

## Tema 8. Diseño de voladuras en túnel

---

### Índice del Tema:

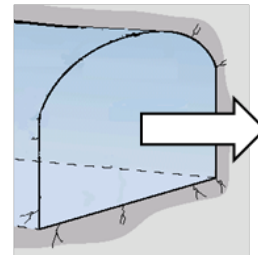
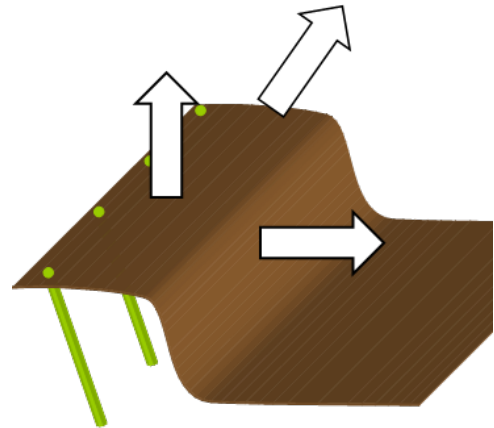
1. INTRODUCCIÓN
2. TIPOS DE CUELES
3. CÁLCULO DE LAS DIFERENTES SECCIONES
4. SECUENCIA DE INICIACIÓN
5. CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

## 1. Introducción

---

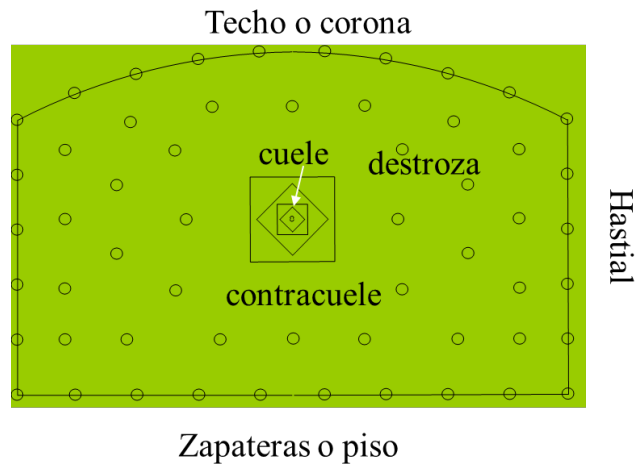
El avance de túneles y galerías mediante perforación y voladuras presenta algunas diferencias importantes con respecto a voladuras en banco:

- Se dispara, inicialmente, con una única cara libre perpendicular a las cargas
- El material está bastante más confinado (las secciones nos suelen superar los 100 m<sup>2</sup> y hay poca superficie libre)
- Hay menor cooperación entre los barrenos
- En general, los errores de perforación son mayores
- Los equipos de carga y transporte tienen menor capacidad (interesa un mayor grado de fragmentación)
- Menores problemas de proyecciones

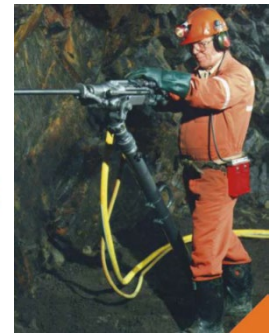


Estas circunstancias justifican el empleo de altos consumos específicos (mínimos entre: 0.8-1.2 kg/m<sup>3</sup>); o sea, de, por lo menos, unas dos o tres veces mayores que el utilizado en banqueo.

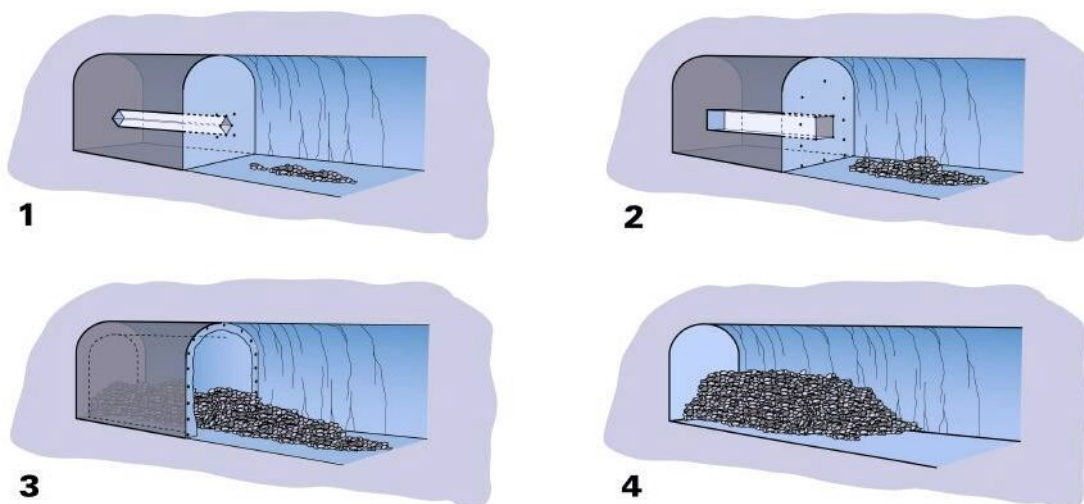
Así, si en el banqueo de rocas habituales, empleando un explosivo potente en fondo, el valor máximo de la piedra práctica es del orden de 40 d, en los barrenos de destroza de un túnel (figura de la derecha), dicho valor es del orden de (24-28) d. La relación E/V en dichos barrenos es, en torno, a 1.1, o sea, del mismo orden que en banqueo. Por tanto, el volumen de roca arrancando por barreno es, como mucho, del orden de (1/3-1/2) del arrancado en banqueo.



La perforación suele realizarse con jumbos electrohidráulicos, de uno o más brazos - en función del tamaño de la galería-, con diámetros de perforación entre 32mm y 50mm. Para pequeñas secciones se emplea la perforación manual con equipos neumáticos o hidráulicos.



Dadas las malas condiciones de salida de los barrenos, la estrategia para el avance de túneles es: abrir una cavidad inicial, el cuele, hacia el cual se vuela sucesivamente el resto de la roca, ensanchándolo progresivamente hasta completar el arranque de la totalidad de la sección.



**Ensanche del cuele tras la apertura del mismo (se realiza en la misma pega secuenciando los barrenos)**

Para secuenciar la pega se utiliza la serie de microrretardo/retardo corto y la de retardo/retardo largo, empleando el sistema eléctrico/nonel.

