

GRADO EN INGENIERIA Y TECNOLOGIA DE
MINAS

TRABAJO FIN DE GRADO

*TUNEL CARRETERO EN LA N-625.
(CORIGOS-ASTURIAS)*

ANEJO 4- VOLADURAS

Alumno/Alumna: MILAGROS, LOPEZ, ENRIQUE

Director/Directora (1): GALLO, LAYA, JAVIER

Curso: 2017-2018

Fecha: 15-02-2018



Anejo Voladuras



Contenido

1	Objeto del presente Anejo	9
2	Selección del Explosivo	10
2.1	Consideraciones Previas.....	10
3	Voladura.....	14
3.1	Partición de la sección.....	14
3.2	Sistema de avance	16
3.3	Parámetros de la voladura	17
3.3.1	Constante de la roca	17
3.3.1.1	Determinación de la constante de roca	18
3.3.1.2	Factor de Fijación	18
3.3.2	Diámetro de los barrenos.....	19
3.4	Calculo de las voladuras.....	19
3.4.1	Voladuras parte superior avance	19
3.4.2	Máximo vano sin sostenimiento.....	19
3.4.3	Longitud de Pase	20
3.4.4	Avance por voladura o pega.....	22
3.4.5	Cuele y contracuele	22
3.4.5.1	Primera sección de Apertura.....	25
3.4.5.1.1	Concentración lineal de carga:.....	26
3.4.5.1.2	Retacado:	27
3.4.5.1.3	Frente libre tras la primera voladura:.....	28
3.4.5.1.4	Carga de los barrenos primera sección:	28
3.4.5.2	Segunda sección.....	30
3.4.5.2.1	Frente libre tras la segunda voladura:	31

3.4.5.3	Tercera Sección.....	31
3.4.5.3.1	Piedra:.....	31
3.4.5.3.2	Frente libre tras la tercera voladura	31
3.4.5.4	Cuarta sección.....	31
3.4.5.4.1	Frente libre tras la cuarta voladura:	32
3.4.5.5	Cargas barrenos segunda, tercera y cuarta sección.....	32
3.4.5.6	Posicionamiento del cuele.....	32
3.4.5.7	Resumen de los datos obtenidos y comprobación	35
3.4.6	Destroza.....	35
3.4.6.1	Cargas de los barrenos de la destroza	36
3.4.7	Zapateras	37
3.4.7.1	Piedra	38
3.4.7.2	Carga barrenos Zapatera	38
3.4.8	Contorno.....	40
4	Comprobaciones del diseño de la voladura.....	43
5	Voladura de destroza en destroza.....	46
5.1	Cálculos de los parámetros de la voladura.....	46
5.1.1	Carga de los barrenos:.....	46
6	Secuenciación de la voladura	49
6.1	Consideraciones previas.....	49
6.2	Fuente de energía.....	53
6.3	Explosores convencionales.....	53
6.3.1	Comprobación del Explosor.....	54
7	Control de Vibraciones terrestres	57
7.1	Estimadores de leyes de propagación de vibraciones terrestres.....	57



7.2	Efecto de las vibraciones sobre las personas.....	65
8	Desescombro de la Voladura.....	71
8.1	Volumen de Escombro	71
8.1.1	Volúmenes a Desescombrar	71
8.1.1.1	Volumen de escombro en la sección de Avance.....	71
8.1.1.2	Volumen a desescombrar en el Avance en destroza	74
8.1.2	Selección de la maquinaria.....	74
8.2	Tiempos de Ciclo	75
8.2.1	Desescombro del Avance	75
8.2.2	Desescombro Avance en destroza.....	88



Índice de Ilustraciones:

Ilustración 1 Recomendaciones Romana (2001) para la partición de la sección. Romana, 2001.
 15

Ilustración 2 Banqueo vertical y horizontal en un túnel con avance en dos secciones. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico..... 16

Ilustración 3 División del túnel en Avance y Destroza 17

Ilustración 4 Recomendaciones para la excavación de túneles de 10-14 metros de ancho. Romana (2000)..... 21

Ilustración 5 Clasificación de los cueles 23

Ilustración 6 Cuele de cuatro secciones. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico 24

Ilustración 7 Relación de la piedra con el diámetro del barreno vacío. (Basado en: López Jimeno et. Al 2004)..... 26

Ilustración 8 Relación entre la concentración lineal de carga y piedra máxima para diferentes diámetros de barrenos de expansión (Larsson y Clark). 27

Ilustración 9 Empaquetados comercializados en España para Riodin HE. (Maxam) 29

Ilustración 10 Esquema Barrenos Primera Sección. Elaboración Propia..... 30

Ilustración 11 Ilustración del esquema de los barrenos de 2, 3 y 4 Sección. Elaboración Propia 32

Ilustración 12 Posicionamiento del cuele. (Francisco Sena Leite)..... 34

Ilustración 13 Valores de los factores de fijación. Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico 35

Ilustración 14 Esquema barreno tipo destroza. Elaboración Propia..... 37

Ilustración 15 Esquema Barreno Tipo Zapatera. Elaboración Propia 39

Ilustración 16 Consumo específico en función del área del túnel y diámetro de los barrenos. Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico..... 44

Ilustración 17 Numero de barrenos por pega en función del área..... 45



Ilustración 18 Efecto del tiempo de retardo de los barrenos del cuele sobre el rendimiento de la voladura en túnel. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico..... 50

Ilustración 19 Características eléctricas detonadores Riodet Aluminio. Maxam..... 51

Ilustración 20 Tiempos de retardo comercializados para Riodet Aluminio. Maxam..... 52

Ilustración 21 Circuito en serie. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico..... 53

Ilustración 22 Características técnicas explosor Zebra 122.Maxam 54

Ilustración 23 Zona donde se llevaran a cabo las Voladuras. Elaboración Propia..... 58

Ilustración 24 Zona donde se llevaran a cabo las voladuras. Elaboración Propia..... 59

Ilustración 25 Alturas de las poblaciones. Google Earth 61

Ilustración 26 Respuestas humanas a las vibraciones. Goldman, 1948. 66

Ilustración 27 Respuestas humanas a las vibraciones según Goldman (1948). Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno..... 70

Ilustración 28 Valores de las densidades de diferentes materiales según este suelto (Loose) o en banco (Bank).Caterpillar Performance Handbook. 73

Índice de Tablas:

Tabla 3-1 Valores del factor de fijación. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico 19

Tabla 3-3 Diámetros de Perforación según el área de la sección. Unión Española de Explosivos 19

Tabla 3-4 Valores de ESR. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico 20

Tabla 3-5Resumen datos obtenidos del cuele y contracuele..... 35

Tabla 7-1 Valores del Factor de Estructura. Criterios de prevención Vibraciones (Maxam).. 62

Tabla 7-2 Valores del Factor del macizo rocoso. Criterios de prevención Vibraciones (Maxam). 62

Tabla 7-3 Velocidades Sísmicas para diferentes materiales. (Explocen)..... 63

Tabla 7-4 Tabla carga/distancia general para selección del tipo de estudio. Maxam 65

Tabla 7-5 Valores de velocidad máxima de partícula. Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno..... 67

Tabla 7-6 Valores del factor de edificación. Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno 68

Tabla 7-7 Valores del factor de material de construcción. Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno..... 68

Tabla 7-8 Factor de distancia, F_d . Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno 69

Tabla 7-9 Valores de factor de duración del proyecto. Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno..... 69

Tabla 8-1 Datos de la operación de desescombros del Avance. Elaboración Propia 87

Tabla 8-2 Datos de la operación de desescombros del Avance en Destroza. Elaboración Propia. 100





1 Objeto del presente Anejo

En el presente anejo desarrollaremos la metodología que se llevara a cabo para la excavación del túnel.

Aunque la excavación de túneles mediante perforación y voladura constituye un problema multivariable no solo de índole técnica, sino también económica y ambiental, en el presente anejo nos centraremos únicamente en el aspecto técnico.



2 Selección del Explosivo

2.1 Consideraciones Previas

La selección del explosivo es uno de los grupos de variables controlables por los técnicos en las voladuras. Para su selección tendremos en cuenta varios factores:

– Precio del explosivo:

El coste del explosivo es evidentemente un criterio de selección muy importante, en principio hay que elegir el explosivo más barato con el que se es capaz de realizar un trabajo determinado.

Al hablar del precio de los explosivos sería más correcto hacerlo expresando este por unidad de energía disponible (€/kcal) que por unidad de peso (€/kg) pues en definitiva los resultados de las voladuras dependen de la energía destinada a la fragmentación y esponjamiento de la roca. Así pues, el mejor explosivo, desde un punto de vista económico no es el más barato sino aquel con el que consigue el menor coste de la voladura.

Teniendo en cuenta lo anterior se observa que el explosivo más barato es el ANFO (aunque presenta algunos inconvenientes como son su mala resistencia al agua y su baja densidad).

– Diámetro de carga

Cuando se utilizan explosivos cuya velocidad de detonación varía fuertemente con el diámetro, como en el caso del ANFO, hay que tomar las siguientes precauciones:

- Con barrenos de diámetro inferior a 50 mm, preferibles, aunque más caros usar hidrogeles o dinamitas encartuchadas.
- Entre 50 y 100 mm, el ANFO es adecuado aumentando la densidad hasta un 20% con cargadoras neumáticas y cebándolo de forma efectiva.
- Por encima de los 100 mm, no existen problemas con el ANFO, siendo muy económico realizar la carga con medios mecánicos.



– Características de la roca

Las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a volar conforman el grupo de variables más importantes debido a la influencia directa en los resultados de las voladuras y su interrelación con otras variables de diseño.

De forma esquemática y resumida:

- Rocas masivas resistentes, hidrogeles, emulsiones y explosivos gelatinosos.
 - Rocas muy fisuradas, interesan explosivos que posean una elevada energía de los gases como es el caso del ANFO.
 - Rocas conformadas en bloques, ALANFO y ANFO.
 - Rocas porosas, explosivos con baja de densidad y velocidad de detonación como el ANFO.
- Volumen de roca a volar

Los volúmenes de excavación a realizar y ritmos de trabajo marcan los consumos de explosivo a efectuar dentro de las operaciones de arranque.

En las obras de mayor envergadura las cantidades de explosivo pueden llegar a aconsejar su utilización a granel, ya que posibilitan la carga mecanizada desde las propias unidades de transporte, reduciendo así los costes de mano de obra y aprovechando mejor el volumen de roca perforado.

– Condiciones atmosféricas

En cuanto a las condiciones atmosféricas, cabe decir que las bajas temperaturas influyen fuertemente en los explosivos que contienen NG (ya que tienden a congelarse a temperaturas inferiores a 8°C).

Las altas temperaturas también dan lugar a inconvenientes que hacen del manejo del explosivo peligroso como es el caso de la denominada exudación.



– Presencia de agua

La presencia de agua en los barrenos es un factor limitante para el uso de ciertos explosivos viéndose reducida o incluso eliminada su efectividad.

Un claro ejemplo de esto es el ANFO, que si se encuentra en un ambiente que le aporte humedad superior al 10% se producirá una alteración que impide la detonación de la mezcla explosiva.

Ante la presencia de agua en los barrenos los hidrogeles, gomas y emulsiones a granel tienen una excelente resistencia.

– Humos

Los humos intervienen como criterio de elección solo en los trabajos subterráneos y es preciso señalar que más que un problema propio del explosivo suele ser un problema de insuficiencia de ventilación en las labores.

La presencia de fundas de plástico, diámetros de carga inadecuados o iniciadores ineficientes pueden dar lugar a un elevado volumen de humos.

Los explosivos gelatinosos son generalmente buenos pero no así las dinamitas con alto contenido en NA.

– Condiciones de seguridad

Hay que buscar un punto de equilibrio, sensibilidad-seguridad.

Los explosivos gelatinosos tienen una alta sensibilidad, pudiéndose darse el caso de que si en la pila de escombros queda por algún motivo restos de explosivos y es necesario el uso de maquinaria pesada pueda darse la detonación de los explosivos con el riesgo para el personal de la operación.

Este problema se resuelve con el empleo de los hidrogeles y emulsiones que son insensibles a los golpes, fricciones y estímulos subsónicos, pero poseen un grado de sensibilidad adecuada para la iniciación.



– Problemas de suministro

Habrá que tener en cuenta las posibilidades reales de suministro en función de la localización de la obra y los puntos de abastecimiento de los explosivos.

Asimismo, si se dispone de polvorines propios será necesario considerar los tiempos de almacenamientos y las variaciones de las características explosivas de algunos de los explosivos.



3 Voladura

3.1 Partición de la sección

La forma o el esquema según el cual se ataca la sección de los túneles y galerías dependen de diversos factores:

- Equipo de perforación empleado.
- Tiempo disponible para la ejecución.
- Tipo de roca.
- Tipo de sostenimiento.
- Sistema de Ventilación.

Como una primera aproximación de la selección de la partición de la sección, podemos acudir a las recomendaciones, a la práctica Española que plantea Romana (2001) para la excavación de túneles mediante el método convencional de perforación y voladura.

RMR	CLASE	LONGITUD DE PASE (m)		PARTICIÓN DE LA SECCIÓN	MÉTODO DE EXCAVACIÓN
		MÁXIMA	RECOMENDADA		
100	I a		≥ 5	SECCIÓN COMPLETA	TBM ABIERTO
90	I b		≥ 5		
80	II a	16.0	≥ 5		
70	II b	9.5	4/6		
60	III a	6.0	3/4		
50	III b	4.0	2/3	CALOTA Y DESTROZA	VOLADURAS
40	IV a	2.5	1/2		
30	IV b	1.75	1		
20	V a	1.0	0,5/0,75		
10	V b		0,5		
0				GALERÍA DE AVANCE	ESCUDO
				GALERÍAS MÚLTIPLES	
				CONTRABO VEDA	
					FRESADO
					ROZADORA
					ESCARIFICACIÓN/PALA

73.1

Notas
 1 La unidad para el pase es el metro (m)
 2 El pase máximo es el límite teórico según BIENIAWSKI
 3 El pase recomendado se refiere a la excavación en calota/avance y en caso de que exista galería de avance a la excavación de ensanche (y no a la propia galería)
 4 Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
 5 Las líneas de trazas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces

Ilustración 1 Recomendaciones Romana (2001) para la partición de la sección. Romana, 2001.

Tal y como vemos en la ilustración anterior se nos recomendaría partir la sección en:

- Sección Completa, posible a partir de $RMR > 50$ y recomendable (con buena mecanización) para RMR mayores que 60.
- Calota y Destroza, Posible (con contrabóveda) para $20 < RMR < 30$ y recomendable para $RMR > 30$.

El galibo mínimo para el trabajo en la calota suele ser de 4,5/ 5 metros por lo que en túneles de altura reducida la destroza puede ser muy pequeña (de 1 a 2 m de altura) y puede eliminarse o convertirse en un tajo de regulación.

En general podrán excavarse completamente por separado la calota y la destroza siempre que la calidad del macizo rocoso no sea mala o muy mala.

Cuando la calidad del macizo es mala y hay riesgos de inestabilidad del frente suele ser útil excavar el avance dejando un machón central sin excavar.

3.2 Sistema de avance

La forma o el esquema según el cual se ataca la sección de los túneles y galerías dependen de diversos factores:

- Equipo de perforación empleado.
- Tiempo disponible para la ejecución.
- Tipo de roca.
- Tipo de sostenimiento.
- Sistema de ventilación.

En rocas competentes con secciones inferiores a los 100 m², como es el caso que tratamos, puede excavarse con perforación y voladura a sección completa o en un solo paso.

Aun así, se ha optado por seguir el sistema usual de dividir el túnel en dos partes, una superior o bóveda y otra inferior en banco o destroza. La bóveda se excava como si se tratara de una galería y la destroza que ira retrasada con respecto al avance de la bóveda, se lleva a cabo por banqueo que puede ser tanto con barrenos verticales u horizontales.

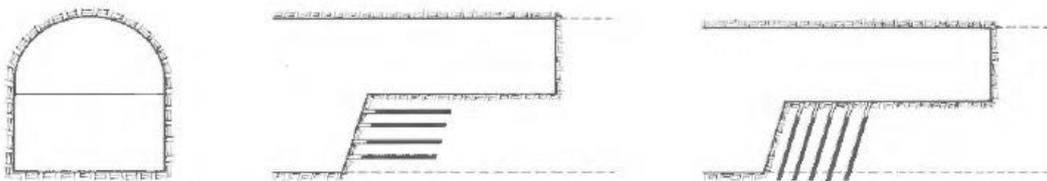


Ilustración 2 Banqueo vertical y horizontal en un túnel con avance en dos secciones. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico

Seleccionaremos un banqueo horizontal que permite la utilización del mismo equipo de perforación que para la bóveda y además el mismo procedimiento de carga de explosivos y desescombro, teniendo en cuenta aun así que el principal inconveniente de este sistema es la discontinuidad de ejecución.

