

Tecnología de los Explosivos

Tema 3.1. Voladuras en banco



Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

Aquellas en que la roca presenta dos caras libres (paralela y perpendicular al barreno), sobre las que el explosivo puede ejercer su acción.

El banqueo es la forma más sencilla de ejecución de voladuras de exterior (canteras, cortas, excavaciones...). La aplicación de esquemas y cargas prefijados facilita la automatización.

Consume entre el 80% y el 90% de los explosivos industriales.

* TAMAÑOS DE PERFORACIÓN

| | | |
|-----------|------------|---|
| Φ pequeño | 33-50 mm | Pequeños desmontes, túneles, minería subterránea. |
| Φ medio | 65-165 mm | Canteras, explotaciones medianas, excavaciones de obra civil. |
| Φ grande | 180-450 mm | Gran minería a c.a., alguna explotación de áridos para cemento. |

ALGUNOS ASPECTOS INDICATIVOS DE UNA BUENA VOLADURA

El objetivo es la homogeneidad y correcta fragmentación, que facilite las operaciones posteriores.

Si no aparecen bolos en la parte alta del escombro, tampoco los habrá por debajo (la zona superior lleva menos explosivo).

Si el material queda próximo al frente, a poyado en este, la voladura se calculó bien (no exceso de explosivo).



TAMPOCO CONVIENE REDUCIR EN EXCESO.

FACTORES TÉCNICOS ESENCIALES

Diámetro de perforación (en base a la altura de banco, tamaño óptimo de bloques; coste, calidad y velocidad de perforación de la máquina).

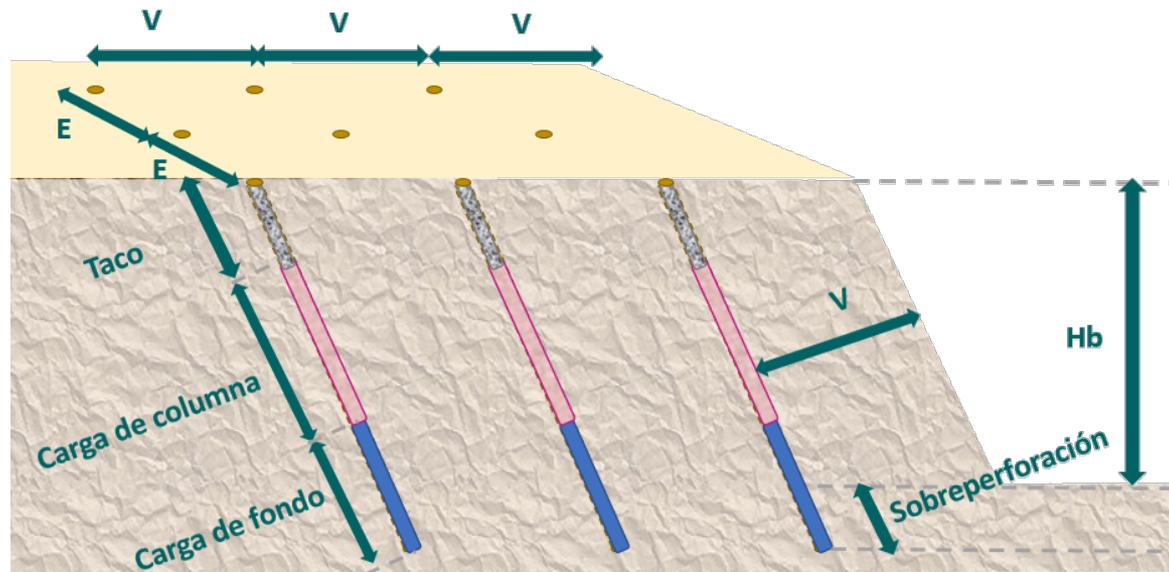
Tipo de explosivo (deberá ser el que aporte mejor rendimiento con la perforación efectuada).



De acuerdo con ello debe diseñarse el esquema de perforación (piedra, separación, pendiente y profundidad). Otro factor importante es la **SECUENCIACIÓN**.

** Los diámetros límites pueden diferir en función de la fuente. Ciertos autores designan la voladura de diámetro medio como de diámetro pequeño o diámetro pequeño-medio.*