Hay diferentes técnicas para abrir el cuele, pudiendo perforarse con dos tipos de esquemas, que a su vez presentan diferentes variantes:

- Barrenos en ángulo
  - Cuele en abanico
  - Cuele en cuña o en V
- Barrenos paralelos
  - Cuele en cráter
  - Cuele quemado
  - Cuele cilíndrico

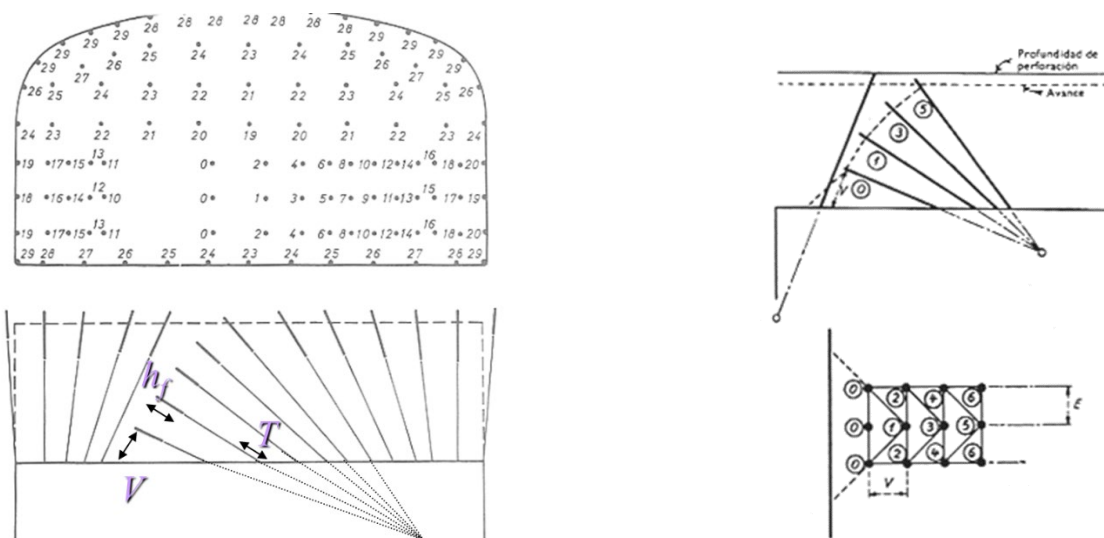
De entre todos ellos, el cuele cilíndrico es el de uso más extendido.

## 2. Tipos de cueles

---

### Cuele en abanico

Los barrenos se perforan en ángulo y rompen, según los principios del franqueo libre, hacia la cara libre del túnel. En la figura de la derecha se muestra la proyección de los barrenos del cuele según la dirección de la piedra. El cuele es equivalente a volar una zanja que incrementa en profundidad.



Cuele en abanico

Los valores prácticos de las variables de diseño (de aquí en adelante, se darán valores según Gustafsson si no se indica lo contrario), cargando goma con alto grado de retacado ( $P=1.20-1.25 \text{ g/cc}$ ), son del orden de:

- $V = 24 \text{ d}$        $E = [0.9-1.0] V$
- $h_f = 1/3 H$        $l_c = 0.4 l_f$        $T = 12 \text{ d}$

En donde H es la longitud de perforación.

Como V es proporcional a  $(P \times s)^{0.5}$ , el cambio para otras condiciones de carga es inmediato. La longitud de retacado será variable para ajustarla a la separación entre barrenos en el emboquille.

Se dan por lo menos tres hileras e interesa, si es posible, utilizar retardos de 50 ms a 100 ms para dar tiempo a la salida de cada abanico.

Presenta algunos inconvenientes:

- Dificultad en la perforación: ángulos y profundidades variables
- Avance limitado por el ancho del túnel (aprox. la mitad del ancho)



### Cuele en cuña

Se perforan los barrenos en ángulo, formando cuñas, con un ángulo mínimo de  $60^\circ$  entre sí. Note en la figura de la derecha como está definida la piedra.

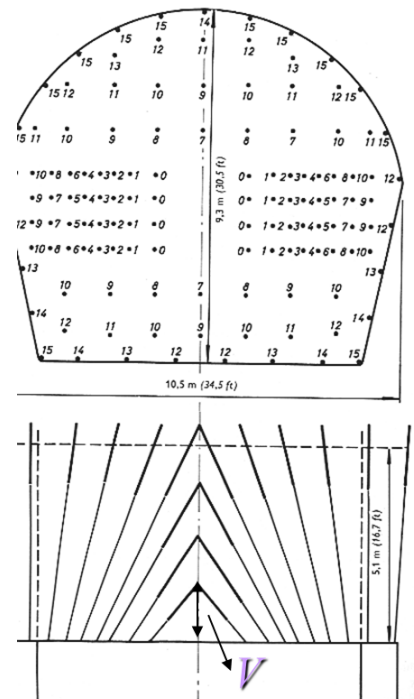
Para tres cuñas, los valores geométricos de diseño son:

diámetro mm)	altura del cuele (m)	piedra (m)
30	1.5	1.0
38	1.6	1.2
45	1.8	1.5
51	2.8	2.0

Con:

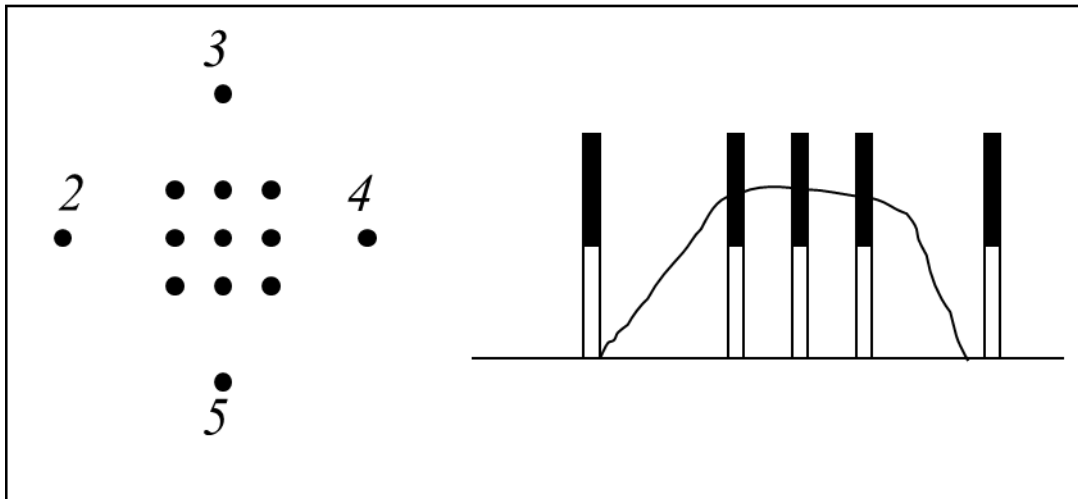
- $h_f = 1/3 H$        $l_c = 0.5 l_f$        $T = 12 \text{ d}$

Los barrenos del contracuele se calculan como los del cuele en abanico. Asimismo, presenta los mismos inconvenientes que aquél, aunque ambos cueles emplean menores c.e. que los de barrenos paralelos.



