

Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Tema 9. Excavación mediante perforación y voladura



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/)

TEMA 9: EXCAVACIÓN MEDIANTE PERFORACIÓN Y VOLADURA

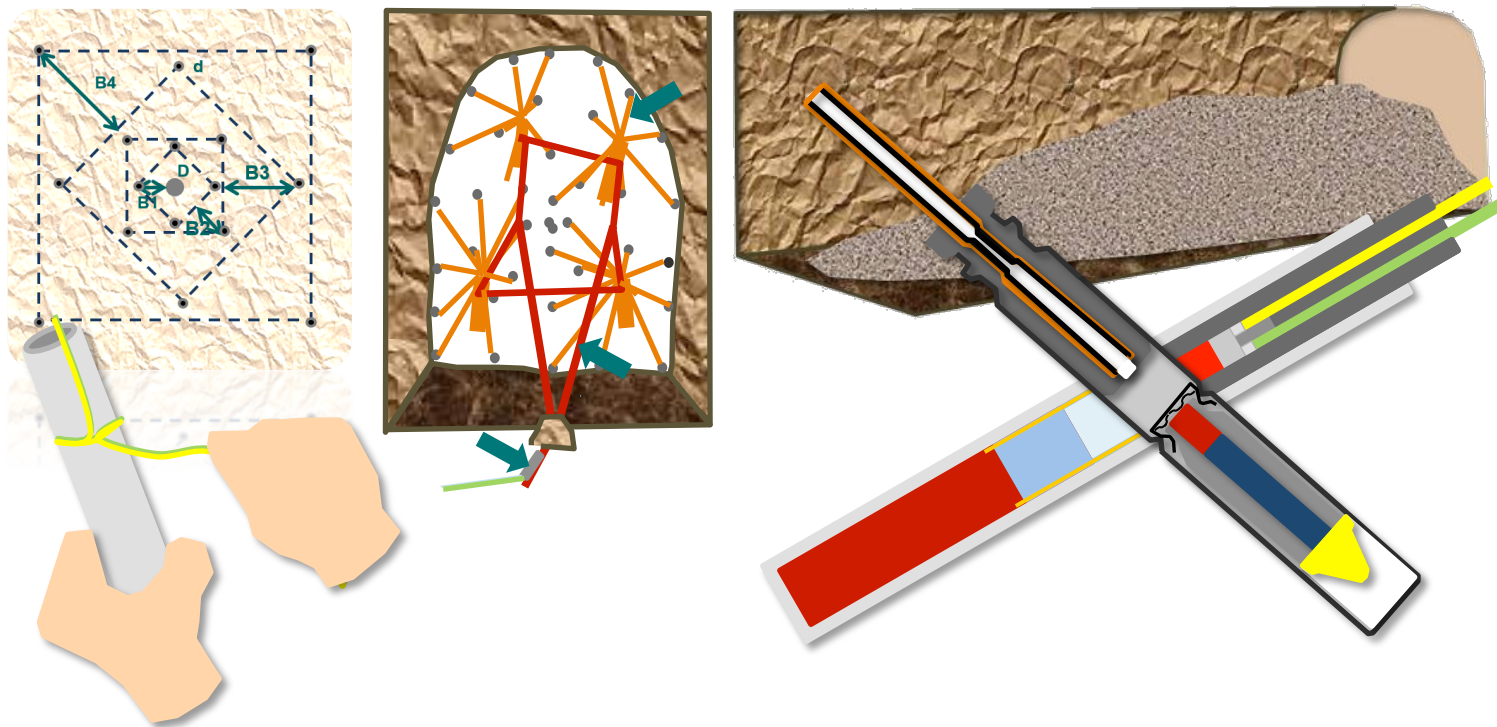
9.1. Introducción.

9.2. Tipo de voladuras: eléctrica, no eléctrica y electrónica.

9.3. Esquema de perforación.

9.4. Cálculo de las voladuras.

9.5. Secuencia de encendido.



Introducción

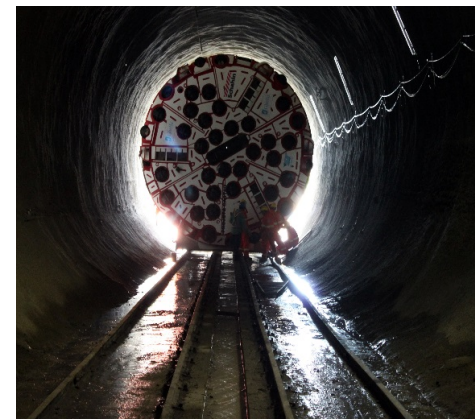
Principales tipologías de avance en túneles y obra subterránea



<https://www.flickr.com/photos/mikelo/>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>.



<https://www.flickr.com/photos/barrenera/>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.



<https://www.flickr.com/photos/pacgov/>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/>.

Introducción

Características del método convencional

VENTAJAS

La metodología de perforación y voladura cuenta en la actualidad con gran aplicación por ofrecer ventajas frente a las alternativas vistas anteriormente.

-  **Versatilidad frente a la abrasividad y dureza de la roca, con aplicación a partir de 80 Mpa a rocas más duras, en las que minadores o tuneladoras pueden resultar antieconómicos. Flexibilidad frente a cambios litológicos y tectónicos.**
-  **Versatilidad de secciones, posibilitando avances tanto a sección completa como mediante fases.**
-  **Aplicabilidad de los jumbos al sostenimiento.**
-  **Inversión en equipos de perforación sensiblemente inferior que en las restantes alternativas, para secciones idénticas.**
-  **Movilidad de los equipos en caso de tratarse de montados sobre ruedas.**
-  **Mayor facilidad de amortización y de aprovechamiento de los equipos en obras distintas.**

Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

Introducción

Características del método convencional

DESVENTAJAS

- Peores condiciones del frente remanente debido a la introducción de vibraciones en caso de no recurrir a voladuras de contorno.
- Importancia de las vibraciones como factor limitante que puede comprometer la aplicabilidad en núcleos urbanos.
- Perfiles menos sanos y ajustados al teórico y mayores costes de sostenimiento/revestimiento, particularmente en la aplicación de hormigón proyectado.

Fuente: Ríos Vázquez, J. (2009): «Curso Básico de Explosivos». Oviedo: I. Gofer.

INDICADORES DE RENDIMIENTO

CONSUMO ESPECÍFICO

AVANCE

Artículo 149, R.G.N.B.S.M. Se prohíbe terminantemente recargar fondos de barreno, reprofundizar los barrenos fallidos y utilizar fondos de barrenos para continuar la perforación.

Expresión orientativa de estimación:

Kg de explosivo empleados por metro cúbico volado.

$$C_E = \frac{14}{S} + 0,8$$

Distancia entre dos frentes consecutivos, pudiendo expresarse en tanto por ciento de la longitud del barreno perforado. Entre un 85% y 90% se considera correcto. Esto implica la permanencia de fondos de barreno en el nuevo frente generado.

Introducción

Ciclos

CICLO BÁSICO

- 🔧 **Replanteo del esquema de perforación.**
- 🔧 **Perforación.**
- 🔧 **Carga.**
- 🔧 **Disparo.**
- 🔧 **Disipación del tapón de humos.**
- 🔧 **Saneamiento de hastiales y bóveda.**
- 🔧 **Desescombro (carga y transporte).**

TIEMPOS

Los tiempos considerando trabajo a sección completa o en el avance (en caso de avance y destroza), puede implicar uno o dos relevos, en función de las características de la sección y la necesidad de sostenimiento, distribuyéndose los tiempos de la siguiente manera:

- 🔧 **Perforación (10% - 30%).**
- 🔧 **Carga (5% - 15%).**
- 🔧 **Disparo y disipación de gases (5% - 10%).**
- 🔧 **Saneamiento-desescombro (15% - 35%).**

Sostenimiento (10% - 65%). Si se plantea avance a sección partida, la colocación de sostenimientos de avance, en las peores condiciones, puede superar el 50%, mientras que la colocación en destroza suele resultar inferior.

Introducción

La perforación rotopercutiva. Fundamentos

PERCUSIÓN

<http://www.atlascopco.es/eses/products/equipos-de-perforaci%C3%B3n-y-martillos/1401284/>

Impactos producidos por los golpes del pistón generan ondas de choque que por el varillaje son transmitidos hasta la cabeza (martillo en cabeza, o bien llegan a ésta directamente (martillo en fondo). Estas ondas de choque transmiten la energía a alta velocidad. Una vez que la onda de choque alcanza la cabeza, una parte de la energía se transforma en trabajo, mientras que la restante retrocede reflejada por el varillaje. Los múltiples factores de diseño que influyen en la transmisión dificultan la evaluación del aprovechamiento de dicha energía, debiendo igualmente tenerse en cuenta que los puntos de unión de las varillas favorecen esa pérdida de energía por reflexión y rodamientos, en forma de calor y rozamiento, que redundará además en el desgaste de las piezas roscadas. La potencia de percusión se define como la energía de cada golpe por la frecuencia de impactos, respondiendo a la expresión siguiente:

$$P_m = E_c \cdot n_g = (p_m \cdot A_p \cdot l_p) \cdot K \left(\frac{p_m \cdot A_p}{m_p \cdot l_p} \right)^{1/2} = K \cdot (p_m \cdot A_p)^{3/2} \cdot \left(\frac{l_p}{m_p} \right)^{1/2}$$

Siendo m_p la masa del pistón, p_m la presión del fluido de trabajo en el cilindro, A_p la superficie de la cara del pistón y l_p la carrera del pistón.

La perforación rotopercutiva. Fundamentos

ROTACIÓN

El giro de la boca facilita que los impactos sobre la roca van produciéndose en posiciones diferentes, evitando atascos. Para cada tipo de roca la velocidad de rotación diferirá. Cada tipo de roca presenta una velocidad de roca particular para la que se producirán detritus de mayor tamaño, que aprovecharán la superficie libre del hueco generado en cada impacto. A mayor sea el tamaño de los fragmentos de roca liberados, mayor resultará el rendimiento. Las bocas normalmente presentan pastillas o botones. En el primer caso los ángulos comprendidos entre indentaciones suelen quedar comprendidos entre 10° y 20° , mientras que las velocidades de rotación suelen ser de entre 80 y 150 rpm. Contando con bocas de botones, para diámetros inferiores o iguales a 89 mm las velocidades suelen estar entre 40 y 60 rpm, con ángulos de giro entre 5° y 7° .

Fuente: López Jimeno, C. (1997): «Manual de Perforación y Voladura de Rocas». Madrid: ITGME.



«Sandvik DT820 Jumbo». Kelly Michals.

<https://flic.kr/p/d9Yh2u>.

<https://www.flickr.com/photos/rocbolt>.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>.

La perforación rotopercutiva. Fundamentos

EMPUJE

Requerido para garantizar el contacto de la boca con la superficie de la roca. Dicho empuje es ejercido como la sarta de perforación, y se consigue por un motor o cilindro de avance. Si el empuje es insuficiente, se reduce la velocidad de presión y se incrementan los desgastes en la sarta, reduciéndose la eficiencia e incrementándose las pérdidas por calor. Si es excesivo, la velocidad también se reducirá, el desenrosque del varillaje se dificulta y se incrementa el desgaste en las bocas, el par de rotación, las vibraciones, y la desviación de los barrenos.

Fuente: López Jimeno, C. (1997): «Manual de Perforación y Voladura de Rocas». Madrid: ITGME.



«Tunnel Excavation». Stefg74.

<https://flic.kr/p/71QYnh>.

https://www.flickr.com/photos/stg_gr1.

<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

La perforación rotopercutiva. Fundamentos

BARRIDO

Posibilita la extracción de los fragmentos desde el fondo del barreno. El fondo del barreno ha de estar en todo momento limpio de detritus, con el fin de garantizar una perforación eficaz. Dichos fragmentos se evacuan por el hueco comprendido entre el varillaje y las paredes del barreno, empleándose por lo general agua, empleándose comúnmente agua, por reducir el polvo. Ha de tenerse en cuenta que trabajar con agua reduce el rendimiento en un 10 - 20%. El caudal del fluido de limpieza (m³/min) se determina mediante la expresión:

$$Qa = \frac{Va \cdot (D^2 - d^2)}{1,27} = \frac{9,55}{1,27} \cdot \frac{\rho_r \cdot dp^{0,6}}{\rho_r + 1} \cdot (D^2 - d^2)$$

Siendo Va la velocidad ascensional del fluido en m/s (entre 0,4 y 1 m/s para el trabajo con agua, estando las presiones limitadas entre 0,7 y 1 MPa), ρ_r la densidad de la roca en gr/cm³, dp el diámetro de los fragmentos, D el diámetro del barreno en m, y d el diámetro de las varillas en m.

Fuente: López Jimeno, C. (1997): «Manual de Perforación y Voladura de Rocas». Madrid: ITGME.

Introducción

Tipología de los martillos

MARTILLOS

http://www.atlascopco.es/Images/9851330201_tcm835-1543193.pdf

Se puede distinguir entre **neumáticos** (accionados por aire comprimido) e **hidráulicos** (empleando aceite). Los primeros emplean la misma presión de aire para los dispositivos de impacto que para el circuito de barrido. Los segundos por su parte presentan ventajas como un menor consumo de energía (1/3), funcionando a mayor presión y con menores caídas, un coste más reducido de accesorios de penetración (con una onda de choque más limpia y uniforme, y periodos de vida útil incrementados en un 20% con respecto a las neumáticas), y una mayor capacidad de perforación (velocidades de penetración entre un 50% y un 100% mayores), mejores condiciones ambientales (menores niveles de ruido, ausencia de escapes de aire o nieblas de agua/aceite, mejor visibilidad), una mayor ergonomía de los equipos, una mayor elasticidad de la operación, mayor facilidad para la automatización, y menores costes de mantenimiento.

Fuente: López Jimeno, C. (1997): «Manual de Perforación y Voladura de Rocas». Madrid: ITGME.



«Tunnel Excavation». Stefg74.
<https://flic.kr/p/71QYnh>.
<https://www.flickr.com/photos/steg74/>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Introducción

Las voladuras

PLANTEAMIENTO DEL AVANCE

La forma de ataque de la sección de túneles y galerías depende de varios factores (terreno, equipo de perforación, tiempo disponible, tipo de sostenimiento, ventilación...). En rocas competentes y secciones de menos de 100 metros cuadrados suele recurrirse a excavación a sección completa.

En túneles grandes en los que la sección supere el alcance de los equipos de perforación, o en aquellos casos en los que las condiciones del macizo no permitan ir a sección completa, recurriendo general a la división en dos partes del túnel: zona superior, de avance, y zona inferior, de destroza. El avance implica perforación horizontal/subhorizontal, mientras que en el caso de la destroza, que lleva un cierto retranqueo con respecto al avance, es habitual recurrir a voladuras de banqueo horizontales o verticales.

Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

Introducción

Las voladuras

PLANTEAMIENTO DEL AVANCE

En caso de recurrir a banqueo vertical, es necesario disponer de carro de perforación con deslizadera de dimensiones ajustadas. Permite el trabajo de perforación simultáneo en avance y destroza. El banqueo horizontal por su parte permite emplear un mismo equipo en perforación y destroza, si bien la ejecución se caracterizará por una mayor discontinuidad. En túneles cuya calidad de roca sea mala, la sección suele dividirse en galerías piloto más pequeñas, que sirven como reconocimiento y se adelantan con respecto a las destrozas. Es común que la galería de avance se complete antes que la destroza.

Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

Los explosivos

EXPLOSIVO	DENSIDAD (gr/cm3)	CALOR DE EXPLOSIÓN MJ/kg	VELOCIDAD DE DETONACIÓN (m/s)	ENERGÍA RELATIVA EFECTIV (ANFO: 100%)		Volumen de gases l/Kg	Calidad de humos residuales (l/100g)
				WS (PRP)	BS (ERV)		
RIODIN	1,45	4,1	6000	135	244	895	< 2,27
RIODIN PLUS	1,5	3,9	5500	127	237	832	< 2,27
RIODIN PLUS MD	1,45	4,7	6200	151	273	878	< 2,27
RIODIN 9	1,65	2,7	5200	87	180	515	2,27 A 4,67
LIGAMITA 1	1,15	4	4300	119	171	901	< 2,27
AMONITA 2I	1,1	3,6	4100	107	147	911	2,27 A 4,67
NAGOLITA	0,8	3,9	4000	100	100	978	2,27 A 4,67
RIOGEL TRONER	1,25	3,5	5000	108	169	886	2,27 A 4,67
RIOGEL TRONER PLUS	1,3	4,3	5500	128	208	886	2,27 A 4,67
RIOMAX	1,115	3,9	4300	116	166	921	< 2,27
RIOFLEX U	1,1	2,84	4400	95	131	1006	2,27 A 4,67
RIOFLEX T	1,22	3,19	5200	103	154	988	< 2,27
RIOGUR R	1,15	3,54	3900	107	157	932	2,27 A 4,67
RIOGUR FCD	1,18	3,46	7200	105	155	938	2,27 A 4,67
RIOMEX 320	1,2	3	5400	98	147	914	2,27 A 4,67
RIOMEX E24	1,2	3,8	5400	109	164	864	2,27 A 4,67
RIOMEX E26	1,2	4,1	5400	114	171	840	< 2,27
RIOMEX E28	1,2	4,4	5400	118	176	821	< 2,27

Fuente: López Jimeno, C, López Jimeno, E. & García Bermúdez, P. (2010): «Manual de Voladuras en Túneles». Madrid: U.D. Proyectos - E.T.S.I.M.M.