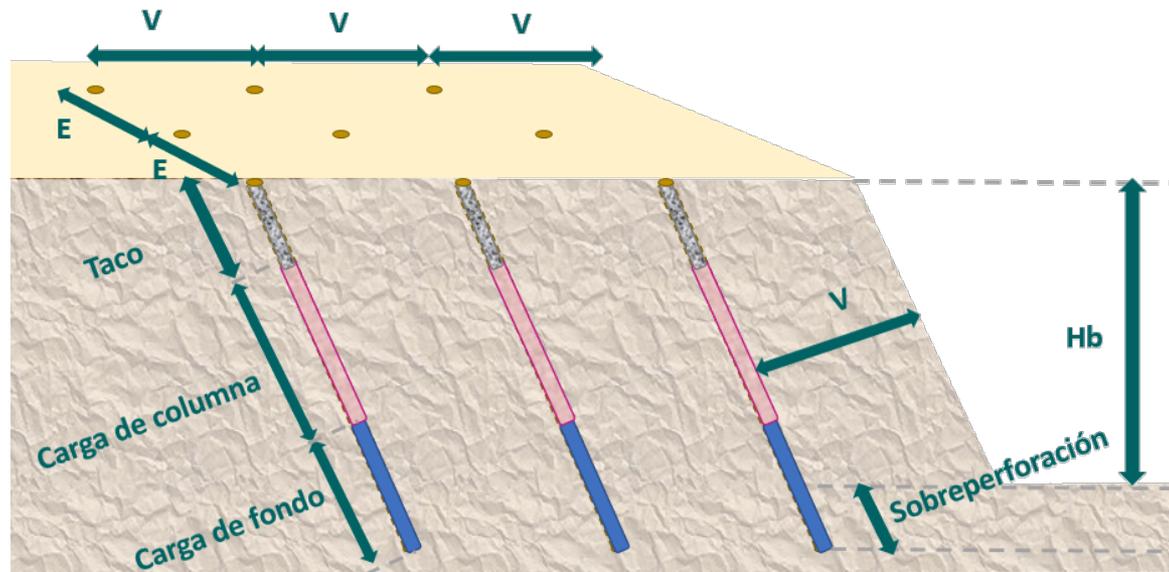
PARÁMETROS



- Φ = diámetro de perforación del barreno (en pulgadas o milímetros).
- $V = B = P$ = “Piedra”, distancia que hay del barreno a la cara/mínima distancia del fondo del barreno a la cara libre del banco.
- E = espaciamiento o distancia que hay entre barrenos de una misma fila (m).
- H_b = altura de banco (m).
- $S_p = J$ = sobreperforación, longitud de barreno perforada por debajo de la línea del piso de la cantera (m), necesario para cortar por la rasante el piso de la voladura. Si es escasa genera “repiés”, si es excesiva, puede “atronar” el terreno subyacente y ocasionar socavones.

Los parámetros a los que acompañan más de una designación son aquellos que reciben diversas notaciones en función del criterio o autor.

PARÁMETROS



- $r = T =$ retacado, representa la longitud de barren que queda sin carga.
- $L_b =$ longitud total del barren, función de la inclinación, de la sobreperforación y la altura de banco (m).
- $Q_f = C_f =$ carga de fondo, cantidad de explosivo en Kg que se introduce en el fondo del barren.
- $Q_c = C_c =$ carga de columna, es el resto de explosivo en Kg que se introduce sobre la carga de fondo.
- Inclinación de los barrenos o pendiente de los mismos, siendo las más comunes la de barren vertical, 3:1 ó 2:1. Puede expresarse también en grados sexagesimales.

Los parámetros a los que acompañan más de una designación son aquellos que reciben diversas notaciones en función del criterio o autor.

INFLUENCIA DE LOS FACTORES ADOPTADOS EN LA VOLADURA

DIÁMETRO

DIÁMETRO PEQUEÑO

VENTAJAS

Puede propiciar una mejor distribución del explosivo (menor consumo específico).

DESVENTAJAS

Encarecimiento de costes de perforación, cebado e iniciación. Mayor tiempo requerido en carga, retacado y conexión.

GRAN DIÁMETRO

DESVENTAJAS

Aumento del consumo específico y el retacado requerido.
La granulometría puede ser inadecuada (ej.: esquemas de perforación más grandes, pudiendo existir bloques formados por diaclasas y discontinuidades de amplio espaciamiento no atravesados por barrenos. Se aconseja que el espaciamiento entre barrenos sea menor que el existente entre fracturas).

VENTAJAS

Elevación de la velocidad de detonación de los explosivos.
Reducción del coste global de perforación y voladura.
Posibilidad de mecanizar la carga de explosivo.
Mayor rendimientos de perforación (m^3 volados/m lineal perforado).
Incremento de los rendimientos de las excavadoras.

INFLUENCIA DE LOS FACTORES ADOPTADOS EN LA VOLADURA

ALTURA DE BANCO

Por delante de los barrenos, existe un paralelepípedo de roca que incluye sobre el resultado de las voladuras.

RATIO ALTURA/PIEDRA

$$1 \leq H/B < 2$$

Fragmentación gruesa, sobreexcavación y repiés.

$$\text{SI } H/B \geq 3$$

Desaparecen esos efectos (SUELE APLICARSE EN CANTERAS Y DESCUBIERTAS).

H PEQUEÑA

Voladuras muy sensibles a la variación de B (Piedra) y S (Espaciamiento).

H GRANDES

Posibles problemas de desviación de los barrenos (afectan a la fragmentación, y pueden inducir vibraciones, proyecciones y sobreexcavaciones por no mantenerse la malla constante en todo el barreno).

INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOMÉTRICOS ADOPTADOS EN LA VOLADURA

INCLINACIÓN DEL BARRENO

VENTAJAS DE LA PERFORACIÓN INCLINADA

- Mejor fragmentación, desplazamiento y esponjamiento del material (B se mantiene más uniforme, se incrementa el ángulo de trayectoria de proyección).
- Menores problemas de posibles descabezamientos de barrenos por otros barrenos anteriores, reduciendo cortes y fallos posibles.
- Taludes más sanos.
- Mayor rendimiento de palas cargadoras (menor altura de pila de escombros, y mayor esponjamiento).
- Menor sobreperforación, mejor rendimiento de la perforación, mejor aprovechamiento energético, reducción de vibraciones.
- Menor consumo específico de explosivo.