### Cuele en cráter

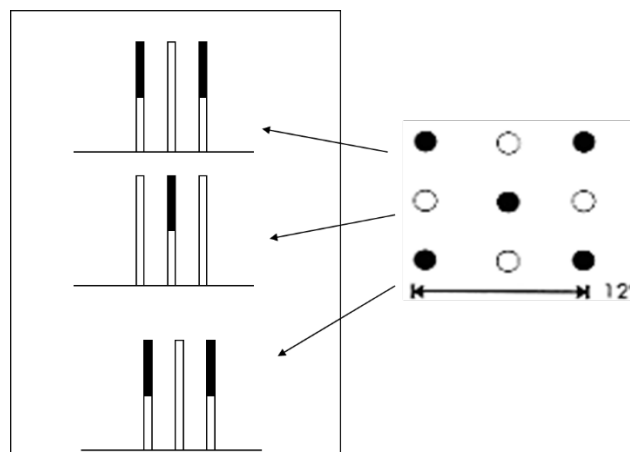
Consiste en perforar barrenos paralelos al eje del túnel, trabajando con una enorme carga específica que hace que la roca rompa en cráter proyectándola contra el frente. Muy poco eficiente está totalmente en desuso por sus malos avances.



Esquema de perforación de un cuele en cráter

### Cuele quemado

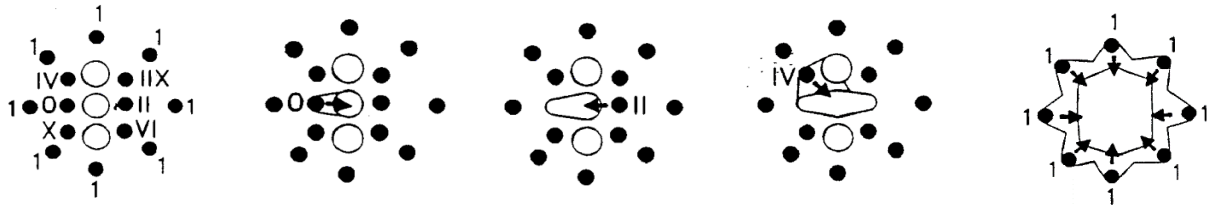
Consisten en volar los barrenos cargados hacia uno o más vacíos, habitualmente del mismo diámetro, que actuarán como cara libre. Dado el elevado confinamiento, las necesidades de carga son tan elevadas que parte del material se sinteriza o apelmaza contra las paredes de los barrenos vacíos obturándolos. Ejemplos: cuele sarrois, cuele sueco...



Esquema de un cuele quemado (note los barrenos con carga)

## Cuele cilíndrico

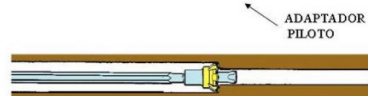
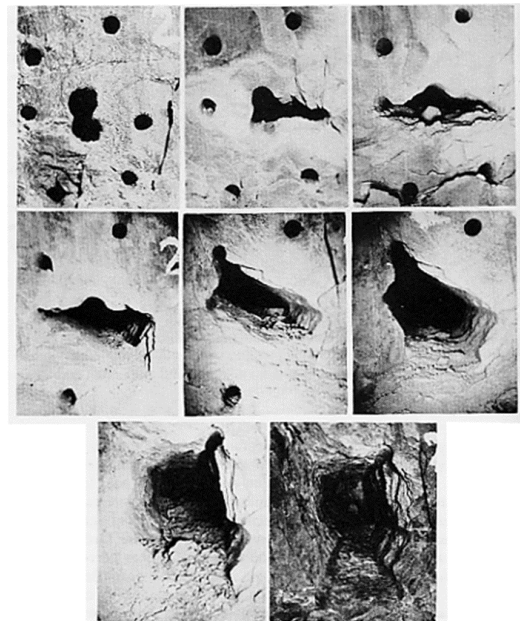
En este cuele, se disparan los barrenos cargados hacia uno a más barrenos vacíos, de mayor diámetro (barrenos de expansión). Aunque el consumo específico es muy elevado, debido a la gran fijación de los barrenos, se controla la carga y la distancia entre los barrenos de manera que la roca rompa y quepa en el hueco creado, y sea expulsada del mismo por los gases de la voladura: el/los barreno/s de expansión actúan como cara libre y se secuencian la salida para ir ensanchando progresivamente la apertura.



Esquema de la secuencia de salida de los barrenos de un cuele cilíndrico (salen secuenciados en la misma pega)

A la derecha se muestra la salida de un cuele Coromant (Langefors) en la que se han disparado los barrenos uno a uno para tomar las fotos. Los dos barrenos secantes, de mayor diámetro, son los barrenos de expansión; el resto van cargados.

Para ensanchar los barrenos y obtener el diámetro de expansión se utiliza una broca escariadora.



De acuerdo con Langefors, son varias las condiciones las que se deben cumplir para que el cuele cilíndrico salga correctamente (además de la concerniente a que los barrenos sean efectivamente paralelos):



- Que la distancia entre los barrenos no sea excesiva

Si la distancia  $V$  es mayor de  $2D$ , el grado de fijación es muy elevado, así como el c.e. requerido: hay deformación plástica de la roca y se obtura la salida. Si se disminuye la piedra hay rotura, pero el volumen de la roca esponjado es mayor que el del hueco y, de nuevo, se obtura la salida. Para  $V$  en torno a  $1.5D$  se cumplen las condiciones de rotura

(aunque el c.e. requerido sigue siendo elevado) y el material esponjado entra en el hueco. Note que es con una profundidad algo mayor a los barrenos de expansión

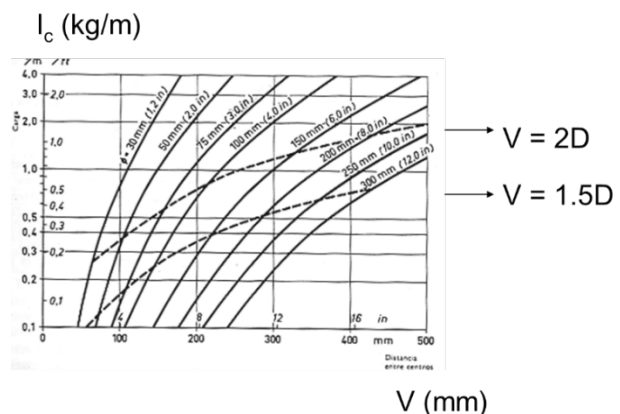
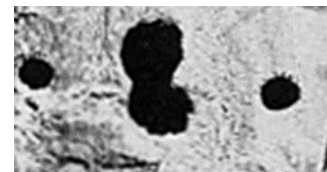
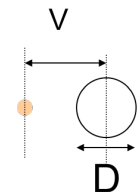
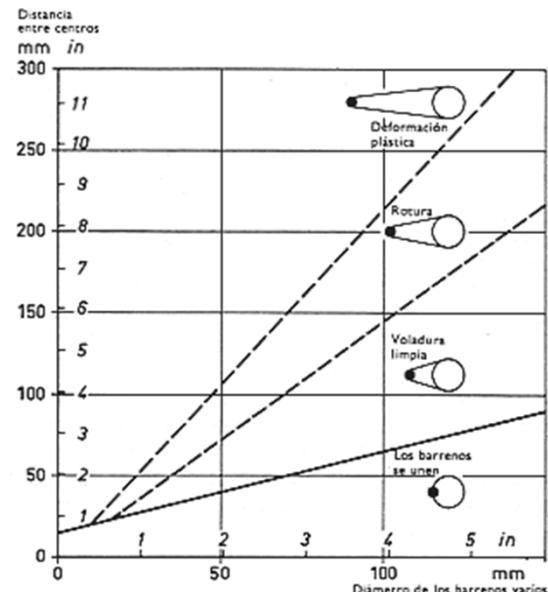
Langefors sugiere utilizar una  $V_p = 1.5D$  ( $2.4D$  en caso de perforar dos barrenos de expansión), mientras que Gustafsson sugiere utilizar una piedra  $V_G = 0.7D$  (el doble con dos barrenos de expansión). La piedra de Gustafsson viene definida como la mínima distancia entre los barrenos. Si se define de acuerdo con Langefors, la piedra con un único barreno de expansión sería:

$$V_p = 0.7D + 0.5D + 0.5d = 1.2D + 0.5d$$

- Que la carga sea la correcta para la distancia considerada

En la figura de la derecha se muestran los requerimientos de carga en función de  $V$  para un diámetro de 32mm. Noten que dichos requerimientos son muy sensibles al valor de la piedra. Si la carga es excesiva la roca romperá, pero se apelmazará contra el barreno, obturándolo; si es insuficiente, la piedra no romperá.

Es por de ello de la enorme importancia de perforar correctamente los barrenos del cuele, mas teniendo en cuenta que si no sale el cuele no saldrá el resto de la voladura.



Langefors sugiere emplear una densidad de carga:

$$l_c \text{ (kg/m)} = (V_t / D)^{1,5} (V_t - D/2) d / 22000$$

Con  $V_t$  (Langefors sugiere tomar un valor de  $1.7 D$  para una  $V_p = 1.5D$ ),  $d$  y  $D$  en mm (note que hay cierta libertad para escoger  $V_t$  y, por tanto,  $V_p$ ).

En el caso de dos barrenos de expansión, si se quiere emplear el valor práctico  $V_p = 2.4D$ , el valor de  $V_t$  en la ecuación anterior, se hace igual a  $2.7 D$ , y se sustituye, en dicha ecuación,  $D$  por  $1.6D$ .

Si se calcula la piedra según Gustafsson, éste sugiere utilizar una densidad lineal de carga:

$$l_c \text{ (kg/m)} = 15.4 d(m) - 0.235$$

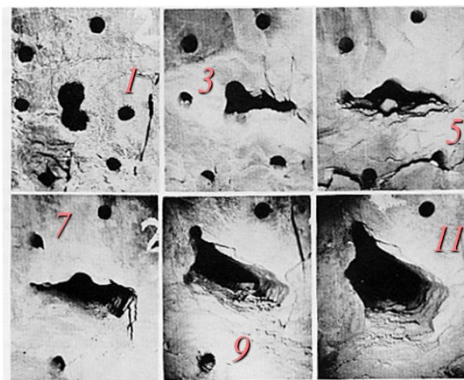
Para los siguientes diámetros de trabajo:

d(mm)	32	35	38	45	48	51
D(mm)	57 - 2x76	76 - 2x76	76 - 2 x 76	2 x 76 - 125	2 x 76 - 125	2 x 76 - 125

#### Diámetros de perforación vs diámetros de expansión para cueles cilíndricos según Gustafsson

- Que haya retardo suficiente para permitir la limpieza del cuele

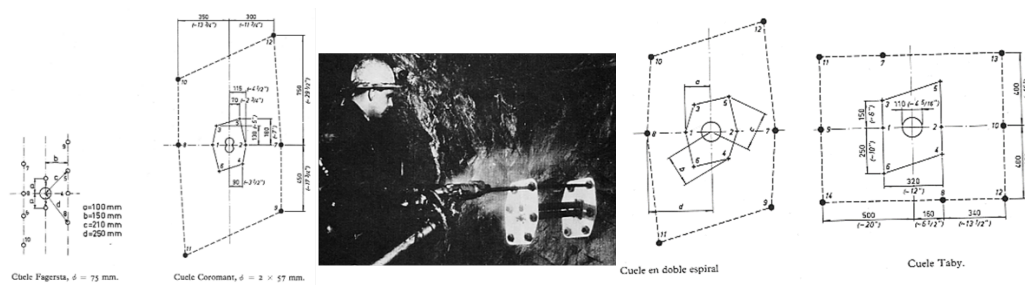
Lo ideal sería saltarse algún número en los barrenos del cuele para permitir la limpieza del mismo. En la práctica, los números de la serie de micro y de retardo son limitados. La posibilidad de saltarse números dependerá de la sección del túnel y del diámetro de perforación – así como del macizo-, dado que de ellos depende el número de barrenos a perforar.



Secuencia de salida del cuele Coromant



Existe gran diversidad de cueles estandarizados. Por ejemplo, el Fagersta o el Coromant para pequeñas secciones, o el Taby y el de doble espiral para secciones medias o grandes. En general, en función de las experiencias acumuladas se emplean unos u otros cueles.



### Ejemplos de cueles cilíndricos y plantilla de perforación

En el caso de secciones pequeñas ( $<10\text{m}^2$ ), si se perfora manualmente, es recomendable utilizar plantillas de perforación para disminuir los errores de perforación.

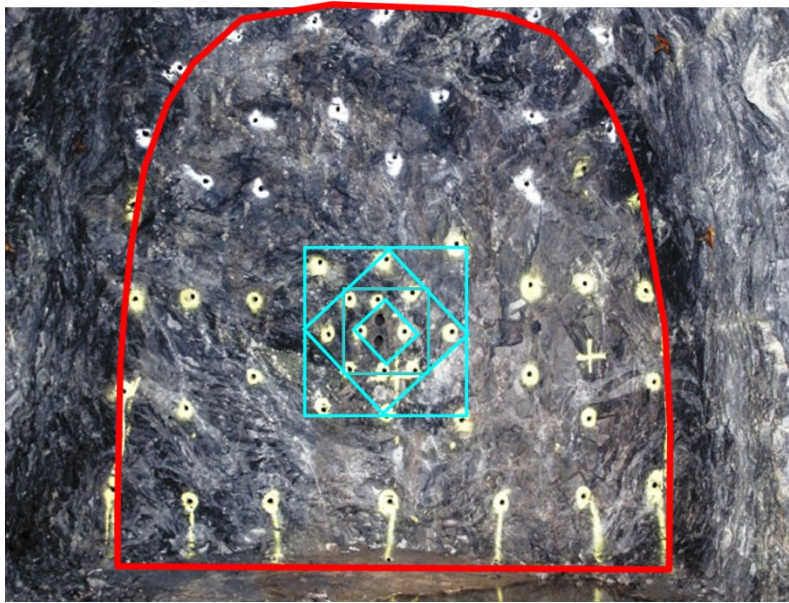
Para cada cuele, el avance máximo depende del diámetro de los barrenos vacíos y de la desviación en la perforación. Langefors ofrece la siguiente tabla en la que se indica la longitud máxima de perforación para obtener avances del 95% de la misma, siempre que el error de perforación (su dispersión) se mantenga por debajo de un 2%.