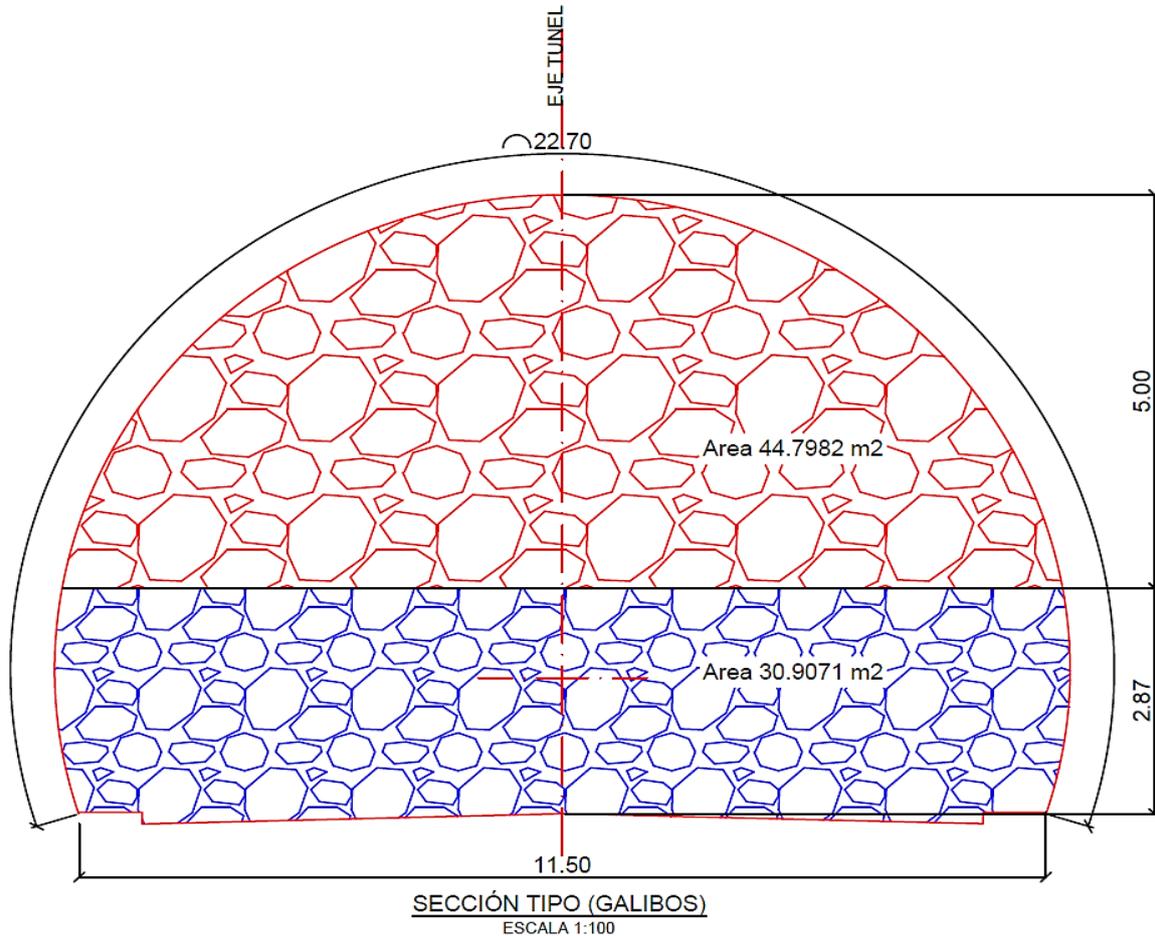


Ilustración 3 División del túnel en Avance y Destroza

3.3 Parámetros de la voladura

3.3.1 Constante de la roca

La constante de la roca, propuesto por Langefors y Kihlström (1963), representa la concentración de carga de explosivo necesaria para romper 1m^3 de roca. Sus fórmulas relacionan el consumo específico y otros parámetros de voladura describiendo como ellos deben variar entre sí para un determinado diseño de túnel.

El diámetro, inclinación y longitud de perforación, diámetro y número de barrenos vacíos y la potencia del explosivo son los parámetros controlables en este método.



3.3.1.1 Determinación de la constante de roca

Como ha sido referido, el valor de c , es un número empírico que representa la cantidad de explosivo necesaria para romper 1 m^3 de roca. Después de pruebas en Suecia, se verificó que su valor era 0.4 kg/m^3 . Persson et al. (1994); refirió que en la práctica todas las rocas, desde arenitas hasta granitos toman el valor de c referido.

Para su cálculo hay que hacer voladuras de prueba y tener varias variables en cuenta:

- Perforación vertical.
- Diámetro $\approx 32 \text{ mm}$.
- Altura de banco : 0.5 a 1m
- Piedra (B): igual a la altura de banco.
- Profundidad de los barrenos: $1.3 \times B$.

Así el valor de c se obtiene como:

$$c = \text{cantidad de explosivo minima usada por metro cubico de roca}$$

En estudios recientes, The Computerized Design Program for Tunnel Blasting (Chung-In Lee et al. 2005), en dos túneles en Corea ha sido propuesto un cambio en la obtención de este valor. Este estudio, de 23 voladuras test analizó la relación entre los valores de c y el valor del RMR. Este valor ha sido modificado en la fórmula de Langefors, siempre considerando un avance superior a 85% y una concentración de carga ideal.

$$c = 5.73 * 10^{-3} * RMR + 0.057$$

Siguiendo el criterio anteriormente expuesto obtenemos un valor de c de:

$$c = 0.47 \text{ kg/m}^3$$

3.3.1.2 Factor de Fijación

El valor del factor de fijación expresa la facilidad o dificultad para el arranque y desplazamiento de la roca por acción del explosivo. Depende directamente de la dirección de salida del barreno y del confinamiento de la voladura.

Dirección de Salida de los Barrenos	Factor de Fijación , f.
Hacia arriba y Horizontalmente	1,45
Hacia Abajo	1,2

Tabla 3-1 Valores del factor de fijación. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico

3.3.2 Diámetro de los barrenos

En el avance de galerías y túneles se opera en el rango de 32 mm a 64mm y en las voladuras en banco para excavaciones de cavernas lo normal son calibres entre 64 y 90 mm.

También teniendo en cuenta el área de la sección se puede estimarse el diámetro de perforación, tal y como muestra la siguiente tabla:

Diámetros de Perforación (mm)	Sección A (m ²)
27-40	<10
35-45	10-30
38-51	>30

Tabla 3-2 Diámetros de Perforación según el área de la sección. Unión Española de Explosivos

Se ha optado por un diámetro de perforación convencional para este tipo de túnel de 51 mm.

3.4 Calculo de las voladuras

3.4.1 Voladuras parte superior avance

3.4.2 Máximo vano sin sostenimiento

Calculando el máximo vano sin sostenimiento obtendremos las dimensiones máximas (anchura, altura y longitud de galería) posibles sin necesidad de sostenimiento alguno.

Lo calcularemos mediante la siguiente formula:

$$\text{Max. Vano} = 2 * \text{ESR} * Q^{0.4}$$

Siendo el ESR la relación de apoyo de la excavación:



CLAVE	TIPO DE EXCAVACION	ESR
1	Excavaciones mineras temporales	3-5
B	Pozos verticales de sección circular	2.5
C	Excavaciones mineras permanentes, túneles hidráulicos, túneles piloto, pozos planos, excavaciones iniciales de gran sección	1,6
D	Cavemas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferroviarios de sección media	1,3
E	Cavemas hidroeléctricas, túneles de gran sección, excavaciones militares, emboquilles de túneles	1,0
F	Instalaciones nucleares, estaciones de ferrocarril e instalaciones industriales	0,8

Tabla 3-3 Valores de ESR. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico

Escogiendo el ESR correspondiente a túneles carreteros, obtenemos que:

$$Max.Vano = 2 * 1.3 * 21.06^{0.4} = 8.79 m.$$

Obtenemos un vano máximo sin sostenimiento elevado, al tratarse de un macizo competente formado por una roca muy dura como son las cuarcitas. Teniendo en cuenta este resultado se opta por disminuir este valor a los 4-4.5 metros, ya que aunque viable teóricamente, optar por avances de 8.79 metros en obra resultarían excesivos.

3.4.3 Longitud de Pase

Como hemos visto en el apartado anterior la longitud de pase será de entre 4-4.5 metros. Podemos comprobar que esta longitud de pase se adecua a las recomendaciones de excavación propuestas por Romana, tal y como vemos en la siguiente tabla:

RMR	CLASE	LONGITUD DE PASE (m)		PARTICIÓN DE LA SECCIÓN	MÉTODO DE EXCAVACIÓN	
		MÁXIMA	RECOMENDADA			
100	I a		≥ 5	SECCIÓN COMPLETA CALOTA Y DESTROZA	TBM ABIERTO VOLADURAS ROZADORA	
90	I b		≥ 5			
80	II a	16.0	≥ 5			
70		9.5				
68.1	II b		4/6			
60		6.0				
	III a		3/4			GALERÍA DE AVANCE GALERÍAS MÚLTIPLES CONTRABO VEDA ESCUDO FRESADO ESCARIFICACIÓN/PALA
50		4.0				
	III b		2/3			
40		2.5				
	IV a		1/2			
30		1.75				
	IV b		1			
20		1.0				
	V a		0,5/0,75			
10						
	V b		0,5			
0						

Notas:

- 1 La unidad para el pase es el metro (m)
- 2 El pase máximo es el límite teórico según BIENIAWSKI
- 3 El pase recomendado se refiere a la excavación en calota/avance y en caso de que exista galería de avance a la excavación de ensanche (y no a la propia galería)
- 4 Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
- 5 Las líneas de trazas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces

Ilustración 4 Recomendaciones para la excavación de túneles de 10-14 metros de ancho. Romana (2000)

Para un RMR de 73.1 al que después de aplicado el factor de ajuste complementario recomendado por Romana se rebaja hasta 68.1, obtenemos una longitud de pase recomendada de entre 4-6 metros. Creemos que una longitud de pase de entre 4-4.5 metros será la adecuada para garantizar un avance continuo y que no acarren problemas durante la ejecución de este.



3.4.4 Avance por voladura o pega

El avance de las pegas está limitado por el diámetro del barreno de expansión y la desviación de los barrenos cargados.

Siempre que la desviación de los barrenos se mantenga por debajo del 2% los avances medios, X, pueden llegar al 95% de la profundidad de los barrenos, L,

$$X = 0.95 * L$$

Por lo que:

$$X = 0.95 * 4 = 3.8 \text{ m}$$

Por lo que perforando unos barrenos de 4 metros conseguiremos unos avances medios de 3.8 metros.

3.4.5 Cuele y contracuele

El cuele es la fase de la voladura que se dispara en primer lugar. Su finalidad es crear una primera abertura en la roca que ofrezca al resto de las fases una superficie libre hacia la que pueda escapar la roca con lo que se facilita y posibilita su arranque.

Existen distintos tipos de cuele , como pueden ser los cueles en V y en abanico , que facilitan la salida de la roca hacia el exterior , pero tienen el inconveniente de que los taladros forman un ángulo respecto al eje del túnel , con lo que se dificulta la perforación y exige variar el esquema de perforación para cada longitud de avance.

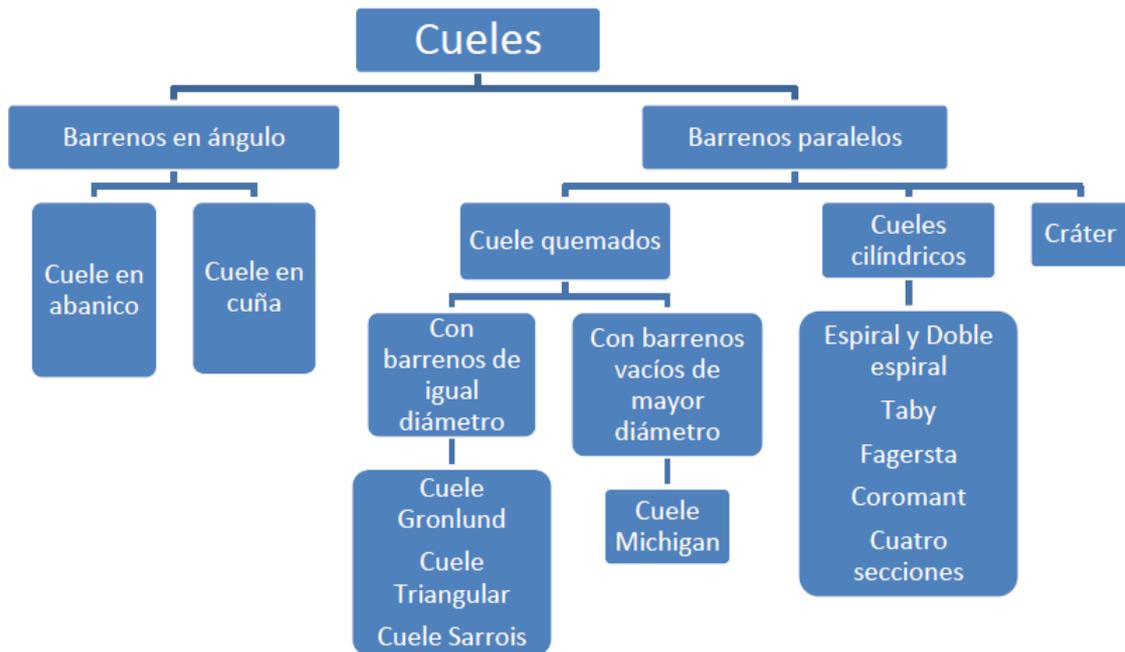


Ilustración 5 Clasificación de los cueles

En la actualidad los cueles de barrenos paralelos son los más utilizados por su facilidad de perforación y probada eficacia.

Dentro de los cueles de barrenos paralelos tenemos el cuele de cuatro secciones, que es un tipo de cuele cilíndrico incluido en el método Sueco. Este se emplea para túneles de sección superior a los 10 m². Fue establecido en Suecia por Langefors y Kihlström (1963) finalizado por Holmberg (1982) y renovado por Persson et al. (2001).

El esquema geométrico general de un cuele de cuatro secciones con barrenos paralelos es el siguiente:

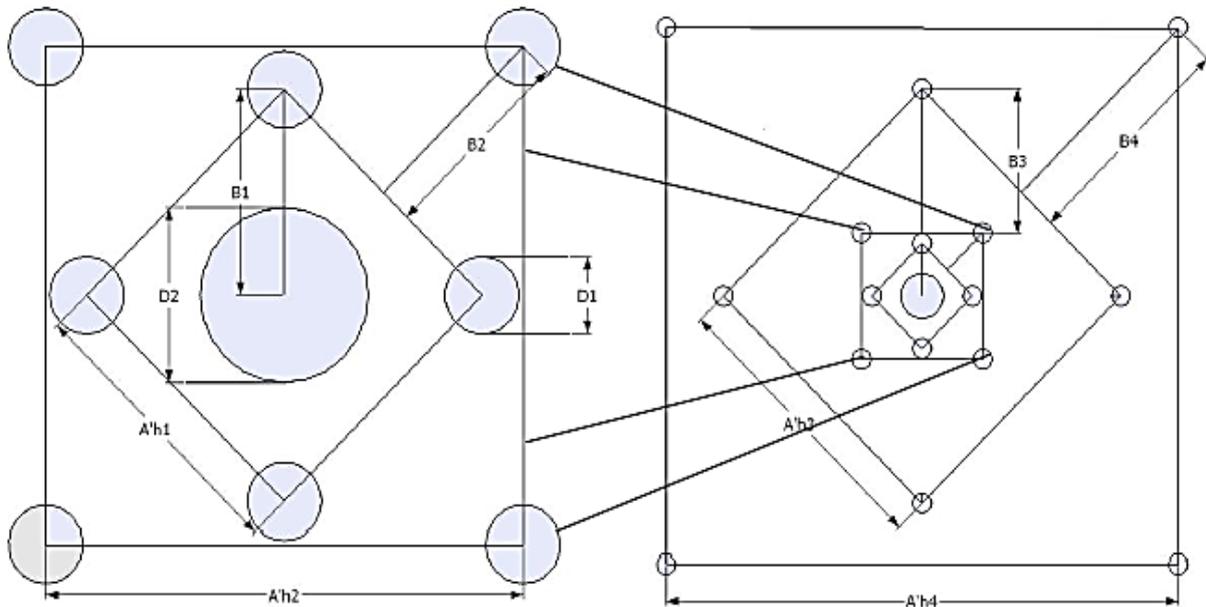


Ilustración 6 Cuele de cuatro secciones. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico

Primeramente calcularemos el diámetro de expansión D_2 , mediante la siguiente formula:

$$L = 0.15 + 34.1 * D_2 - 39.4 * D_2^2$$

$$4 = 0.15 + 34.1 * D_2 - 39.4 * D_2^2$$

De donde obtenemos dos valores de D_2 :

$$D_2 = 731 \text{ mm}$$

$$D_2 = 133.4 \text{ mm}$$

Escogemos el valor de 133.4 mm, ya que el otro valor obtenido es excesivamente grande para el diámetro de expansión del cuele.

Este sería el valor que tendría que tener el diámetro de expansión, pero para poder realizar todos los barrenos con una misma máquina de igual diámetro utilizaremos una equivalencia:

$$D_2 = D_2^* * \sqrt{N_b}$$

Donde N_b es el número de barrenos equivalentes para conseguir ese diámetro:

$$133.4 = 51 * \sqrt{N_b}$$



$$N_b = 6.84 \text{ barrenos de } 51 \text{ mm}$$

Por lo que realizaremos 7 barrenos de 51 mm.

3.4.5.1 Primera sección de Apertura

Se caracteriza porque detona contra un frente libre cilíndrico que es el barreno de expansión. En esta situación el confinamiento de la voladura es el máximo.

Según Langefors y Kihlström (1963), la distancia entre el barreno central de expansión y los barrenos de la primera sección, no debe exceder de $1.7D_2$, para obtener así una fragmentación y salida de la roca satisfactoria.

Esto se debe a que, tal y como se refleja en la siguiente ilustración, para piedras mayores de $2D_2$ el ángulo de salida es demasiado pequeño y se produce así una deformación plástica de la roca entre los dos barrenos. Por el contrario si la piedra es inferior a D_2 , pero la concentración de carga es muy elevada se producirá la sinterización de la roca fragmentada y el fallo del cuele.

Teniendo en cuenta lo anterior, la piedra estaría entre 1.5 y 1.7 veces el diámetro del barreno vacío.

En la práctica, la precisión de la perforación es lo suficientemente buena y se trabaja con un valor de la piedra igual a 1.7 el diámetro de expansión¹.

$$B_1 = 1.7 * D_2$$

Por lo que obtenemos una piedra B_1 :

$$B_1 = 1.7 * 133.4 = 226.79 \text{ mm}$$

¹ Suponiendo que la desviación de perforación de los barrenos es inferior o igual al 1%.

