

Utilización de las voladuras controladas en la excavación de túneles^(*)

Por LAUREANO CORNEJO ALVAREZ

Ingeniero de Minas.

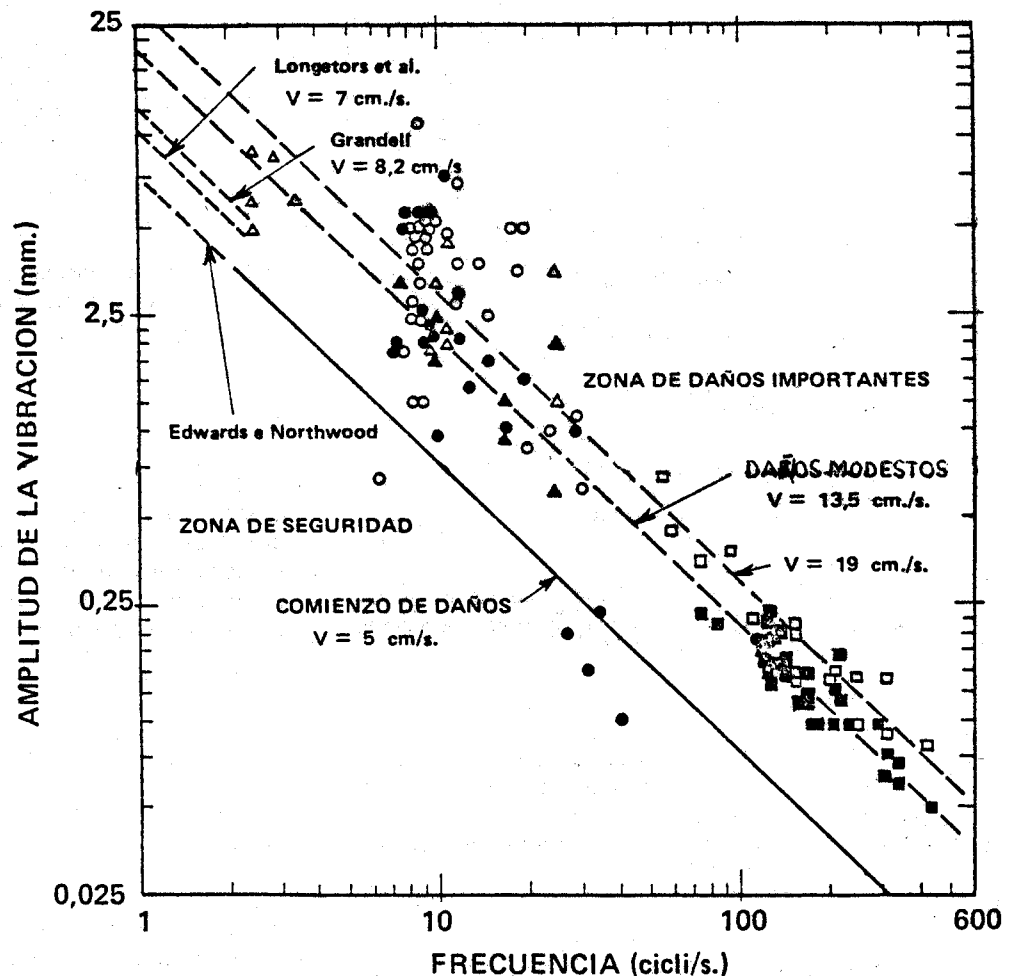
Los trabajos de voladura para la excavación de túneles son operaciones muchas veces complejas por la presencia de edificaciones o estructuras próximas. En este artículo se expone un interesante ejemplo de excavación mediante voladura en areniscas, en la cercanía de un túnel ferroviario.

1. INTRODUCCION

El presente trabajo se refiere a la excavación con explosivos de una galería de enlace que atraviesa unas formaciones de areniscas molosas; la sección es en forma de herradura con un ancho en solera y una altura de 3,20 metros.

Esta galería discurre en las proximidades de un túnel ferroviario a una cota superior.

A causa de esta proximidad con la línea férrea (distancia mínima 16 metros), es necesario proyectar las voladuras de modo que las vibraciones producidas por éstas estén dentro del nivel de segu-



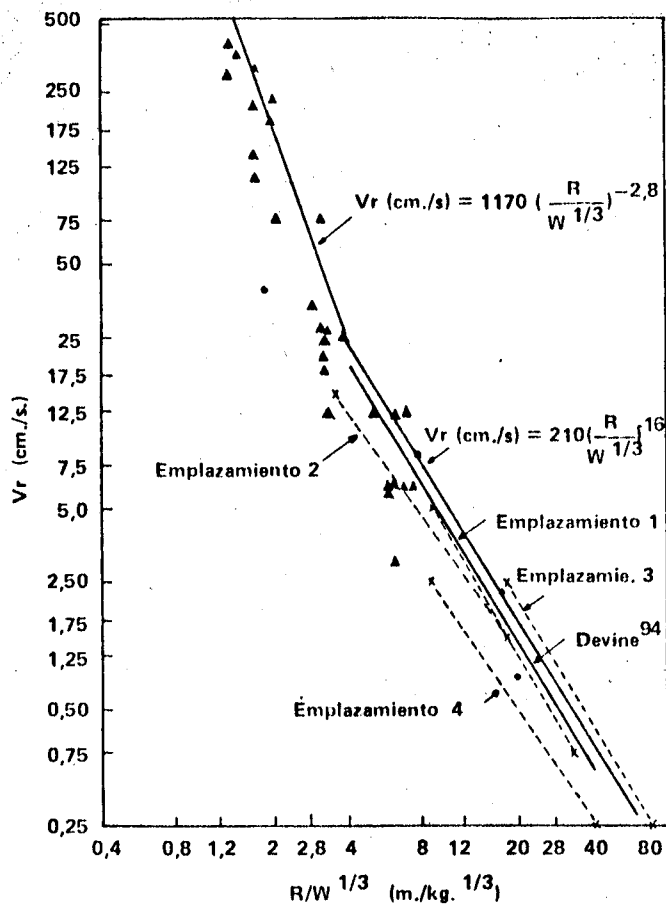
Zonas de seguridad y de daños con relación a la velocidad de vibración.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitiarse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de noviembre de 1980.