Anexo: catálogos de explosivos industriales

Explosivos industriales

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

Para entender la función e importancia de los explosivos de seguridad, previamente hay que estudiar las atmósferas potencialmente explosivas que pueden darse en la minería subterránea de carbón, causadas por el grisú, el polvo de carbón, o la combinación de ambos. El R.G.N.B.S.M. distingue entre las siguientes categorías de mina y labores subterráneas:

- **De primera categoría o sin grisú:** no existe grisú ni gases inflamables.
- **De segunda categoría o débilmente grisúoso:** se desprende una cantidad reducida de grisú u otros gases inflamables.
- **De tercera categoría /fuertemente grisúoso:** en las que se desprende una cantidad importante de grisú y otros gases inflamables.
- **De cuarta categoría o con desprendimiento instantáneo de gas:** en las que puede desprenderse súbitamente grisú u otros gases inflamables, arrastrando importantes cantidades de gases.

Los explosivos de seguridad comenzaron a desarrollarse a finales del siglo XIX, empleándose en aquella época en la minería de carbón las pólvoras y los explosivos rompedores. Inicialmente se desarrollaron envolturas de seguridad, constituidas por arena, geles con agua cristalizada, o cloruros (volatilizaban el calor).

Estas envolturas podrían desmoronarse o bien aumentar el diámetro. A partir de los años cuarenta se incorporaron los inhibidores a la masa del explosivo, mejorando notablemente la seguridad. En los cincuenta aparecen los explosivos de intercambio iónico. Los últimos explosivos en surgir son los hidrogeles y emulsiones de seguridad.

Anexo: catálogos de explosivos industriales

Explosivos industriales

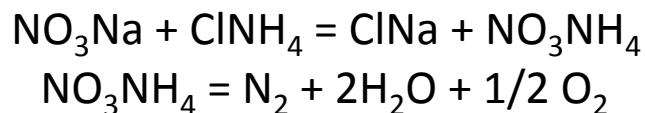
EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

EXPLOSIVOS CON ADITIVO INHIBIDOR

En estos explosivos el grado de seguridad se logra por un aditivo que se incorpora como inhibidor de la inflamación del grisú y del polvo de carbón. Este se introduce en la formulación del explosivo. A medida que aumenta el contenido del producto inhibidor, se producen un aumento de la seguridad, **acompañada de una pérdida gradual de las características explosivas.**

EXPLOSIVOS DE INTERCAMBIO IÓNICO

En la composición del explosivo entrar a formar parte un par de compuestos (par salino) cuya reacción en el momento de la detonación genera la formación del inhibidor. El par salino puede estar formado por nitrato sódico y cloruro amónico, que en su reacción producen el oxidante del explosivo (nitrato amónico), y el inhibidor (cloruro sódico) en estado naciente, de efectividad unas tres veces superior a las registradas en estado normal. La reacción del par salino es desencadenada por la detonación del sensibilizador (por lo general nitroglicerina), verificándose como sigue:



La energía es aportada en dos fases (la primera, de detonación del sensibilizador; la segunda de reacción del par salino, generando el inhibidor y el nitrato amónico, descomponiéndose éste último al verificarse la detonación.

Anexo: catálogos de explosivos industriales

Explosivos industriales

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

HIDROGELES Y EMULSIONES DE SEGURIDAD

Adecuación en la formulación de dichos explosivos para su lograr conformidad a los requisitos de seguridad exigidos en minería de carbón, manteniendo sus características básicas. Las características de estos hidrogeles de seguridad quedan disminuidas en comparación con las de los normales. Esto mismo es aplicable a las emulsiones.

Explosivos industriales

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

ENSAYOS ESPECÍFICOS DE LOS EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

La catalogación y ensayos de los explosivos de seguridad se realizan según pruebas concretas. Los ensayos con atmósferas explosivas se realizan en galerías de ensayo, compuestas de una cámara de explosión (en ella se generan las condiciones a simular), y una cámara de expansión (para dirigir los gases o llamaradas si se producen). Los barrenos se simulan mediante morteros (cilindros de hierro con un taladro longitudinal a lo largo del eje). Los morteros pueden presentar distintas longitudes (largo o corto), y configuraciones (cilíndrico o de esquina).

En la cámara de explosión se simulan las condiciones más desfavorables que pudiesen presentarse en una mina, con metano, polvo de carbón depositado o en suspensión, o mezcla de metano y polvo en suspensión.

Los tipos de ensayos que se realizan son los siguientes:

- ❁ **Mortero corto con o sin placa:** simula la existencia de una carga debidamente separada de una posible bolsa de grisú.
- ❁ **Mortero largo:** representa una carga disparada sin retardo, dando bocazo en una atmósfera del 9% de metano. Se prueban distintas longitudes de carga, porque no siempre la mayor es la que ofrece una mayor probabilidad de inflamación.
- ❁ **Cargas suspendidas:** colgadas en el interior de la galería longitudinalmente, simulando una carga que detona al aire al ser proyectada o dejada al descubierto por un barreno próximo, que ha salido adelantado en la secuencia de tiro.
- ❁ **Mortero en esquina:** simula el fenómeno de inflamación del grisú por reflexión de la onda de choque y gases de explosión contra un objeto duro (paredes laterales o frontales de la galería).

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

La iniciación

Iniciar un explosivo es provocar su detonación. En el caso de explosivos sensibles al detonador, la iniciación puede realizarse introduciendo un detonador en el interior de un cartucho (que llamaremos cartucho cebo) o de un multiplicador, que estará en contacto con el resto de la carga, o adosando un cordón detonante a la carga explosiva. Dicho cordón detonante se iniciará mediante un detonador, transmitiendo la detonación a dicha carga.

Existen dos formas básicas de cebado mediante detonadores eléctricos: en fondo o en cabeza.

El cebado en fondo con detonadores eléctricos se aplica en voladuras de interior (NO ASÍ EN VOLADURAS A CIELO ABIERTO, POR EL RIESGO QUE PUEDE SUPONER EL FALLO DE UN BARRENO, CON EL POTENCIAL DEPÓSITO DEL CARTUCHO CEBADO ENTRE EL ESCOMBRO). El detonador se inserta en un extremo del cartucho de cebo, debiendo anteriormente haberlo taladrado con un punzón adecuado*. El detonador deberá quedar cubierto por el explosivo, siendo recomendable hacer un lazo con los hilos conductores alrededor del cartucho.

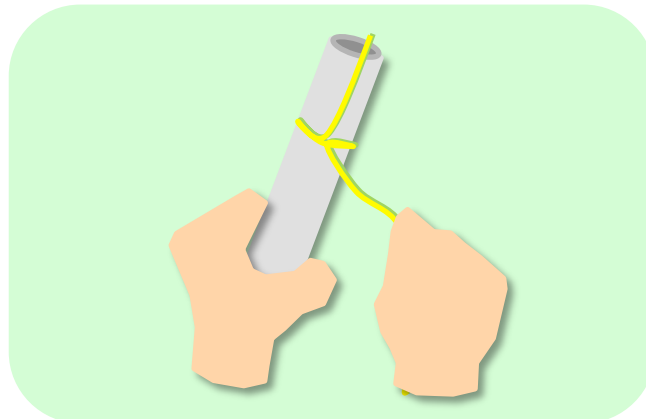
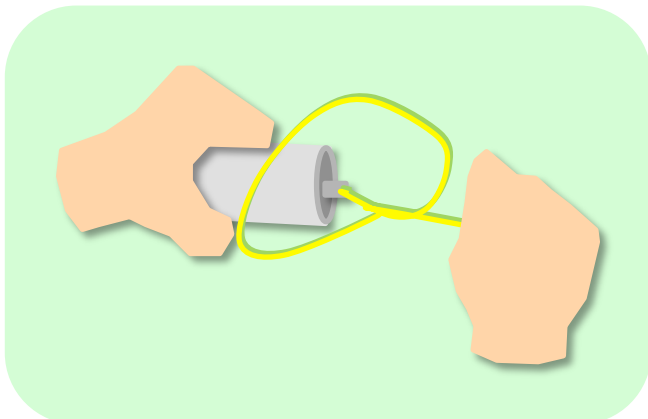
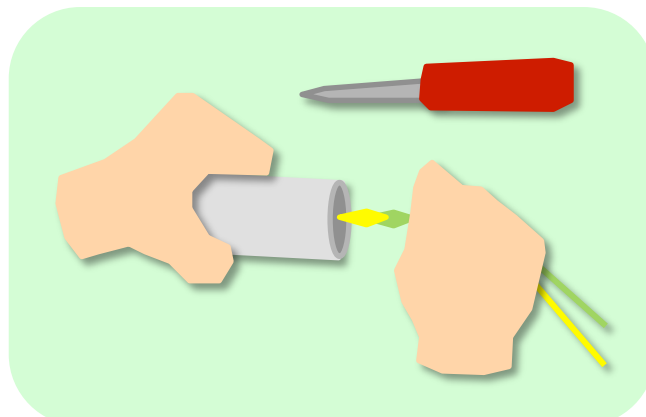
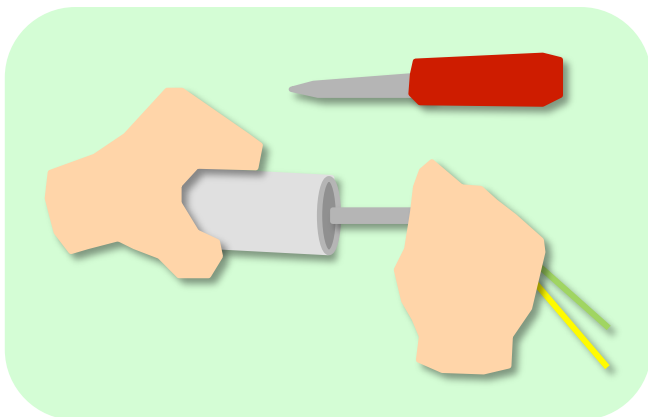
El cartucho cebado se coloca en el fondo, debiendo estar el detonador dirigido hacia la masa de explosivos (orientado del fondo hacia afuera). Durante la carga de los cartuchos en los barrenos, los hilos de los detonadores deben permanecer tirantes, evitando roturas o deterioros de aislamiento por abrasión. NUNCA SE DEBERÁ EMPLEAR EL ATACADOR SOBRE EL CARTUCHO CEBO.

Fuente: «Manual de Empleo de Explosivos». MAXAM.

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

El cebado

PUNZÓN DE COBRE ESTAÑADO CON MANGO DE PVC DURO ÚTIL EN EL CEBADO DE CARTUCHOS.



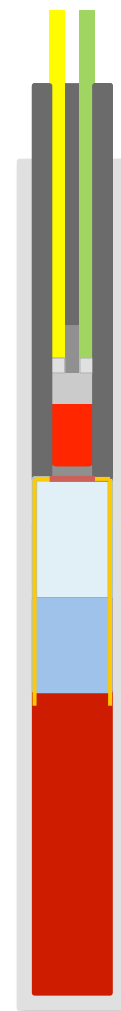
Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega eléctrica

Los detonadores eléctricos son aquellos que, como su nombre indica, se activan mediante energía eléctrica. Constituye un producto muy fiable, ya que permiten un diseño correcto de la voladura con unos resultados adecuados, seguridad en la manipulación y un control eficaz de los efectos derivados del empleo de los explosivos.

El detonador eléctrico se compone de tres partes (parte eléctrica, parte retardadora, y parte explosiva), dispuestas en un casquillo de aluminio o cobre, empleándose éste último en atmósferas con riesgo explosivo.

Fuente: «Manual de Empleo de Explosivos». MAXAM.



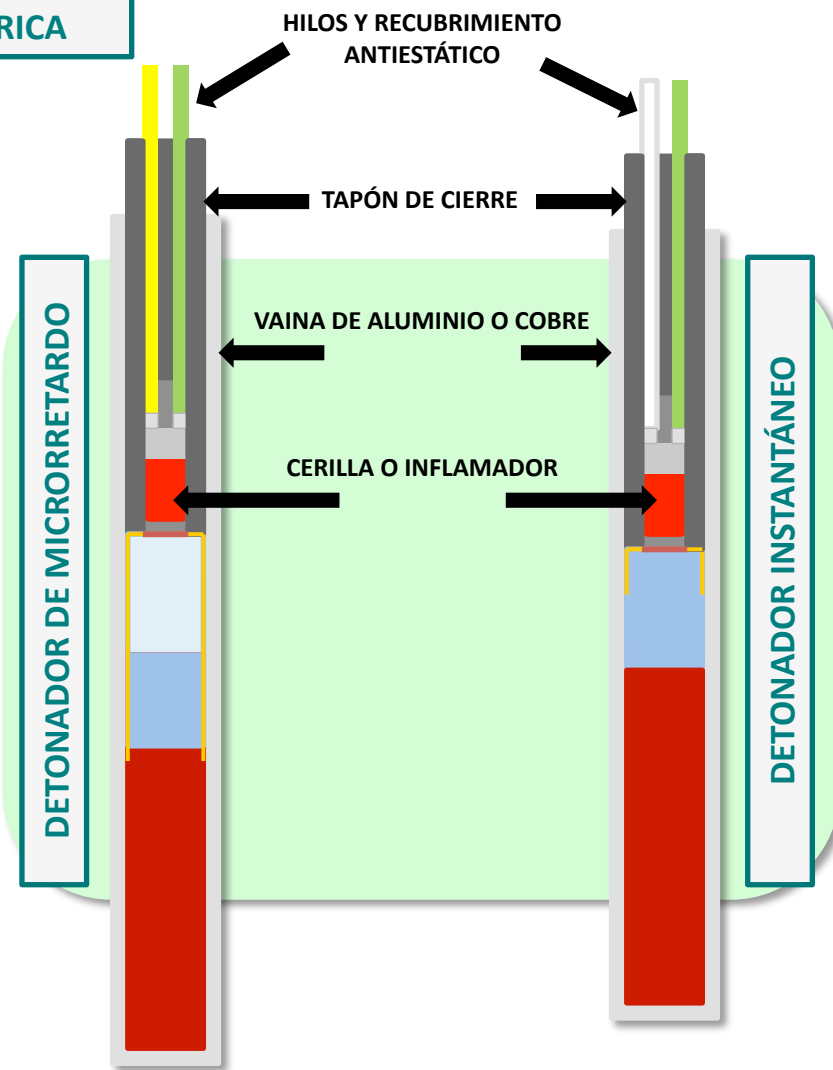
Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega eléctrica

PARTE ELÉCTRICA

La parte eléctrica va dispuesta en la zona superior del casquillo, formada por un inflamador/cerilla y los hilos de conexión, de colores diferentes en función del tipo de detonador.

El inflamador o cerilla es una pequeña resistencia, recubierta de pasta explosiva. Esta resistencia se llama también «puente de incandescencia», y va conectada a los hilos de conexión, recibiendo a través de ellos la corriente eléctrica.



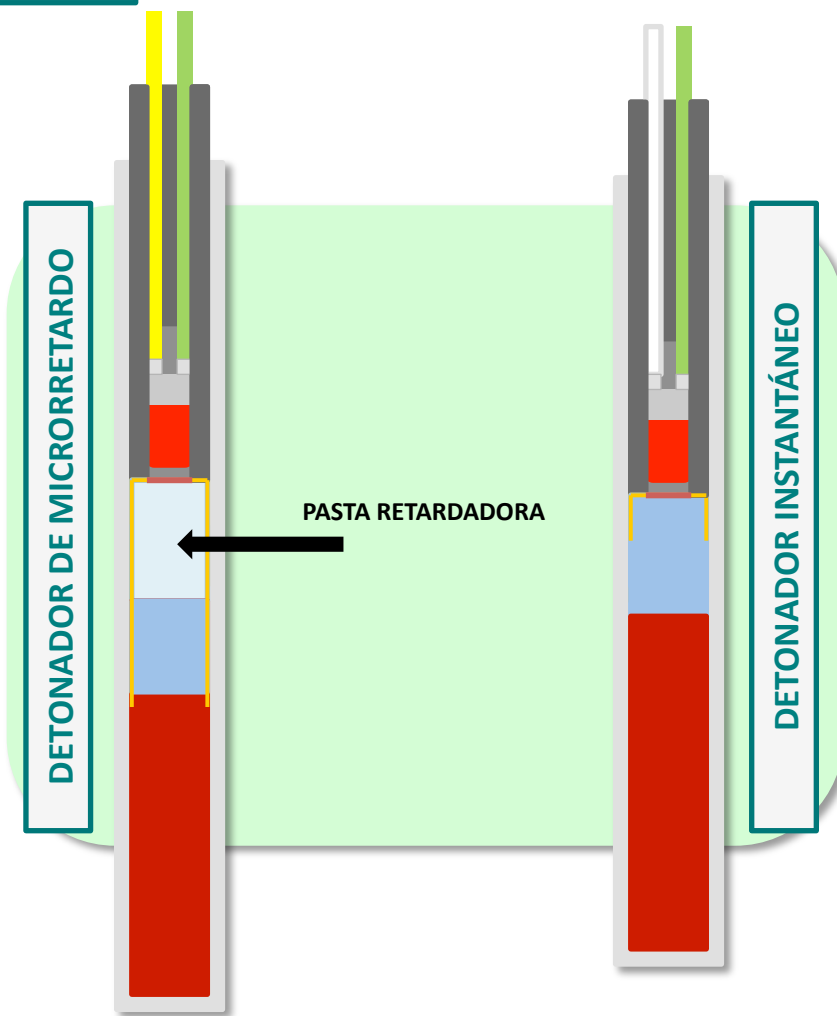
Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega eléctrica

PASTA RETARDADORA

La pasta retardadora únicamente puede encontrarse en los detonadores de tiempo, es decir, los detonadores eléctricos de retardo o microrretardo. Los detonadores instantáneos, o de número 0, no llevan.