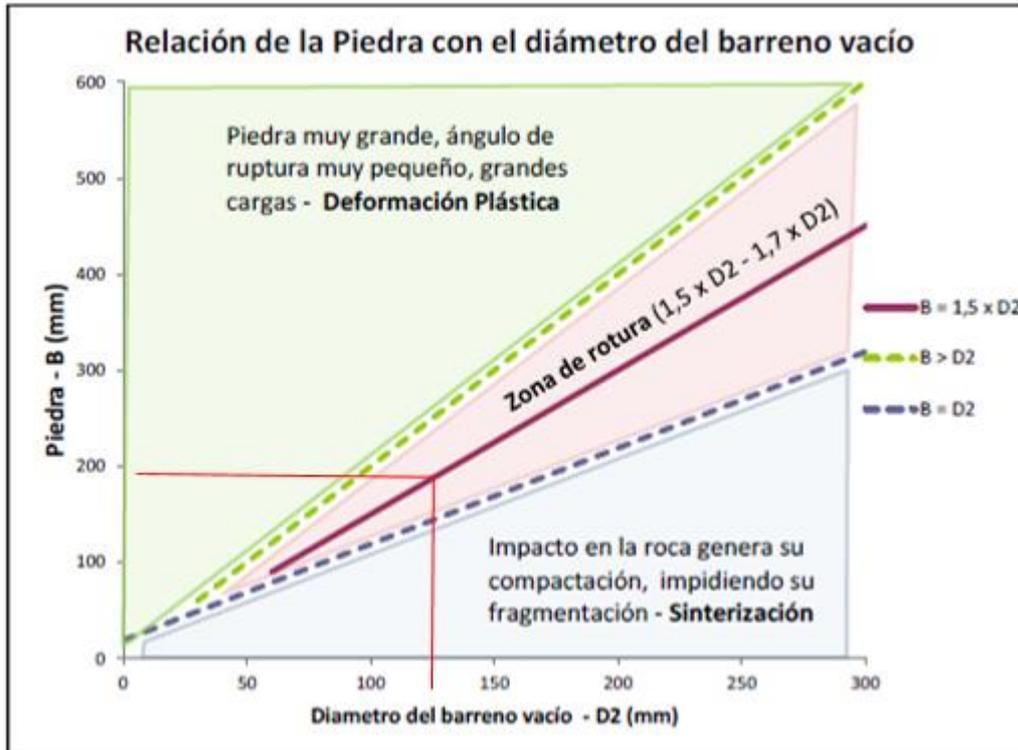


Ilustración 7 Relación de la piedra con el diámetro del barreno vacío. (Basado en: López Jimeno et. Al 2004)

Como vemos en la ilustración anterior, relacionando la piedra obtenida y el diámetro de expansión observamos que con estos parámetros nos encontramos dentro de la zona de rotura por lo que no en un principio no se dará ni deformación plástica ni sinterización de la roca.

3.4.5.1.1 Concentración lineal de carga:

La concentración lineal de carga define la cantidad de explosivo utilizado por metro perforado.

Se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$q_l = 55 * D_1 * \left[\frac{B_1}{D_2} \right]^{1.5} * \left[B_1 - \frac{D_2}{2} \right] * \left[\frac{c}{0.4} \right] * \left[\frac{1}{PRP_{ANFO}} \right]$$

Donde:

- Q_1 , Concentración lineal de carga (kg/m).
- D_1 , Diámetro de perforación (m).
- D_2 , Diámetro del barreno de expansión (m).
- B , Dimensión de la piedra (m).

- C, Constante de la roca.
- PRP_{ANFO} , Potencia relativa en peso del explosivo referida al ANFO.

Con lo que obtenemos una concentración lineal de carga:

$$q_l = 55 * 0.051 * \left[\frac{0.226}{0.133} \right]^{1.5} * \left[0.226 - \frac{0.133}{2} \right] * \left[\frac{0.7}{0.4} \right] * \left[\frac{1}{1.21} \right]$$

$$q_l = 1.433 \text{ kg/m}$$

Podemos comprobar que con esta concentración lineal de carga, la piedra que hemos calculado en el apartado anterior está dentro del rango de piedra máxima.

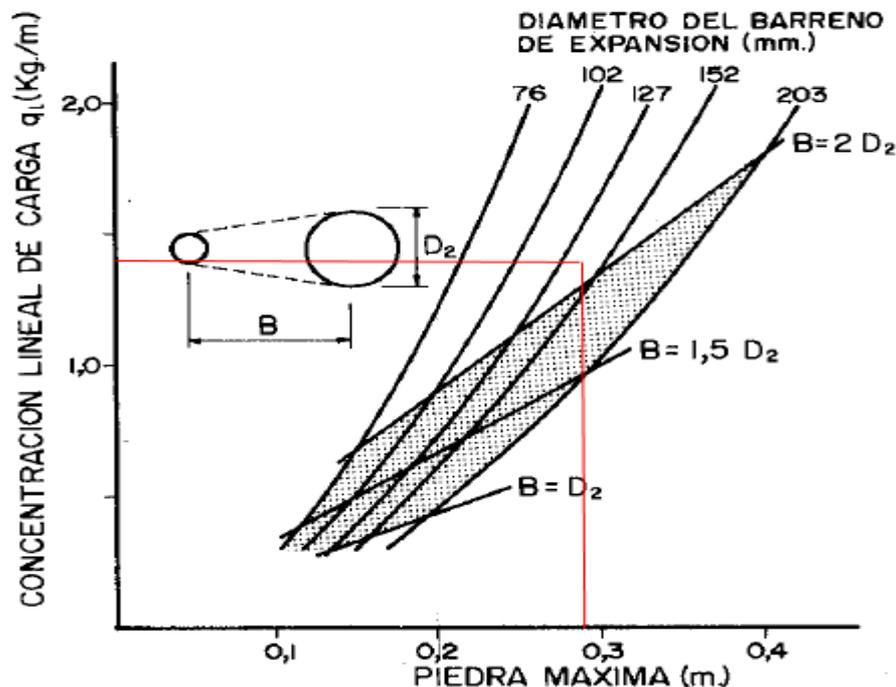


Ilustración 8 Relación entre la concentración lineal de carga y piedra máxima para diferentes diámetros de barrenos de expansión (Larsson y Clark).

3.4.5.1.2 Retacado:

El retacado es la longitud de barreno que en la parte superior de este se rellena con un material inerte y tiene la misión de confinar y retener los gases producidos en la explosión para permitir que se desarrolle por completo el proceso de fragmentación de la roca.



Si el retacado es insuficiente se producirá un escape prematuro de los gases a la atmosfera, generándose problemas de onda aérea y riesgo de proyecciones. Por el contrario con un retacado excesivo se obtendrá gran cantidad de bloques procedentes de la parte alta del banco, poco esponjamiento del material y un nivel de vibración elevado.

Las longitudes de los retacados se estiman con:

$$T = 10 * D_1$$

Por lo que obtenemos un retacado de:

$$T = 10 * 51 = 510 \text{ mm}$$

Esta distancia se le restara a la distancia total del barreno dejando así un espacio para el explosivo de 3.490 m.

3.4.5.1.3 Frente libre tras la primera voladura:

Es el espacio que se origina tras la detonación de la primera sección del cuele y contracuele.

El cálculo de este parámetro se realiza mediante la siguiente formula:

$$Ah_1 = \sqrt{2} * B_1$$

$$Ah_1 = \sqrt{2} * 226.79 = 320.71 \text{ mm}$$

3.4.5.1.4 Carga de los barrenos primera sección:

La carga del barreno se realizara mediante la relación de:

- Carga lineal.
- Diámetro del barreno.
- Diámetro del cartucho.
- Longitud disponible para introducir el explosivo.

Los diferentes empaquetados proporcionados por Maxam para el explosivo seleccionado Riodin HE, que se comercializan en España son:

Standard Packaging 1.1D (Nominal values)				
Diameter x Length (mm)	Cartridge Weight (g)	Cartridges/Box	Weight/box (kg)	Type of Encasing
26x200	156	165	25	Waxed paper cartridge
26x400	305	82	25	Waxed paper cartridge
29x200	192	130	25	Waxed paper cartridge
32x200	238	105	25	Waxed paper cartridge
40x240	417	60	25	Waxed paper cartridge
40x400	714	35	25	Waxed paper cartridge
50x380	1042	26	25	Waxed paper cartridge
60x620	2500	10	25	Plastic wrap cartridge
65x530	2500	10	25	Plastic wrap cartridge
70x500	2778	9	25	Plastic wrap cartridge
80x600	4167	6	25	Plastic wrap cartridge
90x570	5000	5	25	Plastic wrap cartridge
100x450	5000	5	25	Plastic wrap cartridge

Ilustración 9 Empaquetados comercializados en España para Riodin HE. (Maxam)

Teniendo en cuenta lo anterior hemos seleccionado los cartuchos del calibre 29x200, 32x200 y 40x240 como posibles dimensiones para la carga y así disponer de una uniformidad en la cartuchería.

Para esta primera sección se han escogido cartuchos del calibre 32x200 con una carga lineal de $q_l=1.075$ kg/m.

Con lo que el número de cartuchos que necesitaremos será de:

$$N_c = \frac{3.49}{0.2} = 17.45 \cong 18 \text{ cartuchos } 32x200$$

La carga del barreno será de:

$$18 * 215 \text{ g} = 3150 \text{ gr} = 3.87 \text{ kg}.$$

Como se muestra en la siguiente ilustración habrá que quitar al retacado 0.1 m, para poder meter los cartuchos.

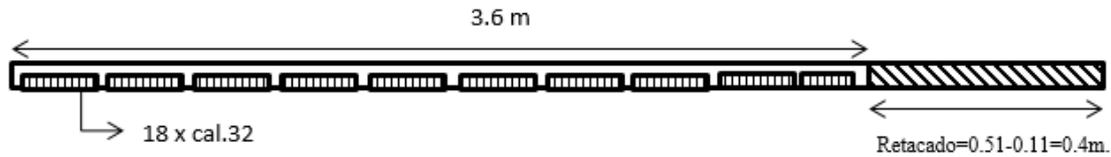


Ilustración 10 Esquema Barrenos Primera Sección. Elaboración Propia

3.4.5.2 Segunda sección

Para el cálculo de la segunda y siguientes secciones se considera que ya existen unos huecos rectangulares de anchura A_h y que se conocen las concentraciones lineales de carga q_l .

El valor de la piedra se calculara a partir de:

$$B_2 = 8.8 * 10^{-2} * \sqrt{\frac{A_{h1} * q_l * PRP_{ANFO}}{D_1 * c}}$$

Con lo que obtenemos un valor de.

$$B_2 = 8.8 * 10^{-2} * \sqrt{\frac{0.320 * 1.075 * 1.21}{0.051 * 0.7}} = 0.3 \text{ m} = 300 \text{ mm}$$

Existen algunas restricciones en cuanto al valor de B_2 ya que debe satisfacer

$$B_2 \leq 2 * A_h$$

para que no se produzca la deformación plástica.

Se cumple que:

$$0.300 \leq 2 * 0.282 = 0.564 \text{ m}$$

También, el ángulo de apertura debe ser menor de 1.6 radianes (90°), pues si no el cuele pierde su carácter de cuele de cuatro secciones. Esto significa que debe cumplir:

$$B_2 > 0.5 * A_{h1}$$

Se cumple que:

$$0.366 > 0.5 * 0.320 = 0.16 \text{ mm}$$

3.4.5.2.1 Frente libre tras la segunda voladura:

Es el espacio que se origina tras la detonación de la primera sección del cuele y contracuele. Sera directamente proporcional a la piedra de la primera sección del cuele.

Se calcula con la siguiente expresión:

$$A_{h_2} = \sqrt{2} * \left(\frac{A_{h_1}}{2} + B_2 \right)$$

$$A_{h_2} = \sqrt{2} * \left(\frac{0.320}{2} + 0.3 \right) = 0.650 \text{ m} = 650 \text{ mm}$$

3.4.5.3 Tercera Sección

3.4.5.3.1 Piedra:

Para el cálculo de la piedra de la tercera sección se utilizara la siguiente formula:

$$B_3 = 8.8 * 10^{-2} * \sqrt{\frac{A_{h_2} * q_l * PRP_{ANFO}}{D_1 * c}}$$

$$B_3 = 8.8 * 10^{-2} * \sqrt{\frac{0.650 * 1.075 * 1.21}{0.051 * 0.7}} = 0.4282 \text{ m} = 428.2 \text{ mm}$$

3.4.5.3.2 Frente libre tras la tercera voladura

$$A_{h_3} = \sqrt{2} * \left(\frac{A_{h_2}}{2} + B_3 \right)$$

$$A_{h_3} = \sqrt{2} * \left(\frac{0.650}{2} + 0.4282 \right) = 1.064 \text{ m} = 1 \text{ m}$$

3.4.5.4 Cuarta sección

$$B_4 = 8.8 * 10^{-2} * \sqrt{\frac{A_{h_3} * q_l * PRP_{ANFO}}{D_1 * c}}$$

$$B_4 = 8.8 * 10^{-2} * \sqrt{\frac{1 * 1.075 * 1.21}{0.051 * 0.7}} = 0.531 \text{ m} = 531 \text{ mm}$$

3.4.5.4.1 Frente libre tras la cuarta voladura:

$$A_{h_4} = \sqrt{2} * \left(\frac{A_{h_3}}{2} + B_4 \right)$$

$$A_{h_4} = \sqrt{2} * \left(\frac{1}{2} + 0.531 \right) = 1.45 \text{ m} = 1450 \text{ mm}$$

3.4.5.5 Cargas barrenos segunda, tercera y cuarta sección

Para los barrenos de la segunda, tercera y cuarta sección utilizaremos unos cartuchos con una carga mayor que los de la primera sección, en concreto utilizaremos los cartuchos inmediatamente superiores, es decir 32x200 con una carga lineal de 1.075 kg/m.

El número de cartuchos que necesitaremos será de:

$$N_c = \frac{3.49}{0.2} = 17.45 \cong 18 \text{ cartuchos } 32 \times 200$$

Por lo que tendremos que tendremos que reducir el retacado a 0.4 m.

La carga de cada barreno será de:

$$18 * 215 = 3.87 \text{ kg.}$$

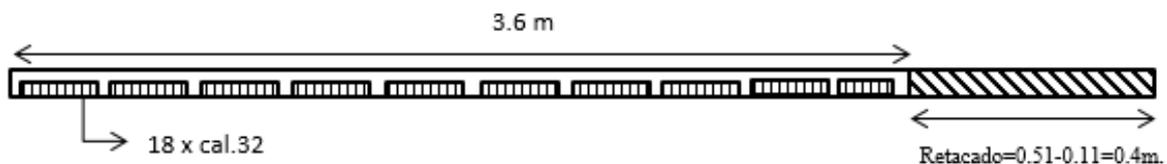


Ilustración 11 Ilustración del esquema de los barrenos de 2, 3 y 4 Sección. Elaboración Propia

Tal y como ha ocurrido en los barrenos de la primera sección, le hemos restado al retacado 0.1 m, reduciéndolo a 0.4m.

3.4.5.6 Posicionamiento del cuele

El cuele puede ser colocado en cualquier zona de la sección del túnel, tal y como muestra la siguiente ilustración. Sin embargo, esa posición va a determinar factores como:

- Cantidad y alcance máximo del escombros.
- Número de barrenos perforados.
- Coste por unidad de voladura.



En relación al posicionamiento del cuele se ha optado por no hacer una perforación en un fondo de un barreno de la voladura anterior.

Se toma esta decisión para evitar algún tipo de explosión de posibles restos de explosivos atrapados en el fondo de los barrenos. Para ello alternaremos la posición del cuele de voladura en voladura. El cuele representa la zona del túnel con más concentración lineal, por lo que el avance es más pronunciado que en otras zonas del túnel.

Así alternando su posición el túnel avanzara uniformemente.

	<p>Movimiento controlado de la pila hacia delante</p>
	<p>Controlo del avance del túnel</p>
	<p>Mayor lanzamiento del material</p>

Ilustración 12 Posicionamiento del cuele. (Francisco Sena Leite)



3.4.5.7 Resumen de los datos obtenidos y comprobación

Esquema de los datos obtenidos para el cuele:

	Piedra (mm)	Frente Libre (mm)	Carga Barreno (kg)	Número de Barrenos	Carga Total (kg)
Primera Sección	226.78	320.72	3,87	4	15.48
Segunda Sección	300	650	3,87	4	15,48
Tercera Sección	428	1064	3,87	4	15,48
Cuarta Sección	548	1450	3,87	4	15,48

Tabla 3-4Resumen datos obtenidos del cuele y contracuele.

Como comprobación, podemos calcular si el área del cuele se encuentra entre los parámetros establecidos dependientes del diámetro del barreno.

Para barrenos de pequeño diámetro el área del cuele se tiene que situar entre 1 y 2 metros cuadrados y para barrenos de gran diámetro entre 2 y 4 metros cuadrados. Nosotros estamos usando barrenos de gran diámetro por lo que:

$$2 m^2 < Area\ cuele < 4 m^2$$

3.4.6 Destroza

El método para calcular el esquema de los barrenos de destroza es similar al empleado para las zapateras aplicando únicamente unos valores distintos del Factor de fijación y relación espaciamento piedra.

DIRECCION DE SALIDA DE LOS BARRENOS	FACTOR DE FIJACION «f»	RELACION «S/B»
● Hacia arriba y horizontalmente	1,45	1,25
● Hacia abajo	1,20	1,25

Ilustración 13 Valores de los factores de fijación. Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico

Piedra de la destroza:

$$B = 0.9 * \sqrt{\frac{q_l * PRP_{ANFO}}{c * f * \left(\frac{S}{B}\right)}}$$

$$B = 0.9 * \sqrt{\frac{1.075 * 1.21}{0.7 * 1.45 * 1}} = 1.01 \text{ m}$$

3.4.6.1 Cargas de los barrenos de la destroza

Carga de fondo:

Para la carga de fondo elegiremos el mayor cartucho que entre en el barreno, recordando que para que un cartucho entre sin dificultad deberá ser entre unos 8-10 mm inferior que el diámetro del barreno. Para diámetros de perforación de 51 mm se recomienda el uso de cartuchos de 40 mm, con una carga lineal de 1.75 kg/m.

Por lo que usaremos cartuchos de 32x200.

Longitud de la carga de fondo:

$$L_f = \frac{1}{6} * L = 0.66 \text{ m}$$

Número de cartuchos:

$$N_c = \frac{0.66}{0.24} = 2.75 \cong 3 \text{ cartuchos de } 40 \times 240$$

Estos cartuchos ocupan una longitud de 0.72 m, por lo que tendremos que quitar a la columna 0.053 m.

Carga de columna:

Para la carga de columna usaremos cartuchos de calibre inferior a la de columna, siendo estos de 32x200.