D (mm)	2 x 57	75	100	2 x 75	110	125	150
Doble espiral	3.1	3	3.8	4.1	4.1	4.5	5.1
Taby	2.2	2.1	2.6	2.8	2.8	3.1	3.6

Si en una nueva situación, tras el periodo inicial de aprendizaje, se obtienen avances medios inferiores al 90% de la longitud de perforación habrá que empezar a replantearse el diseño: longitud de perforación adoptada, errores en la perforación o en la iniciación, distancias, cargas y explosivo utilizado, o el cuele escogido.

### Cuele cilíndrico de cuatro secciones

El cuele de cuatro secciones (apodado por algunos cuele cañón) es un cuele utilizado por su fácil replanteo, así como los buenos avances que pueden obtenerse.

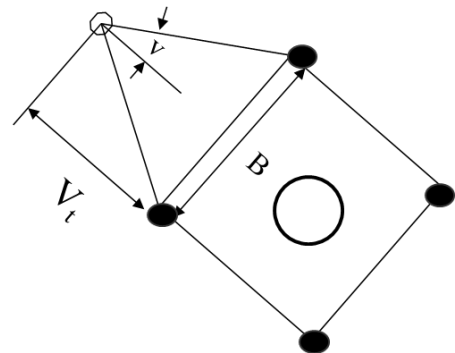


**Detalle del replanteo de la voladura y del cuele de cuatro secciones**

Como se observa en la figura, los barrenos del cuele y contracuele se disponen, en cada sección, formando *cuadrados* que van saliendo progresivamente. Al final se tendrá una abertura entre 1 m<sup>2</sup>-4 m<sup>2</sup> hacia la que saldrán el resto de barrenos (primeramente, serán los barrenos de destroza en la figura anterior). La profundidad de perforación puede estimarse con  $L = 30 D (n)^{0.5}$ , siendo n el número de barrenos de expansión.

Los barrenos de la primera sección, los más cercanos a los de expansión, se sitúan y cargan con los valores calculados en el epígrafe anterior, según utilicen uno u otro autor.

Para el resto de las secciones, Langefors indica los siguientes requisitos de carga (vea figura de la derecha):



$$l_c \text{ (kg/m)} = 0.35 V_t(m) / (\text{sen } v)^{1.5} (d(\text{mm})/32), \text{ con } 0.5B < V_t < 2B$$

B es el ancho de la superficie libre creada en la sección anterior y v es el semi-ángulo indicado en la figura. Los valores prácticos se obtendrían restando los errores de perforación - igual que en banqueo.

Gustafsson ofrece una serie de valores prácticos tabulados, que se han ajustado con las siguientes expresiones:

$$V_p = (0.7-0.9) B \text{ (la piedra medida como habitualmente)}$$

$$Q_f \text{ (kg)} = 1.25 V_p \text{ (m)}$$

$$l_c \text{ (kg/m)} = (0.4 V_p(m) + 0.22) d^2 \text{ (mm)} / 1000$$

En ambos casos, se repetirían los cálculos para cada una de las secciones restantes. Si la piedra calculada en la cuarta sección es mayor que el valor de la piedra en los barrenos de destroza, se tomaría como piedra el valor de esta última y se tendría un cuele de tres secciones. Gustafsson indica cargar los barrenos como los de la destroza con rotura horizontal cuando la piedra sea mayor de 0.7 m.

En cuanto al retacado, se suelen utilizar tacos de arcilla con una longitud del orden de la mitad de la piedra.

Note que, si bien el valor de la carga en los barrenos del cuele va a ser menor que la del resto de barrenos, el consumo específico en dicha zona va a ser muy elevado dado el pequeño volumen de roca arrancado por barreno. Langefors indica que el c.e. teórico en el cuele es del orden de  $7 \text{ kg/m}^3$ , pero que en la práctica es del orden de  $13 \text{ kg/m}^3$ .

### 3. Cálculo del resto de secciones

---

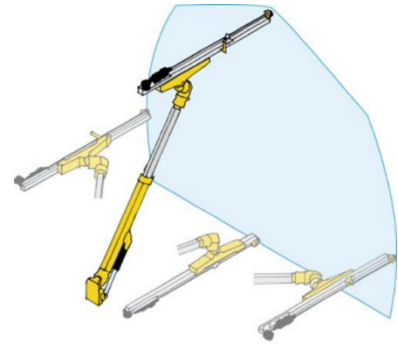
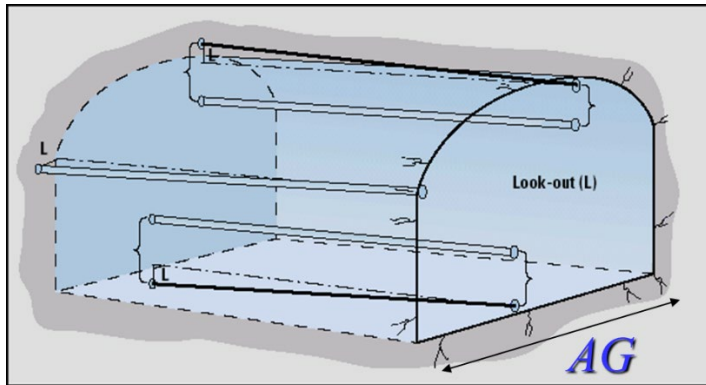
#### Zapateras

Cuando salen Las zapateras, o barrenos del piso, parte del material volado descansa sobre ellas debido a que estos tiros salen al final de la voladura. Por ellos, son lo barrenos que llevan más carga. Gustafsson recomienda utilizar un consumo específico de goma en fondo (c.e.f.), para rocas normales, de 1.1, 1.3 o  $1.5 \text{ kg/m}^3$ , en función de que el diámetro de perforación sea 30, 40 ó 50 mm, respectivamente. Los parámetros de diseño son:

$$E/V = 1.1 \quad h_f = 1/3 H \quad l_c = 0.7 l_f \quad T = 0.2V$$

$$\text{Debiéndose cumplir: } V \leq (H - 0,4) / 2$$

Hay que tener en cuenta que el valor de la piedra hay que corregirlo (ver figura, Look-out  $\approx 20 \text{ cm}$ ) ya que los barrenos del piso se perforan ligeramente inclinados- al igual que todos los que delimitan la sección-, con respecto al perfil de túnel, para permitir el emboquille del jumbo de la voladura siguiente. El espaciamiento también hay que corregirlo según el ancho de la galería, AG, y la inclinación lateral de los barrenos de las esquinas.