En los detonadores de tiempo la pasta se coloca entre el inflamador y la carga explosiva (zona intermedia del detonador). Se compone de un pequeño casquillo metálico (portarretardo) lleno de pasta explosiva retardadora de precisión que arderá a una velocidad calculada.

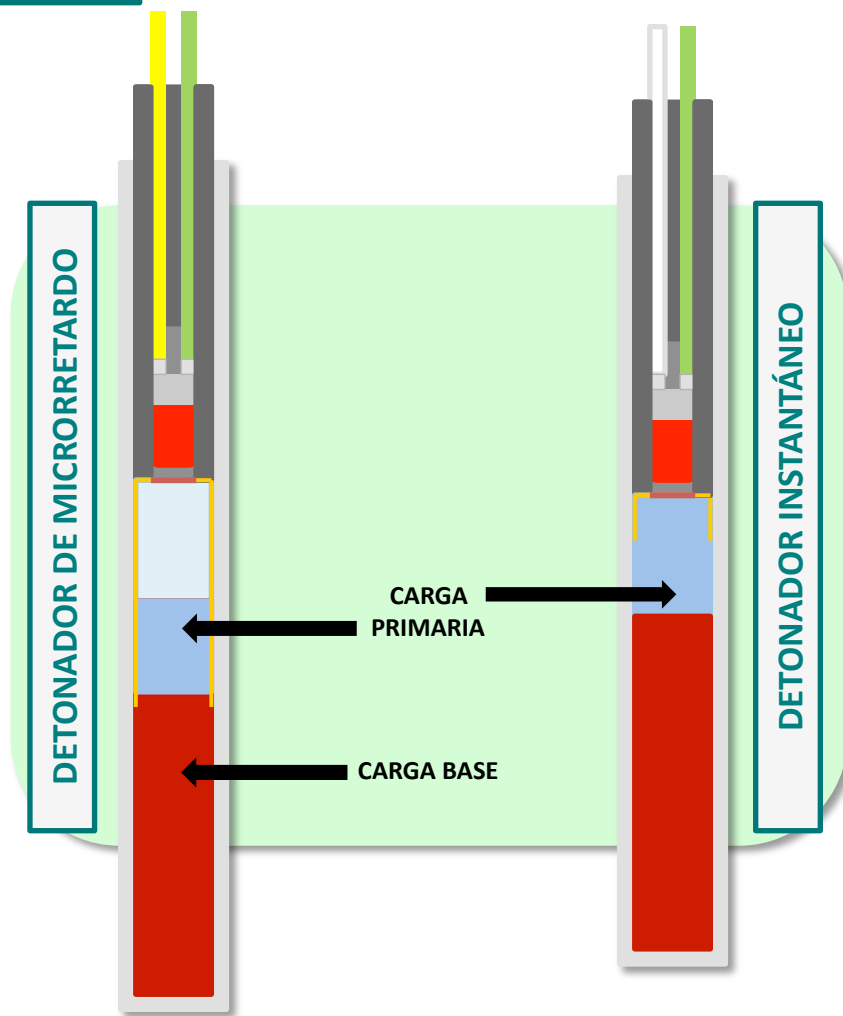


Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega eléctrica

PARTE EXPLOSIVA

Alojada en el interior del casquillo, compuesta de dos cargas. La menor, se denomina carga primaria (compuesta de nitruro de plomo con estifnato de plomo) y la mayor se denomina carga base o secundaria, de pentrinta.



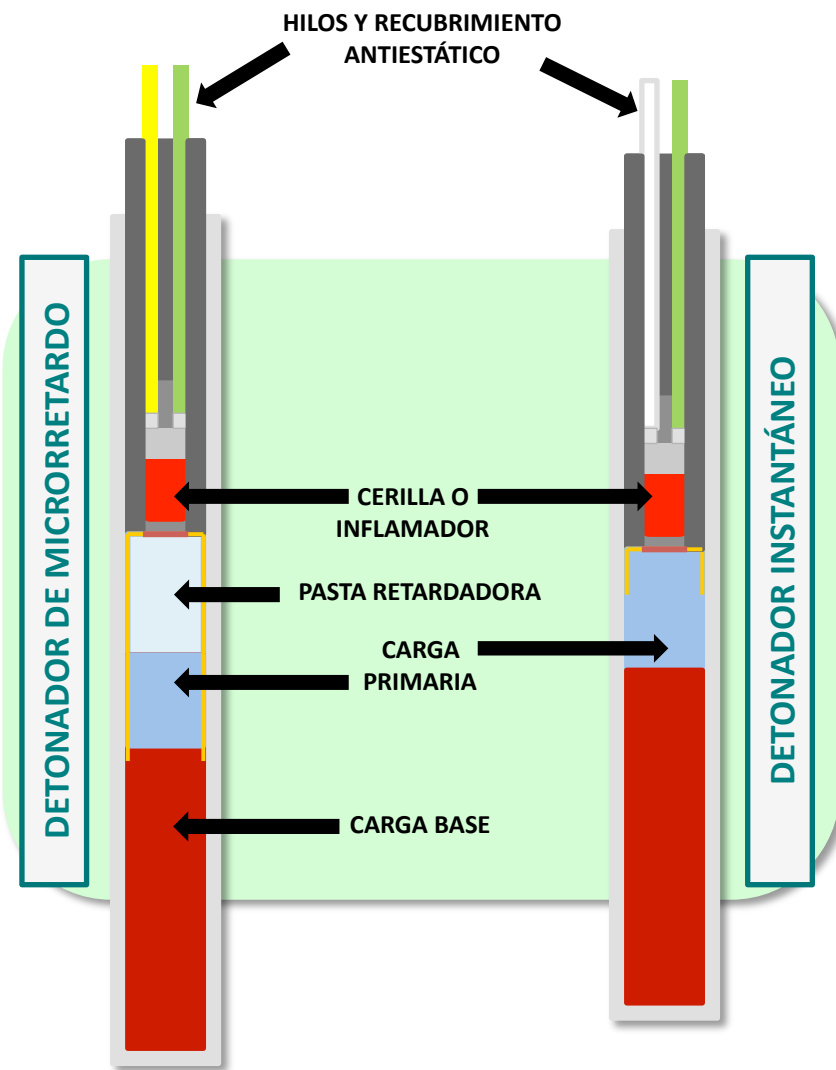
Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Funcionamiento

Cuando una corriente eléctrica pasa por los hilos de conexión atravesando la pequeña resistencia de la cerilla, con una intensidad de corriente lo bastante grande, provoca el calentamiento de la resistencia hasta alcanzar la temperatura de inflamación de la pasta explosiva que la rodea.

En los detonadores de tiempo, la inflamación de la cerilla ocasiona la del elemento de retardo, de tal modo que cuando éste termina de arder, la combustión alcanza la carga primaria, que detona, haciendo a su vez detonar la carga base o secundaria.

En el caso de detonador eléctrico instantáneo (o de número 0), al carecer de portarretardo, la cerilla hace detonar a la carga primaria directamente, y ésta la carga



Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Funcionamiento

INTENSIDAD DE CORRIENTE RECOMENDADA

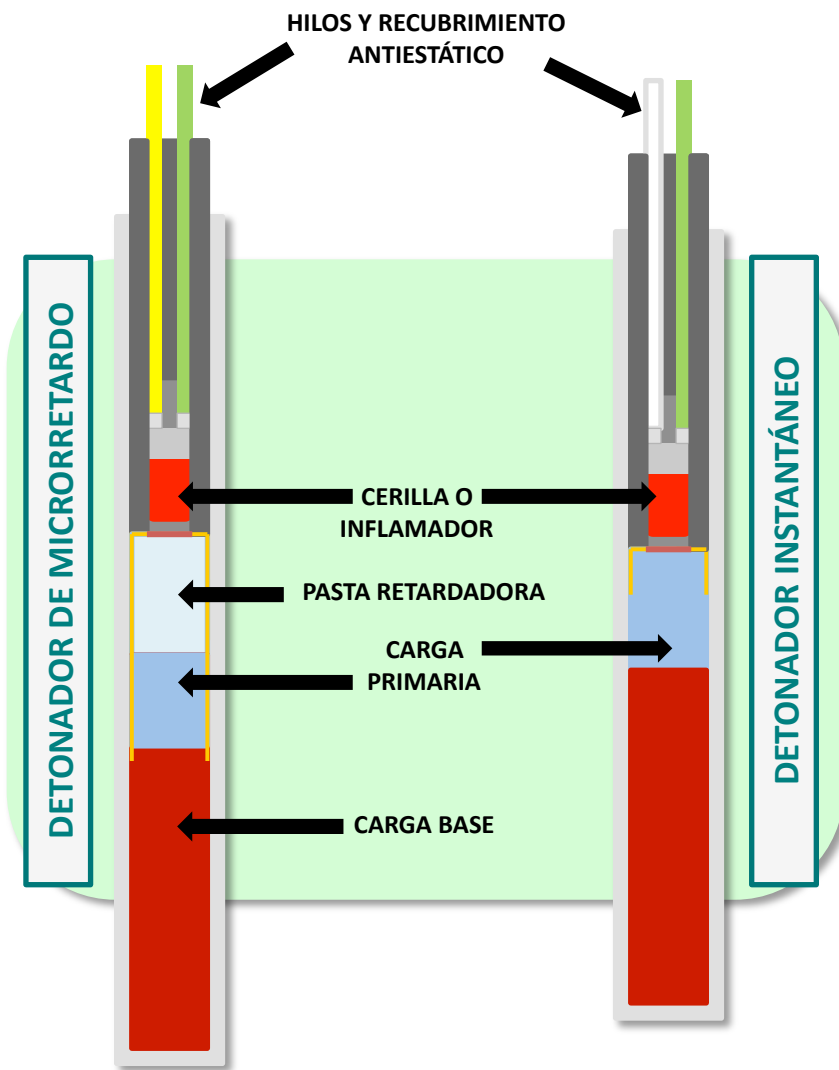
Intensidad mínima necesaria para asegurar que todos los detonadores conectados en serie de una voladura reciban energía suficiente para su correcta iniciación. Viene recomendada por el fabricante, y debe ser la mínima a utilizar. Se mide en Amperios(A).

CORRIENTE DE SEGURIDAD

Máxima intensidad de corriente que atravesando el puente de incandescencia del detonador durante cinco minutos no provoca inflamación. Se mide en Amperios (A).

IMPULSO DE ENCENDIDO O SENSIBILIDAD ELÉCTRICA DE LOS DETONADORES

Energía eléctrica por unidad de resistencia necesaria para provocar al inflamación de la cerilla. Se mide en miliWattios-s/W.



Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Clasificación de los detonadores eléctricos en base a su sensibilidad

SENSIBLES (S)

Apropiados para lugares en que no existe peligro de corrientes estáticas/extrañas, producidas por líneas eléctricas, tormentas... Uno de los hilos es de color rojo, el color del otro hilo vendrá determinado por el tiempo de retardo. Ningún detonador sensible debe hacer explosión al ser atravesado por corriente de 0,18 A durante 5 minutos. Hoy día prácticamente en desuso. Intensidad de encendido en serie 1,2 A.

INSENSIBLES (I)

Más seguros que los S frente a corrientes extrañas. Su impulso de encendido es 5 veces mayor y su corriente de seguridad superior al doble. Se emplea en casos en que a pesar de no ser previsible la existencia de corrientes peligrosas en el entorno, se requiere un mayor margen de seguridad. Uno de sus hilos será rosa. Ningún Riodet I debe explotar con una corriente de 0,45 A durante 5 minutos. La intensidad mínima de disparo es de 2,5 A.

ALTAMENTE INSENSIBLES (AI)

Se reducen notablemente los riesgos de autoencendido ante energías extrañas, a pesar de no ser totalmente seguros en caso de que superen los límites de seguridad. La corriente de seguridad es de 4 A, y la intensidad de disparo de 25 A. Se distinguen por el color verde de uno de sus hilos.

Si el puente de incandescencia de algún detonador rompe antes de encenderse todos, la corriente se cortaría (no saldría la voladura entera). Es peligroso utilizar corrientes insuficientes, o mezclar detonadores de distinta sensibilidad.

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Clasificación de los detonadores eléctricos en base a la secuenciación

INSTANTÁNEOS

Sin portarretardo, por lo que la detonación es instantánea. Uno de sus hilos será blanco.

MICRORRETARDO DE 25-50 ms

Los detonadores explotan con secuencia de 25/50 ms. La serie va desde el número 1 al 16 en la serie de 25 ms, y del 18 al 30 (sólo pares) de 50 ms. El número más alto de la serie explota a los 750 ms del accionamiento del explosor. Uno de sus hilos será amarillo O TURQUESA (Maxam).

RETARDO DE 500 ms

La serie consta de 12 números. No es aconsejable en voladuras a cielo abierto, ya que puede producir proyecciones inadecuadas. Suelen emplearse con cierta frecuencia en interior. Uno de sus hilos será azul.

MAXAM HA AMPLIADO A 16 NÚMEROS

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Código de colores y resumen de los parámetros eléctricos

TRADICIONALMENTE, COLOR AMARILLO. RECIENTEMENTE MAXAM PASA A TURQUESA.

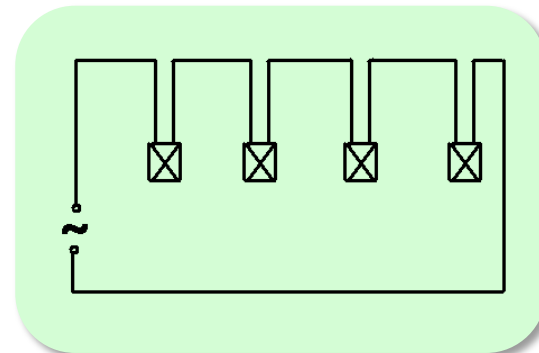
Clasificación por sensibilidad	Sensibles (S)		Insensibles (I)		Áltamente Insensibles (AI)	
Clasificación por tiempo	Hilo sensibilidad	Hilo tiempo	Hilo sensibilidad	Hilo tiempo	Hilo sensibilidad	Hilo tiempo
Instantáneos	[Red]	[White]	[Pink]	[White]	[Green]	[White]
Microrretardo, 25 ms		[Yellow]		[Yellow]		[Yellow]
Retardos, 500 ms		[Blue]		[Blue]		[Blue]

Clasificación por sensibilidad	Sensibles (S)	Insensibles (I)	Áltamente Insensibles (AI)
Resistencia del puente (Ω)	1,2 - 1,6	0,3 - 0,5	0,03 - 0,05
Impulso de encendido (mJ/ Ω)	0,8 - 3	8 - 16	1100 - 2500
Corriente de seguridad (A)	0,18	0,45	4
Corriente de encendido en serie (A)	1,2	2,5	25

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

La conexión en serie

Cada detonador se va conectando al anterior y al siguiente mediante sus terminales. El terminal que queda libre del primer detonador y el del último de la serie se conecta a la línea volante, y ésta a la línea principal de tiro. La línea de tiro deberá permanecer cortocircuitada por los extremos destinados a la conexión con el explosor hasta el momento de la comprobación. La resistencia total teórica deberá coincidir con la que se mida en el óhmetro, y deberá ser:



RESISTENCIA DE LA LÍNEA DE TIRO + RESISTENCIA DE LA LÍNEA VOLANTE + RESISTENCIA TOTAL DEL DETONADOR · NÚMERO DE DETONADORES. $R_t = R_l + R_d \cdot N$

LA RESISTENCIA DEL DETONADOR DEPENDERÁ DE LA DE PUENTE, Y DE LA LONGITUD DE LA MADEJA QUE CONSTITUYA SUS HILOS EXTREMOS DE CONEXIÓN, POR LO QUE CRECERÁ CON DICHA LONGITUD.

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Comprobaciones previas a disparo

Requiere comprobación de continuidad: estando la línea de tiro cortocircuitada por uno de los extremos (unidos los dos ramales en un extremo), la resistencia que dé el óhmetro deberá coincidir con la calculada para la línea.