El número de cartuchos será de:

$$N_c = \frac{2.77}{0.2} = 13.85 \cong 14 \text{ cartuchos } 32 \times 200$$

- Espaciamiento.

Sabiendo la piedra podemos obtener el espaciamiento, este espaciamiento será independiente de si los barrenos tienen salida horizontal o vertical:

$$S_d = 1 * B$$

$$S_d = 1 * 1.01 = 1.01 \text{ m}$$

Cargas:

- Carga de fondo :

$$3 * 0.42 = 1.26 \text{ kg.}$$

- Carga de columna:

$$14 * 0.215 = 3.01 \text{ kg}$$

- Carga total:

$$1.26 + 3.01 = 4.27 \text{ kg.}$$

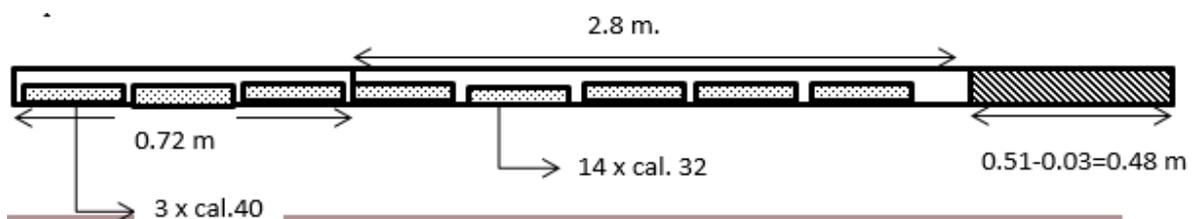


Ilustración 14 Esquema barreno tipo destroza. Elaboración Propia

3.4.7 Zapateras

Para el cálculo de las zapateras se admite que se trabaja de forma similar a un banco a cielo abierto pero en este caso la altura del banco será la profundidad de los barrenos y el factor de fijación (f) tomara el valor de 1.45. El elevado factor de fijación se debe a que los barrenos ejercen un trabajo en roca confinada y contra la gravedad.



3.4.7.1 Piedra

La piedra de los barrenos de zapatera dispuestos en filas se calcula, básicamente, con la misma fórmula que se emplea en las voladuras en banco, considerando que la altura de esta última es igual al avance de la pega:

Se opta por utilizar cartuchos de Riodin HE de calibre 40, el cual define una carga lineal de 1.75kg/m.

$$B = 0.9 * \sqrt{\frac{q_l * PRP_{ANFO}}{c * f * \left(\frac{S}{B}\right)}}$$

Donde:

- F, Factor de fijación. Generalmente se toma 1.45 para tener en cuenta el efecto gravitacional y el tiempo de retardo entre barrenos.
- S/B, Relación entre el espaciamiento y la piedra. Se suele tomar igual a 1.
- c, Constante de la roca corregida.

$$c = c + 0.05 \text{ para } B > 1.4m$$

$$c = c + \frac{0.077}{b} \text{ para } B < 1.4 m$$

Por lo que:

$$B = 0.9 * \sqrt{\frac{1.75 * 1.21}{0.7 * 1.45 * 1}} = 1.29 m$$

En la piedra se debe cumplir la condición de:

$$B \leq 0.6L$$

$$1.58 m \leq 0.6 * 4 = 2.4 m$$

3.4.7.2 Carga barrenos Zapatera

Para las zapateras y por la necesidad de romper del barreno hacia arriba se suele utilizar un explosivo más potente. Elegiremos el cartucho de calibre máximo que pueda ser introducido

sin problemas dentro del barreno, recordando que el cartucho deberá tener un diámetro de unos 8-10 mm inferior al diámetro del barreno para que este pueda ser introducido sin dificultad.

Para diámetros de perforación de 51 mm, el cartucho recomendado es el de calibre 40, que nos da una carga lineal de 1.75 kg/m.

La concentración de la carga de columna puede reducirse al 70% de la carga de fondo. Sin embargo se suele emplear la misma concentración por motivos de tiempo de preparación.

Por lo que usando la misma concentración de carga para la columna y el fondo obtenemos que:

– Retacado:

El retacado en los barrenos de las zapateras variara entre $10xD_1 - 0.2B$.

Se deberá mantener como mínimo un retacado de 20 cm según ITC 10.2-01².

$$T = 10 * 51 = 510 \text{ mm.}$$

Por lo que el número de cartuchos necesario será de:

$$N_c = \frac{3.49}{0.24} = 14.54 \cong 15 \text{ cartuchos } 40 \times 240$$

Carga del barreno:

$$15 * 420 \text{ gr} = 6.3 \text{ kg.}$$

Habrá que quitar al retacado 0.11m

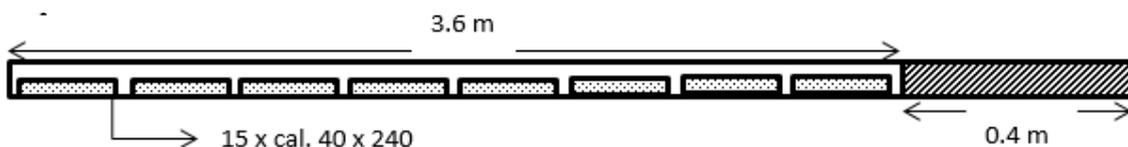


Ilustración 15 Esquema Barreno Tipo Zapatera. Elaboración Propia

– Número de barrenos:

El número de barrenos necesario vendrá dado por la expresión:

² Orden de 29 de abril de 1987 por la que se modifica la Instrucción Técnica Complementaria 10.2-01, Explosivos Utilización.



$$NB = \left[\frac{AT + 2L \sin \gamma}{B} + 2 \right]$$

Donde:

- AT, Anchura del túnel.
- γ , En los barrenos de zapateras es necesario considerar el ángulo de realce γ o inclinación que se precisa para proporcionar un hueco adecuado a la perforadora para realizar el emboquille de la próxima pega. Para avances de 3 metros un ángulo de 3° , que equivale a 5cm/m es suficiente (aunque dependerá lógicamente de las características del equipo).

Por lo que el número de barrenos será de:

$$NB = \frac{11.87 + 2 * 4 * \sin 3}{1.29} + 2 = 11.52 \text{ barrenos} \cong 12 \text{ barrenos}$$

Debido a la dificultad de romper la roca en las esquinas se calculan dos espaciados:

- Espaciado para los barrenos centrales de las zapateras

$$S_z = \left[\frac{AT + 2L \sin \gamma}{NB - 1} \right]$$

$$S_z = \left[\frac{11.87 + 2 * 4 * \sin 3}{11} \right] = 1.11 \text{ m}$$

- Espaciado para los barrenos de las esquinas:

$$S'_z = S_z - L \sin \gamma$$

$$S'_z = 1.11 - 4 * \sin 3 = 0.9 \text{ m}$$

3.4.8 Contorno

Las voladuras de contorno se utilizan para definir en mayor grado el contorno final del túnel reduciendo así los costes en el saneamiento y sostenimiento de este.

En el caso de tener que realizar voladuras de contorno el espaciamiento entre los barrenos se calcula a partir de:

$$S_c = K * D_1$$

Donde:

- S_c , Espaciado de los barrenos de contorno.
- K , Factor de espaciado (15-16 para recorte).

Por lo que el espaciamiento entre los barrenos será de:

$$S = 15 * 51 = 765 \text{ mm}$$

La concentración lineal de carga mínima se determina en función del diámetro de perforación.

Para barrenos con un calibre inferior a los 150 mm se emplea la siguiente ecuación:

$$q_k = 90 * D_1^2$$

Donde D_1 se expresa en metros.

Con lo que obtenemos una concentración lineal de carga de:

$$q_l = 90 * 0.051^2 = 0.234 \text{ kg/m}$$

Por lo que la carga en cada barreno será de:

$$Q_b = 4 * 0.234 = 0.936 \text{ kg}$$

La carga de fondo consistirá en un cartucho de calibre 32x200 para asegurar la rotura en fondo pero que al mismo tiempo este lo suficientemente desacoplada para no dañar la roca.

En cuanto a la carga de columna, esta será lo suficientemente pequeña como para no dañar la roca residual. Es habitual emplear cordones detonantes de 80 g/m o 40g/m con trozos de cartucho de calibre 22 o 26 distribuidos en su longitud.

Se ha optado por la solución de cordón detonante de 80g/m (en el caso de que el macizo residual quede muy dañado en obra, se optara por cambiar al cordón detonante de 40g/m).

El cordón detonante aportara una carga al barreno de:

$$80 * 4 = 320 \text{ g explosivo cordon detonante}$$

Por lo que teniendo en cuenta esto la carga de cada barreno será de:



$$0.936 - 0.32 = 0.616 \text{ kg.}$$

Calculamos el número de cartuchos del calibre 26x200 necesarios:

$$N_c = \frac{0.616 \text{ kg}}{0.15 \text{ kg}} = 4.10 \cong 4 \text{ cartuchos } 26$$

Con lo que teniendo en cuenta la carga de los cartuchos y del cordón, la carga total será de:

$$Q_t = (4 * 0.15) + 0.32 = 0.92 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta el cartucho de 32x200 de carga de fondo la carga total por barreno de contorno será de:

$$Q_t = 0.92 + 0.215 = 1.135 \text{ kg}$$

– Número de barrenos del contorno:

Teniendo en cuenta que el perímetro del túnel es de 22.62 metros obtenemos que el número de barrenos deberá ser:

$$N_b = \frac{22.62}{0.765} = 29.62 \cong 29 \text{ barrenos}$$

4 Comprobaciones del diseño de la voladura

Una vez efectuados los cálculos de los esquemas y cargas, y antes de dar las voladuras, es interesante chequear o contrastar los datos obtenidos con los estándares o resultados típicos de operaciones similares.

Estas comprobaciones se pueden realizar con simples gráficos, como los que se mostraran a continuación, donde se refleja el consumo específico de explosivo en función de la sección del túnel y el diámetro de perforación, el número de barrenos por pega y la perforación específica a partir de las dos variables indicadas.

Calculo del consumo específico:

Zona		Carga Barreno (kg)	Número de barrenos	Carga total (kg)
Cuele	Primera Sección	3,87	4	15.48
	Segunda Sección	3,87	4	15,48
	Tercera Sección	3,87	4	15,48
	Cuarta Sección	3,87	4	15,48
Destroza		4,27	28	119.56
Zapatera		6,3	11	69.3
Contorno		1.135	23	26.105
Total			78	276.885

Los m³ de roca arrancada por cada voladura son:

$$44.8361 * 3.8 = 170.37 \text{ m}^3$$

Con lo que obtenemos un consumo específico de:

$$C_e = \frac{\text{Kg totales explosivo}}{\text{m}^3 \text{ totales arrancados}}$$

$$C_e = \frac{276.885}{170.37} = 1.62$$

Aunque el diseño de la voladura puede tener múltiples soluciones aceptables, todas ellas deberán tener un consumo específico aceptable.

Este consumo específico lo podemos calcular mediante la expresión:

$$C_E = 8 * A^{-0.45}$$

Para el área del túnel en cuestión obtenemos un consumo específico aceptable de:

$$C_E = 8 * 44.8361^{-0.45} = 1.44 \text{ kg/m}^3$$

Comprobación de los resultados con las gráficas:

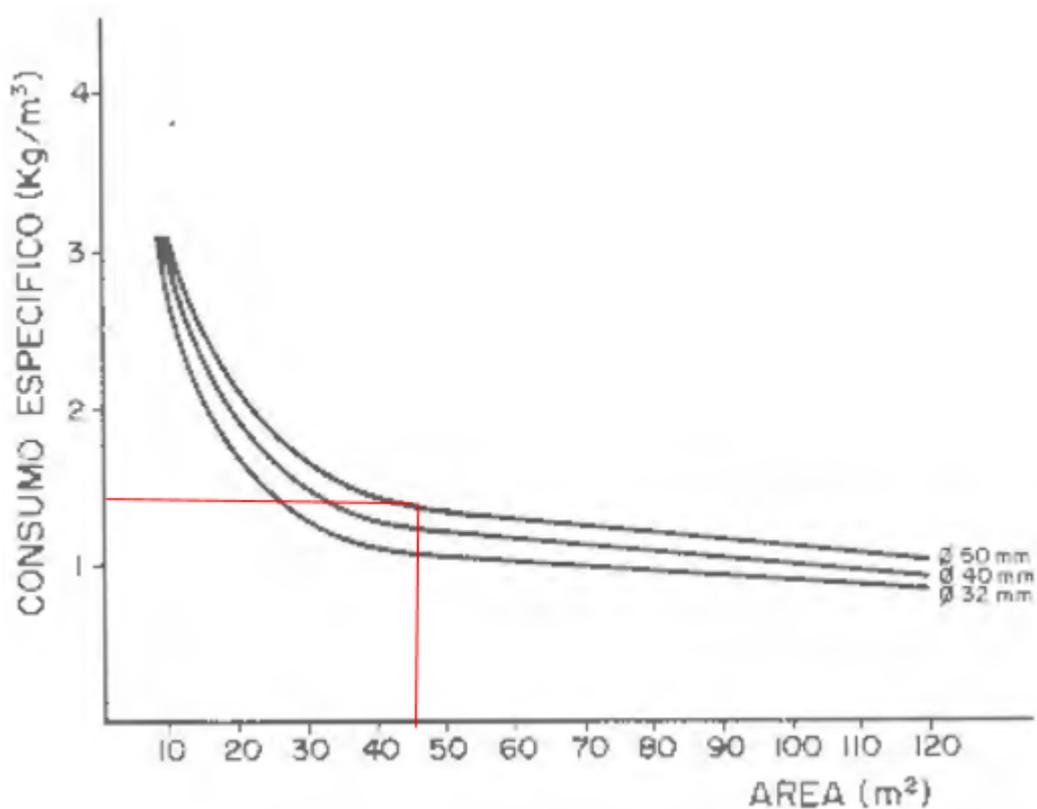


Ilustración 16 Consumo específico en función del área del túnel y diámetro de los barrenos. Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico

Podemos comprobar con la ilustración anterior que el consumo específico obtenido se ajusta a los estándares esperados para un túnel de dicha sección y con el diámetro de perforación usado.

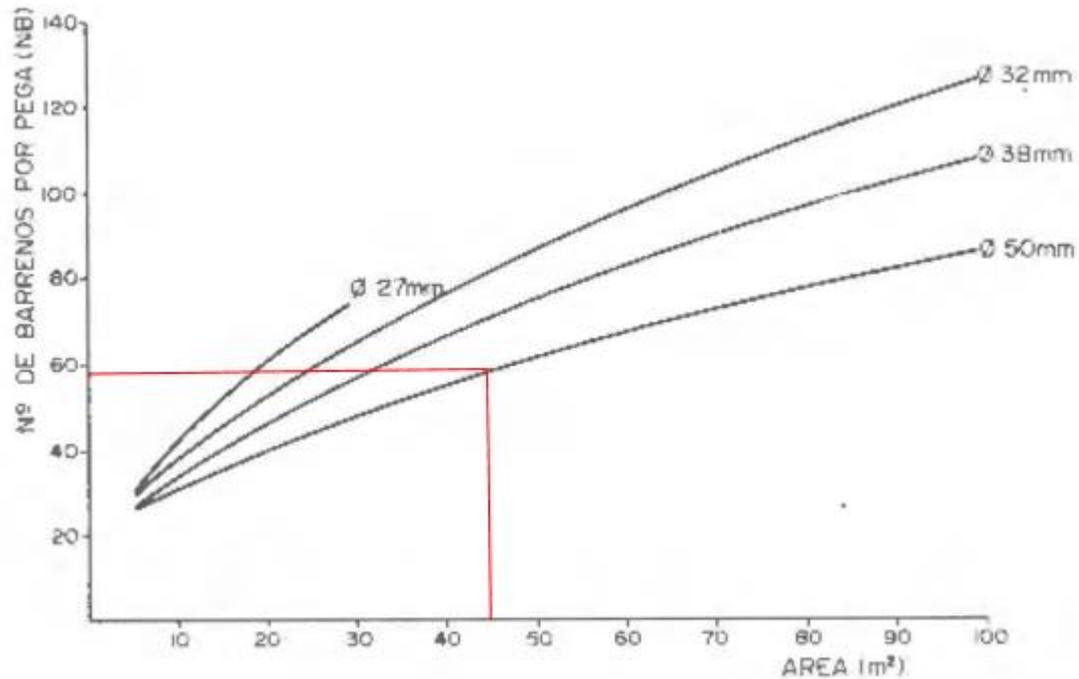


Ilustración 17 Numero de barrenos por pega en función del área.

Con la ilustración anterior observamos que los estándares nos dicen que para un túnel de la sección usada y un diámetro de perforación de 51 mm, se espera que el número de barrenos se sitúe aproximadamente en torno a los 60 barrenos por pega.

Los gráficos anteriores se refieren a voladuras con barrenos paralelos y solo pueden tomarse como orientativos, pues son muchas las variables que influyen sobre los resultados de la excavación: tipos de rocas y explosivos, tamaño de los barrenos, tipos de cuele, necesidad de voladuras de contorno, restricciones por vibraciones...etc. que pueden hacer variar ligeramente los parámetros de diseño.

La comprobación final de los cálculos se hará una vez efectuada la voladura, la forma de introducir las modificaciones necesarias a partir de los análisis e los resultados en las primeras pruebas debe ser gradual y sistemática recomendándose incluso que en las pegas iniciales no se perforen los barrenos en toda su profundidad y se vaya poco a poco aumentando el avance por ciclo.



5 Voladura de destroza en destroza

El cálculo de la voladura de la destroza es similar a una voladura en banco. Se utilizará la perforación en horizontal.

Datos de partida:

- Diámetro de perforación 51mm
- Altura de la destroza 3m
- Anchura de la destroza 11.50
- Longitud de perforación 4m

5.1 Cálculos de los parámetros de la voladura

Para la voladura en destroza utilizaremos cartuchos del calibre 40 x240 que nos dan una carga lineal de 1.75 kg/m.