INCONVENIENTES DE LA PERFORACIÓN INCLINADA

- Mayor desviación en barrenos largos.
- Incremento en la longitud de perforación.
- Dificultades de posición y emboquille de equipos de perforación.
- Requiere supervisión cuidadosa.
- Reduce el empuje disponible en las perforadoras.
- Mayor desgaste de fungibles.
- Mayores esfuerzos en el mástil y la traslación.
- La reducción de la altura de la pila es negativo en caso de trabajar con excavadoras de cables.
- Dificultades de barrido.
- Problemas para la carga del explosivo.

INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOMÉTRICOS ADOPTADOS EN LA VOLADURA

RETACADO

Relleno de la parte superior del barreno con material inerte, con objeto de confinar los gases de explosión para que fragmenten debidamente la roca. Debe considerarse el tipo y tamaño del material, y la longitud de retacado.

RETACADO INSUFICIENTE

Escape prematuro de gases
(onda aérea y proyecciones).

RETACADO EXCESIVO

Bloques de la parte alta del barreno,
vibraciones y poco espnjamiento.

- Es frecuente el empleo del detrito de perforación (disponible en gran cantidad).
- En teoría materiales angulosos (ej: de machaqueo) y con escasa humedad dan mejor respuesta.
- El tamaño adecuado de partícula se considera entre $1/17$ y $1/25$ del diámetro de perforación.
- Longitudes comunes de retacado son las comprendidas entre 20D y 60D, si bien es aconsejable recurrir en la medida de lo posible de las superiores a 25 D.
- En voladuras de varias filas, debe prestarse especial atención al retacado de la primera, sobre todo con frente irregular.
- Al cebar en cabeza, ha de considerarse el efecto negativo del cordón detonante en el taco (lo comprime, y posibilita el escape prematuro de los gases).
- Es posible recurrir a retacados intermedios de barrenos para reducir el consumo específico (cargas fragmentadas), salvar coqueras (huecos o cavidades), o garantizar la no iniciación por simpatía o la desensibilización por compresión.

INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOMÉTRICOS ADOPTADOS EN LA VOLADURA

SOBREPERFORACIÓN

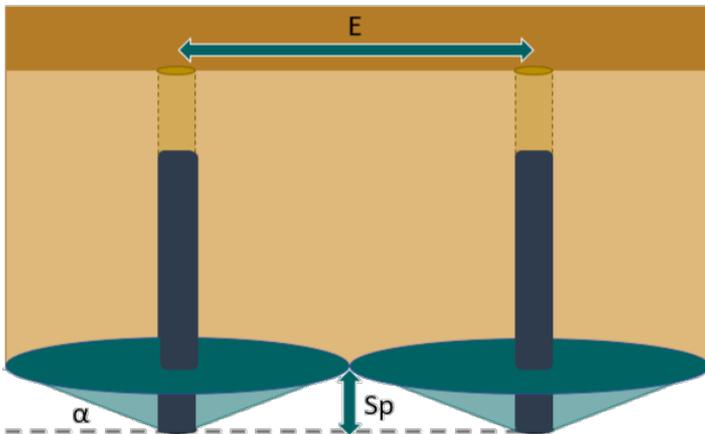
Longitud del barreno por debajo del nivel del piso, necesario para romper la roca a la altura del banco y lograr fragmentación y desplazamiento adecuado para el equipo de carga. Si no es suficiente, aparecerán repiés que encarecerán la carga.

SOBREPERFORACIÓN INSUFICIENTE

REPIÉS (Encarecimiento de la carga).

SOBREPERFORACIÓN EXCESIVA

- Incremento de costes de perforación y voladura.
- Incremento de vibraciones.
- Fragmentación excesiva en la zona inferior del banco, problemas de estabilidad en taludes finales de corta.
- Aumento del riesgo de descabezamiento y sobreexcavación.



El corte del fondo del barreno se produce en conos de entre 10° y 30° de ángulo con la horizontal. Un valor habitual para que se produzca la intersección de esos conos suele ser de $J = 0.3B$ para rocas medias.

| Relación J/B | Terreno |
|--------------|--|
| 0.5 - 0.4 | Roca dura. Repiés de difícil gestión. |
| 0.3 | Rocas medias. Repiés normales. |
| 0.2 - 0.1 | Rocas blandos. Escasa probabilidad de repiés. |
| 0 | Estratificación horizontal. Planos de discontinuidad ubicados en el pie del banco. |

INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOMÉTRICOS ADOPTADOS EN LA VOLADURA

PIEDRA Y ESPACIAMIENTO

La **pedra (B)**, es la distancia mínima existente entre el eje de un barreno y el frente libre. El **Espaciamiento (S)**, es la distancia entre barrenos de una misma fila. Dependen del tipo de roca, los explosivos, la altura de banco y el grado de fragmentación deseado.

Existen numerosas fórmulas de cálculo, proporcionando por lo general valores comprendidos entre 25 y 20 veces el diámetro de perforación, en función del macizo rocoso a volar.

PIEDRA EXCESIVA

Exceso de vibraciones (mucha resistencia a que los gases agrieten y desplacen la roca).

Proyecciones y onda aérea por el excesivo escape de los gases de la voladura.