Comprobada la línea de tiro, debe conectarse la circuito de voladura para la comprobación del circuito completo. Antes de realizar la comprobación, deberá retirarse el personal por razones de seguridad. La resistencia del óhmetro deberá coincidir con la calculada. **POSIBLES CAUSAS DE NO COINCIDENCIA:**

- 🔧 **RESISTENCIA DEMASIADO ALTA:** posible falso contacto en algún empalme o detonador.
- 🔧 **RESISTENCIA DEMASIADO BAJA:** no están conectados todos los detonadores, o existe derivación en el circuito o cruce en la línea de tiro.
- 🔧 **RESISTENCIA INFINITA:** circuito abierto, por un detonador defectuoso por la rotura de un hilo o, en determinados casos, por la rotura de un puente.

En caso de detectarse una de estas anomalías, deberá localizarse la avería. Inicialmente mediante inspección visual. Si no se detecta el fallo, debe desconectarse la línea de tiro (nueva verificación de continuidad). Si el fallo no está en la línea, se une uno de sus terminales a un extremo del circuito, y el otro a la mitad del circuito. (Se comprueba en qué mitad está el error). Se vuelve a dividir el circuito defectuoso en dos mitades, y así hasta localizar al avería.

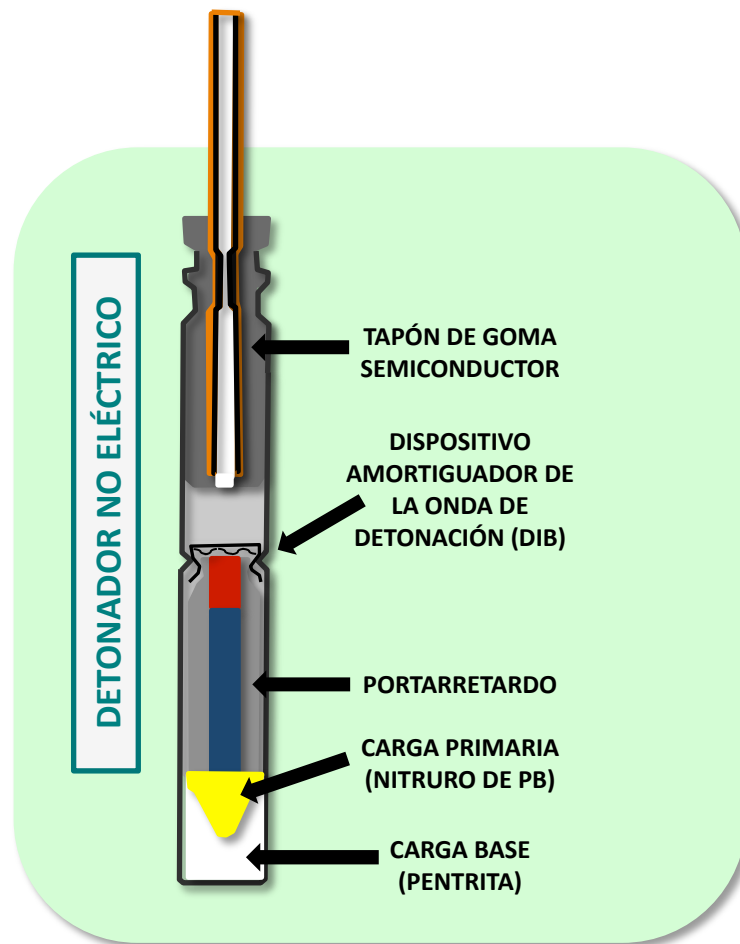
Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega no eléctrica

El fundamento del sistema consiste en una onda de choque de baja velocidad de detonación, canalizada a través de un tubo de plástico (tubo de transmisión). Una vez iniciado el tubo produce una onda de detonación de 2000 m/s. Dicho fenómeno, de onda de choque, se propaga de manera fiable aún a pesar de nudos, dobleces... La onda de detonación no influye en la columna de explosivo del barreno, permitiendo la iniciación en fondo, ya que la cantidad de reactivo es tan pequeña que la superficie exterior del tubo queda intacta durante el paso de la onda de detonación.

Elementos altamente precisos. Se componen de cápsula de aluminio que contiene en su interior una carga base de pentrita, una carga primaria de nitruro de plomo, un portarretardo metálico con su correspondiente pasta, un sistema de amortiguación de la onda de detonación (DIB) y un tapón de goma semiconductora (engarce al tubo de transmisión).

Fuente: «Manual de Empleo de Explosivos». MAXAM.



Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega no eléctrica

La carga base inicia con suficiente energía el explosivo, los detonadores no eléctricos tienen potencia equivalente al detonador óctuple.

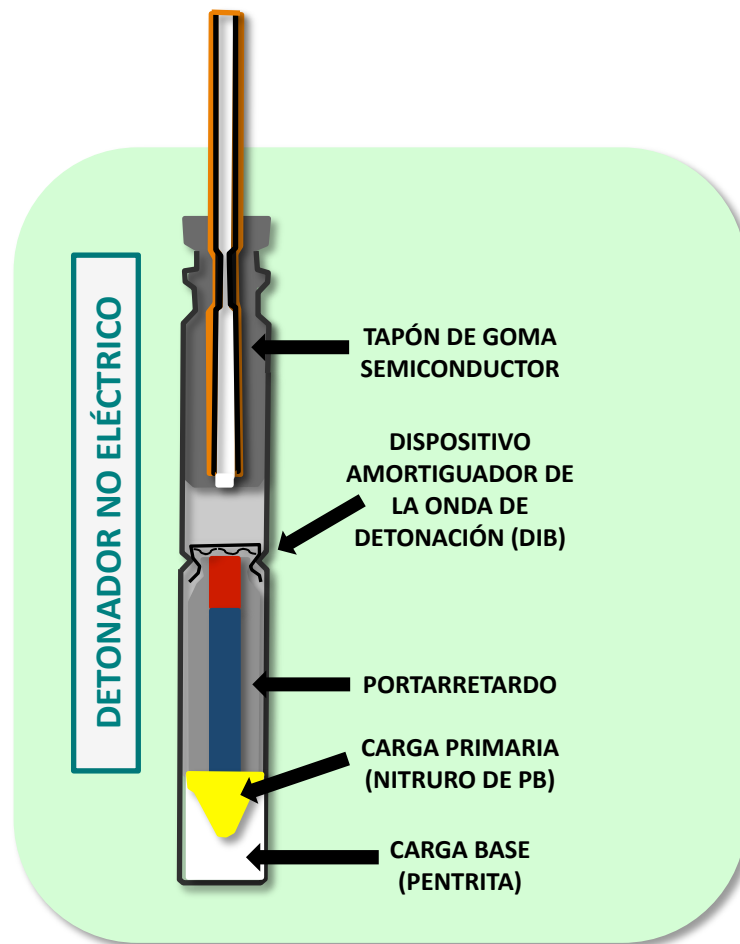
La carga primaria de nitruro de plomo recibe la energía de iniciación de la carga portarretardo, y la transfiere a la carga base.

El portarretardo es de aluminio, y contiene la pasta pirotécnica de gran precisión que da el retardo. Recibe la energía de iniciación desde el tubo de transmisión a través de una composición iniciadora (parte superior, asegura la iniciación).

El amortiguador de la onda de detonación (DIB) distribuye la energía de la onda desde el tubo a toda la superficie de la composición iniciadora del portarretardo (mejora la precisión), previene fallos de aspiración en el portarretardo, y previene la iniciación inversa (del tubo por el detonador).

El tapón de goma semiconductora asegura la hermeticidad, y proporciona conductividad para la electricidad estática del tubo a las paredes del detonador (comprobado hasta 20 KV).

Cada detonador tiene un conector J («cabeza de pato»), que facilita las conexiones al cordón detonante de 3 ó 6 gr.



Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega no eléctrica

DETONADORES NO ELÉCTRICOS MS

La serie de milisegundos suele emplearse para la mayoría de aplicaciones de voladuras a cielo abierto. Cuentan con incrementos de tiempo de 25 ms en números consecutivos del 1 al 30 (desde el 12 sólo existen pares). Disponibles en amplia gama de longitudes. Se dispone de instantáneo. Tubo naranja. Con conector J.

Nº Periodo	Tiempo (ms)	Nº Periodo	Tiempo (ms)
1	25	12	300
2	50	14	350
3	75	16	400
4	100	18	450
5	125	20	500
6	150	22	550
7	175	24	600
8	200	26	650
9	225	28	700
10	250	30	750

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega no eléctrica

DETONADORES NO ELÉCTRICOS LP

Serie de largo periodo, especialmente diseñados para avances en galería de mina y túneles. Los tiempos de retardo son mucho mayores que los de la serie MS, permitiendo el tiempo de movimiento de la roca y creación de cara libre para la expansión y salida de la roca. Cuentan con conector J (para enganchar a línea maestra de cordón detonante). Tubo amarillo.

Nº Periodo	Tiempo (ms)	Nº Periodo	Tiempo (ms)
1	100	18	1800
2	200	20	2000
3	300	25	2500
4	400	30	3000
5	500	35	3500
6	600	40	4000
7	700	45	4500
8	800	50	5000
9	900	55	5500
10	1000	60	6000
12	1200	70	7000
14	1400	80	8000
16	1600	90	9000

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega no eléctrica

DETONADORES NO ELÉCTRICOS CON RETARDO EN SUPERFICIE (DDX)

Reúne detonador en fondo y retardo en superficie. El retardo de superficie está montando en un **bloque EZ** de fácil uso. Su tubo es color naranja. El color del conector de plástico tendrá distintos colores en función del retardo. Se compone de detonador de fondo de potencia óctuple, tubo de transmisión y elemento de retardo en superficie alojado en conector de plástico. El retardador en superficie es un detonador de poca potencia (sin carga base). Inicia los tubos de transmisión, pero en sí no podría detonar cordón ni explosivos. Dado su diseño, no es necesario cubrirlos con detritus de perforación o arena.

En el bloque conector pueden colocarse hasta 6 tubos de transmisión (NO CORDÓN DETONANTE), siempre se mantienen a 90° respecto al elemento de retardo, lo que asegura la iniciación y propagación en dos direcciones del tubo de transmisión.

Al conectar la voladura los tubos deben introducirse en el bloque uno a uno, escuchando el click que atestigua la inserción.

Los colores de las etiquetas dependen de los retardos, y la longitud del tubo se especifica grabada en una etiqueta (facilita la identificación si hay varios detonadores en un barreno).



BLOQUE EZ

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

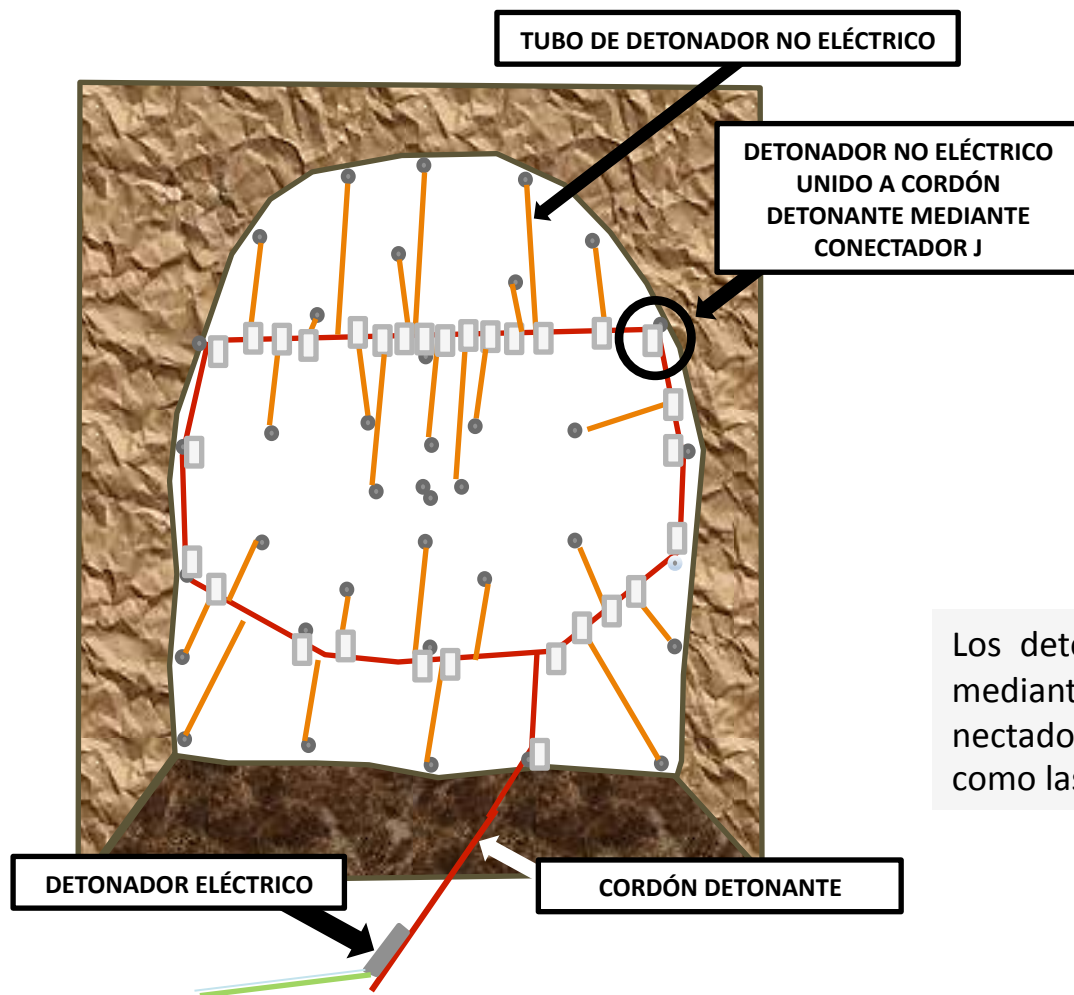
Pega no eléctrica

CONECTOR DE SUPERFICIE (SCX)

Elemento de retardo en superficie, que incorpora el bloque conector de plástico EZ con el retardador de baja potencia, adosado al tubo de transmisión. El tubo es amarillo, y el color del bloque conector depende del retardo. Cuenta con banderola irrompible (blanca impresa en negro). Se puede emplear con el detonador con retardo en superficie (Rionel DDX) para modificar los tiempos de retardo, o combinarse entre sí para conseguir diversos tiempos de retardo (Ej.: $25\text{ ms} + 9\text{ ms} = 34\text{ ms}$). Pueden emplearse además con detonadores Ms, suponiendo una opción silenciosa frente al cordón detonante. Son además simples de conectar. Presenta en el extremo opuesto a aquel en el que esté el conector EZ un conector J, para poder unirlo a líneas maestras de cordón detonante (NO INCLUYE DETONADOR).

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega no eléctrica

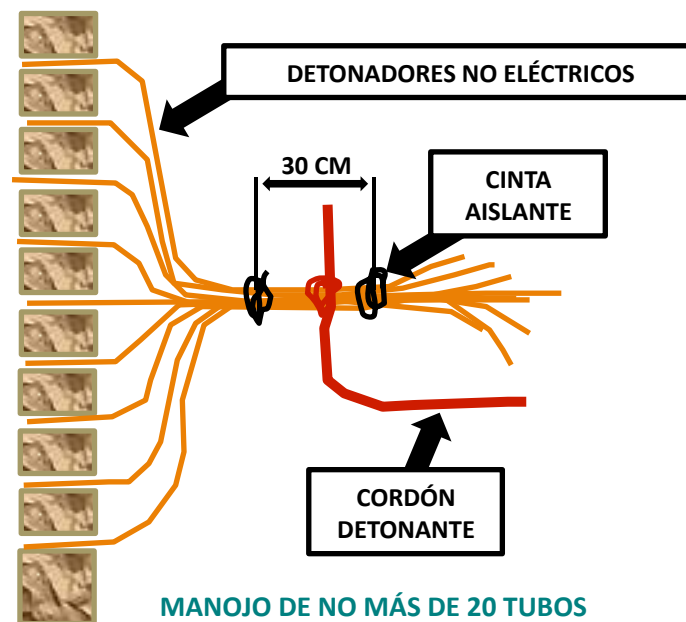
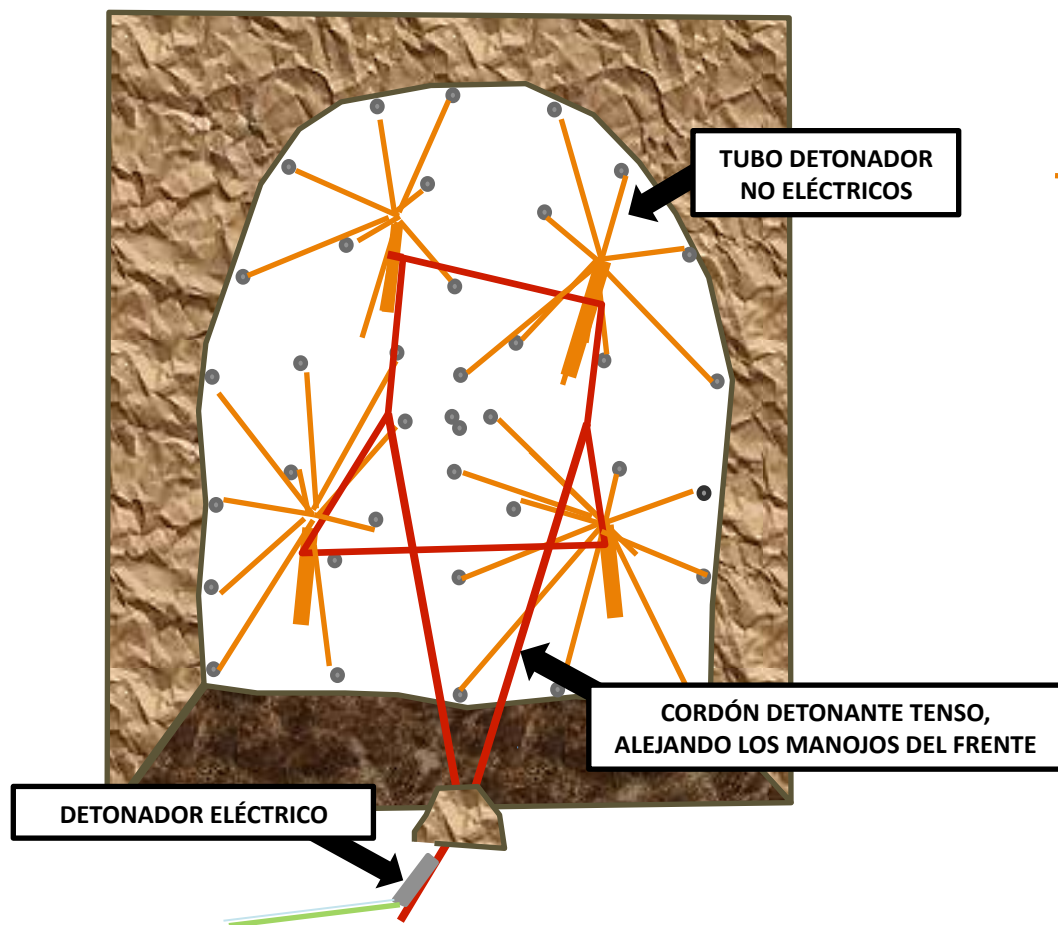


Los detonadores no eléctricos pueden iniciarse mediante cordón detonante, bien utilizando el conector J que presentan tanto las variantes ms como las LP, o a través del método de manojos.