- Bureau of Mines
- Langerfors et al.
- △ Edwards e Northwood
- Bureau of Mines
- Langerfors et al.
- ▲ Edwards e Northwood

DAÑOS
IMPORTANTES

DAÑOS
MODESTOS



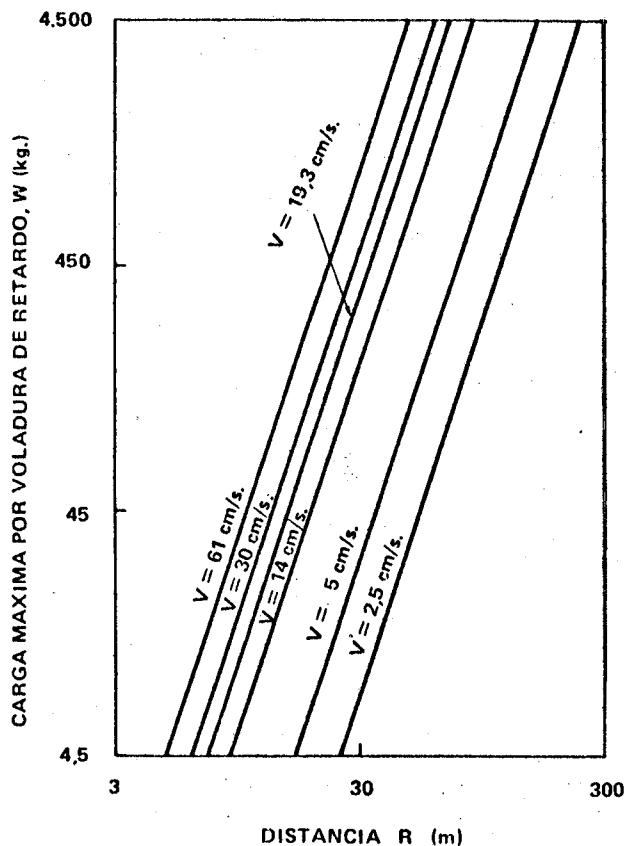
- ▲ Ensayos con explosivos potentes 95
- Voladuras de cantera 93
- Voladuras de cantera 91
- Voladuras de cantera con un retardo de 17 miliseg.
- Valores recomendados para estimaciones en obras de ingeniería.

Relación entre la máxima velocidad radial de las partículas y la distancia referida a $W^{1/3}$ según medidas a escala natural.

ridad que se adopte como conveniente para este caso, y que evite la relajación de la zona de roca más próxima al perímetro del túnel ferroviario como consecuencia de las tracciones inducidas por las vibraciones.

2. ESTIMACION DEL NIVEL DE DAÑOS

2.1. A continuación se exponen los distintos criterios que rigen en la actualidad y que sirven para cuantificar los efectos producidos por las vibraciones debidas a las voladuras.



Variación de la velocidad radial máxima de las partículas con la distancia y la carga de explosivo.

2.2. Criterio americano.

En el momento actual, y en base a las investigaciones realizadas por el U.S.B. of Mines, la velocidad de vibración o velocidad de partícula V , es el parámetro más adecuado para estimar el riesgo de daños, siendo éstos directamente proporcionales al valor de dicha velocidad.

Este organismo ha propuesto la siguiente ley exponencial:

$$V = K (D/\sqrt{Q})$$

en la que V es el valor máximo de la velocidad de vibración registrado en el curso de la voladura expresado en mm/s; K es la constante a determinar mediante ensayos; D es la distancia del barreno explosionado al punto en que se hace la observación (en metros); Q es la carga total detonada en cada intervalo de retardo (en kilogramos), y x es el exponente > 0 a determinar mediante ensayos.

Una vez determinados los parámetros K , x , mediante las voladuras de ensayo pertinentes, para cada velocidad de partícula que se fije, se obtiene

VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

el factor de escala correspondiente $L/\sqrt[3]{Q}$, que nos dará las cantidades máximas de explosivo que puede detonarse con cada número distinto de retardo, en función de la distancia entre el barreno explosionado y la periferia del túnel ferroviario.

Las normas establecen la velocidad de partícula en $V = 50$ mm/seg., como límite de la zona de seguridad; por tanto, este valor no podrá sobrepasarse en ninguna voladura.

2.3. Criterio de Ambraseys y Hendron.

Para voladuras subterráneas con frecuencia se utiliza la fórmula:

$$V = K (D/\sqrt[3]{Q})^{-b}$$

en la que V es la velocidad de partícula expresada en centímetros; D es la distancia entre el barreno y el punto de observación en metros, y Q son los kilogramos de explosivo detonados por número distinto de retardo.

Para valores de $D/\sqrt[3]{Q} > 10 \text{ ft/lb}^{1/3}$ establece para las constantes los valores:

$$K = 210 \quad \text{y} \quad b = 1,6$$

con lo que la fórmula a aplicar es la siguiente:

$$V = 210 (D/\sqrt[3]{Q})^{-1,6}$$

En nuestro caso particular, fijando la velocidad de partícula en $V = 5$ cm/seg., y teniendo en cuenta que la distancia es:

$$D = 16 \text{ metros}$$

resulta:

$$\text{Log } Q = \log \left(\frac{5}{210} + 1,6 \log 16 \right) \times 3/1,6$$

$$Q = 3,7 \text{ kilogramos}$$

Por tanto, aplicando este criterio; la carga máxima a detonador por cada número distinto de retardo sería de 3,7 kilogramos, manteniendo la voladura dentro del nivel de seguridad.

2.4. Criterio de Langefors y Kihlstron. Criterio sueco.

El criterio sueco establece la siguiente fórmula:

$$V_{\text{máx}} = K \sqrt{\frac{Q}{D^{3/2}}}$$

en la que $V_{\text{máx}}$ es la velocidad de partícula expresada en mm/seg.; Q es la carga explosiva en Kgds., y D es la distancia en metros.

Los niveles de daños establecidos son los que figuran en el cuadro adjunto.

Velocidad de partícula V mm/seg.	D a ñ o s	Observaciones
50	Ninguna fisura.	Límite de absoluta seguridad.
70	Ninguna fisura aparente.	
100	Fisuras insignificantes.	
150	Fisuras.	
225	Fisuras grandes.	
300	Caída de piedras en galerías.	
400	Nuevas fisuras en la roca.	
1.400	Fisuras en revestimiento de túneles.	

Langefors da el valor de $K = 400$ para rocas duras (granitos suecos, calizas duras).

