Facultad de Ingeniería UMG. Investigación: "Vulnerabilidad sísmica de estructuras de concreto reforzado".

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

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

BARRENACIÓN EN LÍNEA, DE LÍMITE O DE COSTURA

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

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

alineación. Para obtener buenos resultados, los barrenos deben quedar en el mismo plano. Cualquier desviación en ellos, al tratar de barrenar más profundamente, tendrá un efecto desfavorable en los resultados. Para barrenos de 1 ½" a 3" de diámetro las profundidades mayores de 9 metros son raramente satisfactorias.

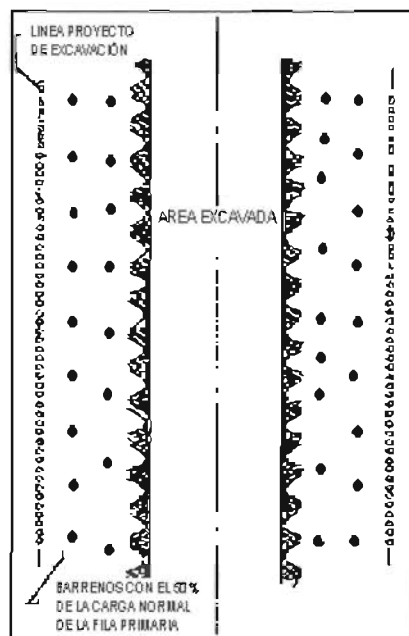


Figura 1. Plantilla típica del procedimiento de barrenación en línea.

Los barrenos de la voladura directamente adyacentes a los de la barrenación en línea, se cargan generalmente con menos explosivos y también a menor espaciamiento que los otros barrenos. La distancia entre las perforaciones de la barrenación en línea y los más próximas, cargados, es usualmente de 50 a 75% de la pata usual (Fig. 1).

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

Trabajos subterráneos. La aplicación de la teoría básica del sistema de Barrenado en Línea, esto

es, utilizando solamente barrenos vacíos, es muy limitada en trabajos subterráneos. Generalmente se usan barrenaciones cerradas, pero siempre cargadas aunque ligeramente. A este procedimiento hemos preferido llamarlo voladura perfilada y será descrito posteriormente.

VOLADURAS AMORTIGUADAS

Principio. Las voladuras amortiguadas a veces denominadas como voladuras para recortar o desbastar, se introdujeron en Canadá hace varios años. Al igual que la barrenación en línea, la voladura amortiguada implica una sola fila de barrenos a lo largo de la línea proyecto de excavación. las cargas para las voladuras amortiguadas deben ser pequeñas, bien distribuidas, perfectamente retacadas y se harán explotar después de que la excavación principal ha sido despejada.

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

Aplicación.

Trabajos a cielo abierto: La pata o berma y el espaciamiento variarán de acuerdo con el diámetro de los barrenos que se hagan. La tabla No. 1 muestra una guía de patrones y cargas para diferentes diámetros de barrenos. Nótese que los números mostrados cubren un campo promedio debido a las variaciones que resultan del tipo de formación de roca por volarse. Con este procedimiento los barrenos se cargan con cartuchos enteros o usándose generalmente cartuchos de 1 ½" de diámetro por 8" de largo y colocándose a 1 o 2 pies de separación centro a centro.

Tabla 1. Cargas y plantillas propuestas para Voladuras Amortiguadas

DIÁMETRO DEL BARRENO EN PULGADAS	ESPACIAMIENTO EN METROS	BERMA EN METROS	CARGA EXPLOSIVA EN Kg/m (1) y (2)
2 - 2 ½	0.90	1.20	0.12 - 0.40
3 - 3 ½	1.20	1.50	0.20 - 0.75
4 - 4 ½	1.50	1.80	0.40 - 1.0
5 - 5 ½	1.80	2.00	1.0 - 1.5
6 - 6 ½	2.00	2.50	1.5 - 2.20

El número (1) indica que dependen de la naturaleza de la roca. El número (2) indica que el diámetro del cartucho deberá ser igual o menor que la mitad del diámetro del barreno.

Para efectos de un amortiguamiento máximo, las cargas deben colocarse dentro del barreno tan próximas como sea posible a la pared correspondiente al lado de la excavación.