Los barrenos de la periferia se perforan para dar cierta conicidad a la sección del túnel y permitir el emboquille (es conveniente poner cañas en las zapateras para que no se entierren y obturen los emboquilles)

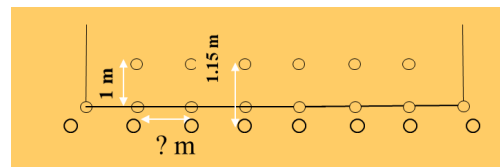


**Detalle de un jumbo perforando - para posicionar la broca necesita cierto espacio**

Si, por ejemplo,  $d = 45 \text{ mm}$  (c.e.f. =  $1.4 \text{ kg/m}^3$ ); se carga con goma y alto grado de retacado ( $P = 1,25 \text{ kg/dm}^3$ ). Se tiene:

$l_f = 1250 \pi 0.045^2 / 4 = 2 \text{ kg/m}$ ; como:  $l_f / \text{c.e.f.} = E/V$ , con  $E/V = 1.1$ , entonces:  $2 / 1.4 = 1.1 V^2$

Despejando:  $V_p = 1.15 \text{ m}$  y  $E_p = 1.25 \text{ m}$  (son valores de diseño o prácticos). Si el look-out son 15cm, la piedra con respecto al emboquille de las zapateras será de 1m.



Si el ancho de la galería son 8 m, el número de barrenos a perforar será igual a:

$NB = (8 + 2 \times 0.15) / 1.25 + 1 = 7.6 \approx 8$  barrenos, con una separación en el fondo igual a:

$E_p = (8 + 2 \times 0.15) / (8-1) = 1,18 \approx 1.2 \text{ m}$  [ $l_c = 0.7 l_f = 1.4 \text{ kg/m}$  y  $T = 0.2 V \approx 0,25 \text{ m}$ ]



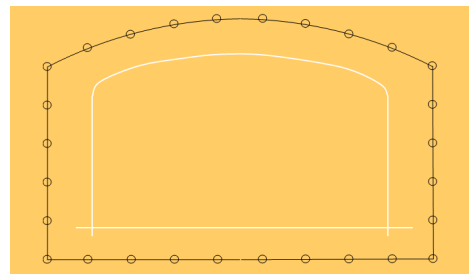
Finalmente, también pueden utilizar la metodología de Langefors para obtener los valores máximos de E y V (aumenta el factor de fijación:  $f \approx 1.5$ , por las razones que ya se expusieron), y descontar los errores de perforación para obtener los valores prácticos.

### Barrenos de destroza

Para los barrenos que rompen hacia la horizontal o hacia arriba se emplea el mismo esquema que para las zapateras. Si los barrenos rompen hacia abajo se disminuye el c.e.f. en  $0.1 \text{ kg/m}^3$  y se emplea una  $E/V = 1.2$ . En ambos casos:  $h_f = H / 3$ ,  $l_c = 0.5 l_f$  y T del orden de  $0.5 V$ . Las distancias entre barrenos deberán ajustarse a la sección y al resto de barrenos.

### Barrenos de techo y hastiales

La piedra se toma igual al 90 % de la piedra de los barrenos de franqueo descendente –que son los de destroza que rompen hacia abajo. Recuerden el margen para el emboquille y el ajuste del espaciamiento a las dimensiones de la galería. El resto de variables de diseño son:



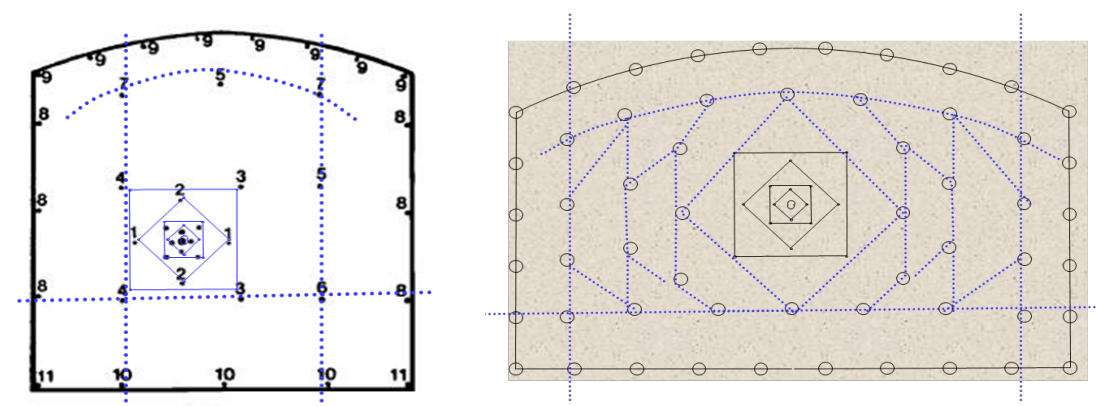
$$E/V = 1.2 \quad h_f = 1/6 H \quad l_c = (0.3-0.4) l_f \quad T = 0.5 V$$

Noten que estos barrenos van menos cargados con el objetivo de dañar menos al macizo remanente -para controlar el daño en el macizo se suele utilizar la técnica de recorte que se verá en el próximo capítulo-.

### Integración del diseño en la sección

Al final se obtendrán los valores de E, V y las cargas para cada sección, y se adaptarán los resultados de los cálculos a la geometría del túnel. Para integrar los barrenos en la sección puede seguirse el siguiente proceso:

- Marcar los barrenos perimetrales y las líneas de rotura (ver figura de arriba)
- Ubicar el cuele: éste no tiene porqué ir centrado. Al ser el consumo específico en esta zona muy elevado, la roca remanente puede quedar muy dañada dificultando la perforación de la siguiente voladura. Por otra parte, la mayor o menor elevación de la ubicación del mismo dará lugar a mayor o menor deslizamiento del material volado
- Ubicar los barrenos de destroza: ajustar los valores de E y V a la sección; en general, el ajuste se realiza por exceso en el número de barrenos
- Comprobar las líneas de rotura



Integración de los barrenos en la sección de la galería

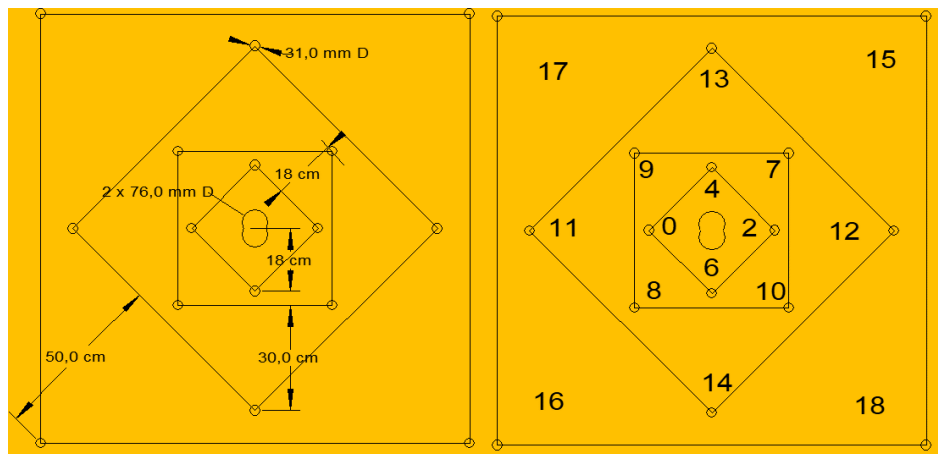
A continuación, se determinará el número de barrenos a perforar para cada sección. Con estos datos podrá calcularse el consumo de explosivo por pega, los metros a perforar por cada avance, los valores específicos, etc.