Kirillow da el valor de $K = 200$ para rocas menos competentes.

Adoptando uno y otro valor para nuestro caso, se obtienen los siguientes valores:

$$\text{Para } K = 400 \quad Q = (50/400)^2 \cdot 16^{3/2} \quad Q = 1 \text{ Kg}$$

$$\text{Para } K = 200 \quad Q = (50/200)^2 \cdot 16^{3/2} \quad Q = 4 \text{ Kg}$$

El valor de la carga por retardo distinto que buscamos para nuestro caso estará entre estos dos valores y presumiblemente más próximo al valor de cuatro kilogramos que al de un kilogramo, ya que la roca que tenemos es una arenisca molasa, bastante menos competente que los granitos suecos que han servido de base para la obtención del valor $K = 400$.

Como vemos, el valor de $Q = 4$ Kg concuerda con el obtenido en el apartado 2.3.

Según Langefors y M. Kihlstrom, las líneas de igual riesgo de daños obedecen a la ecuación:

$$Q D^{-3/2} = K$$

Para una roca tipo granito con una velocidad de propagación sónica de

$$c = 3.000 \text{ m/seg.}$$

VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

tendríamos el siguiente cuadro para los niveles de daños:

Escala Mercalli modif. grados	$Q D^{-3/2}$ Kg·m ^{-3/2}	V cm/s.	V/C μ/m	D a ñ o s
II		0,225		El hombre acusa estas vibraciones.
V		2,25		
	0,008	3,50	10	Caída de yeso, ninguna fisuración.
VI		4,50		Ninguna fisuración.
	0,015	5	17	
	0,03	7	25	
	0,06	10	33	
	0,12	15	50	
	0,25	22,5	75	
	0,50	30	100	
	1,00			Caídas de piedras en galerías y túneles.
				Fisuras en rocas.

Estableciendo el nivel de daños en 0,015 que es el que corresponde a una vibración de 50 mm/s. en un granito y para una distancia $D = 16$ metros obtendríamos un valor para la carga de:

$$Q D^{-3/2} = 0,015 ; Q = 1 \text{ Kg}$$

Como la roca, en nuestro caso, es una molasa a la cual suponemos un valor para la velocidad de propagación sónica no superior a:

$$C = 2.000 \text{ m/seg.}$$

el nivel de daños, manteniendo el mismo valor para la velocidad de vibración, será de:

Angulo de cizallamiento:

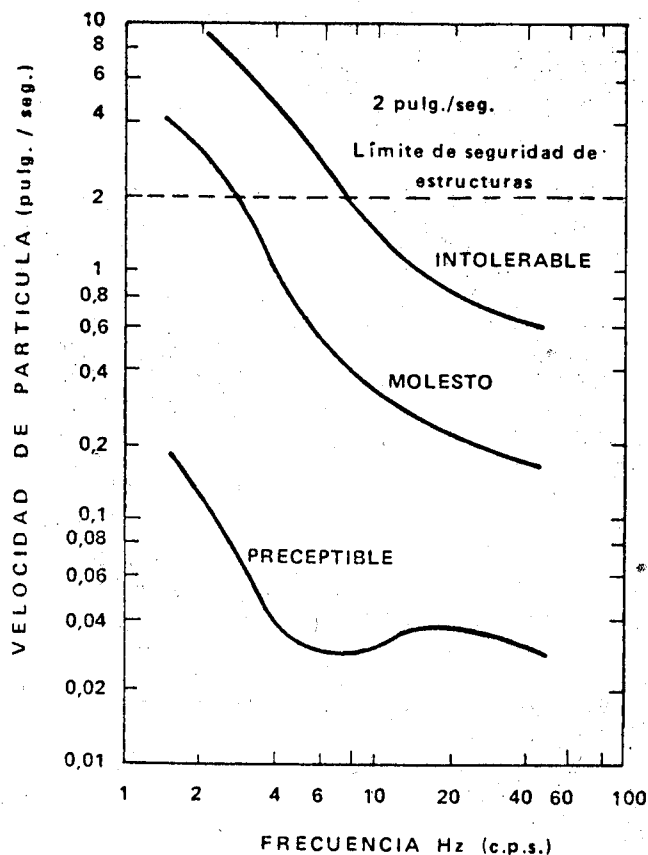
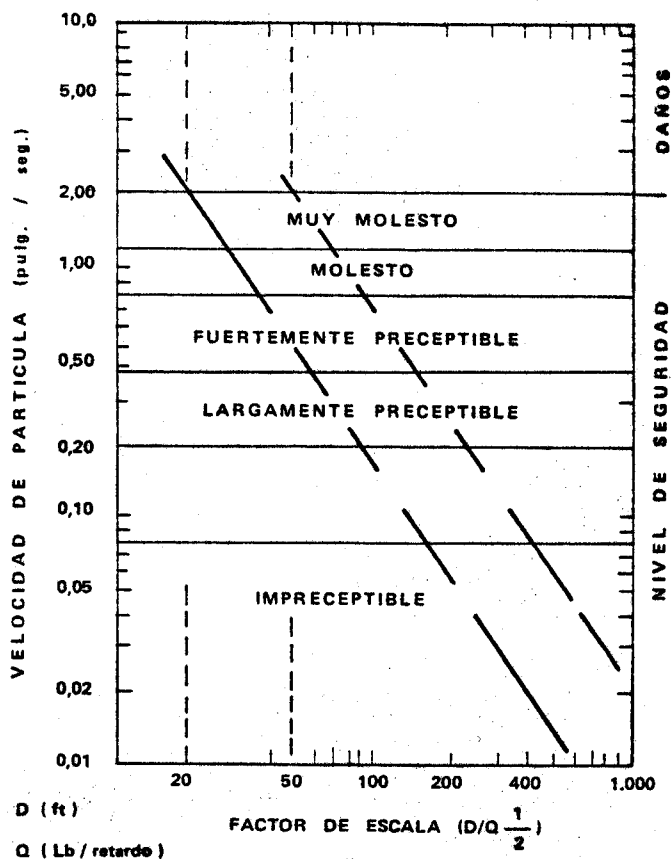
$$V/C = \frac{50.000}{2.000} = 25 \mu/m$$

al que corresponde un valor de:

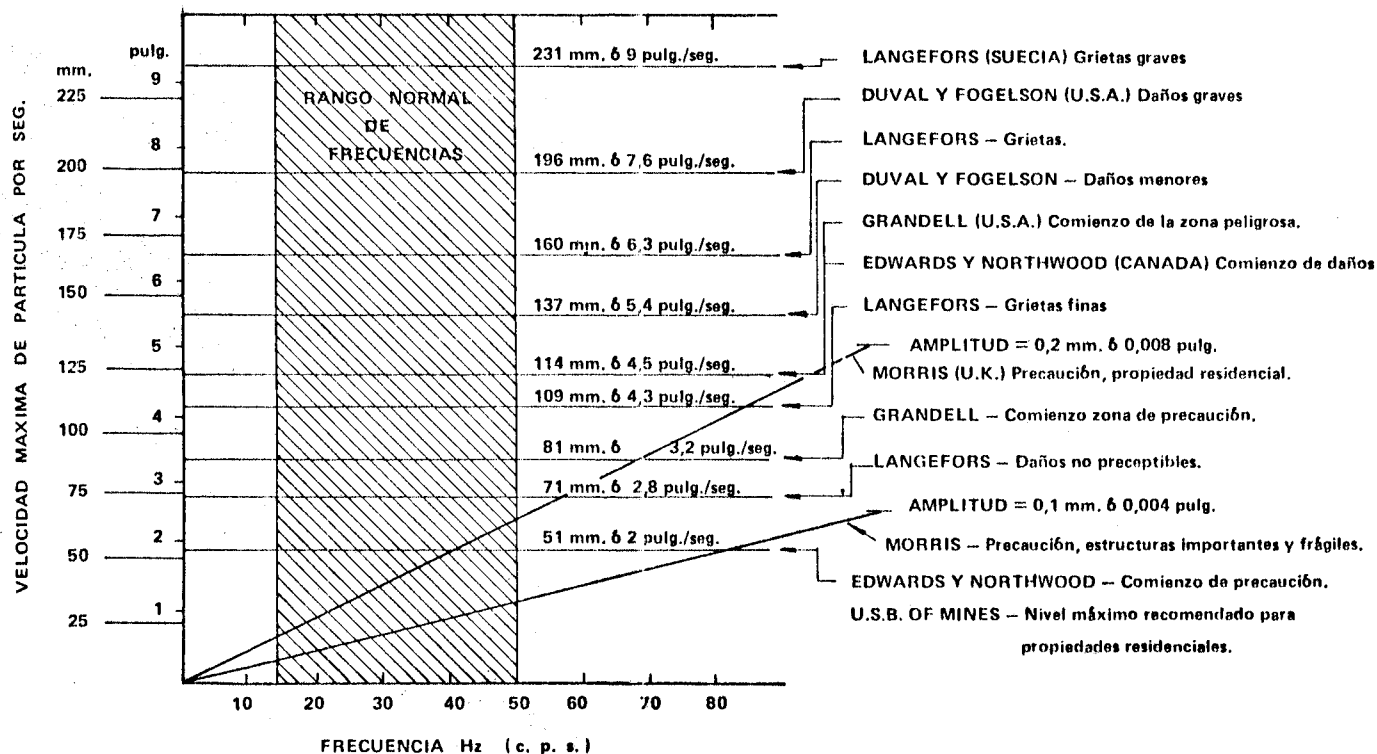
$$Q \cdot D^{3/2} = 0,03$$

para cuyo nivel la carga será de:

$$Q = 2,00 \text{ Kg}$$



VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES



2.5. Conclusiones.

Todos los criterios anteriormente enumerados han sido obtenidos mediante tratamiento estadístico de una serie de datos constatados en un tipo concreto de roca, en el caso sueco en granitos.

Todo lo que deduzcamos en base a estos datos se moverá dentro de la certeza estadística; en ningún caso dentro de una certeza matemática para nuestro caso concreto; para ello hay que recurrir a las voladuras de ensayo previas.

De todos modos estos datos estadísticos aportan una aproximación fundada a los datos que se obtengan en la realidad.

En base a esto, obtendremos como criterio de partida el siguiente:

Velocidad de vibración, limitada a 50 mm/seg.

Velocidad de transmisión sónica de la roca (molasa):

$$c = 2.000 \text{ m/seg.}$$

Angulo de cizallamiento:

$$V/c = 25 \mu/\text{m}$$

A este valor de ángulo de cizallamiento corres-

ponde un nivel de daños:

$$QD = 0,03$$

en cuyo nivel, la carga máxima a detonar por número de retardo distinto es de:

$$Q = 2,00 \text{ Kg}$$

Adoptando un coeficiente de seguridad de 2, el valor de dicha carga queda limitado a:

$$Q = 1 \text{ Kg}$$

con cuyo criterio se han proyectado las voladuras tipo.

2.6. Voladuras tipo.

A continuación proponemos, en base a los criterios del apartado 2.5 unas voladuras tipo que pueden emplearse con el margen de seguridad suficiente para que no se llegue a sobrepasar el límite de la zona de seguridad de daños en la roca perimetral de túnel ferroviario.

2.6.1. Voladura tipo número 1 (ver esquema adjunto).

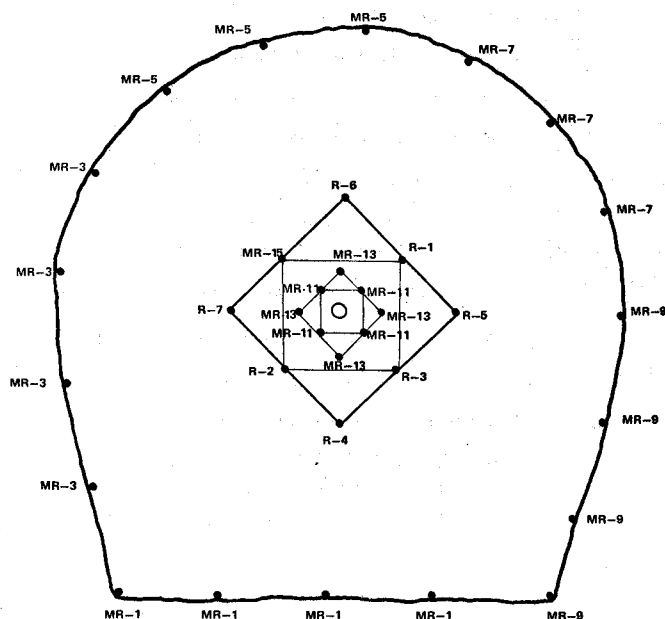
Esta voladura se da en dos fases:

VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

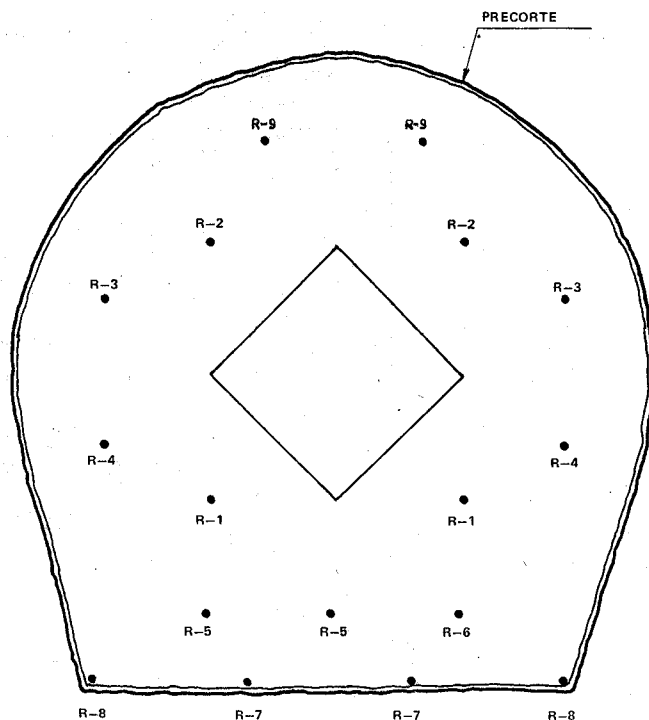
VOLADURA TIPO NUM. 1

Longitud de perforación: 1,60 m.

Avance por voladura: 1,50 m.



1ª FASE



2ª FASE

1. Perforación y voladura precorte, barrenos de cuele y contracuele.

2. Perforación y voladura zapateras y destroza.

Cada barreno de precorte lleva una carga de 0,204 kilogramos.

El máximo de barrenos de precorte que disparamos con un mismo número de micro-retardo es de 4, por lo que la carga que se detona de una vez es de:

$$4 \times 0,204 \text{ Kg} = 0,816 \text{ Kg}$$

catnidad menor de 1 Kg.

Una vez disparado el precorte se crea una grieta alrededor del túnel que reduce la magnitud de la vibración transmitida a la roca como consecuencia de las voladuras siguientes. Esto nos permite aumentar la carga por barreno manteniéndonos dentro del mismo nivel de seguridad; veamos cuánto podemos aumentar las cargas de los barrenos que siguen al precorte.

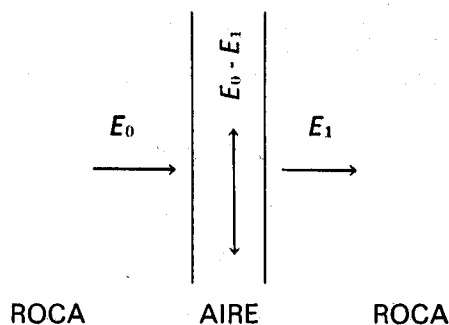
Esta reducción viene motivada por la creación de una superficie de discontinuidad en la que, al pasar la energía transmitida de la roca al colchón

de aire y continuar a través de la roca, se produce una disminución en el nivel de energía transmitida de la roca al colchón de aire y continuar a través de la roca, se produce una disminución en el nivel de energía transmitida, por disipación de parte de la energía inicial.

La relación entre la energía incidente y la transmitida viene dada por la relación:

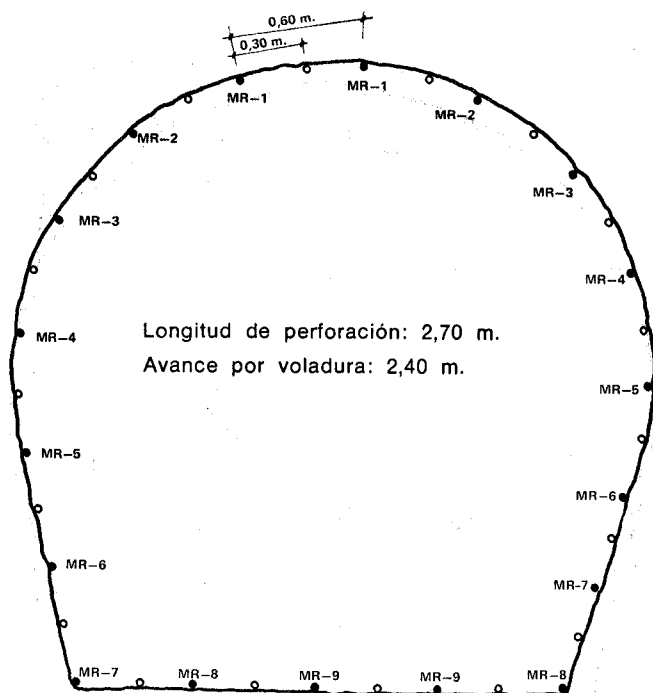
$$E_1 = E_0 \frac{4}{(n + 1)^2}$$

en la que E_0 es la energía incidente, y E_1 es la energía transmitida.