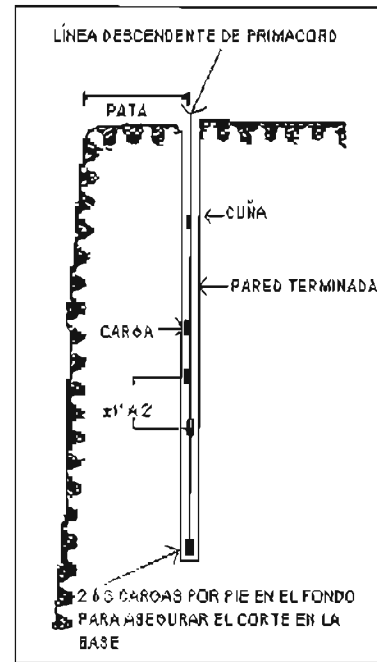


Figura 2. Colocación de las cargas de explosivos para Voladuras Amortiguadas

El retardo mínimo entre la explosión de los barrenos amortiguadores proporciona la mejor acción de corte entre barreno y barreno; por lo tanto, normalmente se emplean líneas troncales de

Primacord¹. En donde el ruido y la vibración resulten críticos, se pueden obtener buenos resultados con estopines de retardo MS.

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

VOLADURAS PERFILADAS O DE AFINE

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

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

Aplicación.

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

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

La voladura perfilada en trabajos subterráneos utiliza barrenos perimetrales en una relación de aproximadamente 1 ½ a 1, entre el ancho de la berma (y) y el espaciamiento (x) usando cargas ligeras, bien distribuidas y disparadas en el último período de retardo de la voladura. estos barrenos son los últimos en dispararse para asegurar que la roca fragmentada se desplace lo suficiente para ofrecer el máximo desahogo a los barrenos de la voladura perfilada. Este franqueo permite la libre remoción del banco final y produce menos fractura más allá del límite de la excavación.

Las cargas pequeñas bien distribuidas en los barrenos perimetrales usando plantillas y retardo convencionales, han producido regularmente resultados satisfactorios. La Tabla 2 proporciona las plantillas recomendadas y las cargas en libras por pie, para la voladura perfilada.

Tabla 2. Cargas y espaciamiento para Voladuras Perfiladas

DIÁMETRO DEL BARRENO EN PULGADAS	ESPACIAMIENTO EN METROS -1	BERMA EN METROS -1	CARGA EXPLOSIVA EN KG. (1) y (2)
1 ½ - 1 ¾	0.6	0.90	0.20 - 0.40
2	0.70	1.10	0.20 - 0.40

El número (1) indica que dependen de la naturaleza de la roca. Las cifras anotadas son promedios.

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

¹ Primacord. Es un tipo de cordón detonante. Se usa dentro del barreno para asegurar la detonación del explosivo. Es seguro, confiable y eficiente en este tipo de voladuras.

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

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

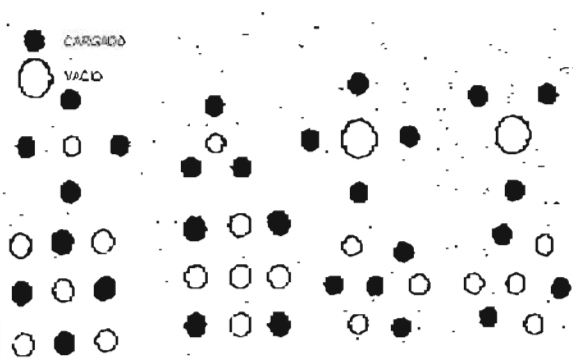


Figura 3. Algunos tipos de cuñas quemadas

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

PREFRACTURADO

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

La teoría del prefRACTURADO consiste en que cuando dos cargas se disparan simultáneamente en barrenos adyacentes, la suma de esfuerzos de tensión procedentes de los barrenos rompe la pared de roca intermedia y origina grietas entre los barrenos (figura 4). Con cargas y espaciamiento adecuado, la zona fracturada entre los barrenos se constituirá en una angosta franja que la voladura principal puede romper con facilidad. El resultado es una pared lisa que casi o produce sobreexcavación.

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

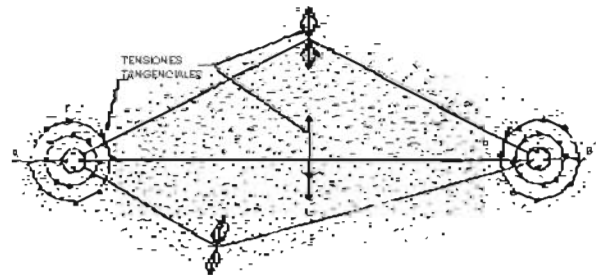


Figura 4. Si pensamos en una roca de extensión infinita, dos barrenos como troncos simultáneamente, sumarán las tensiones a la roca, especialmente en el plano que los une (A-B) ya que, además de ser el plano de menor resistencia, es el lugar geométrico de la máxima suma de las tensiones, por lo que la roca tiende a romperse por dicho plano.