Resumen resultados						
Voladura estándar						
	Nº de barrenos	Qbarreno (kg)		d cartuchos (mm)	Qttotal(kg)	Cespecífico teórico(kg
Cuele		columna	fondo		58.33	5.05
1ª sección	4	2.89		26	11.55	
2ª sección	4	2.89		26	11.55	
3ª sección	4	4.52		32	18.09	
4ª sección	4	4.28		32	17.14	
Zapateras	6	3.57	2.86	40 y 32	38.56	1.56
Destroza	10	2.62	2.86	40 y 32	54.74	1.02
Techo y hastiales	12	2.43	1.43	40 y 26	46.32	0.99
<b>TOTAL</b>	<b>44</b>	barrenos de 45 mm			<b>197.94 Kg</b>	<b>1.45 kg/m3</b>
	2	barrenos de 76 mm				

Resultados del diseño (el c.e. real será mayor que el mínimo teórico)

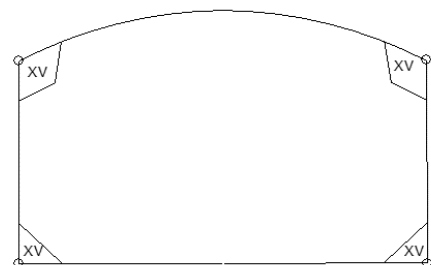
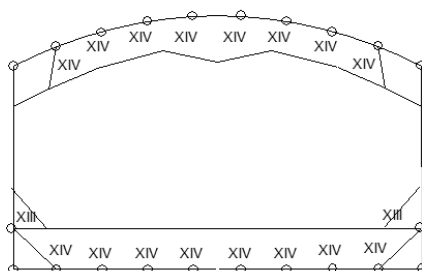
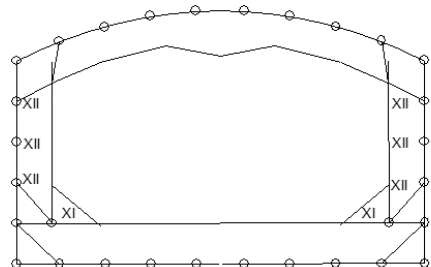
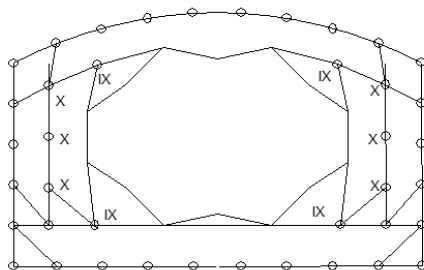
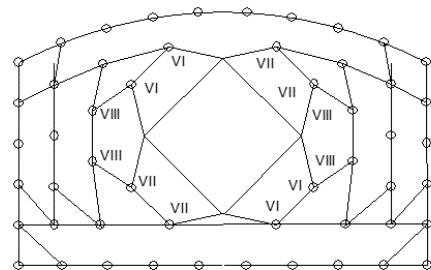
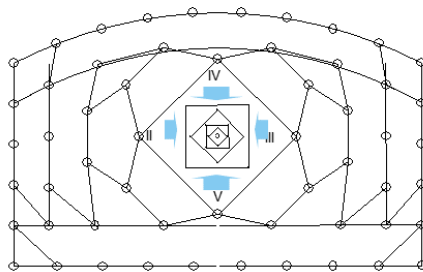
## 4. Secuencia de iniciación

Se diseña siguiendo el principio básico de secuenciación: cada barreno en el momento de salir ha de tener al menos una cara libre y la menor fijación (constricción) posible. Se comienza con los barrenos del cuele que irán con la serie de micro-retardo (se suele indicar esta serie con números arábigos).



**Ejemplo de secuencia del cuele**

A continuación, se prosigue con los barrenos de destroza, comprobando las líneas de rotura, y así hasta completar la totalidad de la sección.

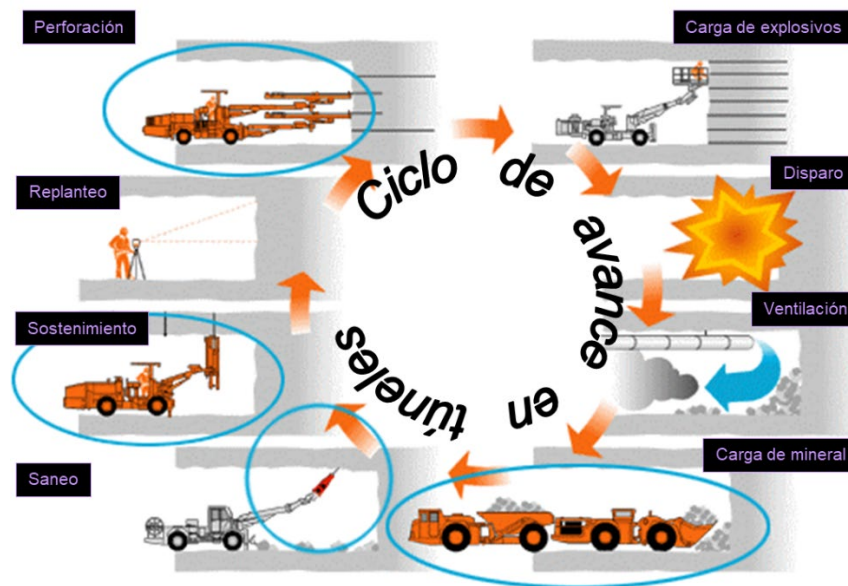


**Secuenciación del túnel (los números romanos indica la serie de retardo)**



## 5. Consideraciones generales de diseño

Al igual que en las voladuras a cielo abierto, en el diseño de las voladuras en túnel hay que considerar el conjunto de procesos que intervienen en el avance de la misma.