Fuente: «Manual de Empleo de Explosivos». MAXAM.

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega no eléctrica

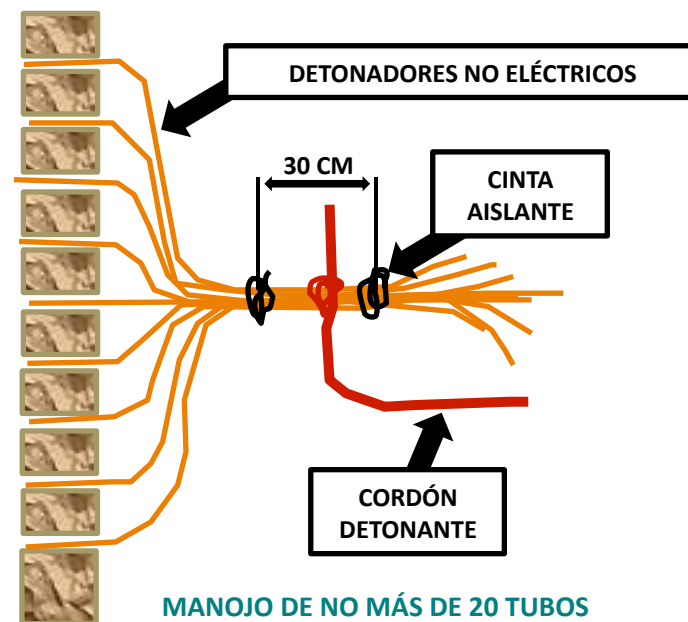


Fuente: «Manual de Empleo de Explosivos». MAXAM.

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega no eléctrica

- Se agrupan hasta 20 tubos por manajo. Se asegura que están tensos, y se enrollan con cinta adhesiva.
- A 30 cm se enrolla nuevamente el manajo con cinta adhesiva,
- Todos los manojos se juntarán con cordón detonante. En el centro del manajo, entre los dos encintados, se anuda cordón detonante con un nudo simple en derivación.
- Puede repetirse tantas veces como se precise.
- Debe iniciarse la línea maestra asegurando que el iniciador principal no dañe las conexiones.
- El cordón detonante no deberá estar en contacto con ningún tubo de transmisión fuera del nudo.



Fuente: «Manual de Empleo de Explosivos». MAXAM.

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Pega electrónica

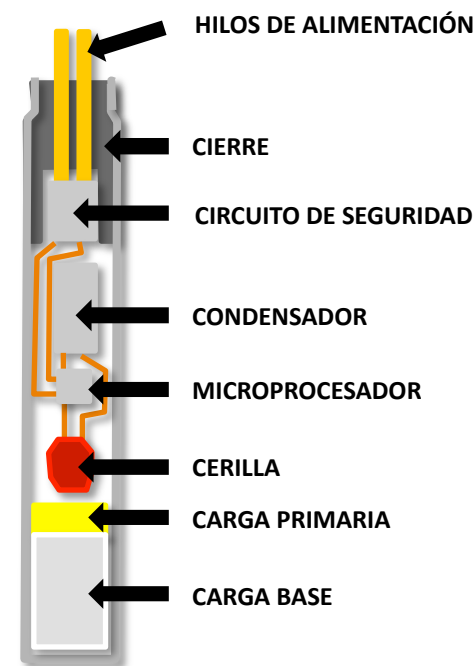
Emplea un microchip para regular el retardo del detonador, empleando la energía eléctrica almacenada en uno o varios condensadores. El retardo se consigue electrónicamente, no pirotécnicamente como sucede con los detonadores eléctricos y no eléctricos.

Cada detonador aloja un microchip al que se le asigna durante la fabricación un código de serie (identidad). El detonador va unido por un cable bifilar a un conector en el que va grabado un código de barras (código de serie del microchip). El conector permite unir cada detonador con el anterior y siguiente en el circuito de la voladura.

Los detonadores pueden programarse individualmente para hacer explotar en un intervalo entre 0 y 25 segundos, con incrementos de un milisegundo.

El tiempo entre barrenos puede variarse automáticamente y de forma pre-programada, o manualmente por una persona experta, una vez que el detonador esté colocado. Si hubiese detonadores que no hubiesen sido escaneados, el sistema asigna un tiempo, de modo que explotan tras haber salido los demás, eliminando el riesgo de detonadores en el escombro.

Sistema compuesto por: detonadores, escáner, explosor, comprobador, accesorios (líneas de tiro, alargadores de línea, conectadores entre circuitos...), software.



Fuente: Ríos Vázquez, J. (2009): «Curso Básico de Explosivos». Oviedo: I. Gofer.

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

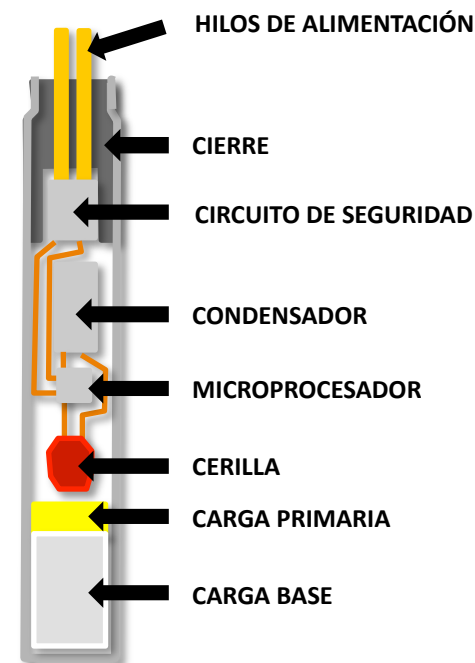
Pega electrónica

VENTAJAS

- **Altísima precisión, variedad de retardo.**
- **Posibilidad de programar con retardos entre 0 y 25 segundos con incrementos de un milisegundo y exactitud de 0,1% (microsegundos). ESTOS PARÁMETROS DEPENDEN DE MODELO Y FABRICANTE, MAXIMO ENTRE 0 Y 25 MS, CON DIFERENCIA DE 1 MS.**
- **Seguridad ante corrientes extrañas, respuesta únicamente ante señal eléctrica codificada por el explosor.**
- **Facilidad de conexión: el circuito de voladura se conecta uniendo dos terminales eléctricos entre barrenos, sin preocuparse del orden. Son conexiones simples que pueden modificarse.**
- **Versatilidad: una vez asignados los tiempos pueden corregirse tantas veces como se quiera con el escáner previamente al disparo.**
- **Mejora de los resultados de las voladuras en materia de vibraciones (cada barreno puede iniciarse en un tiempo distinto y en secuencia adecuada al tipo de roca).**

DESVENTAJAS

La alta inversión requerida en Hardware, la formación del personal o el elevado coste de los detonadores (tres o cuatro veces superior al no eléctrico), son aspectos que dificultan la generalización del método.



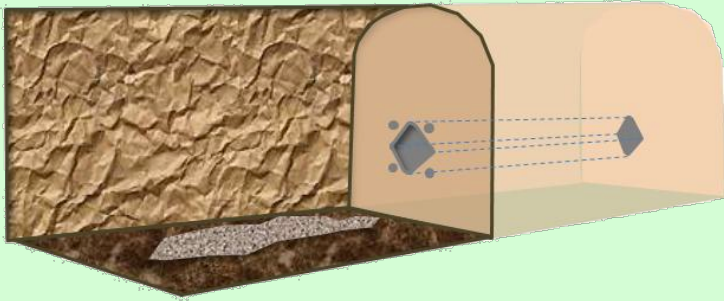
Fuente: Ríos Vázquez, J. (2009): «Curso Básico de Explosivos». Oviedo: I. Gofer.

Tipos de voladuras: eléctrica, no eléctrica, electrónica

Principales tipologías de avance en túneles y obra subterránea

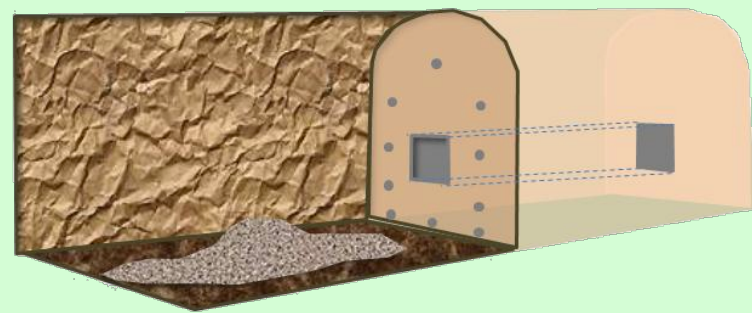
1

MATERIALES DEL CUELE



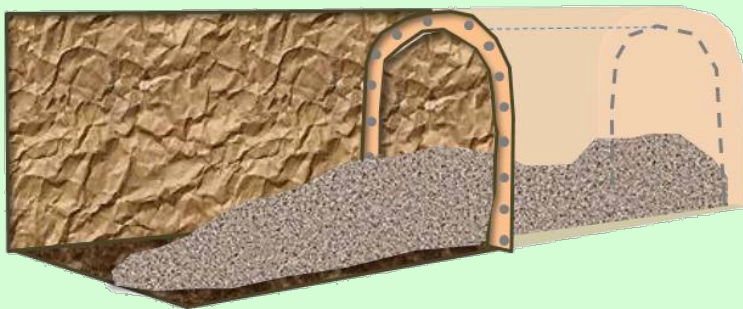
2

MATERIALES DEL CONTRACUELE



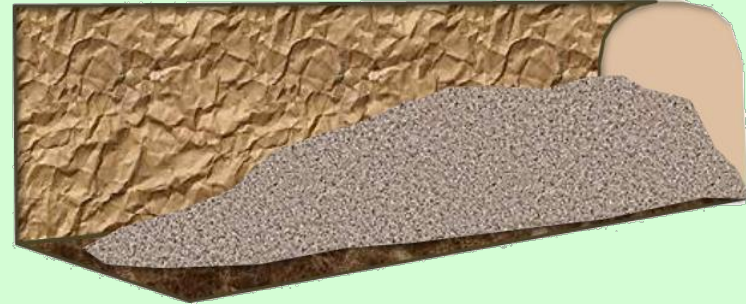
3

MATERIALES DE LA DESTROZA



4

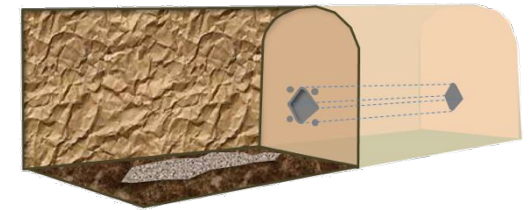
PERFIL FINAL TRAS RECORTE



Esquemas de perforación

Zonas fundamentales en las que se divide la voladura

Las voladuras en túneles se caracterizan por contar únicamente con una superficie libre, la del propio frente de ataque. Es por ello que se requiere crear un hueco hacia el cual dar salida a los materiales del resto de la voladura, recurriendo de esta manera a la generación de **cueles** y **contracueles**. Dicho hueco inicial podrá oscilar entre 1 y 4 m², en función de las dimensiones de la sección. Al considerar **la destroza**, y con independencia de su similitud con las voladuras en banco, los consumos específicos suelen situarse entre 4 y 10 veces superiores, por el mayor confinamiento, errores de perforación, etc. Los barrenos de **contorno**, que marcan la forma final de la excavación, cuentan con un espaciamiento reducido y suelen ir perforados con una inclinación hacia el exterior, de tal manera que permitan un hueco suficiente para la ubicación de las perforadoras. El cuele y su ubicación influyen en la dirección de proyección del escombro, y también en aspectos como la fragmentación y el número de barrenos.



Fuente: López Jimeno, C, López Jimeno, E. & García Bermúdez, P. (2010): «Manual de Voladuras en Túneles». Madrid: U.D. Proyectos - E.T.S.I.M.M.

Esquemas de perforación

Cueles

Las voladuras en túneles presentan una mayor complejidad que las voladuras en banco, por no contar con una segunda superficie libre, lo que eleva los consumos específicos (4 y 10 veces superiores). Dada la proximidad entre barrenos, es necesario que los explosivos empleados deberían presentar una adecuada insensibilidad a la simpatía, pero caracterizarse por una adecuada velocidad de detonación, superior a los 3000 /s.

Los cueles pueden divisarse en dos grupos principales: **cueles de barrenos paralelos**, y **cueles de barrenos en ángulo u oblicuos**. Un segundo criterio de clasificación, para los cueles de barrenos en oblicuos, reside en la iniciación simultánea o secuenciada de los barrenos constituyentes del cuele.

Se comentarán seguidamente aquellos de uso más extendido:

CUELES DE BARRENOS OBLICUOS

-  **Instantáneos.**
-  **Secuenciados.**

CUELES DE BARRENOS PARALELOS

-  **Cráter.**
-  **Quemados.**
-  **Canadiense.**
-  **Cilíndricos.**

Fuente: López Jimeno, C, López Jimeno, E. & García Bermúdez, P. (2010): «Manual de Voladuras en Túneles». Madrid: U.D. Proyectos - E.T.S.I.M.M.

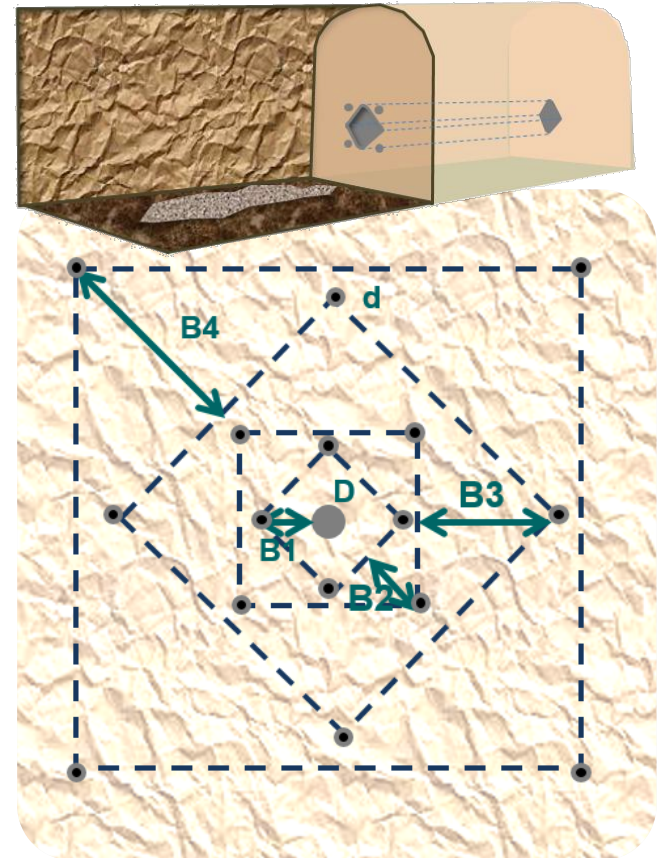
Esquemas de perforación

Cueles

CUELES CILÍNDRICOS

Se denomina **cuele** al conjunto de barrenos que, cargados de explosivo o no, crean un hueco inicial en la galería, de tal manera que los barrenos posteriores encuentren una cara libre que facilite su acción. Comúnmente en el centro, si bien no tiene por qué ser siempre así.