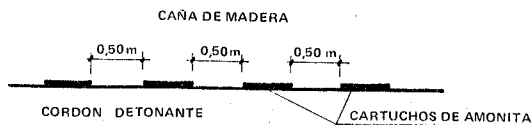


VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

VOLADURA TIPO NUM. 2

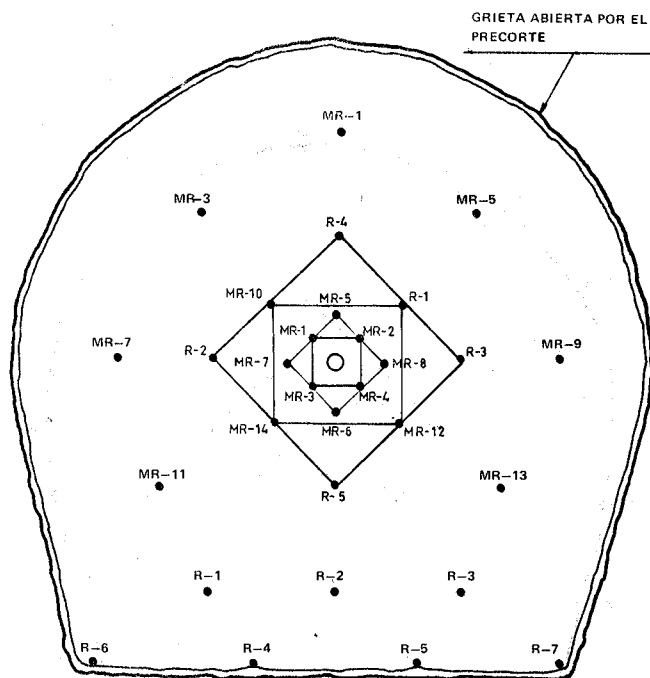


1ª FASE PERFORACION Y VOLADURA PRECORTE



1 CARTUCHO DE AMONITA DE Ø 26 mm. x 200 mm

SEPARADOS 50 cm. Y UNIDOS MEDIANTE CORDON DETONANTE



2ª FASE... VOLADURA CUELE Y CONTRA-CUELE

3ª FASE... VOLADURA ZAPATERAS Y DESTROZA

Por tanto, teniendo en cuenta el efecto de precorte previo, la voladura de la primera fase tiene un coeficiente de seguridad de 2 por estar la carga limitada a un kilogramo por retardo y teóricamente de 6 por efecto del precorte y que consideramos a efectos prácticos de 2, siendo el coeficiente de seguridad resultante de 4.

En la fase segunda:

La voladura de la segunda fase tiene aún un coeficiente de seguridad mayor, ya que la carga máxima detonada por retardo es de 0,86 kilogramos.

Una vez realizada la primera fase con la perforación y voladura del precorte, cuele y contracuele se perfora el resto de la voladura cargando nuevamente los barrenos de las zapateras, que en la primera fase sirvieron como barrenos de precorte, con la carga correspondiente para las zapateras. Si estos barrenos hubieran quedado obstruidos en la

primera fase, lo que no es probable siempre que el precorte se cargue con la carga adecuada, se perforarían al lado de éstos, otros barrenos de zapateras.

2.6.3. Voladura tipo número 2 (ver esquema adjunto).

Esta voladura se dispara en tres fases:

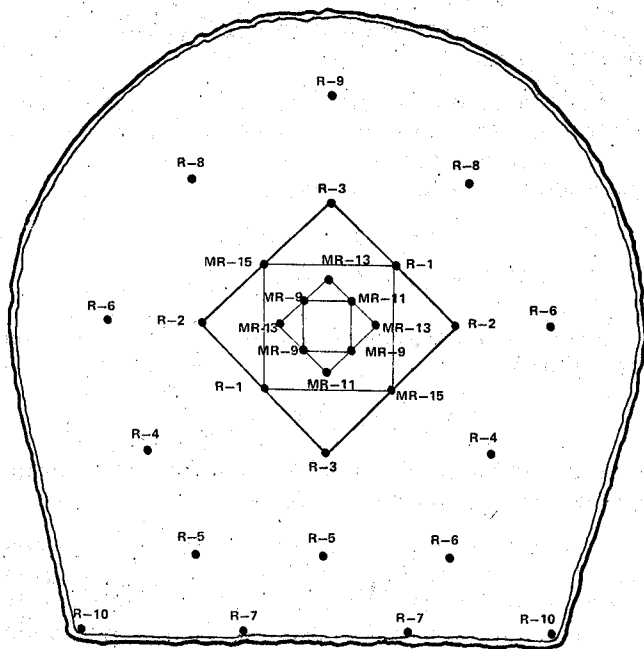
Primera fase. — Perforación de toda la pega y voladura del precorte. En el precorte se intercalan barrenos vacíos que contribuyen a dejar un perfil más recortado y una grieta aislante más perfecta, mejorando la amortiguación de la vibración.

Segunda fase. — Voladura del cuele y contracuele.

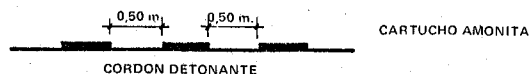
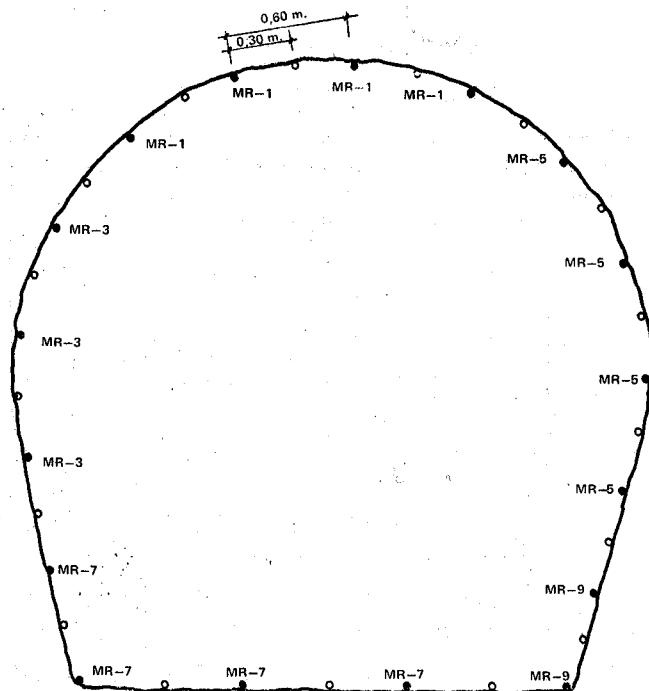
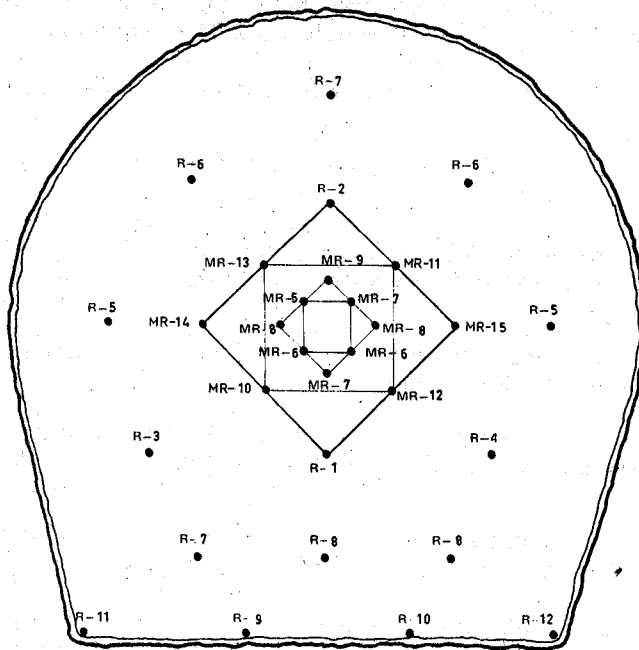
Antes de disparar la segunda fase se introducen en los barrenos de las zapateras unos atacadores

VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

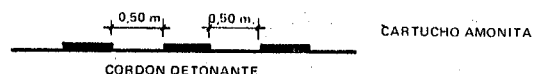
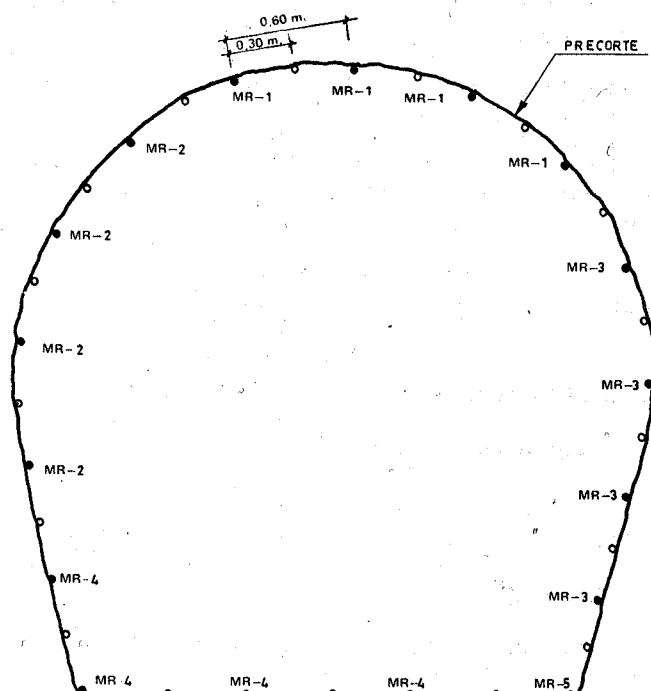
VOLADURA TIPO NUM. 3



VOLADURA TIPO NUM. 3 bis.



1 CARTUCHO DE AMONITA DE Ø 26 m/m X 200 m/m.
SEPARADOS 50 cm. Y UNIDOS MEDIANTE CORDON DETONANTE



1 CARTUCHO DE AMONITA DE Ø 26 m/m X 200 m/m.
SEPARADOS 50 cm. Y UNIDOS MEDIANTE CORDON DETONANTE

VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

para localizar posteriormente los barrenos y evitar que se taponen.

La carga por retardo del cuele es de un kilogramo y la del contracuele de 2,04 kilogramos.

Tercera fase. — Voladura zapateras y destroza.

2.6.4. *Voladura tipo número 3* (ver esquema adjunto).

Esta voladura se perfora de una vez, y se dispara, primero el precorte y después el resto de la pega.

La carga máxima por retardo en el contracuele es de 2,2 kilogramos.

El coeficiente de seguridad de esta voladura respecto a las vibraciones es de 1,80.

2.6.5. *Voladura tipo número 3 bis* (ver esquema adjunto).

Esta voladura se perfora de una vez y se dispara, primero el precorte y después el resto de la pega.

La carga máxima por retardo del cuele es de 1,092 kilogramos.

La carga máxima por retardo del contracuele es de 1,1 kilogramo.

Los barrenos de destroza con el mismo número no cooperan en la vibración, ya que tienen una dispersión mayor de 100 s.

El coeficiente de seguridad de esta voladura respecto a las vibraciones es de 3,63.

3. PLANIFICACION DE LOS TRABAJOS

3.1. Voladuras de ensayo.

Los primeros trabajos consisten en dar unas voladuras de ensayo con objeto de determinar la frecuencia de las vibraciones y la Ley de Propagación en dicha roca.

Dicha ley se obtiene determinando los parámetros K y X de la expresión:

$$V = K (D/\sqrt{Q}) \quad (1)$$

Aplicando logaritmos tenemos:

$$\log V = \log K - x \log D/\sqrt{Q} \quad (2)$$

Haciendo el cambio de variables:

$$\log V = y; \quad x = a; \quad \log K = b; \quad \log D/\sqrt{Q} = x,$$

obtenemos la ecuación de la recta:

$$Y = b - a X \quad (3)$$

De cada voladura de ensayo obtenemos un valor de x_i, y_i .

Establecemos un sistema de ecuaciones para determinar los parámetros a y b de modo que la recta quede ajustada por el método de los mínimos cuadrados, para lo cual tendrá que cumplirse:

$$\begin{aligned} \sum y_i &= N b - a \sum x_i \\ \sum x_i y_i &= b \sum x_i - a \sum x_i^2 \end{aligned}$$

Para los distintos valores de x_i, y_i obtenemos los valores:

$$\sum x_i, \sum y_i, \sum x_i y_i, \sum x_i^2$$

y resolviendo el sistema de ecuaciones determinamos los valores de a y b .

Una vez conocidos dichos valores, conocemos los de K y x y, por tanto, la ley que relaciona la velocidad de vibración con la carga explosiva y la distancia para el caso concreto de la roca ensayada

Estadillo de las voladuras de ensayo

(Explosivo Goma 2E-C) Ø' 26 × 400

Número voladura	Distancia D (m)	Carga Q (Kg)	Velocidad de vibración V (mm/seg.)
1	16	0,143	2,427
2	16	0,287	4,764
3	16	0,430	7,031
4	16	0,573	9,268
5	16	0,716	11,324

Para cada voladura de ensayo el valor de V se deduce del registro del sismógrafo.

El sismógrafo y el geófono a él conectado se colocan dentro del túnel de ferrocarril.

El geófono se coloca adosado a la pared del túnel lo mejor posible y preferentemente dentro de un taladro de 70 mm de diámetro.