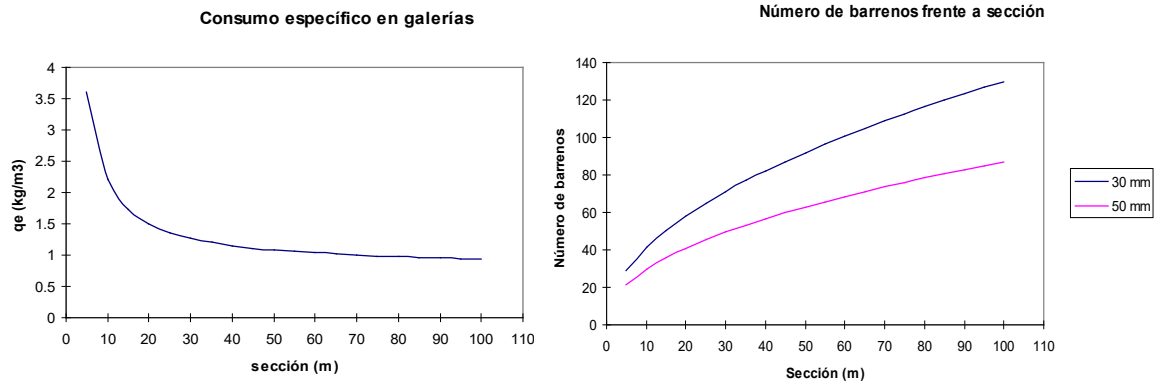
Procesos que intervienen en el avance de túneles y galerías

Y, en general, el objetivo será el de minimizar el coste por tonelada, metro cúbico, o por metro avanzado - note que una componente del coste es el de oportunidad de adelantar o retrasar el fin de la obra. Dicho objetivo suele ser coincidente con el de lograr que el avance medio del ciclo sea el mayor posible, y aquél no tiene por qué ser equivalente al de alcanzar el mayor avance por voladura.

La longitud de perforación será pues función de: la sección, los equipos disponibles, el cuele, el tipo de roca, de los requerimientos de sostenimiento/revestimiento, y de la organización del trabajo.

Por otra parte, el avance de la voladura lo define el cuele- si éste avanza sólo 1 m, el avance de la voladura lo limitará dicho metro-: hay que diseñar, perforar y cargar el mismo cuidadosamente.

Hay algunas relaciones empíricas que relacionan el consumo específico y el número de barrenos a perforar con la sección del túnel, que permiten realizar estimaciones rápidas.



### Relación entre el consumo específico medio y el número de barrenos a perforar con la sección de la galería

Note el rápido incremento del c.e. para pequeñas secciones. Bajo estas circunstancias, el cuele tiene un peso muy importante. También advierta el gran ahorro, en el número de barrenos, que supone perforar con un diámetro de 50mm a partir de secciones entre 10-15 m<sup>2</sup>.

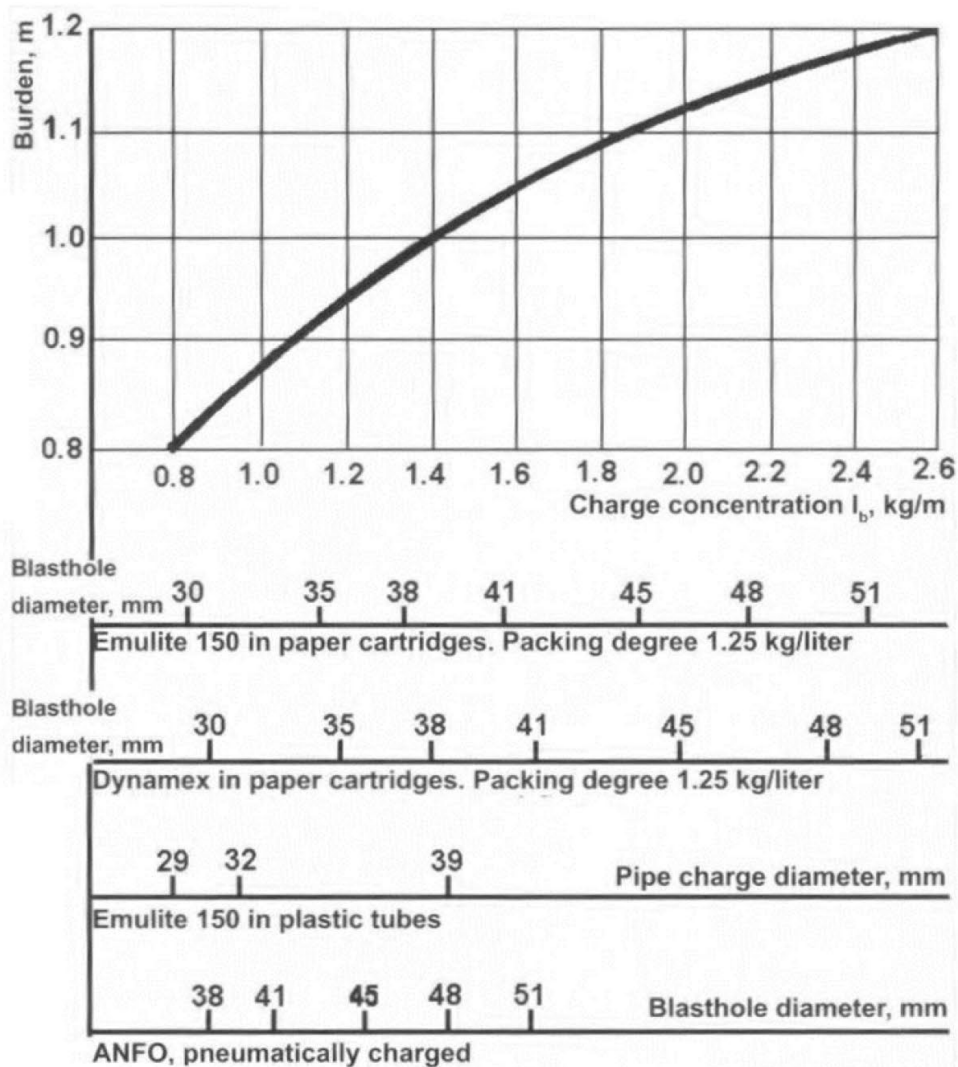
Finalmente, para grandes secciones (grosso modo, a partir de 50-60 m<sup>2</sup>) y/o en el caso de roca poco competente hay que plantear la posibilidad del avance en fases: bóveda, destroza, ensanches...



**Avance por fases en túneles de grandes secciones o en roca poco competente**

## ANEXO

### Carga para las zapateras según Olofsson



### Parámetros de diseño del resto de las secciones

Part of the round:	Burden (m)	Spacing (m)	Height bottom charge (m)	Charge concentration		Stemming (m)
				Bottom (kg/m)	Column (kg/m)	
Floor	$1 \times B$	$1.1 \times B$	$1/3 \times H$	$I_b$	$1.0 \times I_b$	$0.2 \times B$
Wall	$0.9 \times B$	$1.1 \times B$	$1/6 \times H$	$I_b$	$0.4 \times I_b$	$0.5 \times B$
Roof	$0.9 \times B$	$1.1 \times B$	$1/6 \times H$	$I_b$	$0.3 \times I_b$	$0.5 \times B$
Stopping:						
Upwards	$1 \times B$	$1.1 \times B$	$1/3 \times H$	$I_b$	$0.5 \times I_b$	$0.5 \times B$
Horizontal	$1 \times B$	$1.1 \times B$	$1/3 \times H$	$I_b$	$0.5 \times I_b$	$0.5 \times B$
Downwards	$1 \times B$	$1.2 \times B$	$1/3 \times H$	$I_b$	$0.5 \times I_b$	$0.5 \times B$

Resumen de cálculo del resto de las secciones: zapateras, hastiales, corona y destroza