El **contracuele** es la corona de barrenos que circundan a los del cuele. A menudo se consideran parte de los del cuele, pero merecen trato diferenciado. El contracuele ensancha el hueco creado por el cuele, y no presenta barrenos vacíos. Emplean secuencias de milisegundos en sus barrenos. Si bien son tiros sobrecargados, presentan menor consumo específico que el cuele.



Esquemas de perforación

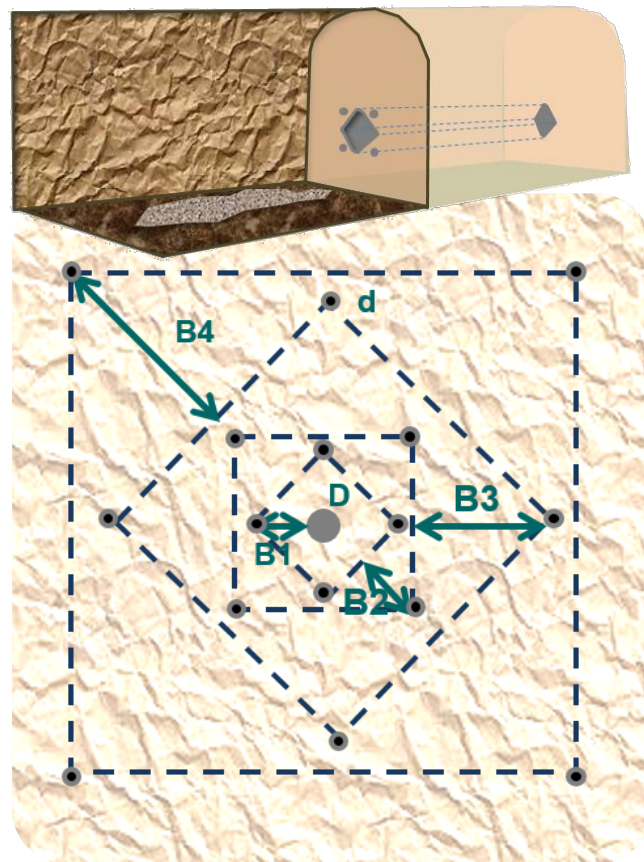
Cueles

CUELES CILÍNDRICOS

Los más utilizados en la actualidad, suelen aplicarse con independencia de las dimensiones del túnel o galería en cuestión. Presenta uno o más barrenos vacíos (de expansión, de gran diámetro, entre 65 y 200 milímetros, perforados mediante escareo), con una salida escalonada de los barrenos cargados).

CUELE DE CUATRO SECCIONES

El cuele cilíndrico empleado en la actualidad con mayor frecuencia es el **de cuatro secciones**, dada su simpleza. Utiliza uno o dos barrenos centrales de mayor diámetro (3 1/2" ó 4") que el resto de la pega, que no van cargados y hacen la función de primera cara libre. A su alrededor van dispuestos sucesivos grupos o secciones de cuatro barrenos cada una, formando cuadrados de lado sucesivamente mayor.



Esquemas de perforación

Cueles

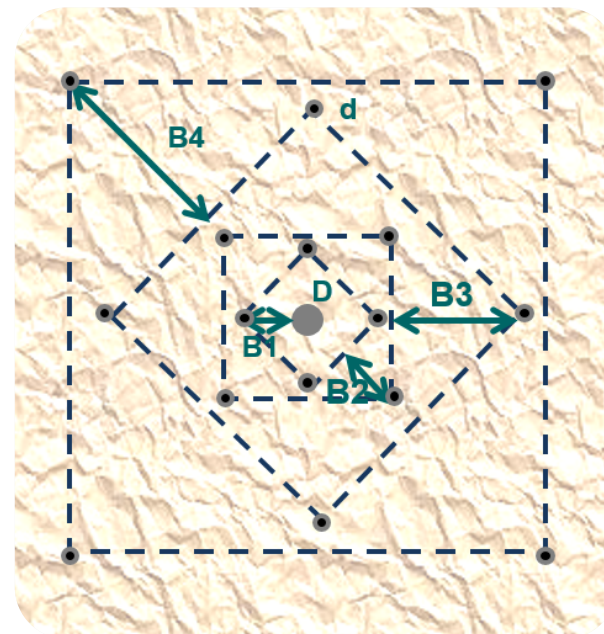
CUELES CILÍNDRICOS

CUELE DE CUATRO SECCIONES

Puede proporcionar avances de hasta el 95% de la longitud de los barrenos, que a su vez puede estimarse en base al diámetro (D) y cantidad (N) de los barrenos de expansión, mediante la expresión:

$$L = -39,4 \cdot (D^2 \cdot N) + 34,1 \cdot D \cdot N^{1/2} + 0,15$$

Como problemas fundamentales de este tipo de cueles está la iniciación por simpatía y la desensibilización como consecuencia de la onda de choque de una carga que haya salido con anterioridad, y que pueda ocasionar que el explosivo correspondiente al barreno afectado alcance la denominada «densidad de muerte». Entre las posibles soluciones puede recurrirse a la disposición de los barrenos vacíos como pantallas entre los cargados. Las rocas de grano grueso son menos propicias a los fallos en los cueles.



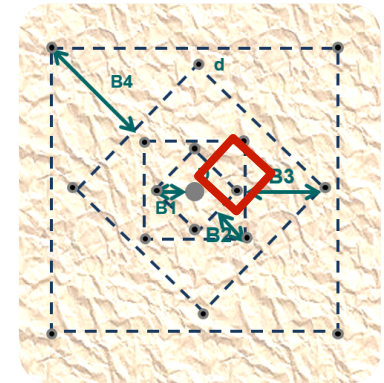
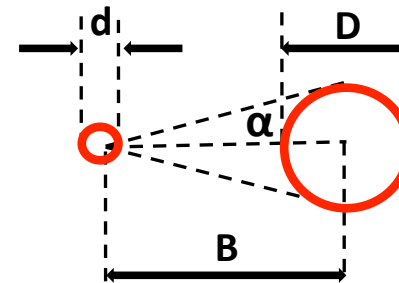
Cueles

CUELES CILÍNDRICOS

Suele aplicarse para el cálculo de la piedra de los barrenos de la primera fila $1,5 \cdot D$. Valores superiores a $2 \cdot D$ pueden reducir en exceso el ángulo de salida de los materiales (por ello el límite superior de cálculo se establece en $1,7 \cdot D$), mientras que valores inferiores a D y concentraciones de carga excesivas pueden conducir a la sinterización de los fragmentos. La concentración lineal de carga de la primera sección se determina mediante la expresión:

Fuente: López Jimeno, C, López Jimeno, E. & García Bermúdez, P. (2010): «Manual de Voladuras en Túneles». Madrid: U.D. Proyectos - E.T.S.I.M.M.

$$q(\text{kg/m}) = 55 \cdot d \cdot \left(\frac{B}{D}\right)^{3/2} \cdot \left(B - \frac{D}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{0,4}\right) \cdot \frac{1}{PRP_{\text{anfo}}}$$



Siendo d el diámetro de perforación de los barrenos cargados en metros, D el diámetro del barreno de expansión, B la piedra, c la constante de roca y PRP_{ANFO} la potencia relativa en peso del explosivo empleado con respecto al ANFO. Longitudes expresadas en metros.

$$PRP_{\text{ANFO}} = \frac{1}{0,84} \left(\frac{5}{6} \cdot \frac{Q_e}{5} + \frac{1}{6} \cdot \frac{V_g}{0,85} \right)$$

Q_e es el calor de explosión en MJ/Kg, y V_g el volumen de gases generados por el explosivo en m³/kg

Esquemas de perforación

Cueles

CUELES CILÍNDRICOS

CUELE DE CUATRO SECCIONES

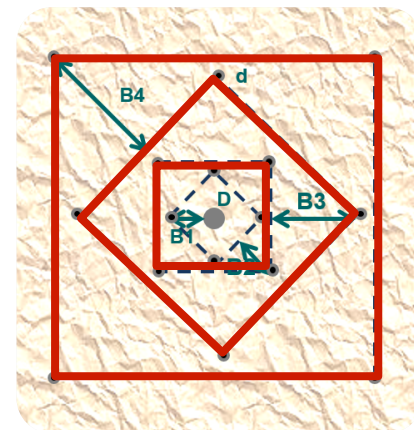
El resto de secciones del cuele presentarán una superficie libre plana; para el cálculo de la piedra se considerará conocida la concentración lineal de la carga, q , y se aplicará la siguiente expresión:

$$B = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot q \cdot PRPanfo}{d \cdot c}}$$

Una vez realizado este cálculo, y considerando los posibles errores de perforación y emboquille, si se cumple que $B_{real} \leq 2A$ mantenerse el valor de concentración lineal obtenido en la primera sección.

En caso contrario, habrá de utilizarse la siguiente para las secciones segunda, tercera y cuarta del cuele:

$$q = \frac{540d \cdot c \cdot A}{PRP_{ANFO}}$$



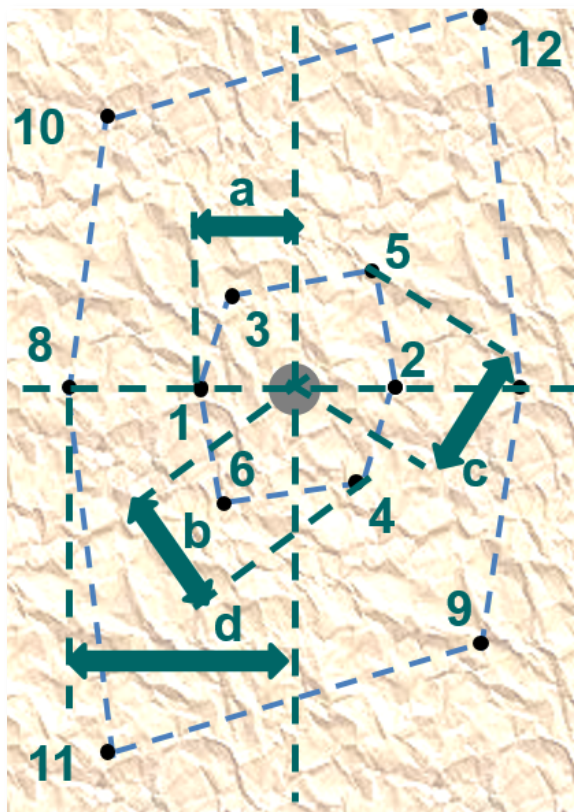
Esquemas de perforación

Cueles

OTROS CUELES CILÍNDRICOS

CUELE DE CUATRO SECCIONES

Otros tipos de cueles cilíndricos son el de doble espiral, el Coromant o el Fagersta:



CUELE Y CONTRACUELE DE DOBLE ESPIRAL

Se perfora el barreno central con D entre 75 y 200 mm, y se circunvala por espirales de barrenos de menor diámetro, constituidas por los barrenos (1 - 2, 3 - 4, 5 - 6).

Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

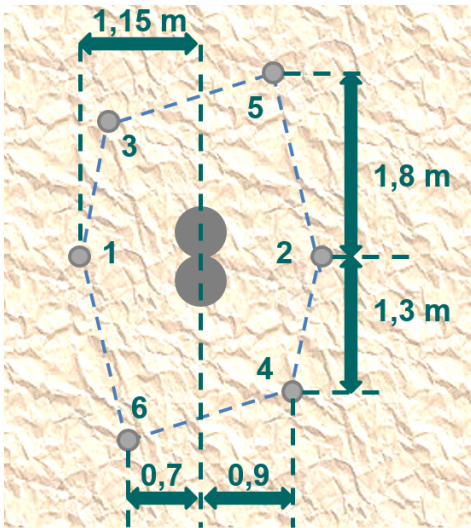
Esquemas de perforación

Cueles

OTROS CUELES CILÍNDRICOS

CUELE DE CUATRO SECCIONES

Otros tipos de cueles cilíndricos son el de doble espiral, el Coromant o el Fagersta:

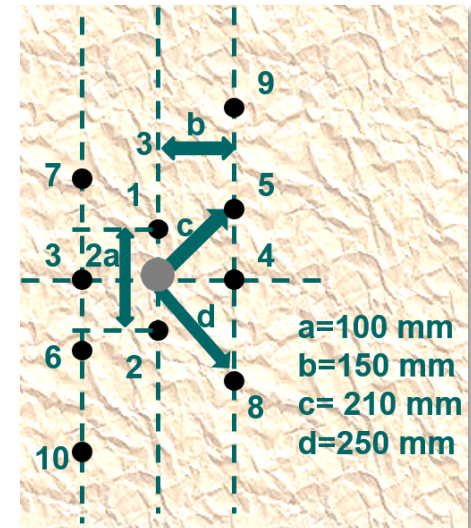


CUELE COROMANT

En el caso del cuele Coromant, se perforan dos barrenos secantes de 57 mm de diámetro mediante plantilla de perforación.

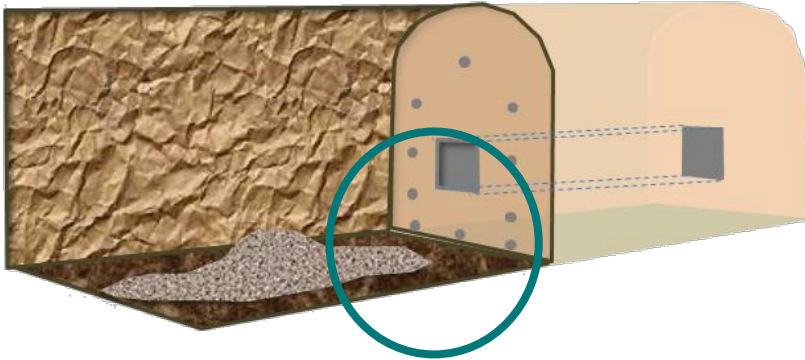
CUELE FAGERSTA

En el caso del Cuele Fagersta el barreno central presenta 64 ó 76 mm de diámetro, constituyendo un cuele mixto entre el de cuatro secciones y el cuele de doble espiral.



Esquemas de perforación

Destroza



Área de barrenos comprendidos entre el contracuele y el recorte. Es la parte principal de voladura en cuanto a volumen de arranque. El esquema suele ser más abierto que en el cuele, con menores consumos específicos de explosivo, empleándose frecuentemente en los barrenos carga selectiva.

Fuente: Ríos Vázquez, J. (2009): «Curso Básico de Explosivos». Oviedo: I. Gofer.

La expresión y procedimiento a aplicar se asemeja a las indicaciones que se darán para el cálculo de las zapateras, si bien variando los coeficientes.