Longitud de pase:

$$X = 0.95 * L$$

$$X = 0.95 * 4 = 3.8 \text{ m}$$

- Piedra:

$$B = 0.9 * \sqrt{\frac{q_l * PRP_{ANFO}}{c * f * \left(\frac{S}{B}\right)}}$$

$$B = 0.9 * \sqrt{\frac{1.75 * 1.21}{0.7 * 1.45 * 1.25}} = 1.18 \text{ m}$$

5.1.1 Carga de los barrenos:

Para la carga de los barrenos de la destroza elegiremos la carga mayor que entre en los barrenos. Como se ha visto en puntos anteriores, para diámetros de perforación de 51 mm, el cartucho recomendado es el del calibre 40x240.



– Carga de fondo:

Para la carga de fondo elegiremos el mayor cartucho que entre en el barreno, recordando que para que un cartucho entre sin dificultad deberá ser entre unos 8-10 mm inferior que el diámetro del barreno. Para diámetros de perforación de 51 mm se recomienda el uso de cartuchos de 40 mm, con una carga lineal de 1.75 kg/m.

Por lo que usaremos cartuchos de 40x240.

Longitud de la carga de fondo:

$$L_f = \frac{1}{6} * L$$

$$L_f = \frac{1}{6} * 4 = 0.66 \text{ m}$$

Número de cartuchos:

$$N_c = \frac{0.66}{0.24} = 2.77 \cong 3 \text{ cartuchos de } 40 \times 240$$

Estos cartuchos ocupan una longitud de 0.72 m, por lo que tendremos que quitar a la columna 0.053 m.

– Carga de columna:

Para la carga de columna usaremos cartuchos de calibre inferior a la de columna, siendo estos de 32x200.

El número de cartuchos será de:

$$N_c = \frac{2.77}{0.2} = 13.85 \cong 14 \text{ cartuchos } 32 \times 200$$

– Espaciamiento.

Sabiendo la piedra podemos obtener el espaciamiento, este espaciamiento será independiente de si los barrenos tienen salida horizontal o vertical:



$$S_d = 1.25 * B$$

$$S_d = 1.25 * 1.18 = 1.48 \text{ m}$$

Con lo que obtenemos el número de barrenos necesarios será aproximadamente de:

$$N_b = \frac{11.50}{1.7} = 7.75 \cong 8 \text{ barrenos}$$

Cargas:

– Carga de fondo :

$$3 * 0.42 = 1.26 \text{ kg.}$$

– Carga de columna:

$$14 * 0.215 = 3.01 \text{ kg}$$

– Carga total:

$$Q_t = 1.26 + 3.01 = 4.27 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta que se realizan 15 barrenos obtenemos una carga total por pega de:

$$15 * 4.27 = 64.05 \text{ kg.}$$

Calculo del consumo específico:

Los m^3 de roca que se van a arrancar en cada voladura de la destroza serán:

$$30.9071 * 3.8 = 117.44 \text{ m}^3$$

Con lo que obtenemos un consumo específico de:

$$C_e = \frac{\text{Kg totales explosivo}}{\text{m}^3 \text{ totales arrancados}}$$

$$C_e = \frac{70.86}{117.44} = 0.603 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



6 Secuenciación de la voladura

Cuando se habla de voladuras subterráneas, la secuencia de detonación de los barrenos es de gran importancia. Un buen diseño de la secuencia de encendido puede definir el tamaño de fragmentación, forma de la pila, vibración, ruido y cantidad de roca proyectada (Konya y Walter 1985).

Para el presente proyecto dentro de los tres grandes grupos de detonadores:

- Detonadores eléctricos.
- Detonadores no eléctricos.
- Detonadores electrónicos.

Se usaran detonadores de tipo eléctrico, ya que no se ha detectado corrientes erráticas en el terreno que puedan producir detonaciones inesperadas.

Se utilizaran detonadores eléctricos de microretardo y retardo Riodet de Maxam.

6.1 Consideraciones previas

En los cueles de barrenos paralelos, como el utilizado en el presente proyecto, las primeras cargas detonadas son las que se encuentran más próximas a los barrenos vacíos o de expansión, aumentando el valor de la piedra a medida que progresa la secuencia de encendido.

La roca fragmentada por la acción de los primeros barrenos es proyectada lateralmente hacia el pequeño hueco disponible.

Es por ello que en barrenos con una longitud mayor de 3 metros el tiempo necesario para que los trozos de roca sean completamente expulsados de las zonas del cuele es considerable y normalmente superior a los 100 ms.

Dicho esto para evitar la sinterización y apelmazamiento de la roca en la zona del cuele y conseguir que cada carga disponga de un frente libre efectivo el tiempo de retardo entre barrenos consecutivos deberá exceder de 100 ms.

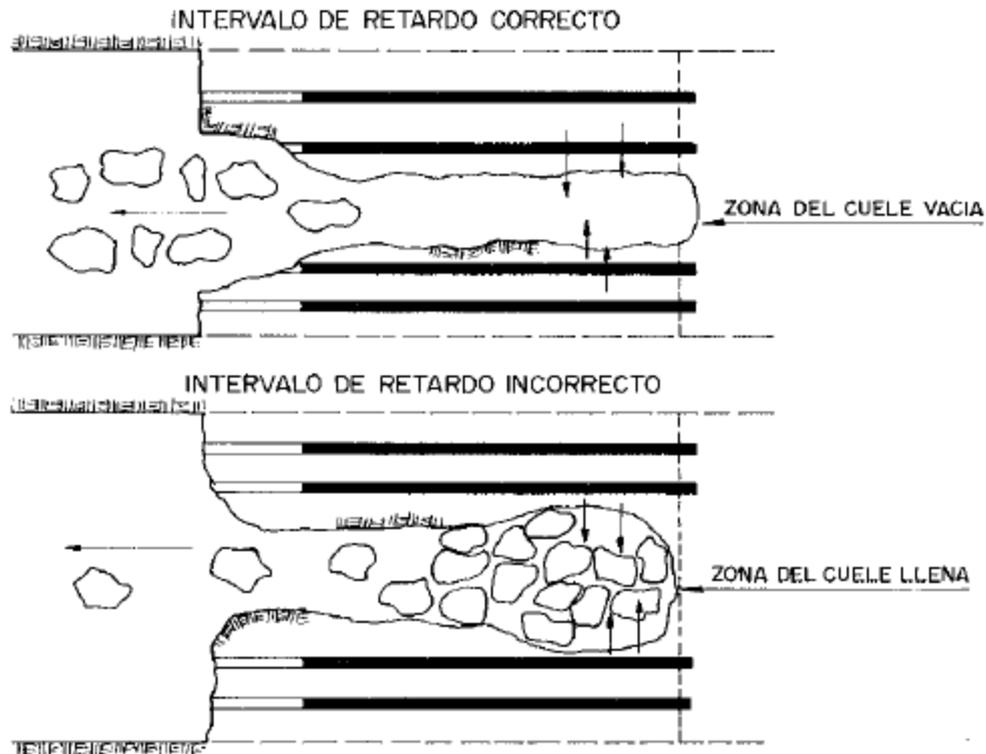


Ilustración 18 Efecto del tiempo de retardo de los barrenos del cuele sobre el rendimiento de la voladura en túnel. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico

Es por ello que los detonadores utilizados en las destrozadas, contorno y zapateras son de retardo y los utilizados en el cuele y contracuele se han proyectado con microretardos.

Se utilizarán detonadores eléctricos de aluminio tipo Riodet de la empresa Maxam.

Las características eléctricas de estos detonadores se muestran a continuación.



Características Eléctricas (valores nominales)		
	Tipo I	Tipo H
Resistencia puente (ohms)	0,3-0,5	0,03-0,05
Impulso encend (mW.s/ohm)	8-16	1.100-2.500
Corriente de seguridad (A)	0,45	4
Corriente recomendada de encendido en serie (A)	2,5	25

Ilustración 19 Características eléctricas detonadores Riodelt Aluminio. Maxam

Tiempos de retardo (valores nominales)			
Serie Microrretardo		Serie Retardo	
Número	Tiempo(ms)	Número	Tiempo(ms)
0	-	0	-
1	25	½	250*
2	50	1	500
3	75	1½	750*
4	100	2	1.000
5	125	3	1.500
6	150	4	2.000
7	175	5	2.500
8	200	6	3.000
9	225	7	3.500
10	250	8	4.000
11	275	9	4.500
12	300	10	5.000
13	325	11	5.500
14	350	12	6.000
15	375	14	7.000*
16	400	16	8.000*
17	425*		
18	450		
19	475*		
20	500		
22	550		
24	600		
26	650		
28	700		
30	750		

*Número no estándar. Disponible bajo pedido.

Ilustración 20 Tiempos de retardo comercializados para Riodet Aluminio. Maxam

Se ha decidido realizar la conexión en serie, uno de los circuitos más utilizado por su sencillez y por la posibilidad de comprobación por simple continuidad del mismo.



Ilustración 21 Circuito en serie. (Lopez Jimeno, C. & Lopez Jimeno, E. (1997) :<Manual de túneles y obras subterráneas>.Madrid: Entorno Grafico

6.2 Fuente de energía

Las fuentes de energía para la iniciación de los detonadores eléctricos son:

- Explosores.
- Baterías.
- Red de Energía Eléctrica.

Tanto las baterías como las líneas eléctricas son fuentes de energía poco adecuadas para el disparo de voladuras y solo en casos especiales y con una autorización expresa podrían emplearse.

6.3 Explosores convencionales

Dentro del grupo de explosores los más utilizados son los de condensador. En este tipo de explosores mediante un magneto de manivela o una pila se carga progresivamente el condensador cerrándose el circuito de forma automática o controlada cuando la tensión alcanzada en el mismo es la adecuada y se produce la descarga de corriente en un tiempo muy breve.

Se ha optado por el explosor Zebra 122, comercializado por Maxam con las siguientes características:

Datos técnicos

Tipo:	ZEBRA 122
Voltaje del condensador (aprox.):	1200 v
Capacidad del condensador (aprox.):	40 μF
Máxima resistencia del circuito:	A 810 Ω U 370 Ω VA 90 Ω
Detonadores eléctricos con hilo de acero de 3,5 m de longitud de conexión en serie:	160 A 100 U
Peso:	1,5 Kg
Dimensiones:	110 x 90 x 170 mm
Rango de temperatura:	-20°C...+55°C

Ilustración 22 Características técnicas explosor Zebra 122.Maxam

Una vez elegido el explosor comprobaremos, en el siguiente punto, que este satisface nuestras necesidades.

6.3.1 Comprobación del Explosor

Para comprobar que el modelo de explosor que se posee en un trabajo determinado es el correcto, o para el dimensionamiento del mismo es conveniente efectuar los siguientes cálculos.

- Resistencia total del circuito:

$$R_T = R_L + n * (R_p + 2m * r_1) = R_L + n * R_p$$

Siendo:

- R_L , Resistencia de la línea de tiro (Ω).
- R_p , Resistencia del puente del detonador (Ω).
- N, Numero de detonadores.
- M, Metraje de los hilos del detonador.
- R_1 , Resistencia por metro lineal de hilo.

Para la voladura en avance considerando que la galería tiene un área de 44.7982 m², consideraremos una longitud total delinea de tiro de 90 metros.

Con lo que la resistencia de línea de tiro será de:

$$R_L = 0.065 * 90 = 5.85 \Omega$$

Por lo que la resistencia total del circuito será de:

$$R_T = 5.85 + 71 * 0.5 = 41.35 \Omega$$

– Energía total Disponible en el explosor:

$$E_o = \frac{1}{2} * C * V^2$$

Donde:

- C, capacidad en faradios del explosor.
- V, Tensión en voltios que alcanza el condensador en el momento del disparo

Por lo que la energía total disponible en el explosor será de:

$$E_o = \frac{1}{2} * 40 * 10^{-6} * 1200^2 = 28.8 J$$

– Energía suministrada al circuito:

Se trata de la energía suministrada al circuito durante un corto periodo de tiempo que normalmente es de unos 5ms.

$$E_d = E_o * \left(1 - e^{-\frac{0.01}{R_T * C}}\right)$$

$$E_d = 28.8 * \left(1 - e^{-\frac{0.01}{41.35 * 40 * 10^{-6}}}\right) = 28.73 J$$

– Intensidad efectiva que será suministrada al circuito:

$$I_{EF} = \sqrt{\frac{E_d}{0.005 * R_T}}$$

$$I_{EF} = \sqrt{\frac{28.73}{0.005 * 41.35}} = 11.78 A$$



– Impulso de encendido:

$$S_i = \frac{E_d}{R_T} = I_{EF} * t$$

$$S_i = \frac{28.73 * 10^3}{41.35} = 694,8 \text{ mW} * \text{s}/\Omega$$

Podemos comprobar que el impulso de encendido es mayor que la sensibilidad eléctrica de los detonadores seleccionados.

$$694,8 \text{ mW} * \frac{\text{s}}{\Omega} > 8 - 16 \text{ mW} * \frac{\text{s}}{\Omega}$$

Obtendríamos un factor de seguridad de:

$$F_S = \frac{S_i}{S_E} = \frac{694.8}{16} = 43.42$$

Por lo que con todo lo anteriormente calculado vemos que el explosor seleccionado es más que suficiente para conseguir la iniciación de las voladuras.

7 Control de Vibraciones terrestres

Las alteraciones principales que originan las voladuras son:

- Vibraciones.
- Onda aérea.
- Proyecciones de roca.

Todas ellas pueden, en algunas circunstancias, originar daños en las estructuras próximas y, además, ser causa de conflictos permanentes con los habitantes próximos a los lugares donde se realizan las voladuras. También es frecuente la formación de polvo cuyo control es difícil.

7.1 Estimadores de leyes de propagación de vibraciones terrestres

En el presente apartado se recogen los criterios de prevención recomendados para prevención de las vibraciones terrestres en la norma UNE 22-381-93.

En la normativa Española se distinguen tres tipos de estructuras:

1. Estructuras del Grupo I, Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.
2. Estructuras del Grupo II, Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.
3. Estructuras del Grupo III, Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

En las inmediaciones donde tendrán lugar las voladuras existen edificios del grupo II, tal y como se ve en las siguientes fotografías:



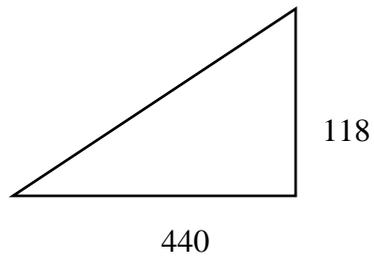
Ilustración 23 Zona donde se llevaran a cabo las Voladuras. Elaboración Propia



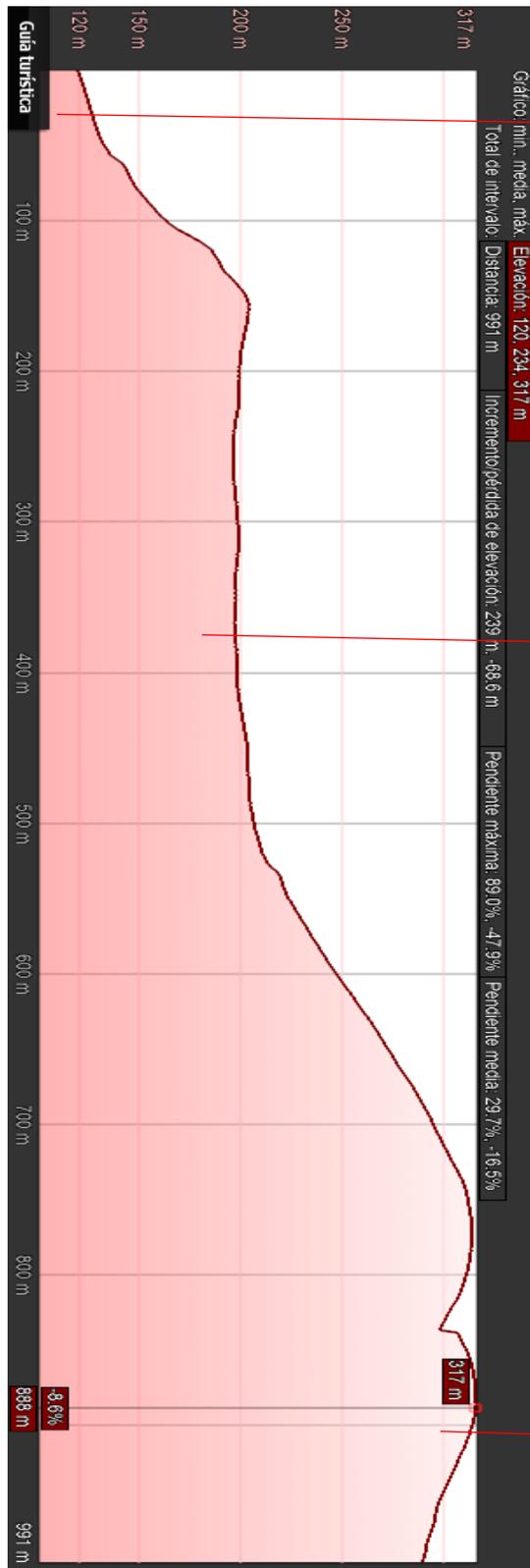
Ilustración 24 Zona donde se llevaran a cabo las voladuras. Elaboración Propia

Como podemos observar existen dos poblaciones la población de Vista y Corigos.

La población de Vista se encuentra a una distancia en línea recta desde la montera donde se construirá el túnel de 440 metros. Hay que tener en cuenta que existe una diferencia de altura de 118 metros desde donde se realizaran las voladuras hasta, esto quiere decir que existe un volumen importante de macizo rocoso de una piedra extremadamente dura como las cuarcitas entre las voladuras y la población de Vista. Con una simple relación trigonométrica podemos estimar que la distancia más corta desde donde se producirán las voladuras hasta la población es de:



$$D = \sqrt{440^2 + 118^2} = 455.54 \text{ m}$$



Corigos. Altitud 121 m.

Túnel. Altitud 198 m.

Vista. Altitud
317 m

Ilustración 25 Alturas de las poblaciones. Google Earth

La distancia desde donde se proyecta la obra a la población de Corigos es de 373 metros en línea recta y de 77 metros de diferencia de altura obteniendo una distancia mínima en línea recta desde las voladuras hasta la población de 380.86 metros.

Una vez determinada la distancia a la que están los edificios a proteger se determina la carga máxima operante de explosivo que se prevé detonar, es decir, la suma de todas las cargas detonadas con el mismo número de detonador o retardo, esta carga máxima operante se calcula mediante la ecuación:

$$Q_c = Q_o * F_r * F_e$$

Donde:

- F_r , es el factor del macizo rocoso que implícitamente tiene en cuenta la frecuencia dominante del medio trasmisor.
- F_e , Factor de estructura.