PIEDRA ESCASA

El **Espaciamiento** generalmente se establece en base a la piedra. Puede considerarse dependiente además de la secuenciación.

ESPACIAMIENTO ESCASO

Puede producir fragmentación inadecuada o rotura en cráter de la zona superior de los barrenos con proyecciones.

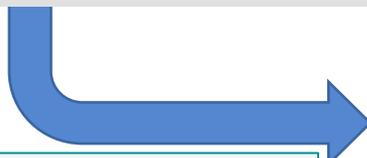
POSIBLES CAUSAS DE FALTA DE CONCORDANCIA ENTRE EL ESQUEMA TEÓRICO Y EL REAL

- Error de posicionamiento.
- Falta de paralelismo entre barreno y cara del banco.
- Desviaciones en perforación.
- Irregularidades del frente del talud.

INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOMÉTRICOS ADOPTADOS EN LA VOLADURA

ESQUEMA DE PERFORACIÓN

Los esquemas comúnmente empleados son cuadrados o rectangulares (FACILITAN EL REPLANTEO). Los esquemas a tresbolillo son sin embargo más efectivos, siendo el mejor entre ellos el que forma triángulos equiláteros.



VENTAJAS DEL TRESBOLILLO

- Optimiza la distribución de energía.
- Posibilita una mayor flexibilidad en la secuencia de encendido y la dirección de salida de la roca.

La caída de tensión de la onda de choque es función del cuadrado de la distancia (al ser menor la distancia al barreno del punto más alejado posible, se puede incrementar la energía de rotura que le llegue empleando un esquema en tresbolillo en un 23% respecto al esquema cuadrado equivalente (que por otro lado ofrece buenos resultados en roca blanda).

VOLADURAS DE DIÁMETRO MEDIO

TEORÍA DE LA CARGA SELECTIVA

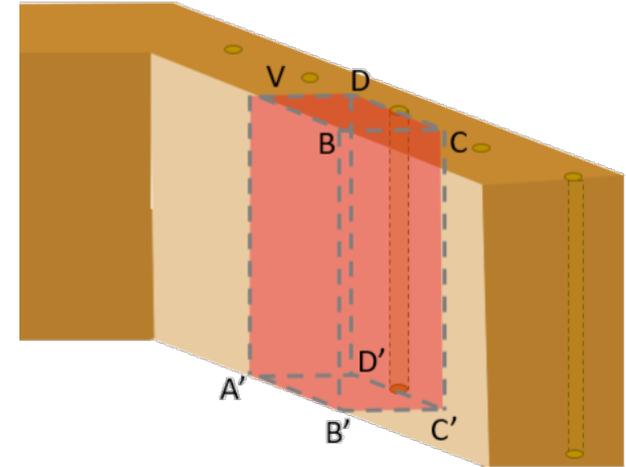
Para un tipo de roca homogéneo, la energía necesaria para el arranque de una voladura de banco es mayor en su zona inferior: el barreno ha de superar la resistencia a tracción de la roca en la sección CDD'C', y romper por cizallamiento la superficie A'B'C'D' en el fondo (la resistencia de la roca a esfuerzo cortante >> que a tracción).

La energía específica para la rotura del fondo se ha calculado 2,5 veces mayor que en la columna (zona central del barreno).

$$\frac{\rho_c \cdot s_c}{\rho_f \cdot s_f} = \frac{1}{2,5}$$

El explosivo empleado para la carga de fondo debe ser de gran potencia y densidad, y estar bien compactado, mientras que para la carga en columna basta un explosivo de baja densidad y media potencia.

En las voladuras en banco y cuando se utilicen diámetros medios de perforación (entre 50 y 150-165 mm), la carga debe ser selectiva, constituida por dos explosivos de distintas características (**fondo** y **columna**).



Ámbito de rotura de un barreno concreto.

Fuente: Adaptado de Jaime Ríos Vázquez (2009): «Curso Básico de Explosivos».



Blasting near e75, Vantaa, Finland, photo 2/6.

By halen [CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], from Wikimedia Commons).

VOLADURAS DE DIÁMETRO MEDIO

DETERMINACIÓN DE LA PIEDRA

La piedra (V) y la separación de barrenos (E) máximas están limitadas por la carga de fondo, y una vez definida ésta, será fácil obtener la carga de columna por metro de barreno, a partir de la relación siguiente:

$$\frac{\rho_c \cdot S_c}{\rho_f \cdot S_f} = \frac{1}{4}$$

FÓRMULA DE LANGEFORS Y KHILSTROM PARA DETERMINAR LA PIEDRA (V)

- V = PIEDRA MÁXIMA en m.
- D = diámetro de perforación en mm.
- S_f = potencia relativa del explosivo de carga en fondo.
- ρ_f = densidad del explosivo de fondo.
- C = factor de la roca.
- f = grado de fijación (coeficiente dependiente del grado de inclinación de los barrenos).
- E/V = relación entre la separación de los barrenos (E) y la piedra (V). Debe determinarse experimentalmente, aunque suele tomarse $E = 1,25 V$ con buenos resultados.

Para compensar los defectos de emboquillado y desviaciones de perforación, por las exigencias de una mayor proyección en el caso de efectuar varias filas de barrenos, este valor debe reducirse en un 10%.