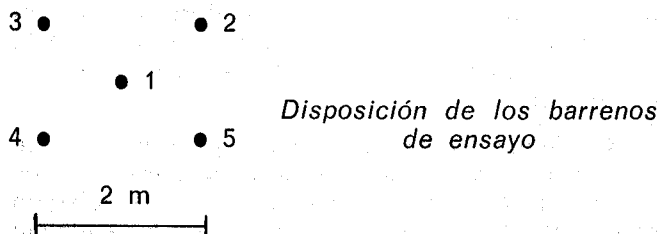
Seguidamente se calcula la distancia entre la carga explosiva y el geófono.

El geófono nos detecta la vibración según tres direcciones ortogonales; de todas ellas se elegirá la que dé un mayor valor para la velocidad de vibración.

VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

Para las voladuras de ensayo se perforan cinco barrenos de 1,50 metros de longitud.

Próximos a la zona de emboquillado del túnel de enlace.



Orden de disparo	Carga	Detonador	Explosivo
1	½ cartucho	Instantáneo	Goma 2E-C Ø 26 x 400
2	1 cartucho	Instantáneo	Goma 2E-C Ø 26 x 400
3	1 ½ cartucho	Instantáneo	Goma 2E-C Ø 26 x 400
4	2 cartuchos	Instantáneo	Goma 2E-C Ø 26 x 400
5	2 ½ cartuchos	Instantáneo	Goma 2E-C Ø 26 x 400

3.2. Determinación de la Ley de Propagación.

$x_i = \log D / \sqrt{Q}$	$y_i = \log V$	$x_i y_i$	x_i^2	Número voladura
1,626	0,385	0,626	2,644	1
1,475	0,678	1,000	2,176	2
1,387	0,847	1,175	1,924	3
1,325	0,967	1,281	1,756	4
1,277	1,054	1,346	1,631	5
$\sum x_i = 7,091$	$\sum y_i = 3,931$	$\sum x_i y_i = 5,428$	$\sum x_i^2 = 10,131$	Sumatorios

Sustituyendo en las ecuaciones de condición de mínimos cuadrados los valores de la tabla, obtenemos:

$$3,931 = 5b - 7,09a \quad (1)$$

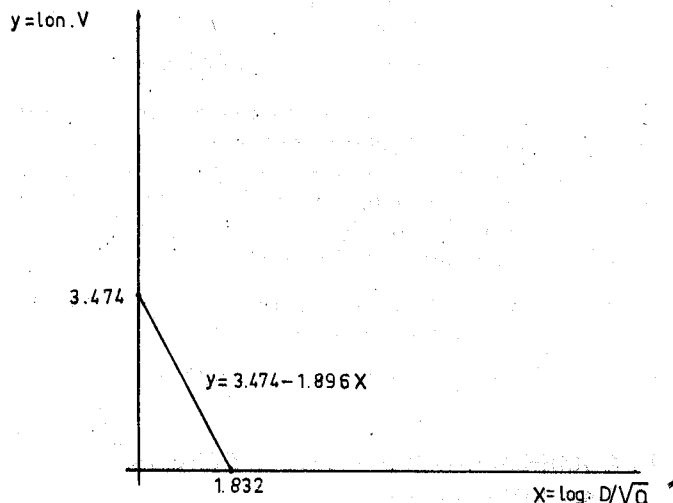
$$5,428 = 7,09b - 10,131a \quad (2)$$

$$a = 1,896; \quad x = 1,896$$

$$b = 3,474; \quad \log K = 3,474$$

$$K = 2.978,513$$

RECTA DE REGRESION



La recta de regresión vendrá dada por la ecuación:

$$Y = 3,474 - 1,896 X$$

Determinemos ahora el coeficiente de correlación lineal entre las variables:

$$r = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}}$$

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	y_i^2
1,568	0,5	2,459	0,784	0,25
1,410	0,8	1,988	1,590	0,64
1,304	1,0	1,700	1,304	1,00
1,200	1,2	1,440	1,440	1,44
1,094	1,4	1,197	1,532	1,96
0,988	1,6	0,976	1,581	2,56
0,883	1,8	0,780	1,589	3,24
0,777	2,0	0,604	1,554	4,00
$\sum x_i^2 = 11,144$	$\sum x_i y_i = 11,374$	$\sum y_i^2 = 15,09$	Sumatorios	

$$r = \frac{11,374}{11,44 \times 15,09} = 0,877$$

Esto indica que la correlación lineal entre las dos variables es muy alta, siendo la recta la forma ideal de ajuste.

Si el coeficiente de correlación hubiese sido inferior a 0,3 sería necesario ajustar otra curva en lugar de una recta.

Según esto la ley de propagación vendrá representada por la ecuación:

$$V = 2,978,531 (D/\sqrt{Q})^{-1,896} \quad (3)$$

VOLADURAS CONTROLADAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

de la que para $V = 50$ mm/seg.

$$D = 16 \text{ mm.}$$

Se obtiene el valor de $Q = 3,435$ Kg.

Esto quiere decir que por cada número distinto de micro-retardo se puede detonar un máximo de carga explosiva de 3,435 Kg una vez comprobado que no se produce acoplamiento de efectos en los primeros números de los micro-retardos, lo cual sucede cuando se cumple que:

$$\tau \geq 2,5 T; \tau, \text{ intervalo de micro-retardo en ms. (milisegundos).}$$

T , período de la vibración.

RECOMENDACIONES PARA EFECTUAR LAS VOLADURAS

1. Dimensionar las voladuras de acuerdo con la limitación de la carga explosiva determinada en la Ley de Propagación.

2. Para evitar accidentes debido a las líneas de transporte de la Renfe, utilizar detonadores eléctricos de alta insensibilidad (AI).

3. Con objeto de que los distintos barrenos de la voladura no cooperen en la vibración, utilizar toda la serie de micro-retardos ($\tau = 30$ s.) del 1-15 y de retardos (0,5 s.) del 1-12; este punto es muy importante.

4. Antes de dar la voladura ponerse en contacto con la estación más próxima para que nos comunique el momento exacto de dar la voladura con objeto de que en ese momento no pase ningún tren.

Con esto, aunque no se produzcan interrupciones en la vía como consecuencia de las voladuras, se evita así el efecto sorpresivo y desagradable de la vibración a los viajeros.

5. Con el fin de evitar litigios, será muy conveniente registrar todas las voladuras empleando un sismógrafo de registro continuo y un geófono conectado al mismo.