Ambos factores se indican en las siguientes tablas:

TIPO DE ESTRUCTURA	FACTOR F_e
I	0,28
II	1
III	3,57

Tabla 7-1 Valores del Factor de Estructura. Criterios de prevención Vibraciones (Maxam).

CLASE DE FORMACION	FACTOR F_r
Dura	0,40
Media	1
Blanda	2,52

Tabla 7-2 Valores del Factor del macizo rocoso. Criterios de prevención Vibraciones (Maxam).

Se considera:

- Formación rocosa dura, aquella cuya velocidad sísmica es superior a 4000m/s.
- Formación rocosa media, Aquella cuya velocidad sísmica está comprendida entre 2000-4000 m/s.
- Formación rocosa blanda, Aquella cuya velocidad sísmica es inferior a los 2000 m/s.

Las cuarcitas poseen una velocidad de propagación sísmica de entre 5100-6100 m/s.

CLASE DE FORMACION	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA SISMICA LONGITUDINAL (m/s)
CAPA METEORIZADA	300 – 900
ALUVINES MODERNOS	350 – 1500
ARCILLAS	1000 – 2000
MARGAS	1400 – 4500
CONGLOMERADOS	2500 – 5000
CALIZAS	4000 – 6000
DOLOMITAS	5000 – 6000
SAL	4500 – 6500
YESO	3000 – 44000
ANHIDRITA	3000 – 6000
GNEIS	3100 – 5400
CUSRCITAS	5100 – 6100
GRANITOS	4000 – 6000
GABROS	6700 – 7300
DUNITAS	7900 – 8400
DIABASAS	5800 – 7100

Tabla 7-3 Velocidades Sísmicas para diferentes materiales. (Explocen)

Utilizaremos la mayor carga operante de la voladura, entendiendo que con esta carga se dará la peor situación en cuanto a las vibraciones.

Obtenemos una carga máxima operante de:

$$Q_c = 30 * 0.4 * 1 = 12 \text{ kg.}$$



Entrando en la siguiente tabla con el valor de la carga operante máxima obtenida y la distancia entre la voladura y la estructura a proteger obtenemos la región donde se pretende trabajar, distinguiéndose tres tipos de estudios:

- Estudio Preliminar, en estos habrá que realizar voladuras de ensayo con diferentes cargas instantáneas y tomar registros en posiciones distantes que cubran el área de interés para determinar si habrá daños o no.
- Medición de control, implica la medición de las perturbaciones en una voladura de producción. Si el nivel de vibración registrado fuera menor que el criterio de prevención se podrá incrementar progresivamente la carga hasta que las intensidades de vibración fueran iguales al valor máximo admisible. En caso contrario se pasara a hacer un estudio preliminar de vibraciones.
- Proyecto tipo de vibraciones, en este caso se estima que la carga operante de explosivo es tan baja y la distancia suficiente como para descartar cualquier incidencia en las vibraciones.

Dicho esto, entrando a la tabla obtenemos:

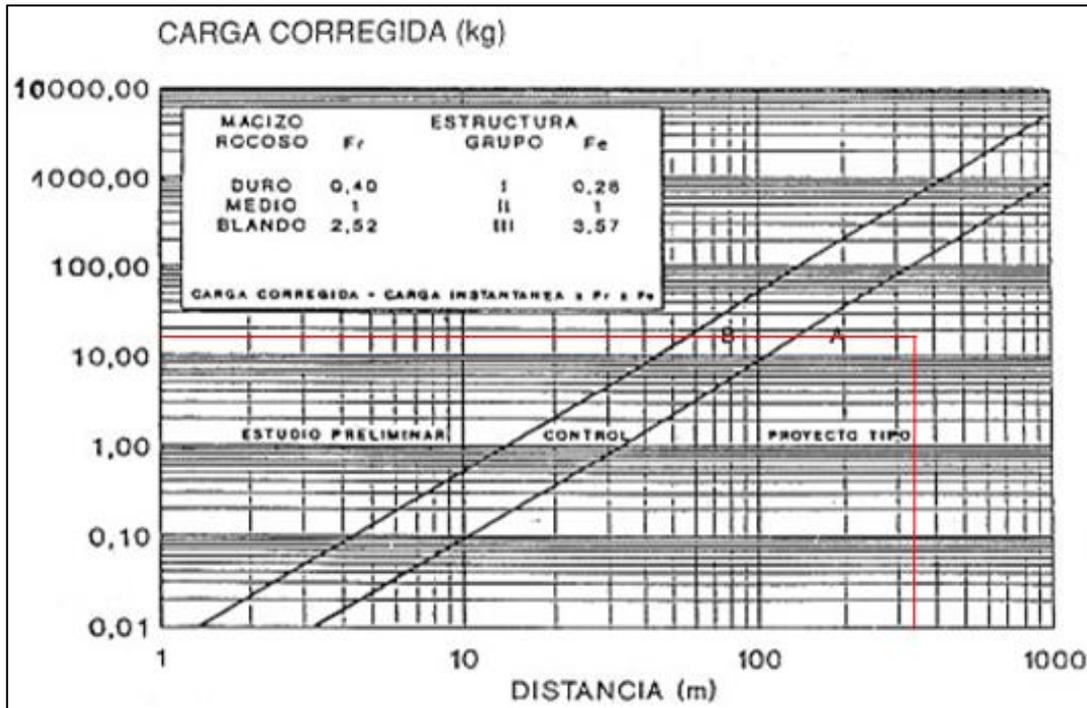


Tabla 7-4 Tabla carga/distancia general para selección del tipo de estudio. Maxam

Nos situamos dentro de la región de Proyecto tipo, por lo que se descarta cualquier incidencia producida por las vibraciones en los edificios colindantes.

7.2 Efecto de las vibraciones sobre las personas

Es preciso contar con el efecto fisiológico de las vibraciones en las personas, ya que con niveles inferiores a los máximos admisibles para no producir daños en las estructuras pueden producir un índice de percepción diferente en las personas. Por lo que es frecuente en muchos proyectos que los umbrales se adopten más sobre la base de la respuesta humana que sobre la probabilidad de daños estructurales.

Para el cálculo de todo ello nos basaremos en el trabajo realizado por Goldman (1948) que presenta una serie de gráficos donde en función de la frecuencia e intensidad de vibración establecen distintos niveles de percepción.

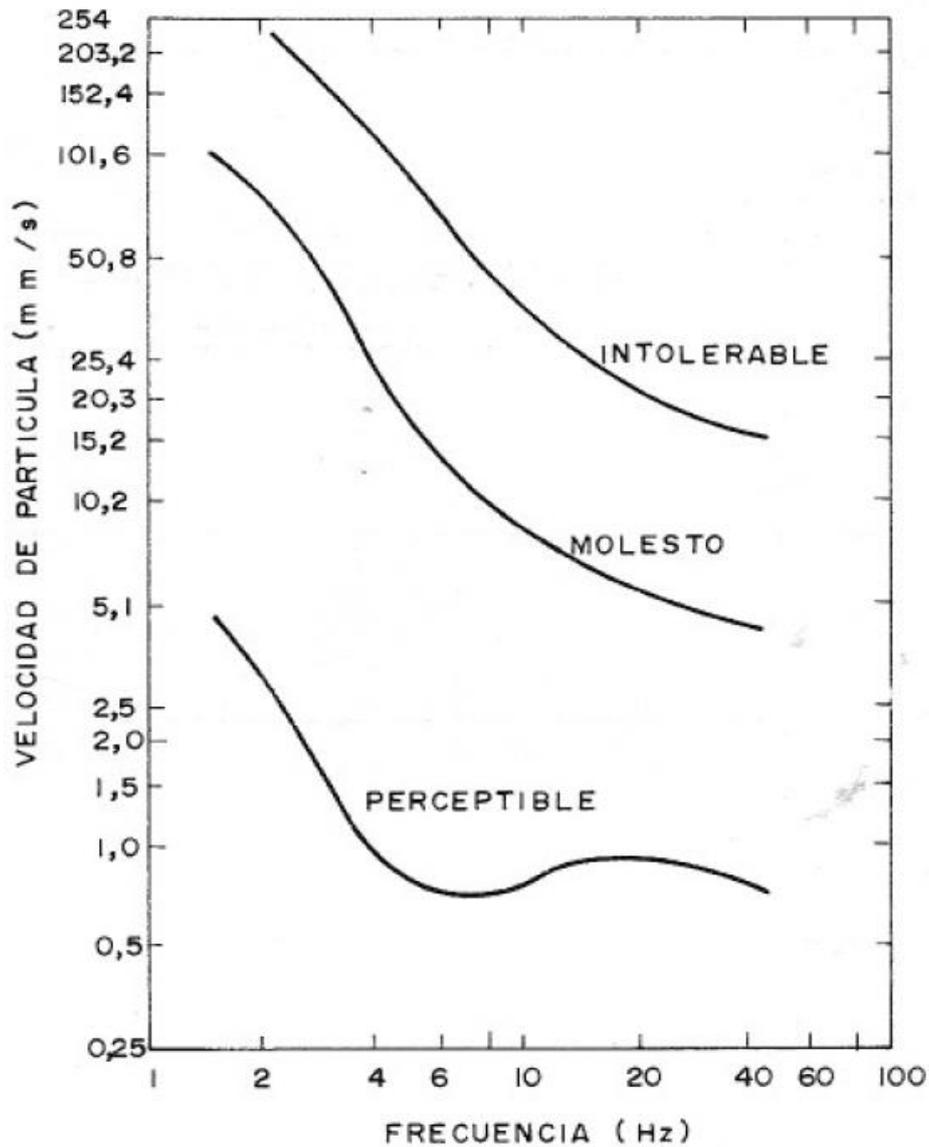


Ilustración 26 Respuestas humanas a las vibraciones. Goldman, 1948.

La velocidad de partícula se calcula mediante la expresión³:

$$v = v_o * F_K * F_d * F_t$$

³ Atendiendo a la Norma Sueca. (Manual de Perforación y voladura de Rocas. López Jimeno)

Donde:

- V_o , velocidad máxima de partícula vertical sin corregir (mm/s).
- F_k , Factor de calidad de la construcción.
- F_d , Factor de distancia que tiene en cuenta la separación entre la voladura y el punto de registro.
- F_t , Factor de tiempo con el que se tiene en cuenta la duración de los trabajos con explosivos.

Los valores de velocidad máxima de partícula vertical que suelen utilizarse se recogen en la siguiente tabla:

TIPO DE TERRENO	V_o (mm/s)
- Gravas, arenas, arcillas, morrena suelta	18
- Caliza blanda, pizarra blanda, morrena firme	35
- Granito, gneis, caliza dura, arenisca, cuarcita, diabasa	70

Tabla 7-5 Valores de velocidad máxima de partícula. Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno

El factor de calidad de construcción se obtiene como el producto del Factor de Edificación y el factor de Material de construcción:

$$F_k = F_b * F_m$$

Los valores del factor de edificación y el factor de material de construcción se obtienen de las siguientes tablas:

CLASE	TIPO DE CONSTRUCCION	F _b
1	Construcciones pesadas como puentes, diques portuarios y construcciones de defensa civil.	1,70
2	Edificios industriales y de oficinas.	1,20
3	Edificios de viviendas estándar.	1,00
4	Edificios especialmente sensibles con grandes arcos, o construcciones con grandes paneles, por ejemplo iglesias y museos.	0,65
5	Edificios históricos en estado precario, y con ciertas ruinas.	0,50

Tabla 7-6 Valores del factor de edificación. Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno

CLASE	TIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCION	F _m
1	Hormigón armado, acero, o madera	1,20
2	Hormigón en masa, ladrillo, o cementos	1,00
3	Hormigón poroso prefabricado	0,75
4	Tabiques prefabricados	0,65

Tabla 7-7 Valores del factor de material de construcción. Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno

Por lo que obtenemos un valor para el factor de calidad de Construcción, F_k de:

$$F_k = 1 * 1.20 = 1.20$$

El factor de distancia, F_d, se puede estimar a partir de la siguiente figura, tomándose la menor distancia existente entre el lugar de la voladura y el foco a estudiar:

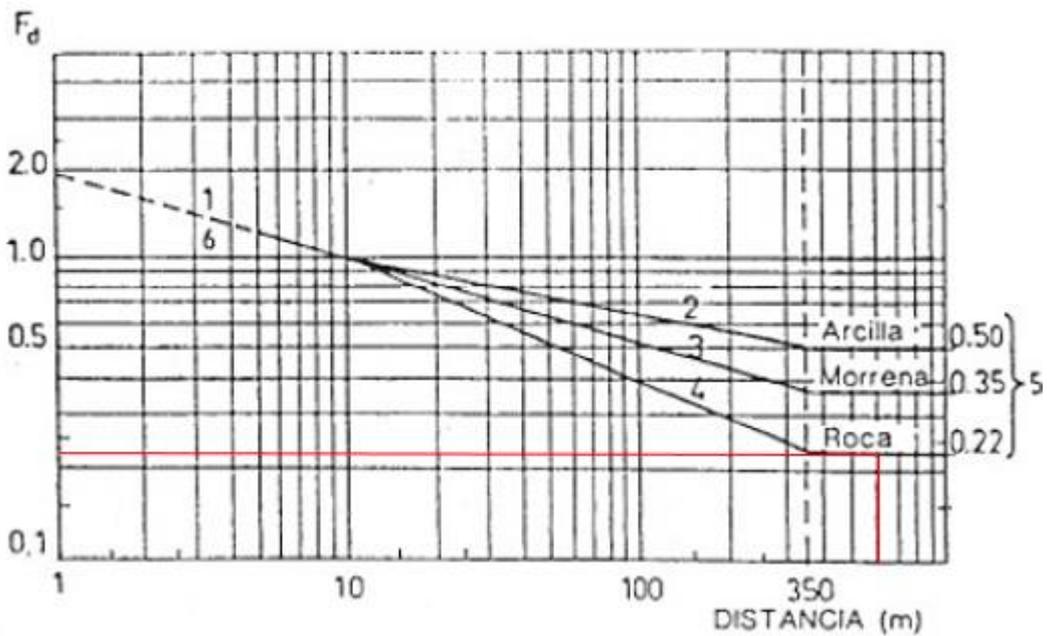


Tabla 7-8 Factor de distancia, F_d . Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno

Para distancias superiores a 350 m, se usa 0.22.

Por último el factor de duración del proyecto F_t depende del periodo de tiempo a lo largo del cual se van a realizar voladuras.

TIPO DE ACTIVIDAD	F_t
– Trabajos de construcción, tales como túneles, cámaras, trincheras para carreteras, zanjas y nivelaciones.	1,0
– Trabajos estacionarios, tales como los de canteras y minas	0,75 - 1,0

Tabla 7-9 Valores de factor de duración del proyecto. Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno

Con todo ello obtenemos una velocidad de partícula v de:

$$v = 70 * 1.20 * 0.22 * 1 = 18.48 \text{ mm/s}$$

Por lo que nos encontraríamos dentro del rango de percepción de

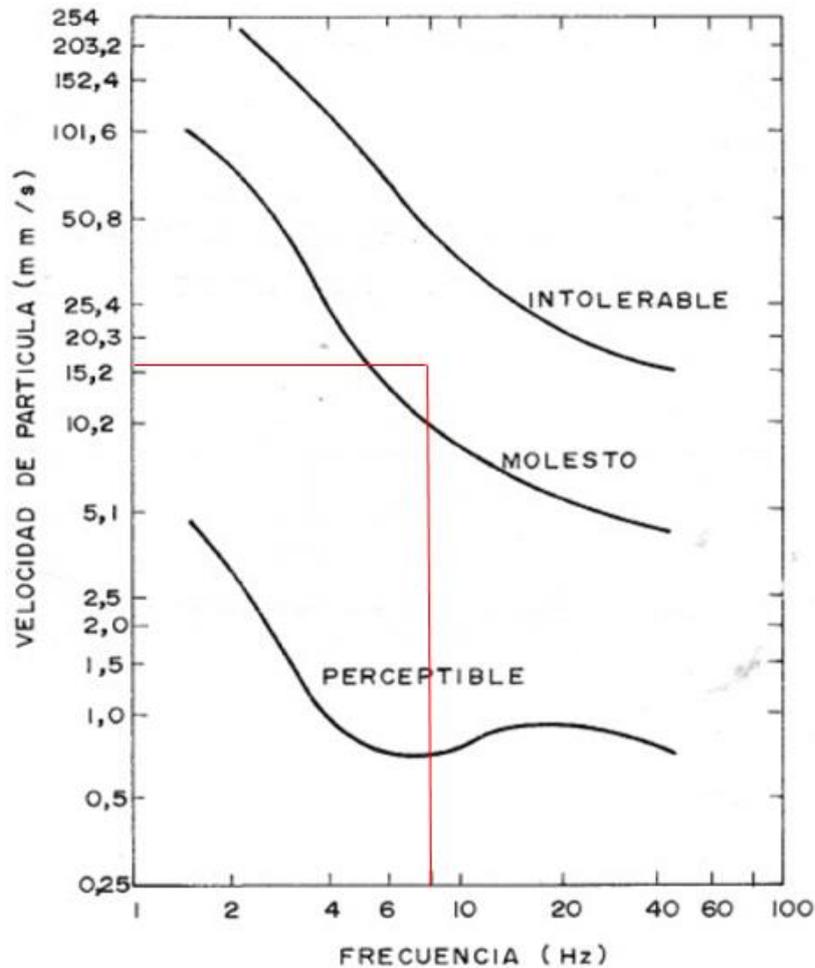


Ilustración 27 Respuestas humanas a las vibraciones según Goldman (1948). Manual de perforación y voladura de rocas. López Jimeno

Como observamos en la ilustración anterior nos encontramos dentro del rango de percepción molesto, debido a la proximidad de las voladuras, cabe mencionar que el estudio anterior no tiene en cuenta que una vez el proyecto del túnel se encuentre dentro del macizo rocoso, existirá una capa amortiguadora formada por el macizo rocoso que reducirá drásticamente la percepción. Aun así nos encontramos dentro del rango de molesto pero dentro de este rango en una zona inferior del rango , estando mucho más cerca del rango de perceptible que de intolerable.