FÓRMULA DE LANGEFORS Y KHILSTROM PARA DETERMINAR LA PIEDRA (V)

$$V = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{\rho_f \cdot S_f}{c \cdot f \cdot \frac{E}{V}}}$$

| Carga de fondo (encartuchada) | ρ_f | S_f |
|-------------------------------|----------|-------|
| Emulsión | 0.95 | 0.9 |
| Hidrogel | 0.9 | 0.95 |
| Dinamita goma | 1-1.1 | 1 |

$$V_{práctica} = 0.9 \cdot V_{teórica}$$

VOLADURAS DE DIÁMETRO MEDIO

DETERMINACIÓN DE LA PIEDRA

FÓRMULA DE LANGEFORS Y KHILSTROM
PARA DETERMINAR LA PIEDRA (V)

$$V = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{\rho_f \cdot S_f}{c \cdot f \cdot \frac{E}{V}}}$$

C, FACTOR DE ROCA:

El factor de roca c , aún variando con los diversos tipos de roca, no suele influir decisivamente. Si se supone a priori un $c = 0,4$ (valor correspondiente a un granito del Escudo Báltico), en el caso de trabajar con una caliza estaré sobredimensionando, trabajando del lado de la seguridad. En el caso de trabajar con peridotita, me quedaré corto. En cualquier caso suelen obtenerse errores de $\pm 10\%$ en el cálculo de V , subsanable en subsiguientes voladuras.

Consumo de explosivo tipo para arrancar un metro cúbico de un determinado tipo de roca. Puede oscilar entre 0,2 y 0,6.

F, GRADO DE FIJACIÓN:

Dependerá de la inclinación de los barrenos, debe tenerse en cuenta ya que con pendientes 3:1 y 2:1 se obtienen arranques y rendimientos mejores.

| Inclinación del barreno | 2:1 | 3:1 | Vertical |
|-------------------------|------|-----|----------|
| f | 0.85 | 0.9 | 1 |

NOTA IMPORTANTE: la inclinación consigue mejor fragmentación, proporciona taludes más sanos, reduce la sobreexcavación, reduce la transmisión de vibraciones al entorno, proporciona escombros más esponjados y dado el mejor aprovechamiento de la energía del explosivo de fondo origina menores repiés, pero ofrece mayor riesgo de desviación de barrenos, mayor dificultad de alineación de los barrenos, mayor longitud de perforación por m^3 excavado, pérdida del empuje de la perforadora, peor barrido de detritus, y carga más laboriosa.

VOLADURAS DE DIÁMETRO MEDIO

SOBRE EL ESQUEMA DE PERFORACIÓN

SOBREPERFORACIÓN

Los barrenos suelen perforarse generalmente bajo el piso del banco inferior (rasante), en una longitud igual a $0,3 V$. Esto se realiza con objeto de disponer mayor cantidad de explosivo en el fondo del barreno, que facilite el arranque en esa zona.

Se realiza para compensar los efectos de la carga alargada (cilíndrica). En la teoría general de la voladura se considera la carga como una masa puntual, pero en el barreno no sucede, se distribuye repartidamente en un cilindro, por lo que no incide en la roca de manera uniforme como si se tratase de una esfera.

Tras comparar los efectos de una carga puntual y cilíndrica, se vio que si la carga cilíndrica no era excesivamente larga, el efecto práctico apenas se desvía del de carga puntual. (Hasta longitud de cilindro de explosivo = $0,3 V$).

Si se estima el efecto de una carga repartida en longitud $L = V$ en base a la aplicación de la teoría de la carga puntual, el resultado práctico obtenido será el calculado para una carga repartida de longitud $L = 0,7 V$. ES POR ELLO QUE SE APLICA UNA CARGA DE FONDO DE LONGITUD $V = V + 0,3 V$, por lo que en estas voladuras se sobreperfora $0,3 V$.

VOLADURAS DE DIÁMETRO MEDIO

SOBRE EL ESQUEMA DE PERFORACIÓN

LONGITUD DEL BARRENO

BARRENO VERTICAL

$$L = H_{banco} + Sp = H_{banco} + 0.3 \cdot V$$

BARRENO INCLINADO 3:1

$$L = \frac{H_{banco}}{\cos(\text{atg}\frac{1}{3})} + Sp = \frac{H_{banco}}{0.95} + Sp = 1.053 \cdot H_{banco} + 0.3 \cdot V$$

BARRENO INCLINADO 2:1

$$L = \frac{H_{banco}}{\cos(\text{atg}\frac{1}{2})} + Sp = \frac{H_{banco}}{0.894} + Sp = 1.12 \cdot H_{banco} + 0.3 \cdot V$$

Otra posibilidad de cálculo la ofrece la siguiente expresión, en la que se corrige la sobreperforación en base a la inclinación: al aumentar el ángulo, se incrementa la longitud de perforación, pero se reduce la sobreperforación.

$$L = \frac{H_{banco}}{\cos(\beta)} + \left(1 - \frac{\beta}{100}\right) \cdot Sp$$

