

Tecnología de los Explosivos

Tema 3.3. Voladuras de interior



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/)

GENERALIDADES

Comprenden aquellas voladuras que se desarrollan en labores subterráneas (minería, obra pública...). Pueden distinguirse dos tipos principales:

- Con una única cara libre, perpendicular o cuasi-perpendicular al avance (túneles, galerías, pozos...).
- Con dos caras libres, una prácticamente paralela a los barrenos (banqueo al piso en túneles, explotaciones por cámaras...).

Este apartado se centrará en el estudio de las primeras.

CARACTERÍSTICAS

- Sistemas específicos para la perforación.
- Mayores consumos específicos.
- Mayor perforación específica.
- Un grupo de barrenos (cuele), creará una segunda cara libre (abrirá hueco) para los restantes barrenos).
- Importancia determinante de los humos de voladura en la selección del explosivo.

<https://www.youtube.com/watch?v=UrM5xRZmpn4>.

GENERALIDADES

Generación de un hueco en la roca, de importante longitud, con secciones variables, que se ejecuta con perforaciones de barrenos fundamentalmente paralelos a su eje.

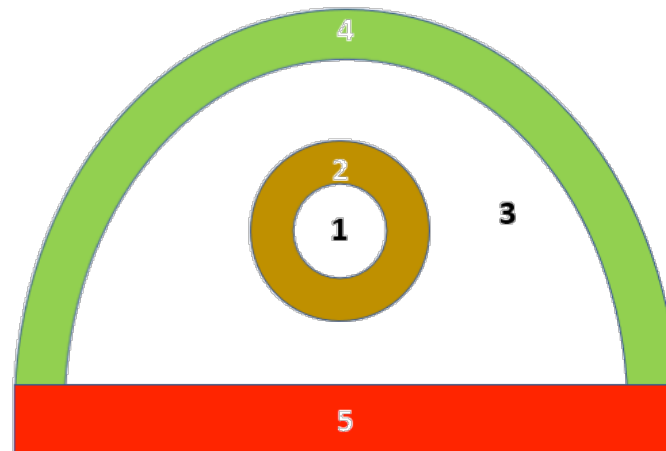
ZONAS DE LA VOLADURA

CUELE

Conjunto de barrenos que, cargados de barrenos 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.

CONTRACUELE

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.



1. CUELE.
2. CONTRACUELE.
3. DESTROZA.
4. RECORTE.
5. ZAPATERAS.

GENERALIDADES

ZONAS DE LA VOLADURA

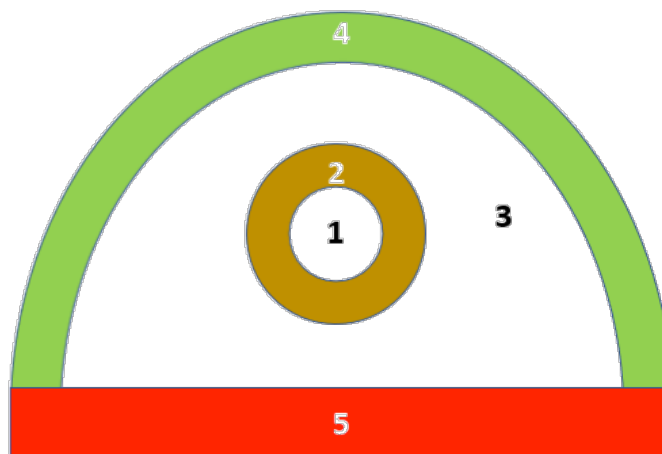
DESTROZA

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.

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.