Aplicación.

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

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

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

Los espaciamientos promedio y las cargas por pie de barreno se dan en la Tabla 3. Estas cargas anotadas son para las condiciones de rocas normales y pueden obtenerse utilizando cartuchos de explosivos convencionales, fraccionados o enteros, espaciados y ligados a líneas de Primacord.

DIÁMETRO DEL BARRENO EN PULGADAS	ESPACIAMIENTO EN METROS	CARGA EXPLOSIVA EN Kg/m
	-1	(1) y (2)
1 ½ - 1 ¾	0.30 - 0.45	0.12 - 0.40
2 - 2 ½	0.45 - 0.60	0.12 - 0.40
3 - 3 ½	0.45 - 0.90	0.20 - 0.75
4	0.60 - 1.20	0.40 - 1.0

Tabla 3. Cargas y espaciamiento propuestos para el prefacturado

El número (1) indica que dependen de la naturaleza de la roca y el (2) que el diámetro del cartucho debe ser igual o menor a la mitad del diámetro del barreno.

La profundidad que puede prefacturarse de una sola vez, nuevamente dependen de la habilidad para mantener un buen alineamiento de los barrenos. Las desviaciones mayores a 6" del plano de corte deseado, darán resultados negativos. Generalmente la máxima profundidad que puede utilizarse para barrenos de 2" a 3 ½" de diámetro sin una desviación considerable en el alineamiento es de 50 pies.

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

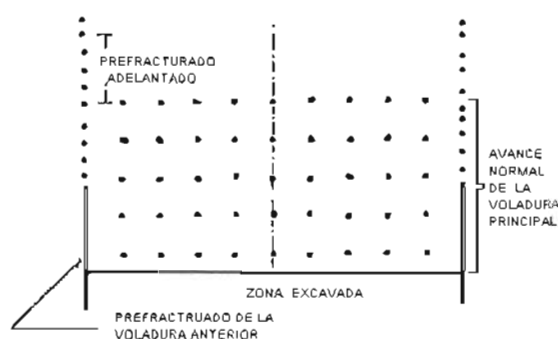


Figura 5. Procedimiento empleado para el prefacturado.

CONCLUSIONES

- Los explosivos son una fuente de energía concentrada que el ingenio del hombre puede permitir aprovecharlos de diferentes maneras para su propio beneficio.

- En la mayoría de las excavaciones en roca, los explosivos constituyen el medio más económico, pues ayudan a realizar el trabajo con mayor rapidez, facilidad y eficacia que cualquier medio mecánico.
- El uso de los explosivos en la construcción es muy amplio y cada vez ha ido en aumento, lo cual es fundamental para el desarrollo de la civilización actual.
- Se debe procurar hacer una buena distribución en la plantilla de detonación; con esto se consigue una salida libre de la roca, una mejor fragmentación, una rezaga concentrada y menores proyecciones, vibraciones y ruido.
- En una voladura es imprescindible conocer la roca y el estado en que se encuentre, es decir el grado de agrietamiento, fallas, intemperismo, etc., ya que evidentemente pueden variar los resultados.
- La granulometría de la roca está íntimamente ligada al uso al que se le va a destinar. No siempre lo más recomendable es la fragmentación más pequeña como suele creerse.
- La base teórica para el cálculo de la carga en el diseño de voladuras se fundamenta en valores empíricos proporcionados por las pruebas y los resultados prácticos que se han ido acumulando, sin embargo estas cifras son sólo el punto de partida debiéndose hacer las pruebas correspondientes a cada caso específico.
- Debido a que la barrenación es un factor muy importante desde el punto de vista económico deberá procurarse desde el diseño utilizar al máximo el volumen del barreno para la carga de explosivos.
- Existen varias técnicas de voladuras controladas, todas ellas tienen como finalidad reducir el sobrerrompimiento y fracturación de la roca residual o sea atrás de la línea de proyecto de excavación.

BIBLIOGRAFÍA

CASTILLO, Mario Aguirre. Uso y Aplicación de Explosivos a Cielo Abierto. México, abril 1 de 2001. Página web: www.amsac.com.mx/minero.html.

GARCÍA ALONSO, Adolfo. Uso de Explosivos en Demoliciones. España, julio de 2000. Página web: www.vecos.es/paginas/art_rubiales.html.

RODRÍGUEZ CALPA, César. Demoliciones por Voladura Controlada. México, septiembre 5 de 2000. Página web: www.unam.mx/terracerias/html.