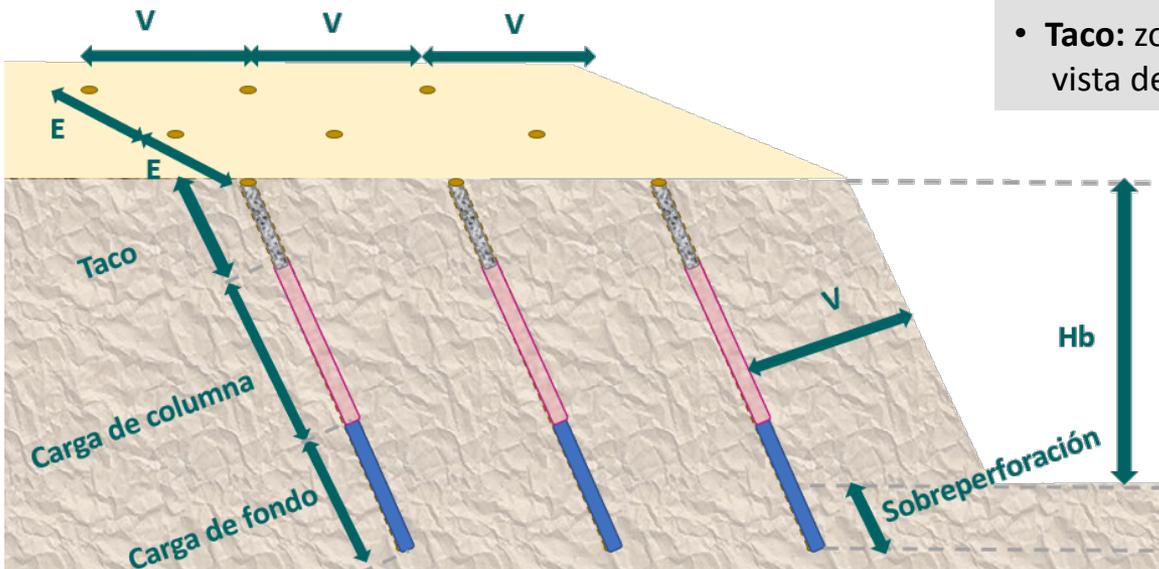
En la expresión anterior, β se corresponde con el ángulo de inclinación medido desde la vertical.

VOLADURAS DE DIÁMETRO MEDIO

CARGA EXPLOSIVA

La carga total de ese explosivo del barreno se divide en carga en fondo (constituida por un explosivo denso y potente), y otra en la zona central del mismo (columna), de explosivo de menor densidad y potencia. En el barreno se podrá distinguir por tanto entre tres zonas.

- **Fondo:** donde se aloja la carga explosiva de fondo:
 $LF = 1,3 v$.
- **Columna:** donde se aloja la carga explosiva en columna. Suele tener longitud total de:
 $Lc = L - 1,3 V - V = L - 2, 3C$.
- **Taco:** zona superior del barreno, retacada, desprovista de explosivos y de longitud = V m.



OTRA POSIBLE FORMULACIÓN A APLICAR

METODOLOGÍA ALTERNATIVA PARA VOLADURAS DE DIÁMETRO MEDIO (65-165 mm)

| Diámetro del barreno Db(mm) | Producción horaria media m3b/h | |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| | Rocas blandas/medias | Rocas duras/muy duras |
| 65 | 190 | 60 |
| 89 | 250 | 110 |
| 150 | 550 | 270 |

| Altura de banco | Diámetro del barreno | Equipo de carga más adecuado |
|-----------------|----------------------|-----------------------------------|
| 8 a 10 | 65 a 90 | Palas cargadoras frontales |
| 10 a 15 | 100 a 150 | Excavadoras hidráulicas/de cables |

| Geometría de la voladura | Resistencia a la compresión simple | | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Blanda < 70 Mpa | Media 70 - 120 | Dura 120 - 180 | Muy dura > 180 |
| Piedra V(m) | 39D | 37D | 35D | 33D |
| Espaciamiento E(m) | 51D | 47D | 43D | 38D |
| Retacado T(m) | 35D | 34D | 32D | 30D |
| Sobreperforación Sp(m) | 10D | 11D | 12D | 12D |
| Longitud de la carga de fondo Lf(m) | 30D | 35D | 40D | 46D |

OTRA POSIBLE FORMULACIÓN A APLICAR

| Parámetro | Expresión de cálculo |
|---|--|
| Longitud de barreno L(m) | $L = H/\cos \beta + (1 - \beta/100) \cdot Sp$ |
| Volumen arrancado Vr (m_{banco}^3) | $V_R = V \cdot E \cdot H/\cos \beta$ |
| Rendimiento de la perforación (m/m_{banco}^3) | $R_p = V_R / L$ |
| Concentración lineal de la carga encartuchada de fondo (Kg/m) | $q_f = \pi \cdot (D_f \cdot 1.1)^2 \cdot \rho_f \cdot 2.5 \cdot 10^{-4}$ |
| Carga de fondo (Kg) | $Q_f = q_f \cdot L_f$ |
| Longitud de carga de columna (m) | $L_c = L - L_f - \text{Taco}$ |
| Concentración lineal de la carga a granel/bombeable de columna (Kg/m) | $q_c = \pi \cdot (D_c)^2 \cdot \rho_c \cdot 2.5 \cdot 10^{-4}$ |
| Carga columna (Kg) | $Q_c = q_c \cdot L_c$ |
| Carga barreno (Kg) | $Q_b = Q_f + Q_c$ |
| Consumo específico (Kg/m_{banco}^3) | $CE = Q_b / V_R$ |
| Diámetro de la carga explosiva (mm) | Fondo: D_f (encartuchado) Columna: D_c (Barreno) |
| Densidades (g/cm^3) | Fondo: ρ_f (encartuchado) Columna: ρ_c (granel) |

Fuente: IGME.