1. CUELE.
2. CONTRACUELE.
3. DESTROZA.
4. RECORTE.
5. ZAPATERAS.

GENERALIDADES

ZONAS DE LA VOLADURA

CONTORNO

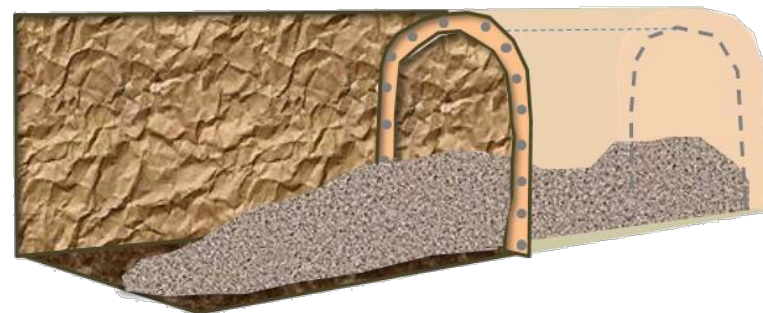
En la zona superior y lateral del perímetro de túnel se deberá actuar con más cuidado si no se quiere correr el riesgo de generar sobreexcavaciones o agrietamientos excesivos en el resto del macizo. Esto obliga a reducir la carga de explosivo de los barrenos perimetrales, que al mismo tiempo deben aproximarse entre sí con objeto de ejecutar un recorte. Queda una zona de 0,6-1m de espesor de influencia de los barrenos perimetrales, cuya excavación deberán asegurar estos. Evidentemente en dicha zona no deberá haber barrenos de destroza que pudiesen comprometer en acabado del contorno.

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.

PROBLEMÁTICA DEL PRECORTE

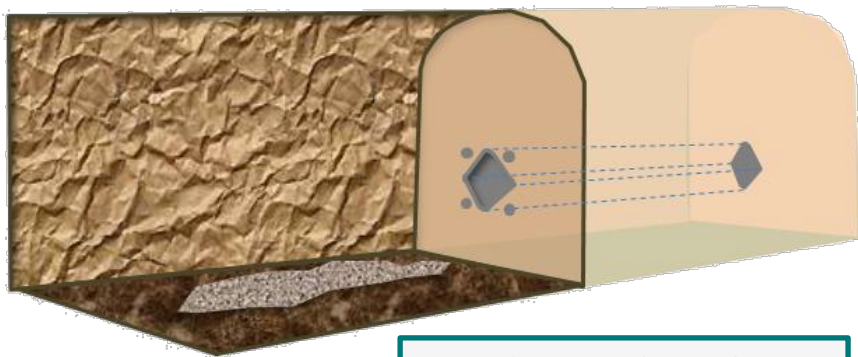
En ámbitos de excavación cercanos a la superficie, en los que las tensiones son menores, resulta relativamente fácil realizar una voladura de precorte. Sin embargo, conforme la profundidad de la labor aumenta, el éxito del precorte no está garantizado.