En este caso la concentración de la carga de fondo será un 50% de la de columna.

$$B = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot PRPanfo}{c^* \cdot f \cdot (S/B)}}$$

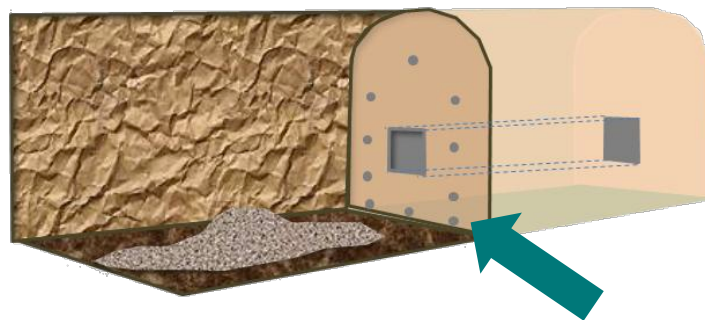
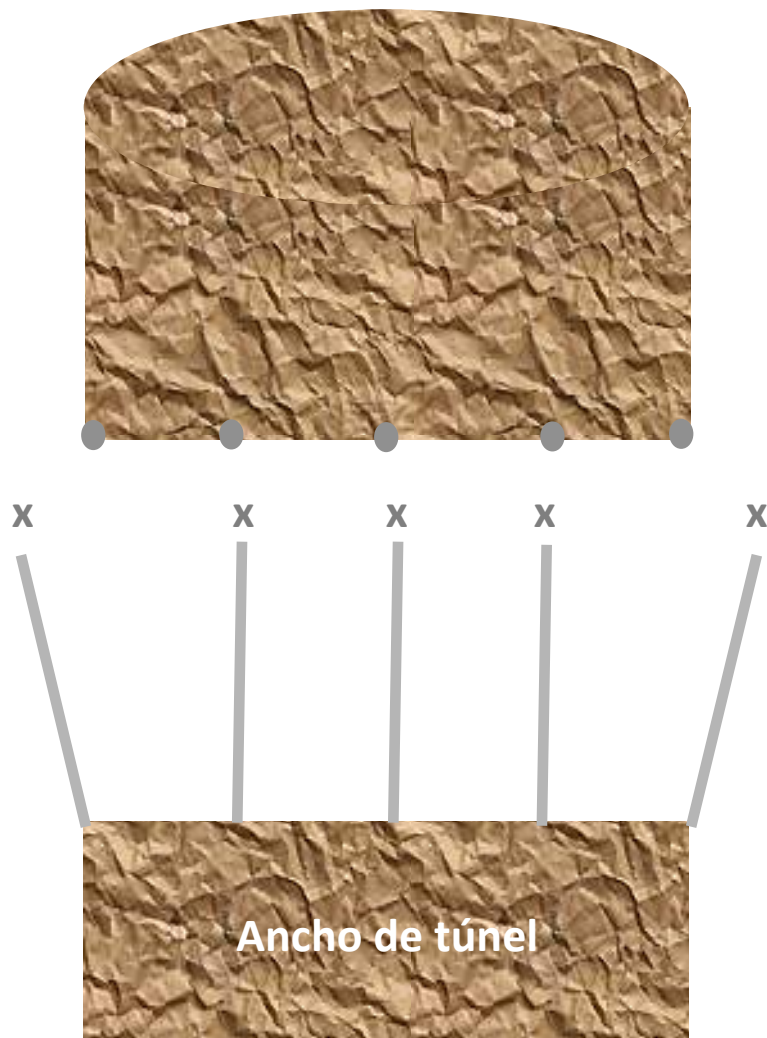
Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

- 🔧 **F: factor de fijación, generalmente 1,45.**
- 🔧 **S/B: relación entre espaciamento y piedra.**
- 🔧 **Factor de roca corregida. Si $B > 1,4$, $c^* = c + 0,05$. Para $B < 1,4$, $c = c + 0,07 / B$.**

DIRECCIÓN DE SALIDA DE LOS BARRENOS	f	E/V
Hacia arriba u horizontal	1,45	1,25
Hacia abajo	1,2	1,25

Esquemas de perforación

Zapateras

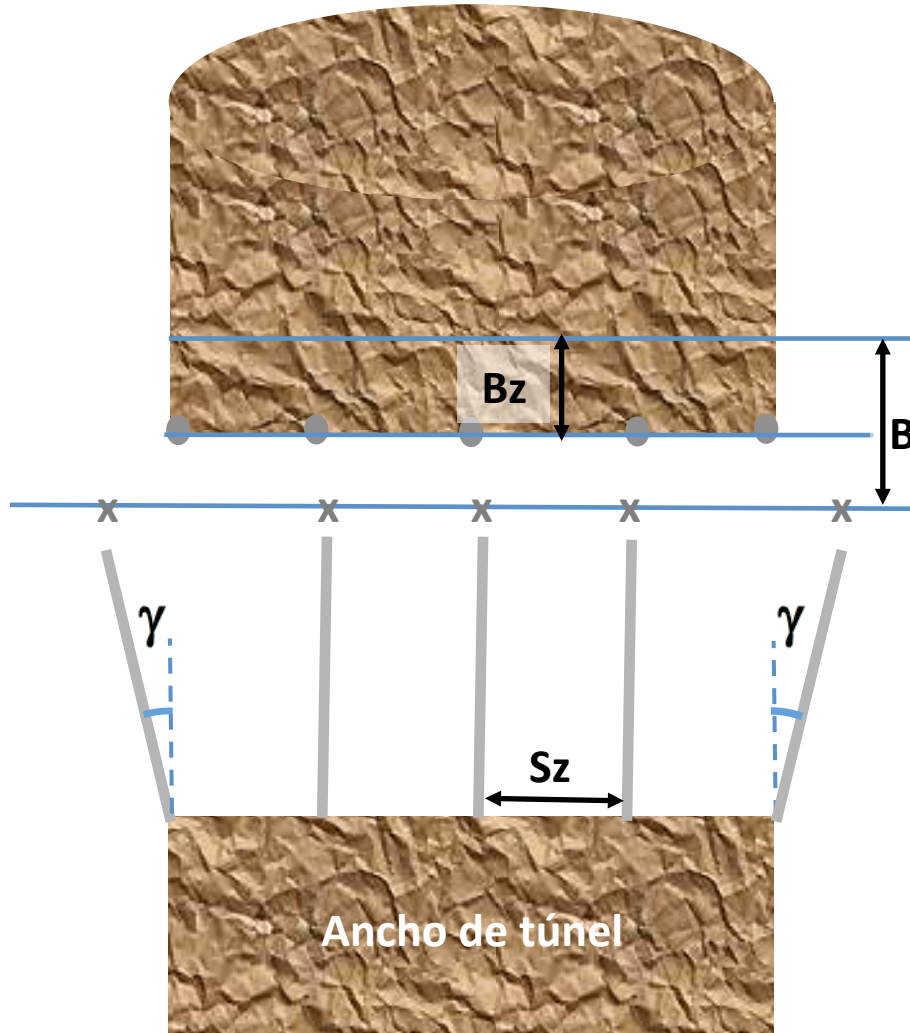


Barrenos situados en la parte inferior de la sección. Se trata de barrenos en los que la carga debe ser superior con respecto a las de otras partes de la voladura, dado que es frecuente la gravedad actúa de forma negativa sobre ellos: no únicamente arrancar su roca correspondiente, sino que además han de vencer el peso de los materiales arrancados con anterioridad, dispuestos sobre su zona de acción.

Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

Esquemas de perforación

Zapateras



La piedra de los barrenos ubicados en la zapatera, se calcula mediante la fórmula siguiente, similar a la aplicada en las voladuras en banco:

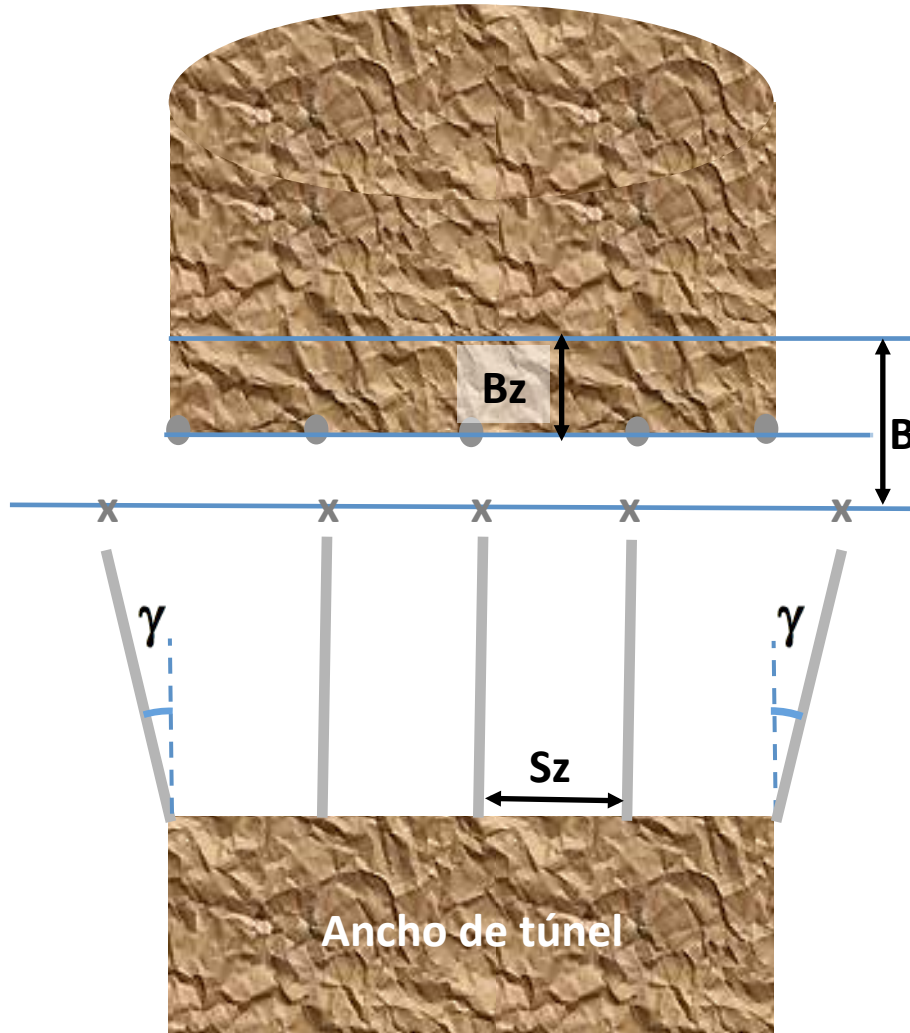
$$B = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot PRP_{anfo}}{c^* \cdot f \cdot (S/B)}}$$

- 🔧 **F:** Factor de fijación, generalmente 1,45
- 🔧 **S/B:** Relación entre espaciamiento y piedra, adoptándose generalmente = 1.
- 🔧 **Factor de roca corregida.** Si $B > 1,4$, $c^* = c + 0,05$.
Para $B < 1,4$, $c = c + 0,07 / B$.

Ha de tenerse en cuenta igualmente el ángulo de divergencia (γ), o ángulo de inclinación para permitir la realización de la perforación de la siguiente pega. Considerando un avance de 3 m, el ángulo será de 3° (5 cm/m).

Esquemas de perforación

Destroza



El número de barrenos será igual a la parte entera de:

$$N = \left(\frac{\text{Ancho}_{\text{túnel}} + 2L \cdot \text{sen} \gamma}{B} + 2 \right)$$

El espaciamiento práctico de los barrenos de esquina se calcula:

$$Sz^* = (Sz - L \cdot \text{sen} \gamma)$$

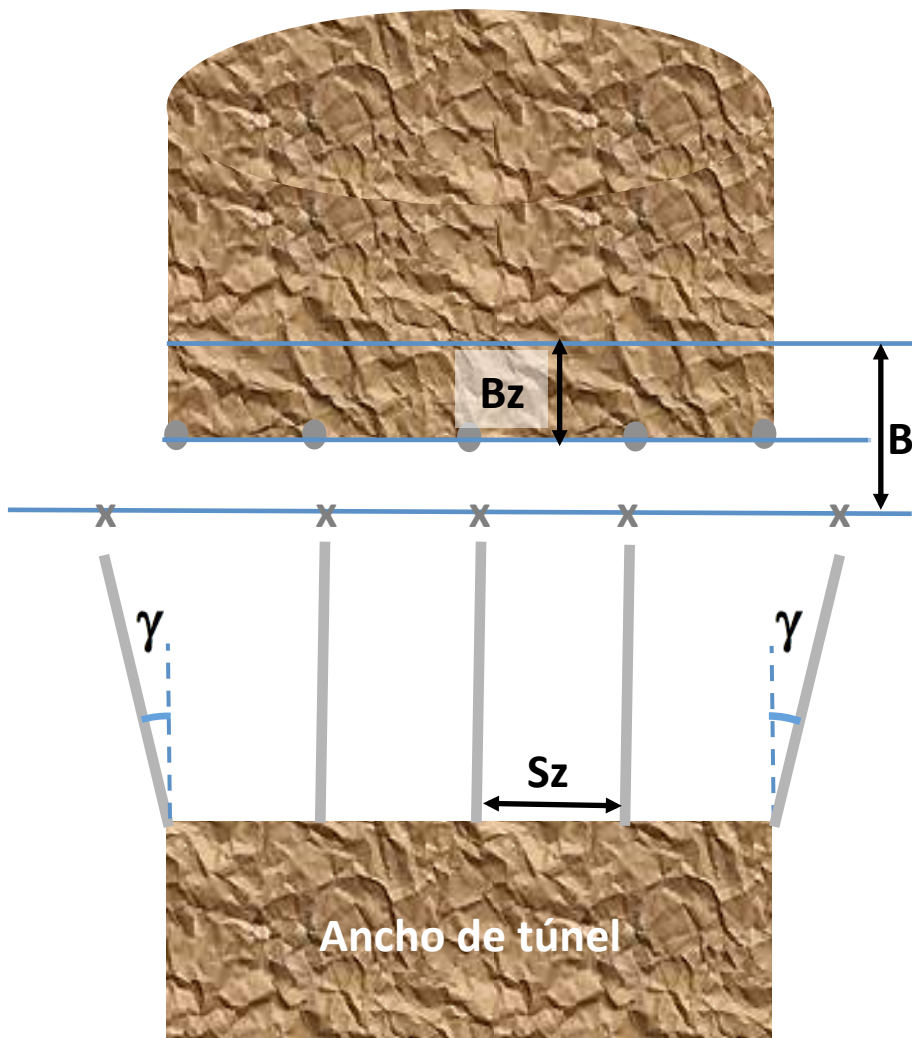
La piedra práctica:

$$Bz = (B - L \cdot \text{sen} \gamma - Ep)$$

Siendo Ep la desviación de los barrenos con respecto a la ubicación teórica.

Esquemas de perforación

Destroza



Se establecen longitudes de carga en fondo y carga en columna con las expresiones siguientes:

$$L_f = 1,25 \cdot B_z$$

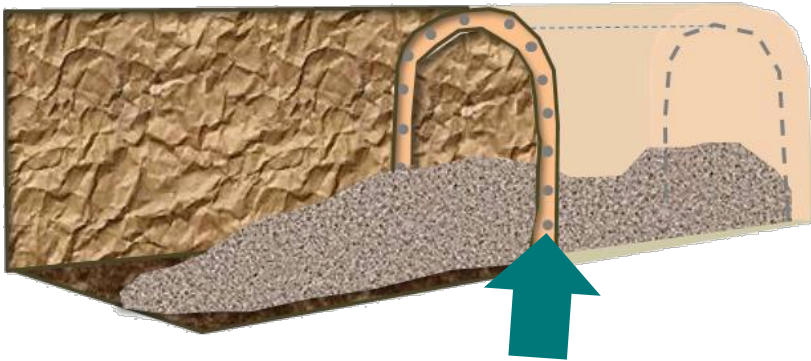
$$L_c = L - l_f - 10d$$

La concentración lineal en columna suele reducirse al 7% de la carga en fondo. El retacado se sitúa en $10d$, y la piedra deberá cumplir que sea menor o igual de $0,6L$.

Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

Esquemas de perforación

Contorno



Fila de barrenos perimetrales que delimitan la sección del túnel o galería. En ocasiones se dividen en corona (techo) y hastiales (laterales, no en el piso). Los barrenos de recorte siempre se dan un poco angulados, y además de arrancar su piedra, si se disparan como recorte deben marcar el perfil final del túnel. En caso darse como voladura de contorno de recorte (habitual), deben salir con un número superior al del último de la destroza. Si se disparan como precorte, pueden utilizarse detonadores eléctricos instantáneos o maestras de cordón detonante. Su número, carga y espaciado determinará la calidad del perfil final. Conforme la profundidad de la labor aumenta, el éxito del precorte no está garantizado.

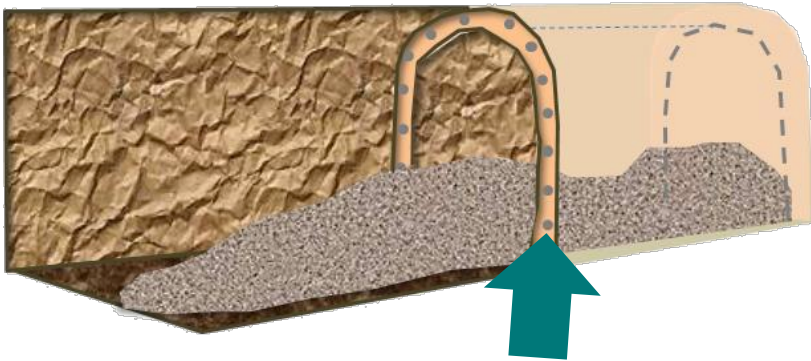
Fuente: Ríos Vázquez, J. (2009): «Curso Básico de Explosivos». Oviedo: I. Gofer.

El recorte aprovecha el campo de tensiones de compresión circundante previo a la iniciación de los barrenos de contorno (la eliminación de roca asociado a la destroza genera un campo de tensiones prácticamente uniaxial en el entorno de casi todo el perímetro de excavación, favoreciendo la generación de la grieta de corte. UN ESTADO DE TENSIONES ALTO INTENSIFICA EL EFECTO DEL RECORTE.

Fuente: López Jimeno, C, López Jimeno, E. & García Bermúdez, P. (2010): «Manual de Voladuras en Túneles». Madrid: U.D. Proyectos - E.T.S.I.M.M.

Esquemas de perforación

Contorno



Si no se requiere voladura de contorno/recorte, se aplica lo visto para la voladura de zapatera, $S/B = 1,24$.

Concentración de la carga de columna, 0,5 de la carga de fondo.

Si se han de realizar voladuras de contorno, el espaciamiento comprendido entre barrenos se calcula como $S = K \cdot d$, con K entre 15 y 16, y $S/B = 0,8$.

La concentración lineal de carga se establece en base al diámetro de perforación. Si el calibre de perforación es inferior a 140 mm, se aplica la ecuación $q = 90 \cdot d^2$.

(d expresado en metros).