Nota: el 1.1 introducido en la fórmula de la distribución lineal de la carga en fondo, q_f ; es debido al ensanchamiento que experimenta el cartucho en diámetro como consecuencia de su achatamiento.

VOLADURAS CON GRANDES DIÁMETROS DE PERFORACIÓN

En la gran minería a cielo abierto es frecuente utilizar diámetros de perforación superiores a 150 mm. La Teoría de Carga Selectiva no da resultados satisfactorios, siendo mejor aplicar LA TEORÍA DEL CRÁTER (de Livingston*).

FUNDAMENTOS DE LA TEORÍA DEL CRÁTER

Dada la geometría de la voladura, la rotura de la roca por acción del explosivo se produce en forma de cráter, actuando tanto sobre la cara libre del banco (paralela al barreno), como sobre la superficie. En principio los frentes no quedan tan sanos como en la voladura de diámetro medio.

FORMULACIÓN

1. CÁLCULO DE LA PIEDRA (V)

Emplea la expresión de Ash:
(La más usada habitualmente).

$$V = K \cdot D/12$$

- V: piedra en pies.
- D: diámetro de perforación en pulgadas.
- K: coeficiente dependiente de la presión de explosión y la resistencia de la roca, oscilando entre 20 y 40.



| Tipo de Explosivo | Clase de Roca | | |
|---|---------------|-------|------|
| | Blanda | Media | Dura |
| Baja densidad (0.8 - 0.9 g/cm ³) y baja potencia | 30 | 25 | 20 |
| Media densidad y potencia (1 - 1.3 g/cm ³) y media potencia | 35 | 30 | 25 |
| Alta densidad (> 1.3 g/cm ³) y alta potencia | 40 | 35 | 30 |

*Para aplicar la Teoría de Livingston, las cargas cilíndricas deben cumplir que Longitud/Diámetro < 50.

VOLADURAS CON GRANDES DIÁMETROS DE PERFORACIÓN

1. CÁLCULO DE LA PIEDRA (V)

Otra expresión común es la de Ash-Konya (Basada en la de Ash).

$$V = 3.5 \cdot De(SGe/SGr)^{1/3}$$

- V: piedra en pies.
- De: diámetro del explosivo en pulgadas.
- SGe: densidad del explosivo empleado.
- SGr: densidad de la roca.

2. RESTO DE PARÁMETROS DE LA VOLADURA

SOBREPERFORACIÓN

$$Sp = 0.3 \cdot V$$

LONGITUD DE BARRENO

$$L = H_B + Sp$$

$$L = \frac{H_B}{\cos \beta} + Sp$$

BARRENOS VERTICALES

BARRENOS INCLINADOS,
SIENDO β EL ÁNGULO
FORMADO CON LA VERTICAL

LONGITUD TOTAL DE TACO

$$T = 0.7 \cdot V$$

VOLADURAS CON GRANDES DIÁMETROS DE PERFORACIÓN

2. RESTO DE PARÁMETROS DE LA VOLADURA

FORMULACIÓN

**CÁLCULO DEL
ESPACIAMIENTO ENTRE
BARRENOS**

OPCIÓN A

Espaciamiento $E = K_e \cdot V$

| K_e | Secuenciación |
|-----------|--|
| 1,0 | 1 |
| 1,2 - 1,8 | Barrenos secuenciados con retardos pequeños. |
| 2,0 | Barrenos iniciados de forma simultánea. |

OPCIÓN B (Basada en Ash-Konya)

Será la opción que se aplique para la resolución de supuestos

| Tipo de bancos | Secuenciación | |
|--|----------------------|----------------------|
| | Voladura instantánea | Voladura secuenciada |
| Altos ($H/V > 4$) | $E = 2V$ | $E = 1.4V$ |
| Bajos ($H/V \leq 4$) | $E = (H + 2V) / 3$ | $E = (H + 5V) / 6$ |

VOLADURAS CON GRANDES DIÁMETROS DE PERFORACIÓN

FORMULACIÓN

3. CÁLCULO DE LA CARGA DE EXPLOSIVO

A diferencia de lo visto en la Teoría de las Cargas Selectivas, se recomienda el empleo de un único explosivo.

a) LONGITUD DE LA CARGA EXPLOSIVA

$$L_E = L - T$$

b) DISTRIBUCIÓN LINEAL DE LA CARGA DE EXPLOSIVO

Lo normal es emplear explosivos a granel.

$$q_E = \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4 \cdot 1000} \cdot \rho \right)$$

c) CARGA EXPLOSIVA (Q_E)

$$Q_E = q_E \cdot L_E$$

D del barreno en mm, densidad en g/cm³, consumo kg/m.

Fuente: Adaptado de Jaime Ríos Vázquez (2009): «Curso Básico de Explosivos».

En las grandes explotaciones a cielo abierto se ha venido utilizando regularmente ANFO como carga única por sus diversas ventajas:

Bajo coste, elevada energía de burbuja, seguridad en el manejo, facilidad de mecanización de la carga.