GENERALIDADES

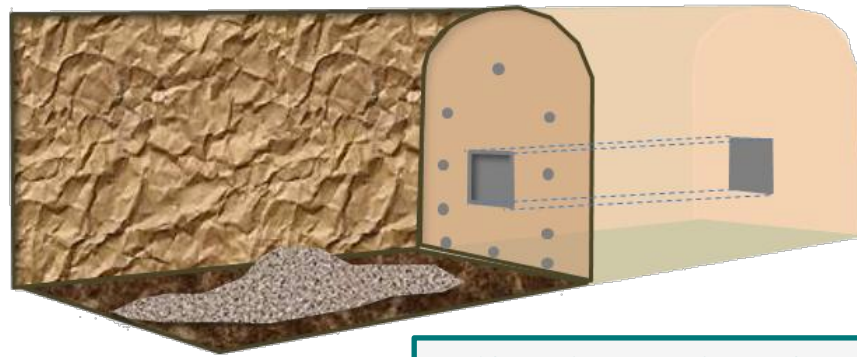
ZONAS DE LA VOLADURA

1



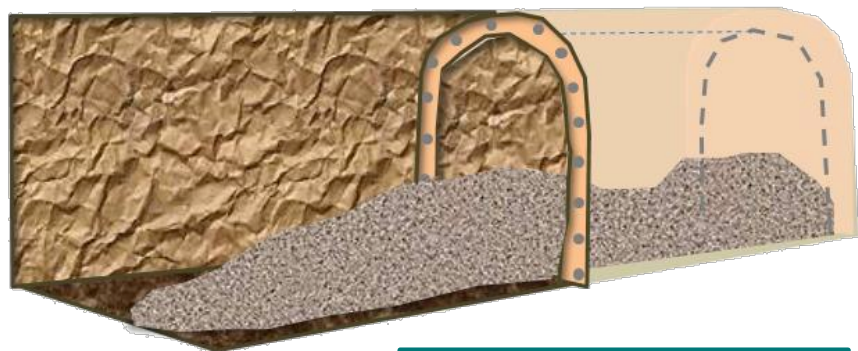
CUELE YA DISPARADO

2



CONTRACUELE YA DISPARADO

3



DESTRONZA YA DISPARADA

4



PERFIL FINAL TRAS RECORTE

GENERALIDADES

RENDIMIENTOS

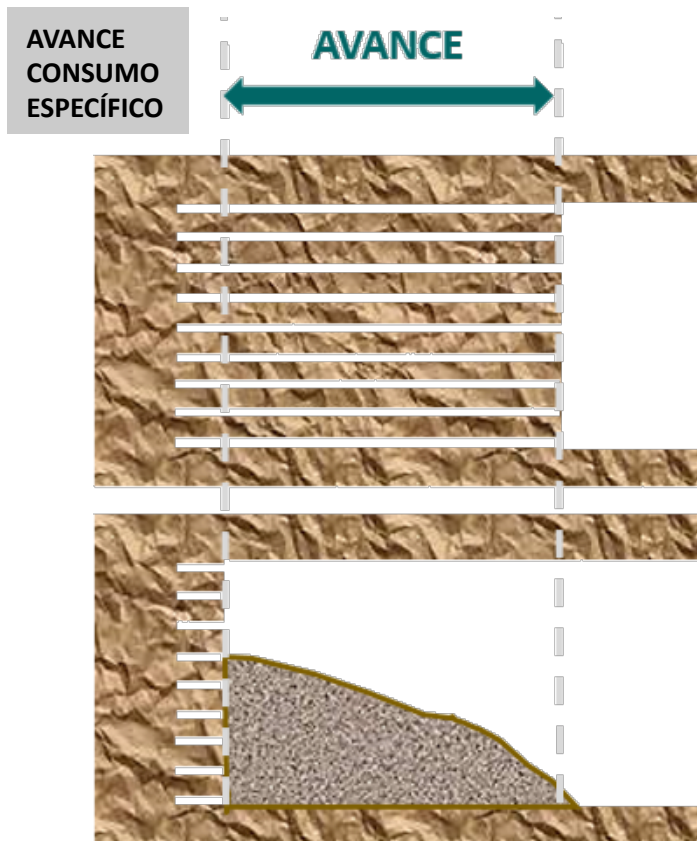
Los parámetros más adecuados para medir el éxito de una voladura son:

AVANCE

Puede definirse como la distancia entre dos frentes consecutivos, pudiendo expresarse en tanto por ciento de la longitud de perforación (¡no la suma de las perforaciones de todos los barrenos individuales!). Un avance del 100% se produciría cuando dicha distancia entre frentes coincidiese con la profundidad del barrenado. Se considera un avance correcto aquel del 85-90%. Existen casos en que la presencia de diaclasas o lisos puede producir avances mayores que la longitud perforada (derrumbe, actuación de diaclasa como segunda cara libre...).

Si se alcanza un 90% de avance, quiere decir que quedará un 10% de fondo de barreno.

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.



GENERALIDADES

RENDIMIENTOS

CONSUMO ESPECÍFICO

En interior el consumo específico suele ser muy superior al asociado a voladuras a cielo abierto (entre 4 y 10 veces mayor). Se debe a:

- Alto consumo de explosivo requerido en cuele y contracuele.
- Cuadrículas más cerradas.
- El grado de fragmentación del escombros requerido es mayor, dadas las capacidades de los elementos de carga.
- Se requiere un mayor desplazamiento de la roca volada que en cielo abierto.

$$C_E = 14 / s + 0.8$$

FÓRMULA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ESPECÍFICO (Langefors y Kihlström)

C_e: consumo específico de explosivo (Kg/m³).
Sección de la galería o túnel (m²).

PROYECCIONES

En la galería o túnel existen elementos susceptibles de sufrir daño por las proyecciones (tuberías de ventilación, aire, agua, elementos de sostenimiento, conducciones eléctricas...).

Las proyecciones pueden reducirse mediante retacados adecuados, cueles paralelos, secuencias adecuadas (las proyecciones son menores en interior con la serie de retardo que con la de microretardo, por eso es común su empleo en la destroza), y consumos específicos ajustados.