8 Desescombro de la Voladura

Un rápido desescombrado de la galería será fundamental para poder iniciar las tareas de sostenimiento. Sacando el escombros al exterior para no dificultar el movimiento de máquinas y materiales por el túnel

El sistema a emplear dependerá de:

- Material a transportar por ciclo.
- Condiciones geométricas del túnel.

Normalmente en túneles de carretera las secciones de excavación son grandes (entre 80 y 110 m² por lo general), con lo que el volumen de escombros es importante.

Entrando directamente a la cuestión de nuestro proyecto, sin entrar en la descripción de toda la tipología de métodos y maquinaria existente, el sistema de transporte más usual que se recomienda teóricamente para túneles con distancias mayores de 500 metros y gran sección, >70m² es el uso conjunto de pala cargadora, normalmente articulada, y camiones Dúmper.

8.1 Volumen de Escombros

El túnel proyectado en el presente proyecto se excavara en dos fases:

1. Fase 1, Se excavara toda la sección de Avance.
2. Fase 2, en donde se excavara toda la sección del Avance en destroza.

8.1.1 Volúmenes a Desescombrar

8.1.1.1 Volumen de escombros en la sección de Avance

En la sección de avance el volumen a desescombrar en cada voladura será de:

$$V = A * L$$

Donde:

- A, Área o sección del Avance (m²).
- L, Longitud del avance o pase.

Con lo que obtenemos un volumen de desescombro de:



$$V = 45 * 4 = 180 \text{ m}^3$$

A este volumen le tendremos que aplicar el correspondiente factor de esponjamiento debido al aumento del volumen de la roca tras ser removida de su estado natural en la voladura. Este factor lo calcularemos con la siguiente expresión:

$$FE = \frac{\gamma_{banco}}{\gamma_{volado}}$$



WEIGHT* OF MATERIALS	LOOSE		BANK		LOAD FACTORS
	kg/m ³	lb/yd ³	kg/m ³	lb/yd ³	
Basalt	1960	3300	2970	5000	0.67
Bauxite, Kaolin	1420	2400	1900	3200	0.75
Caliche	1250	2100	2260	3800	0.55
Carnotite, uranium ore	1630	2750	2200	3700	0.74
Cinders	560	950	860	1450	0.66
Clay — Natural bed	1660	2800	2020	3400	0.82
Dry	1480	2500	1840	3100	0.81
Wet	1660	2800	2080	3500	0.80
Clay & gravel — Dry	1420	2400	1660	2800	0.85
Wet	1540	2600	1840	3100	0.85
Coal — Anthracite, Raw	1190	2000	1600	2700	0.74
Washed	1100	1850			0.74
Ash, Bituminous Coal	530-650	900-1100	590-890	1000-1500	0.93
Bituminous, Raw	950	1600	1280	2150	0.74
Washed	830	1400			0.74
Decomposed rock —					
75% Rock, 25% Earth	1960	3300	2790	4700	0.70
50% Rock, 50% Earth	1720	2900	2280	3850	0.75
25% Rock, 75% Earth	1570	2650	1960	3300	0.80
Earth — Dry packed	1510	2550	1900	3200	0.80
Wet excavated	1600	2700	2020	3400	0.79
Loam	1250	2100	1540	2600	0.81
Granite — Broken	1660	2800	2730	4600	0.61
Gravel — Pitrun	1930	3250	2170	3650	0.89
Dry	1510	2550	1690	2850	0.89
Dry 6-50 mm (1/4"-2")	1690	2850	1900	3200	0.89
Wet 6-50 mm (1/4"-2")	2020	3400	2260	3800	0.89
Gypsum — Broken	1810	3050	3170	5350	0.57
Crushed	1600	2700	2790	4700	0.57
Hematite, iron ore, high grade	1810-2450	4000-5400	2130-2900	4700-6400	0.85
Limestone — Broken	1540	2600	2610	4400	0.59
Crushed	1540	2600	—	—	—
Magnetite, iron ore	2790	4700	3260	5500	0.85
Pyrite, iron ore	2580	4350	3030	5100	0.85
Sand — Dry, loose	1420	2400	1600	2700	0.89
Damp	1690	2850	1900	3200	0.89
Wet	1840	3100	2080	3500	0.89
Sand & clay — Loose	1600	2700	2020	3400	0.79
Compacted	2400	4050			
Sand & gravel — Dry	1720	2900	1930	3250	0.89
Wet	2020	3400	2230	3750	0.91
Sandstone	1510	2550	2520	4250	0.60
Shale	1250	2100	1660	2800	0.75
Slag — Broken	1750	2950	2940	4950	0.60
Snow — Dry	130	220			
Wet	520	860			
Stone — Crushed	1600	2700	2670	4500	0.60
Taconite	1630-1900	3600-4200	2360-2700	5200-6100	0.58
Top Soil	950	1600	1370	2300	0.70
Taprock — Broken	1750	2950	2610	4400	0.67
Wood Chips**	—	—	—	—	—

Ilustración 28 Valores de las densidades de diferentes materiales según este suelto (Loose) o en banco (Bank). Caterpillar Performance Handbook.

Obteniendo los valores de la tabla anterior para el material suelto (loose) o en banco (bank), obtenemos un factor de esponjamiento de:

$$FE = \frac{1600}{2670} = 0.6$$

Por lo que el volumen total a tratar en cada voladura de avance será de:

$$V_T = 180 * \frac{1}{0.6} = 300 \text{ m}^3$$

8.1.1.2 Volumen a desescombrar en el Avance en destroza

Aplicando el mismo procedimiento que el del punto anterior, el volumen a desescombrar en el avance en destroza será de:

$$V = A * L = 31 * 4 = 124 \text{ m}^3$$

Aplicando el factor de esponjamiento calculado:

$$V_T = 124 * \frac{1}{0.6} = 206.6 \text{ m}^3$$

8.1.2 Selección de la maquinaria

Se analizaran cuatro equipos distintos, dos para el trabajo de desescombro en avance y dos para el de destroza.

Los factores que se tendrán en cuenta para la selección del equipo adecuado serán:

- Dimensionales, que el equipo se adapte a las dimensiones libres en obra según previsión del diseñador de la obra.
- Económico, en lo posible se ajustara la excavación a la maquinaria más rentable, aunque en las excavaciones de interior existen condicionantes geomecánicos que dificultan esto.
- Productivos, que la maquinaria tenga la producción, en m³/h ajustada al tiempo de ciclo, generalmente la mayor posible.
- Seguridad, No se sobrepase la carga máxima para el limite estático en pendiente.
- Versatilidad, la maquinaria seleccionada debe ser lo más versátil posible para que sea multifuncional y se le dé la máxima utilización.
- Rendimiento en obra, los rendimientos esperados son del 80%, esto quiere decir un trabajo real de 48 minutos por cada 60 minutos transcurridos.

Para llevar a cabo la operación de desescombro se ha seleccionado la siguiente maquinaria:

- Pala de Ruedas Caterpillar 930M.



- Dos camiones articulados Caterpillar 735C.

8.2 Tiempos de Ciclo

8.2.1 Desescombros del Avance

Para cada voladura de Avance, se produce un total de 300 m³ de escombros a retirar.

Utilizando la maquinaria seleccionada, obtenemos que en la situación más desfavorable de desescombros, producida al final del túnel el tiempo necesario para toda la operación de desescombros será de 2.59 horas es decir 2 horas y 35 minutos y en el más favorable, en el primer pase, será de 1.18 horas es decir 1 hora y 10 minutos.

En la siguiente tabla se muestran los datos de tiempos de ciclo para cada pase hasta completar el desescombros total del túnel.



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m³ Viaje camión 1	m³ Viaje camión 2	m³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
4	4,16	0,96	272	272,96	2,77	1,44	284,41	20	8	7	160	140	300	1,19
8	4,16	1,92	272	273,92	2,77	2,89	286,81	20	8	7	160	140	600	1,20
12	4,16	2,88	272	274,88	2,77	4,33	289,22	20	8	7	160	140	900	1,21
16	4,16	3,85	272	275,85	2,77	5,78	291,62	20	8	7	160	140	1200	1,22
20	4,16	4,81	272	276,81	2,77	7,22	294,03	20	8	7	160	140	1500	1,23
24	4,16	5,77	272	277,77	2,77	8,66	296,43	20	8	7	160	140	1800	1,24
28	4,16	6,73	272	278,73	2,77	10,11	298,84	20	8	7	160	140	2100	1,25
32	4,16	7,69	272	279,69	2,77	11,55	301,24	20	8	7	160	140	2400	1,26
36	4,16	8,65	272	280,65	2,77	13,00	303,65	20	8	7	160	140	2700	1,27
40	4,16	9,62	272	281,62	2,77	14,44	306,06	20	8	7	160	140	3000	1,28
44	4,16	10,58	272	282,58	2,77	15,88	308,46	20	8	7	160	140	3300	1,29



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
48	4,16	11,54	272	283,54	2,77	17,33	310,87	20	8	7	160	140	3600	1,30
52	4,16	12,50	272	284,50	2,77	18,77	313,27	20	8	7	160	140	3900	1,31
56	4,16	13,46	272	285,46	2,77	20,22	315,68	20	8	7	160	140	4200	1,32
60	4,16	14,42	272	286,42	2,77	21,66	318,08	20	8	7	160	140	4500	1,33
64	4,16	15,38	272	287,38	2,77	23,10	320,49	20	8	7	160	140	4800	1,34
68	4,16	16,35	272	288,35	2,77	24,55	322,89	20	8	7	160	140	5100	1,35
72	4,16	17,31	272	289,31	2,77	25,99	325,30	20	8	7	160	140	5400	1,36
76	4,16	18,27	272	290,27	2,77	27,44	327,71	20	8	7	160	140	5700	1,37
80	4,16	19,23	272	291,23	2,77	28,88	330,11	20	8	7	160	140	6000	1,38
84	4,16	20,19	272	292,19	2,77	30,32	332,52	20	8	7	160	140	6300	1,39
88	4,16	21,15	272	293,15	2,77	31,77	334,92	20	8	7	160	140	6600	1,40
92	4,16	22,12	272	294,12	2,77	33,21	337,33	20	8	7	160	140	6900	1,41



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
96	4,16	23,08	272	295,08	2,77	34,66	339,73	20	8	7	160	140	7200	1,42
100	4,16	24,04	272	296,04	2,77	36,10	342,14	20	8	7	160	140	7500	1,43
104	4,16	25,00	272	297,00	2,77	37,55	344,55	20	8	7	160	140	7800	1,44
108	4,16	25,96	272	297,96	2,77	38,99	346,95	20	8	7	160	140	8100	1,45
112	4,16	26,92	272	298,92	2,77	40,43	349,36	20	8	7	160	140	8400	1,46
116	4,16	27,88	272	299,88	2,77	41,88	351,76	20	8	7	160	140	8700	1,47
120	4,16	28,85	272	300,85	2,77	43,32	354,17	20	8	7	160	140	9000	1,48
124	4,16	29,81	272	301,81	2,77	44,77	356,57	20	8	7	160	140	9300	1,49
128	4,16	30,77	272	302,77	2,77	46,21	358,98	20	8	7	160	140	9600	1,50
132	4,16	31,73	272	303,73	2,77	47,65	361,38	20	8	7	160	140	9900	1,51
136	4,16	32,69	272	304,69	2,77	49,10	363,79	20	8	7	160	140	10200	1,52
140	4,16	33,65	272	305,65	2,77	50,54	366,20	20	8	7	160	140	10500	1,53



UPV EHU

Anejo Voladuras

Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
144	4,16	34,62	272	306,62	2,77	51,99	368,60	20	8	7	160	140	10800	1,54
148	4,16	35,58	272	307,58	2,77	53,43	371,01	20	8	7	160	140	11100	1,55
152	4,16	36,54	272	308,54	2,77	54,87	373,41	20	8	7	160	140	11400	1,56
156	4,16	37,50	272	309,50	2,77	56,32	375,82	20	8	7	160	140	11700	1,57
160	4,16	38,46	272	310,46	2,77	57,76	378,22	20	8	7	160	140	12000	1,58
164	4,16	39,42	272	311,42	2,77	59,21	380,63	20	8	7	160	140	12300	1,59
168	4,16	40,38	272	312,38	2,77	60,65	383,03	20	8	7	160	140	12600	1,60
172	4,16	41,35	272	313,35	2,77	62,09	385,44	20	8	7	160	140	12900	1,61
176	4,16	42,31	272	314,31	2,77	63,54	387,85	20	8	7	160	140	13200	1,62
180	4,16	43,27	272	315,27	2,77	64,98	390,25	20	8	7	160	140	13500	1,63
184	4,16	44,23	272	316,23	2,77	66,43	392,66	20	8	7	160	140	13800	1,64
188	4,16	45,19	272	317,19	2,77	67,87	395,06	20	8	7	160	140	14100	1,65



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
192	4,16	46,15	272	318,15	2,77	69,31	397,47	20	8	7	160	140	14400	1,66
196	4,16	47,12	272	319,12	2,77	70,76	399,87	20	8	7	160	140	14700	1,67
200	4,16	48,08	272	320,08	2,77	72,20	402,28	20	8	7	160	140	15000	1,68
204	4,16	49,04	272	321,04	2,77	73,65	404,68	20	8	7	160	140	15300	1,69
208	4,16	50,00	272	322,00	2,77	75,09	407,09	20	8	7	160	140	15600	1,70
212	4,16	50,96	272	322,96	2,77	76,53	409,50	20	8	7	160	140	15900	1,71
216	4,16	51,92	272	323,92	2,77	77,98	411,90	20	8	7	160	140	16200	1,72
220	4,16	52,88	272	324,88	2,77	79,42	414,31	20	8	7	160	140	16500	1,73
224	4,16	53,85	272	325,85	2,77	80,87	416,71	20	8	7	160	140	16800	1,74
228	4,16	54,81	272	326,81	2,77	82,31	419,12	20	8	7	160	140	17100	1,75
232	4,16	55,77	272	327,77	2,77	83,75	421,52	20	8	7	160	140	17400	1,76
236	4,16	56,73	272	328,73	2,77	85,20	423,93	20	8	7	160	140	17700	1,77



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
240	4,16	57,69	272	329,69	2,77	86,64	426,33	20	8	7	160	140	18000	1,78
244	4,16	58,65	272	330,65	2,77	88,09	428,74	20	8	7	160	140	18300	1,79
248	4,16	59,62	272	331,62	2,77	89,53	431,15	20	8	7	160	140	18600	1,80
252	4,16	60,58	272	332,58	2,77	90,97	433,55	20	8	7	160	140	18900	1,81
256	4,16	61,54	272	333,54	2,77	92,42	435,96	20	8	7	160	140	19200	1,82
260	4,16	62,50	272	334,50	2,77	93,86	438,36	20	8	7	160	140	19500	1,83
264	4,16	63,46	272	335,46	2,77	95,31	440,77	20	8	7	160	140	19800	1,84
268	4,16	64,42	272	336,42	2,77	96,75	443,17	20	8	7	160	140	20100	1,85
272	4,16	65,38	272	337,38	2,77	98,19	445,58	20	8	7	160	140	20400	1,86
276	4,16	66,35	272	338,35	2,77	99,64	447,99	20	8	7	160	140	20700	1,87
280	4,16	67,31	272	339,31	2,77	101,08	450,39	20	8	7	160	140	21000	1,88
284	4,16	68,27	272	340,27	2,77	102,53	452,80	20	8	7	160	140	21300	1,89



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
288	4,16	69,23	272	341,23	2,77	103,97	455,20	20	8	7	160	140	21600	1,90
292	4,16	70,19	272	342,19	2,77	105,42	457,61	20	8	7	160	140	21900	1,91
296	4,16	71,15	272	343,15	2,77	106,86	460,01	20	8	7	160	140	22200	1,92
300	4,16	72,12	272	344,12	2,77	108,30	462,42	20	8	7	160	140	22500	1,93
304	4,16	73,08	272	345,08	2,77	109,75	464,82	20	8	7	160	140	22800	1,94
308	4,16	74,04	272	346,04	2,77	111,19	467,23	20	8	7	160	140	23100	1,95
312	4,16	75,00	272	347,00	2,77	112,64	469,64	20	8	7	160	140	23400	1,96
316	4,16	75,96	272	347,96	2,77	114,08	472,04	20	8	7	160	140	23700	1,97
320	4,16	76,92	272	348,92	2,77	115,52	474,45	20	8	7	160	140	24000	1,98
324	4,16	77,88	272	349,88	2,77	116,97	476,85	20	8	7	160	140	24300	1,99
328	4,16	78,85	272	350,85	2,77	118,41	479,26	20	8	7	160	140	24600	2,00
332	4,16	79,81	272	351,81	2,77	119,86	481,66	20	8	7	160	140	24900	2,01



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
336	4,16	80,77	272	352,77	2,77	121,30	484,07	20	8	7	160	140	25200	2,02
340	4,16	81,73	272	353,73	2,77	122,74	486,47	20	8	7	160	140	25500	2,03
344	4,16	82,69	272	354,69	2,77	124,19	488,88	20	8	7	160	140	25800	2,04
348	4,16	83,65	272	355,65	2,77	125,63	491,29	20	8	7	160	140	26100	2,05
352	4,16	84,62	272	356,62	2,77	127,08	493,69	20	8	7	160	140	26400	2,06
356	4,16	85,58	272	357,58	2,77	128,52	496,10	20	8	7	160	140	26700	2,07
360	4,16	86,54	272	358,54	2,77	129,96	498,50	20	8	7	160	140	27000	2,08
364	4,16	87,50	272	359,50	2,77	131,41	500,91	20	8	7	160	140	27300	2,09
368	4,16	88,46	272	360,46	2,77	132,85	503,31	20	8	7	160	140	27600	2,10
372	4,16	89,42	272	361,42	2,77	134,30	505,72	20	8	7	160	140	27900	2,11
376	4,16	90,38	272	362,38	2,77	135,74	508,12	20	8	7	160	140	28200	2,12
380	4,16	91,35	272	363,35	2,77	137,18	510,53	20	8	7	160	140	28500	2,13