Los hidrogeles se reservan para aquellos casos en que no resulta posible el empleo del ANFO o para su empleo como simple cebo.

VARIANTE:

(SEGUNDA METODOLOGÍA DE CÁLCULO QUE SE ESTUDIARÁ)

El desarrollo de las emulsiones y la posibilidad de generar desde el propio camión mezclas de ANFO y emulsión (ANFO pesado), ha posibilitado la implantación de cargas selectivas. El método adaptado para gran diámetro, consiste en la creación de una carga de fondo con explosivo denso de entre 8 y 16D, según el tipo de roca, y cargando el resto del barreno con ANFO.

3.1. Voladuras en banco

VOLADURAS CON GRANDES DIÁMETROS DE PERFORACIÓN. OTRA POSIBLE FORMULACIÓN

METODOLOGÍA RECOMENDADA PARA DIÁMETROS COMPRENDIDOS ENTRE LOS 180 Y LOS 450 mm

| Diámetro del barreno D_b (mm) | Producción horaria media m^3_b/h | | |
|---------------------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------|
| | Rocas blandas | Rocas medias/duras | Rocas muy duras |
| 200 | 600 | 150 | 50 |
| 250 | 1200 | 300 | 125 |
| 311 | 2050 | 625 | 270 |

| Variable de diseño | | Blanda Rc < 70 Mpa | Media-Dura Rc 70 - 180 | Muy dura Rc 120 - 180 |
|---|---------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|
| Altura de banco (m) | | 52D | 44D | 37D |
| Piedra V(m) | Carga de columna ANFO | 28D | 23D | 21D |
| | Carga de columna HIDROGEL | 38D | 32D | 30D |
| Espaciamiento E(m) | Carga de columna ANFO | 33D | 27D | 24D |
| | Carga de columna HIDROGEL | 45D | 37D | 34D |
| Retacado (m) | | 40D | 32D | 25D |
| Longitud de la carga de fondo L_f (m) | | 8D | 12D | 16D |

| Variable | Diámetro del barreno D_b (mm) | |
|------------------|---------------------------------|-----------|
| | 180 - 250 | 250 - 450 |
| Sobreperforación | 8D a 7D | 6D a 5D |

A pesar de que la a priori la aplicación de la Teoría del Cráter considera la aplicación de un único explosivo, en la práctica también es posible encontrar empleo de explosivos de fondo en cantidad variable. (ej.: Mina de Reocín). Se acompaña formulación orientativa.

VOLADURAS CON GRANDES DIÁMETROS DE PERFORACIÓN. OTRA POSIBLE FORMULACIÓN

| Parámetro | Expresión de cálculo |
|--|--|
| Longitud de barreno L(m) | $L = H/\cos \beta + (1 - \beta/100) \cdot Sp$ |
| Volumen arrancado V_r (m_{banco}^3) | $V_R = V \cdot E \cdot H/\cos \beta$ |
| Rendimiento de la perforación (m/m_{banco}^3) | $R_p = V_R / L$ |
| Concentración lineal de la carga encartuchada de fondo (Kg/m) | $q_f = \pi \cdot (D_B)^2 \cdot \rho_f \cdot 2.5 \cdot 10^{-4}$ |
| Carga de fondo (Kg) | $Q_f = q_f \cdot L_f$ |
| Longitud de carga de columna (m) | $L_c = L - L_f - \text{Taco}$ |
| Concentración lineal de la carga de columna (Kg/m) | $q_c = \pi \cdot (D_B)^2 \cdot \rho_c \cdot 2.5 \cdot 10^{-4}$ |
| Carga columna (Kg) | $Q_c = q_c \cdot L_c$ |
| Carga barreno (Kg) | $Q_b = Q_f + Q_c$ |
| Consumo específico (Kg/m_{banco}^3) | $CE = Q_b / V_R$ |
| Diámetro de la carga explosiva (mm), en caso de trabajar con graneles y explosivos bombardeables, diámetro del barreno | Fondo: D_f (encartuchado) Columna: D_c (Barreno) |
| Densidades (g/cm^3) | Fondo: ρ_f (encartuchado) Columna: ρ_c (granel) |

ALGUNAS CONSIDERACIONES ADICIONALES...

Las longitudes de retacado aplicadas por lo general suelen variar entre $0,7 V$ y V , siendo preferible asegurarse de su longitud suficiente, aplicando V .

La máxima altura de banco para trabajo con explosivos es de 20 m. Con autorización pertinente por parte de la Autoridad Minera Competente podrá llegarse a los 30 m, conforme a lo dispuesto en la ITC 7.01.03.

Las metodologías basadas en la obtención de los parámetros geométricos para voladuras con diámetros medio y grande, en función del diámetro estudiadas en el presente curso, no se establece la distinción entre piedra práctica y piedra teórica que sí puede verse en la aplicación de la fórmula de Langefors. Se considera por tanto a todos los efectos que la piedra obtenida en dicha aplicación es práctica (A aplicar en la geometría).

Pueden señalarse como valores habituales en las canteras cántabras los diámetros de perforación de 4 a 4,5 pulgadas para diámetro medio.

Como valores orientativos habituales de perforación de gran diámetro, cabe señalar los comprendidos entre 7 y 7,5 pulgadas (17,8 y 19 cm). Dichos barrenos suelen practicarse mediante perforación rotativa con tricono.