LOS CUELES

CLASIFICACIÓN DE LOS CUELES

Se clasifican en dos grupos principales:

CUELES DE BARRENOS OBLICUOS

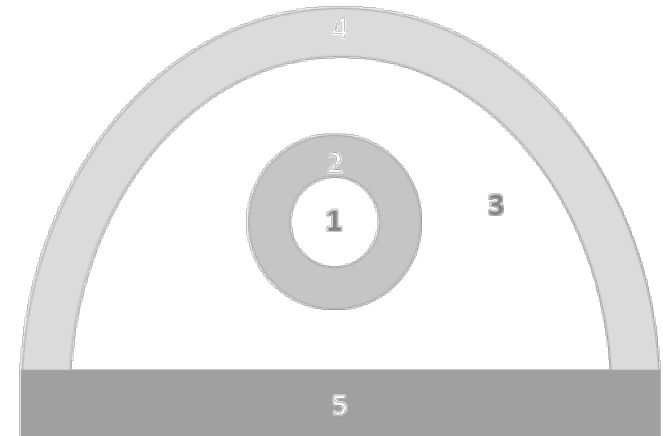
- Con detonadores de tiempo.
- Instantáneos.

DE BARRENOS PARALELOS

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

La clasificación se basa en los siguientes criterios:

- Ángulo respecto al frente de la galería o túnel. Los barrenos paralelos son perpendiculares al frente, los oblicuos lo cortan con ángulos distintos de 90°.
- Tiempo de encendido (barrenos oblicuos).



LOS CUELES

CUELES OBLICUOS O DE BARRENOS INCLINADOS

GENERALIDADES

Tipología constituida por los cueles en V, en cuña o en abanico. En ellos se perfora una cuña central y seguidamente una serie de barrenos cuya inclinación va disminuyendo en función que se aproximan hacia los hastiales, hasta disponerse en paralelo al eje de la galería.

Como ventajas puede mencionarse la menor perforación específica, y el menor consumo de específico.

DESVENTAJAS

Según se ha comprobado experimentalmente que para que este tipo de cuele produzca un adecuado arranque el ángulo de la V deberá ser como mínimo de 50° - 60° , para lo que es posible que deba perforarse una cuña auxiliar. Esto determina que el avance máximo por pega únicamente ascienda a $1/3$ ó $1/2$ del ancho de la galería.

Otro inconveniente de dichos cueles, en la actualidad prácticamente en desuso, es lo complicado que resulta realizar una perforación exacta, dado que tanto la longitud como la inclinación son variables.

VENTAJAS

Como ventajas puede mencionarse la menor perforación específica, y el menor consumo de específico.

LOS CUELES

CUELES PARALELOS

GENERALIDADES

Conjunto de barrenos cargados y vacíos dispuestos en el centro de la sección. Los barrenos cargados se disponen muy próximos entre sí, y alrededor de uno o varios barrenos de expansión de diámetro mayor. Los barrenos de destroza dispondrán de una salida de 1 ó 2 m² de sección, por lo que la separación entre barrenos en esa zona se acercará a la de una voladura con suficientes caras libres.

Los cueles de barrenos paralelos SON LOS MÁS EMPLEADOS EN LA ACTUALIDAD por su facilidad de ejecución y los mayores avances que pueden proporcionar en comparación con otros cueles. Suele considerarse como avance aceptable aquel inferior en un 5-10% a la longitud de los barrenos.

Requieren algo más de perforación y explosivo. El número de barrenos por pega es función de la sección, el diámetro de perforación y el tipo de roca.

DE BARRENOS PARALELOS

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

DESVENTAJAS

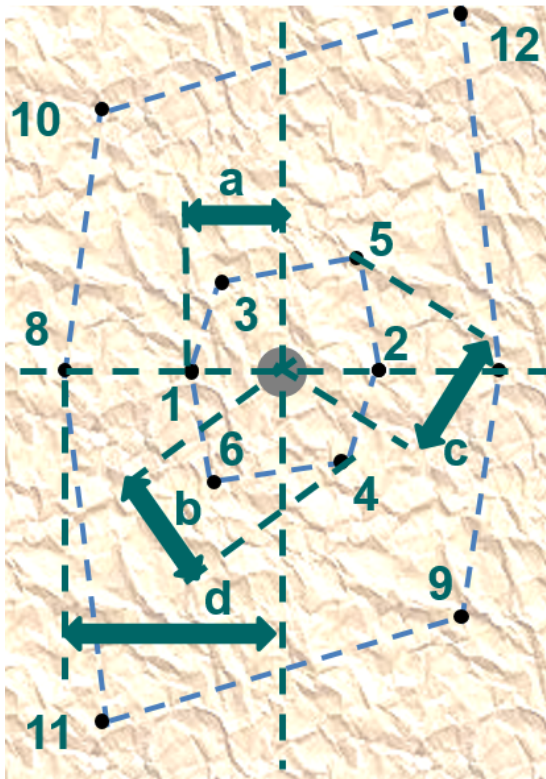
Requieren algo más de perforación y explosivo. El número de barrenos por pega es función de la sección, el diámetro de perforación y el tipo de roca.