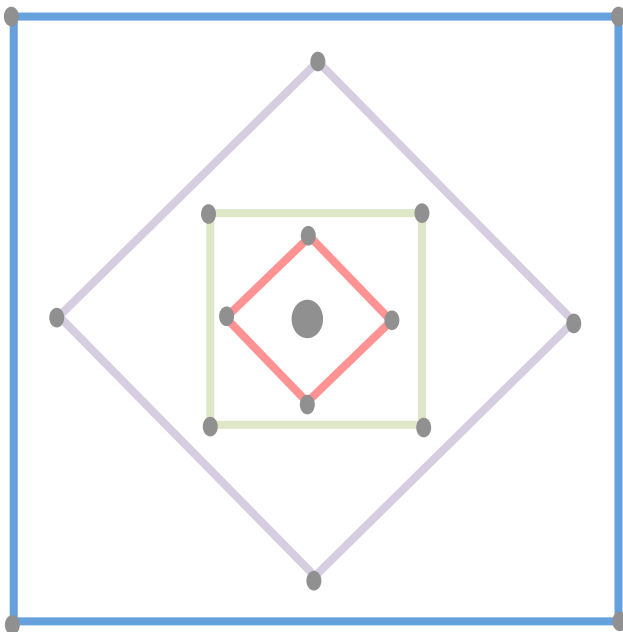
Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

Cálculo de la voladuras

Método simplificado

Para el cálculo rápido de voladuras en túnel empleando cueles de barrenos paralelos de cuatro secciones pueden aplicarse las tablas y expresiones siguientes:

CÁLCULO DEL CUELE DE CUATRO SECCIONES



SECCIÓN 1ª

SECCIÓN 2ª

SECCIÓN 3ª

SECCIÓN 4ª

SECCIÓN DEL CUELE	PIEDRA	LADO DE LA SECCIÓN
Primera	$B1 = 1,5 \cdot D$	$B1 \cdot (2)^{1/2}$
Segunda	$B2 = B1 \cdot (2)^{1/2}$	$1,5 \cdot B2 \cdot (2)^{1/2}$
Tercera	$B3 = 1,5 \cdot B2 \cdot (2)^{1/2}$	$1,5 \cdot B3 \cdot (2)^{1/2}$
Cuarta	$B4 = 1,5 \cdot B3 \cdot (2)^{1/2}$	$1,5 \cdot B4 \cdot (2)^{1/2}$

Fuente: López Jimeno, C. & López Jimeno, E. (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico.

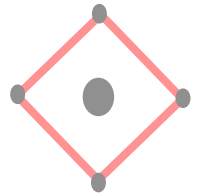
Cálculo de la voladuras

Método simplificado

La distribución lineal de la carga puede ser calculada a través de varias posibilidades, derivadas todas ellas del Método de Langefors-Kihlström.

CÁLCULO DEL CUELE DE CUATRO SECCIONES

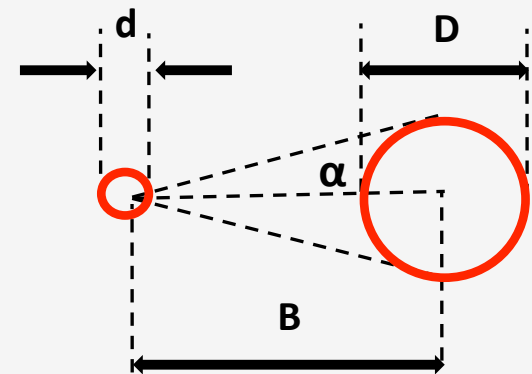
DISTRIBUCIÓN LINEAL DE CARGA DE LA SECCIÓN 1ª



$$q(kg/m) = 55 \cdot d \cdot \left(\frac{B}{D}\right)^{3/2} \cdot \left(B - \frac{D}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{0,4}\right) \cdot \frac{1}{PRP_{anfo}}$$

Longitudes expresadas en metros.

$$PRP_{ANFO} = \frac{1}{0,84} \left(\frac{5}{6} \cdot \frac{Qe}{5} + \frac{1}{6} \cdot \frac{Vg}{0,85} \right)$$

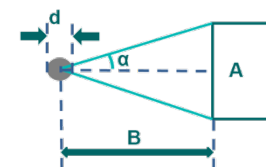


Cálculo de la voladuras

Método simplificado

Tal y como se mencionó en el apartado anterior, la distribución lineal de la carga puede ser calculada a través de varias posibilidades, derivadas todas ellas del Método de Langefors-Kihlström.

DISTRIBUCIÓN LINEAL DE LA CARGA DE LAS RESTANTES SECCIONES



$$B_{real} \leq 2A$$

CUMPLE

$$q(kg/m) = 55 \cdot d \cdot \left(\frac{B}{D}\right)^{3/2} \cdot \left(B - \frac{D}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{0,4}\right) \cdot \frac{1}{PRP_{anfo}}$$

(Mismo ql)

NO CUMPLE

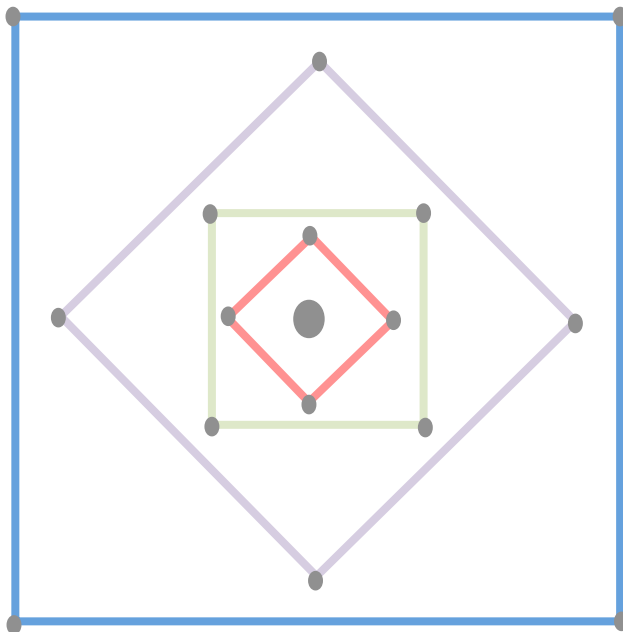
$$q = \frac{540d \cdot c \cdot A}{PRP_{ANFO}}$$

Cálculo de la voladuras

Método simplificado

Para el cálculo rápido de voladuras en túnel empleando cueles de barrenos paralelos de cuatro secciones pueden aplicarse las tablas y expresiones siguientes:

CÁLCULO DEL CUELE DE CUATRO SECCIONES

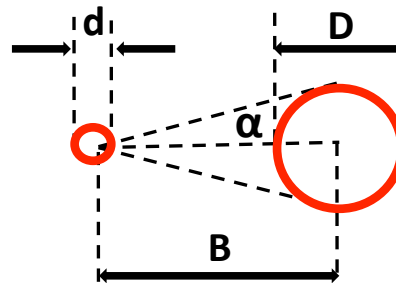


SECCIÓN 1ª

SECCIÓN 2ª

SECCIÓN 3ª

SECCIÓN 4ª



$$q = 30,9 \cdot 10^{-6} \cdot d \cdot B \cdot \left(\frac{P}{A} \right)^{1,5} \cdot \frac{c}{0,4} \cdot \frac{1}{s}$$

B: piedra (distancia entre centros o entre centro y lado, **en mm**).

D: diámetro del barreno vacío (**mm**).

A: ancho del hueco generado por la sección anterior (**mm**).

Q: concentración de la carga (**Kg/m**).

C: constante de la roca, en ppio. 0,4.

S: potencia relativa del explosivo; goma: 1, anfo = 0,88. (respecto no a ANFO, a goma pura).

Cálculo de la voladuras

Método simplificado

RESTO DE LA VOLADURA

A partir de la definición de la piedra y de la carga de fondo, se determina el resto de la voladura.

$$q_f = 7,85 \cdot 10^{-4} \cdot d^2 \cdot \rho_e \quad \leftarrow \quad B = 0,88 \cdot q_f^{0,35}$$

Siendo en este caso d el diámetro del cartucho en mm, y ρ_e la densidad del explosivo en gr/cm³.

ZONA DE LA SECCIÓN	B(piedra, m)	E(espaciamiento, m)	Longitud de la carga de fondo (Lf, m)	Concentración de la carga de fondo (qf, kg/m)	Concentración carga columna (qc, kg/m)	Taco (m)
PISO	B	1,1B	L/3	qf	qf	0,2B
HASTIALES	0,9B	1,1B	L/6	qf	0,4qf	0,5B
TECHO	0,9B	1,1B	L/6	qf	0,36qf	0,5B
DESTROZA						
Salida de barrenos hacia arriba	B	1,1B	L/3	qf	0,5qf	0,5B
Horizontal	B	1,1B	L/3	qf	0,5qf	0,5B
Hacia abajo	B	1,2B	L/3	qf	0,5qf	0,5B

Cálculo de la voladuras

Método simplificado

EJEMPLO DE CÁLCULO

Longitud de perforación	3,2 m
Diámetro barreno vacíos (D)	89 mm
Diámetro barrenos cargados	32 mm
Densidad del explosivo	1,45 gr/cm3
Diámetro cartuchos	26 mm

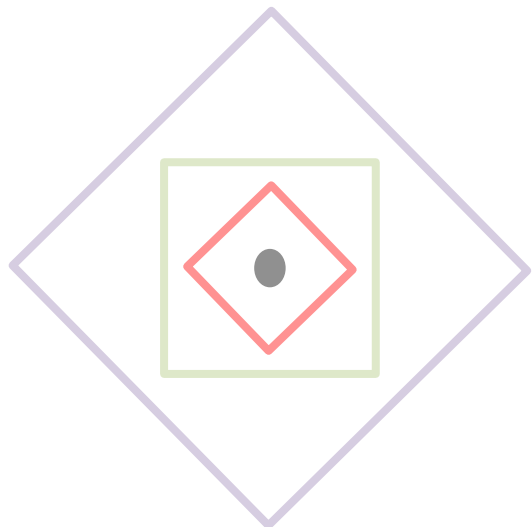
SECCIÓN DEL CUELE	PIEDRA (mm)	LADO DE LA SECCIÓN (mm)
Primera	$B1 = 1,5 \cdot D2 = 1,5 \cdot 89 = 133,5 \text{ mm}$	$B1 \cdot [(2)^{(1/2)}] = 188,8 \text{ mm}$
Segunda	$B2 = B1 \cdot (2)^{(1/2)} = 188,8 \text{ mm}$	$1,5 \cdot B2 \cdot [(2)^{(1/2)}] = 400,5 \text{ mm}$
Tercera	$B3 = 1,5 \cdot [B2 \cdot (2)^{(1/2)}] = 400,5 \text{ mm}$	$1,5 \cdot B3 \cdot [(2)^{(1/2)}] = 849,6 \text{ mm}$
Cuarta	$B4 = 1,5 \cdot B3 \cdot (2)^{(1/2)} = 849,6 \text{ mm}$	$1,5 \cdot B4 \cdot [(2)^{(1/2)}] = 1802,2$

$$q(\text{kg/m}) = 55 \cdot d \cdot \left(\frac{B}{D}\right)^{3/2} \cdot \left(B - \frac{D}{2}\right) \cdot \left(\frac{c}{0,4}\right) \cdot \frac{1}{PRP_{anfo}}$$

$$q(\text{kg/m}) = 55 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{0,1335}{0,089}\right)^{3/2} \cdot \left(0,1335 - \frac{0,089}{2}\right) \cdot \left(\frac{0,4}{0,4}\right) \cdot \frac{1}{1,022} = 0,285 \text{ Kg/m}$$

$$PRP_{ANFO} = \frac{1}{0,84} \left(\frac{5}{6} \cdot \frac{Qe}{5} + \frac{1}{6} \cdot \frac{Vg}{0,85} \right) = \frac{1}{0,84} \left(\frac{5}{6} \cdot \frac{4,1}{5} + \frac{1}{6} \cdot \frac{0,895}{0,85} \right) = 1,022$$

**DISTRIBUCIÓN LINEAL DE CARGA
PARA LA PRIMERA SECCIÓN**



Cálculo de la voladuras

Método simplificado

EJEMPLO DE CÁLCULO

Longitud de perforación	3,2 m
Diámetro barreno vacíos (D)	89 mm
Diámetro barrenos cargados	32 mm
Densidad del explosivo	1,45 gr/cm ³
Diámetro cartuchos	26 mm

SECCIÓN DEL CUELE	PIEDRA (mm)	LADO DE LA SECCIÓN (mm)
Primera	$B1 = 1,5 \cdot D2 = 1,5 \cdot 89 = 133,5 \text{ mm}$	$B1 \cdot [(2)^{(1/2)}] = 188,8 \text{ mm}$
Segunda	$B2 = B1 \cdot (2)^{(1/2)} = 188,8 \text{ mm}$	$1,5 \cdot B2 \cdot [(2)^{(1/2)}] = 400,5 \text{ mm}$
Tercera	$B3 = 1,5 \cdot [B2 \cdot (2)^{(1/2)}] = 400,5 \text{ mm}$	$1,5 \cdot B3 \cdot [(2)^{(1/2)}] = 849,6 \text{ mm}$
Cuarta	$B4 = 1,5 \cdot B3 \cdot (2)^{(1/2)} = 849,6 \text{ mm}$	$1,5 \cdot B4 \cdot [(2)^{(1/2)}] = 1802,2$

¿DISTRIBUCIÓN LINEAL DE CARGA
PARA LAS SUCESIVAS SECCIONES?

$$\Rightarrow B_{real} \leq 2A$$

POR LA SIMPLIFICACIÓN, SE CUMPLE QUE
TODOS LOS LADOS «i» PRESENTA UN
ANCHO IGUAL A LA PIEDRA «i + 1», LUEGO
SE CUMPLE QUE LA PIEDRA «i + 1» ES
INFERIOR AL DOBLE DEL LADO «i».

MANTENGO q PARA EL RESTO DE SECCIONES

$$q(kg/m) = 55 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{0,1335}{D}\right)^{3/2} \cdot \left(0,1335 - \frac{0,089}{2}\right) \cdot \left(\frac{0,4}{0,4}\right) \cdot \frac{1}{1,022} = 0,285 Kg/m$$

Cálculo de la voladuras

Método simplificado

EJEMPLO DE CÁLCULO

Resto de la voladura: $q_f = 7,85 \cdot 10^{-4} \cdot d^2 \cdot \rho_e = 0,769 \text{ kg/m}$ $B = 0,88 \cdot q_f^{0,35} = 0,802 \text{ m}$

Es necesario conocer la longitud de barreno, supuesto un único barreno de expansión de 89 mm:

$$L = -39,4 \cdot (D^2 \cdot N) + 34,1 \cdot D \cdot N^{1/2} + 0,15 = -39,4 \cdot (0,089^2 \cdot 1) + 34,1 \cdot 0,089 \cdot 1^{1/2} + 0,15 = 2,87 \text{ m}$$

ZONA DE LA SECCIÓN	B (piedra, m)	E (espaciamiento, m)	Longitud de la carga de fondo (Lf, m)	Concentración de la carga de fondo (qf, kg/m)	Concentración carga columna (qc, kg/m)	Taco (m)
PISO	B = 0,802	1,1 B = 0,882	L/3 = 0,96	qf = 0,769	qf = 0,769	0,2 B = 0,16
HASTIALES	0,9 B = 0,722	1,1 B = 0,882	L/6 = 0,48	qf = 0,769	0,4 qf = 0,31	0,5 B = 0,401
TECHO	0,9 B = 0,722	1,1 B = 0,882	L/6 = 0,96	qf = 0,769	0,36 qf = 0,28	0,5 B = 0,401
DESTROZA						
Salida de barrenos hacia arriba	B = 0,802	1,1 B = 0,882	L/3 = 0,96	qf = 0,769	0,5 qf = 0,385	0,5 B = 0,401
Horizontal	B = 0,802	1,1 B = 0,882	L/3 = 0,96	qf = 0,769	0,5 qf = 0,385	0,5 B = 0,401
Hacia abajo	B = 0,802	1,2 B = 1,06	L/3 = 0,96	qf = 0,769	0,5 qf = 0,385	0,5 B = 0,401

Al emplear cueles de barrenos paralelos, las primeras cargas en salir serán las más próximas a los barrenos de expansión. En barrenos con longitud superior a 2, el tiempo para que los trozos de roca se vean completamente expulsados se estima como superior a 100 ms, por lo que el tiempo de retardo entre barrenos ha de resultar superior a dicho valor. Al trabajar en secciones medias o grandes, la dificultad para contar con números suficientes hace que se recurra a barrenos de microrretardo para cuele y contracuele, y de retardo para el resto. Deberá tenerse en cuenta la carga máxima operante, limitada por las condiciones geológico/geotécnicas los posibles elementos estructurales que puedan localizarse en el entorno o bienes de interés que deban ser protegidos de posibles efectos no deseados de la voladura, como por ejemplo las vibraciones.

La norma distingue tres tipos de rocas, en función de la velocidad de transmisión de las ondas p, considerando por tanto comportamientos distintos en cuanto a amplitud y frecuencia en función del tipo de roca.

Proyecto tipo: nivel menor de exigencia justificación teórica, obtenida por aplicación directa de la norma, de que los niveles de vibración no van a alcanzar en ningún caso los límites establecidos.

Control de vibraciones: de grado intermedio de exigencia, medición real en las voladuras iniciales del proyecto, para determinar las vibraciones generadas.

Estudio Preliminar: medida más exigente, para aquellos casos en que se predicen niveles superiores a los definidos por la norma. Consiste en obtener la ley de transmisividad del terreno en que se va a ejecutar el proyecto mediante ensayos reales (disparo de cargas y medida de vibraciones).