LOS CUELES

CUELES PARALELOS

EJEMPLOS DE CUELES CILÍNDRICOS

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



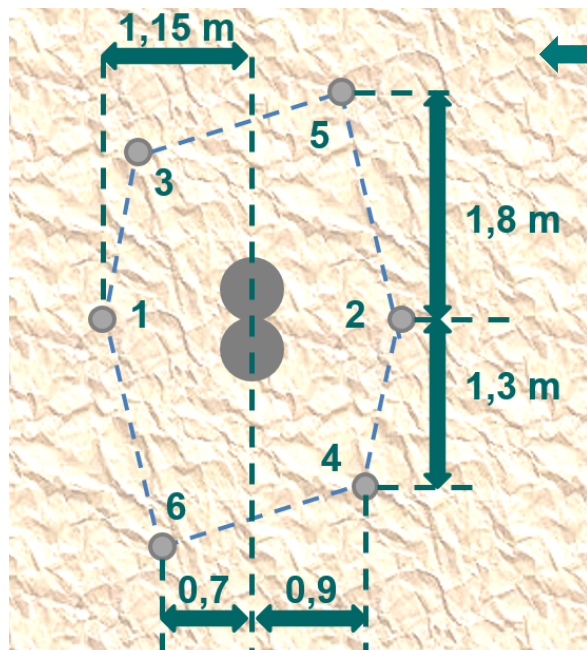
CUELE Y CONTRACUELE DE DOBLE ESPIRAL

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).

LOS CUELES

CUELES PARALELOS

EJEMPLOS DE CUELES CILÍNDRICOS

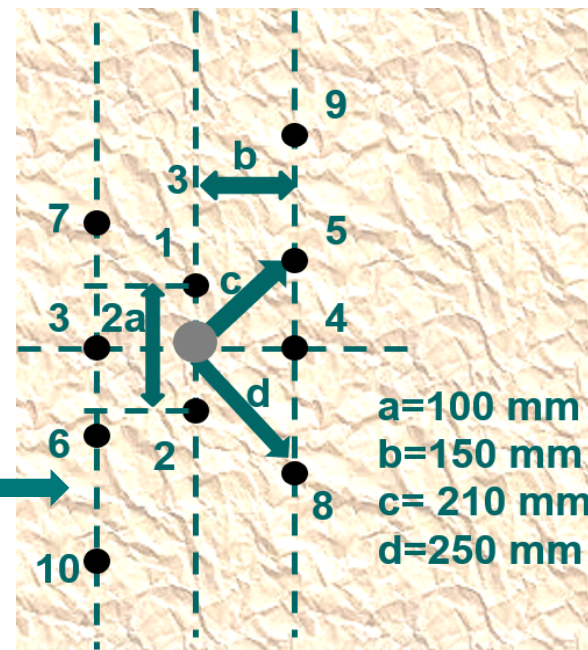


CUELE COROMANT

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.



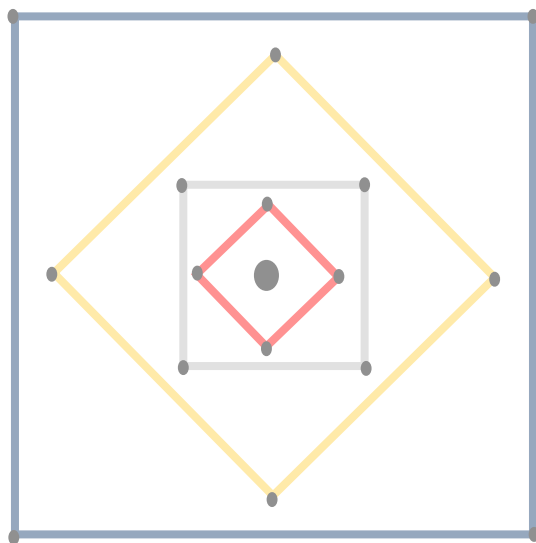
LOS CUELES

CUELES DE CUATRO SECCIONES

EJEMPLOS DE CUELES CILÍNDRICOS

Uno de los más empleados por su sencillez y rendimiento. 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.

CÁLCULO DEL CUELE DE CUATRO SECCIONES



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	$B4 = 1,5 \cdot B3 \cdot (2)^{1/2}$	$1,5 \cdot B4 \cdot (2)^{1/2}$

SECCIÓN 1ª

SECCIÓN 2ª

SECCIÓN 3ª

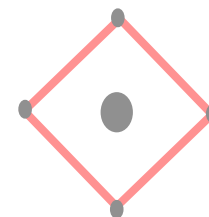
SECCIÓN 4ª

LOS CUELES

CUELES DE CUATRO SECCIONES

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

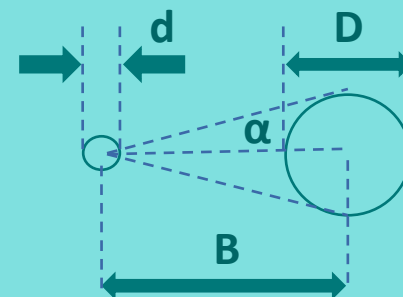


DISTRIBUCIÓN LINEAL DE CARGA DE LA SECCIÓN 1ª

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

Longitudes expresadas en metros.

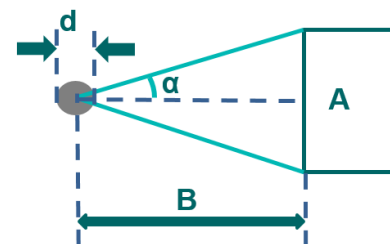
$$PRP_{ANFO} = \frac{1}{0.84} \left(\frac{5}{6} \cdot \frac{Qe}{5} + \frac{1}{6} \cdot \frac{Vg}{0.85} \right)$$



LOS CUELES

CUELES DE CUATRO SECCIONES

CÁLCULO DEL CUELE DE CUATRO SECCIONES



DISTRIBUCIÓN LINEAL DE LA CARGA DE LAS RESTANTES SECCIONES

CUMPLE

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

(Mismo ql).

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

NO CUMPLE

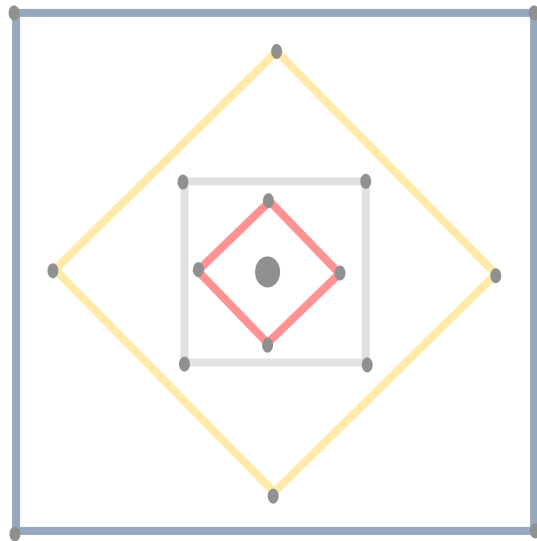
$$q = \frac{540d \cdot c \cdot A}{PRP_{ANFO}}$$

LOS CUELES

CUELES DE CUATRO SECCIONES

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



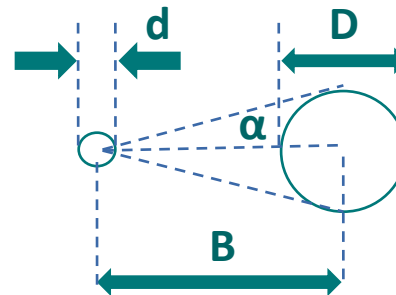
SECCIÓN 1ª

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).

LOS CUELES

MÉTODO SIMPLIFICADO

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

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

↓

Siendo en este caso d el diámetro del cartucho en mm, y ρ_e la densidad del explosivo en gr/cm^3 .

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