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
384	4,16	92,31	272	364,31	2,77	138,63	512,94	20	8	7	160	140	28800	2,14
388	4,16	93,27	272	365,27	2,77	140,07	515,34	20	8	7	160	140	29100	2,15
392	4,16	94,23	272	366,23	2,77	141,52	517,75	20	8	7	160	140	29400	2,16
396	4,16	95,19	272	367,19	2,77	142,96	520,15	20	8	7	160	140	29700	2,17
400	4,16	96,15	272	368,15	2,77	144,40	522,56	20	8	7	160	140	30000	2,18
404	4,16	97,12	272	369,12	2,77	145,85	524,96	20	8	7	160	140	30300	2,19
408	4,16	98,08	272	370,08	2,77	147,29	527,37	20	8	7	160	140	30600	2,20
412	4,16	99,04	272	371,04	2,77	148,74	529,77	20	8	7	160	140	30900	2,21
416	4,16	100,00	272	372,00	2,77	150,18	532,18	20	8	7	160	140	31200	2,22
420	4,16	100,96	272	372,96	2,77	151,62	534,59	20	8	7	160	140	31500	2,23
424	4,16	101,92	272	373,92	2,77	153,07	536,99	20	8	7	160	140	31800	2,24
428	4,16	102,88	272	374,88	2,77	154,51	539,40	20	8	7	160	140	32100	2,25



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
432	4,16	103,85	272	375,85	2,77	155,96	541,80	20	8	7	160	140	32400	2,26
436	4,16	104,81	272	376,81	2,77	157,40	544,21	20	8	7	160	140	32700	2,27
440	4,16	105,77	272	377,77	2,77	158,84	546,61	20	8	7	160	140	33000	2,28
444	4,16	106,73	272	378,73	2,77	160,29	549,02	20	8	7	160	140	33300	2,29
448	4,16	107,69	272	379,69	2,77	161,73	551,43	20	8	7	160	140	33600	2,30
452	4,16	108,65	272	380,65	2,77	163,18	553,83	20	8	7	160	140	33900	2,31
456	4,16	109,62	272	381,62	2,77	164,62	556,24	20	8	7	160	140	34200	2,32
460	4,16	110,58	272	382,58	2,77	166,06	558,64	20	8	7	160	140	34500	2,33
464	4,16	111,54	272	383,54	2,77	167,51	561,05	20	8	7	160	140	34800	2,34
468	4,16	112,50	272	384,50	2,77	168,95	563,45	20	8	7	160	140	35100	2,35
472	4,16	113,46	272	385,46	2,77	170,40	565,86	20	8	7	160	140	35400	2,36
476	4,16	114,42	272	386,42	2,77	171,84	568,26	20	8	7	160	140	35700	2,37



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
480	4,16	115,38	272	387,38	2,77	173,29	570,67	20	8	7	160	140	36000	2,38
484	4,16	116,35	272	388,35	2,77	174,73	573,08	20	8	7	160	140	36300	2,39
488	4,16	117,31	272	389,31	2,77	176,17	575,48	20	8	7	160	140	36600	2,40
492	4,16	118,27	272	390,27	2,77	177,62	577,89	20	8	7	160	140	36900	2,41
496	4,16	119,23	272	391,23	2,77	179,06	580,29	20	8	7	160	140	37200	2,42
500	4,16	120,19	272	392,19	2,77	180,51	582,70	20	8	7	160	140	37500	2,43
504	4,16	121,15	272	393,15	2,77	181,95	585,10	20	8	7	160	140	37800	2,44
508	4,16	122,12	272	394,12	2,77	183,39	587,51	20	8	7	160	140	38100	2,45
512	4,16	123,08	272	395,08	2,77	184,84	589,91	20	8	7	160	140	38400	2,46
516	4,16	124,04	272	396,04	2,77	186,28	592,32	20	8	7	160	140	38700	2,47
520	4,16	125,00	272	397,00	2,77	187,73	594,73	20	8	7	160	140	39000	2,48
524	4,16	125,96	272	397,96	2,77	189,17	597,13	20	8	7	160	140	39300	2,49



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T carga llenado camión (s)	T. Viaje ida y carga	V de vuelta (m/s)	T. Vuelta	T. Ida+Carga+Vuelta+Descarga	m ³ por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº 2	m ³ Viaje camión 1	m ³ Viaje camión 2	m ³ Acumulados	T.Total para desescombrar el pase(h)
528	4,16	126,92	272	398,92	2,77	190,61	599,54	20	8	7	160	140	39600	2,50
532	4,16	127,88	272	399,88	2,77	192,06	601,94	20	8	7	160	140	39900	2,51
536	4,16	128,85	272	400,85	2,77	193,50	604,35	20	8	7	160	140	40200	2,52
540	4,16	129,81	272	401,81	2,77	194,95	606,75	20	8	7	160	140	40500	2,53
544	4,16	130,77	272	402,77	2,77	196,39	609,16	20	8	7	160	140	40800	2,54
548	4,16	131,73	272	403,73	2,77	197,83	611,56	20	8	7	160	140	41100	2,55
552	4,16	132,69	272	404,69	2,77	199,28	613,97	20	8	7	160	140	41400	2,56
556	4,16	133,65	272	405,65	2,77	200,72	616,38	20	8	7	160	140	41700	2,57
560	4,16	134,62	272	406,62	2,77	202,17	618,78	20	8	7	160	140	42000	2,58
564	4,16	135,58	272	407,58	2,77	203,61	621,19	20	8	7	160	140	42300	2,59
568	4,16	136,54	272	408,54	2,77	205,05	623,59	20	8	7	160	140	42600	2,60

Tabla 8-1 Datos de la operación de desescombro del Avance. Elaboración Propia



8.2.2 Desescombro Avance en destroza

Para el avance en destroza tenemos se producen para cada pase de la voladura 206.6 m³ de escombros.

La operación de desescombrado se llevara tal y como se muestra en la tabla a continuación.



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenada (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Des carga (s).	m3 por viaje	Viajes camión Nº1	Viajes camión Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
4	4,16	0,96	272	272,96	2,77	1,44	2,41	284,41	20,66	5	5	103,32	103,32	206,63	1,19
8	4,16	1,92	272	273,92	2,77	2,89	4,81	286,81	20,66	5	5	103,32	103,32	413,26	1,20
12	4,16	2,88	272	274,88	2,77	4,33	7,22	289,22	20,66	5	5	103,32	103,32	619,89	1,21
16	4,16	3,85	272	275,85	2,77	5,78	9,62	291,62	20,66	5	5	103,32	103,32	826,52	1,22
20	4,16	4,81	272	276,81	2,77	7,22	12,03	294,03	20,66	5	5	103,32	103,32	1033,15	1,23
24	4,16	5,77	272	277,77	2,77	8,66	14,43	296,43	20,66	5	5	103,32	103,32	1239,78	1,24
28	4,16	6,73	272	278,73	2,77	10,11	16,84	298,84	20,66	5	5	103,32	103,32	1446,41	1,25
32	4,16	7,69	272	279,69	2,77	11,55	19,24	301,24	20,66	5	5	103,32	103,32	1653,04	1,26
36	4,16	8,65	272	280,65	2,77	13,00	21,65	303,65	20,66	5	5	103,32	103,32	1859,67	1,27
40	4,16	9,62	272	281,62	2,77	14,44	24,06	306,06	20,66	5	5	103,32	103,32	2066,3	1,28
44	4,16	10,58	272	282,58	2,77	15,88	26,46	308,46	20,66	5	5	103,32	103,32	2272,93	1,29



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
48	4,16	11,54	272	283,54	2,77	17,33	28,87	310,87	20,66	5	5	103,32	103,32	2479,56	1,30
52	4,16	12,50	272	284,50	2,77	18,77	31,27	313,27	20,66	5	5	103,32	103,32	2686,19	1,31
56	4,16	13,46	272	285,46	2,77	20,22	33,68	315,68	20,66	5	5	103,32	103,32	2892,82	1,32
60	4,16	14,42	272	286,42	2,77	21,66	36,08	318,08	20,66	5	5	103,32	103,32	3099,45	1,33
64	4,16	15,38	272	287,38	2,77	23,10	38,49	320,49	20,66	5	5	103,32	103,32	3306,08	1,34
68	4,16	16,35	272	288,35	2,77	24,55	40,89	322,89	20,66	5	5	103,32	103,32	3512,71	1,35
72	4,16	17,31	272	289,31	2,77	25,99	43,30	325,30	20,66	5	5	103,32	103,32	3719,34	1,36
76	4,16	18,27	272	290,27	2,77	27,44	45,71	327,71	20,66	5	5	103,32	103,32	3925,97	1,37
80	4,16	19,23	272	291,23	2,77	28,88	48,11	330,11	20,66	5	5	103,32	103,32	4132,6	1,38
84	4,16	20,19	272	292,19	2,77	30,32	50,52	332,52	20,66	5	5	103,32	103,32	4339,23	1,39
88	4,16	21,15	272	293,15	2,77	31,77	52,92	334,92	20,66	5	5	103,32	103,32	4545,86	1,40
92	4,16	22,12	272	294,12	2,77	33,21	55,33	337,33	20,66	5	5	103,32	103,32	4752,49	1,41



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
96	4,16	23,08	272	295,08	2,77	34,66	57,73	339,73	20,66	5	5	103,32	103,32	4959,12	1,42
100	4,16	24,04	272	296,04	2,77	36,10	60,14	342,14	20,66	5	5	103,32	103,32	5165,75	1,43
104	4,16	25,00	272	297,00	2,77	37,55	62,55	344,55	20,66	5	5	103,32	103,32	5372,38	1,44
108	4,16	25,96	272	297,96	2,77	38,99	64,95	346,95	20,66	5	5	103,32	103,32	5579,01	1,45
112	4,16	26,92	272	298,92	2,77	40,43	67,36	349,36	20,66	5	5	103,32	103,32	5785,64	1,46
116	4,16	27,88	272	299,88	2,77	41,88	69,76	351,76	20,66	5	5	103,32	103,32	5992,27	1,47
120	4,16	28,85	272	300,85	2,77	43,32	72,17	354,17	20,66	5	5	103,32	103,32	6198,9	1,48
124	4,16	29,81	272	301,81	2,77	44,77	74,57	356,57	20,66	5	5	103,32	103,32	6405,53	1,49
128	4,16	30,77	272	302,77	2,77	46,21	76,98	358,98	20,66	5	5	103,32	103,32	6612,16	1,50
132	4,16	31,73	272	303,73	2,77	47,65	79,38	361,38	20,66	5	5	103,32	103,32	6818,79	1,51
136	4,16	32,69	272	304,69	2,77	49,10	81,79	363,79	20,66	5	5	103,32	103,32	7025,42	1,52
140	4,16	33,65	272	305,65	2,77	50,54	84,20	366,20	20,66	5	5	103,32	103,32	7232,05	1,53



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
144	4,16	34,62	272	306,62	2,77	51,99	86,60	368,60	20,66	5	5	103,32	103,32	7438,68	1,54
148	4,16	35,58	272	307,58	2,77	53,43	89,01	371,01	20,66	5	5	103,32	103,32	7645,31	1,55
152	4,16	36,54	272	308,54	2,77	54,87	91,41	373,41	20,66	5	5	103,32	103,32	7851,94	1,56
156	4,16	37,50	272	309,50	2,77	56,32	93,82	375,82	20,66	5	5	103,32	103,32	8058,57	1,57
160	4,16	38,46	272	310,46	2,77	57,76	96,22	378,22	20,66	5	5	103,32	103,32	8265,2	1,58
164	4,16	39,42	272	311,42	2,77	59,21	98,63	380,63	20,66	5	5	103,32	103,32	8471,83	1,59
168	4,16	40,38	272	312,38	2,77	60,65	101,03	383,03	20,66	5	5	103,32	103,32	8678,46	1,60
172	4,16	41,35	272	313,35	2,77	62,09	103,44	385,44	20,66	5	5	103,32	103,32	8885,09	1,61
176	4,16	42,31	272	314,31	2,77	63,54	105,85	387,85	20,66	5	5	103,32	103,32	9091,72	1,62
180	4,16	43,27	272	315,27	2,77	64,98	108,25	390,25	20,66	5	5	103,32	103,32	9298,35	1,63
184	4,16	44,23	272	316,23	2,77	66,43	110,66	392,66	20,66	5	5	103,32	103,32	9504,98	1,64
188	4,16	45,19	272	317,19	2,77	67,87	113,06	395,06	20,66	5	5	103,32	103,32	9711,61	1,65



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
192	4,16	46,15	272	318,15	2,77	69,31	115,47	397,47	20,66	5	5	103,32	103,32	9918,24	1,66
196	4,16	47,12	272	319,12	2,77	70,76	117,87	399,87	20,66	5	5	103,32	103,32	10124,87	1,67
200	4,16	48,08	272	320,08	2,77	72,20	120,28	402,28	20,66	5	5	103,32	103,32	10331,5	1,68
204	4,16	49,04	272	321,04	2,77	73,65	122,68	404,68	20,66	5	5	103,32	103,32	10538,13	1,69
208	4,16	50,00	272	322,00	2,77	75,09	125,09	407,09	20,66	5	5	103,32	103,32	10744,76	1,70
212	4,16	50,96	272	322,96	2,77	76,53	127,50	409,50	20,66	5	5	103,32	103,32	10951,39	1,71
216	4,16	51,92	272	323,92	2,77	77,98	129,90	411,90	20,66	5	5	103,32	103,32	11158,02	1,72
220	4,16	52,88	272	324,88	2,77	79,42	132,31	414,31	20,66	5	5	103,32	103,32	11364,65	1,73
224	4,16	53,85	272	325,85	2,77	80,87	134,71	416,71	20,66	5	5	103,32	103,32	11571,28	1,74
228	4,16	54,81	272	326,81	2,77	82,31	137,12	419,12	20,66	5	5	103,32	103,32	11777,91	1,75
232	4,16	55,77	272	327,77	2,77	83,75	139,52	421,52	20,66	5	5	103,32	103,32	11984,54	1,76
236	4,16	56,73	272	328,73	2,77	85,20	141,93	423,93	20,66	5	5	103,32	103,32	12191,17	1,77



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Des carga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
240	4,16	57,69	272	329,69	2,77	86,64	144,33	426,33	20,66	5	5	103,32	103,32	12397,8	1,78
244	4,16	58,65	272	330,65	2,77	88,09	146,74	428,74	20,66	5	5	103,32	103,32	12604,43	1,79
248	4,16	59,62	272	331,62	2,77	89,53	149,15	431,15	20,66	5	5	103,32	103,32	12811,06	1,80
252	4,16	60,58	272	332,58	2,77	90,97	151,55	433,55	20,66	5	5	103,32	103,32	13017,69	1,81
256	4,16	61,54	272	333,54	2,77	92,42	153,96	435,96	20,66	5	5	103,32	103,32	13224,32	1,82
260	4,16	62,50	272	334,50	2,77	93,86	156,36	438,36	20,66	5	5	103,32	103,32	13430,95	1,83
264	4,16	63,46	272	335,46	2,77	95,31	158,77	440,77	20,66	5	5	103,32	103,32	13637,58	1,84
268	4,16	64,42	272	336,42	2,77	96,75	161,17	443,17	20,66	5	5	103,32	103,32	13844,21	1,85
272	4,16	65,38	272	337,38	2,77	98,19	163,58	445,58	20,66	5	5	103,32	103,32	14050,84	1,86
276	4,16	66,35	272	338,35	2,77	99,64	165,99	447,99	20,66	5	5	103,32	103,32	14257,47	1,87
280	4,16	67,31	272	339,31	2,77	101,08	168,39	450,39	20,66	5	5	103,32	103,32	14464,1	1,88
284	4,16	68,27	272	340,27	2,77	102,53	170,80	452,80	20,66	5	5	103,32	103,32	14670,73	1,89



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
288	4,16	69,23	272	341,23	2,77	103,97	173,20	455,20	20,66	5	5	103,32	103,32	14877,36	1,90
292	4,16	70,19	272	342,19	2,77	105,42	175,61	457,61	20,66	5	5	103,32	103,32	15083,99	1,91
296	4,16	71,15	272	343,15	2,77	106,86	178,01	460,01	20,66	5	5	103,32	103,32	15290,62	1,92
300	4,16	72,12	272	344,12	2,77	108,30	180,42	462,42	20,66	5	5	103,32	103,32	15497,25	1,93
304	4,16	73,08	272	345,08	2,77	109,75	182,82	464,82	20,66	5	5	103,32	103,32	15703,88	1,94
308	4,16	74,04	272	346,04	2,77	111,19	185,23	467,23	20,66	5	5	103,32	103,32	15910,51	1,95
312	4,16	75,00	272	347,00	2,77	112,64	187,64	469,64	20,66	5	5	103,32	103,32	16117,14	1,96
316	4,16	75,96	272	347,96	2,77	114,08	190,04	472,04	20,66	5	5	103,32	103,32	16323,77	1,97
320	4,16	76,92	272	348,92	2,77	115,52	192,45	474,45	20,66	5	5	103,32	103,32	16530,4	1,98
324	4,16	77,88	272	349,88	2,77	116,97	194,85	476,85	20,66	5	5	103,32	103,32	16737,03	1,99
328	4,16	78,85	272	350,85	2,77	118,41	197,26	479,26	20,66	5	5	103,32	103,32	16943,66	2,00
332	4,16	79,81	272	351,81	2,77	119,86	199,66	481,66	20,66	5	5	103,32	103,32	17150,29	2,01



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
336	4,16	80,77	272	352,77	2,77	121,30	202,07	484,07	20,66	5	5	103,32	103,32	17356,92	2,02
340	4,16	81,73	272	353,73	2,77	122,74	204,47	486,47	20,66	5	5	103,32	103,32	17563,55	2,03
344	4,16	82,69	272	354,69	2,77	124,19	206,88	488,88	20,66	5	5	103,32	103,32	17770,18	2,04
348	4,16	83,65	272	355,65	2,77	125,63	209,29	491,29	20,66	5	5	103,32	103,32	17976,81	2,05
352	4,16	84,62	272	356,62	2,77	127,08	211,69	493,69	20,66	5	5	103,32	103,32	18183,44	2,06
356	4,16	85,58	272	357,58	2,77	128,52	214,10	496,10	20,66	5	5	103,32	103,32	18390,07	2,07
360	4,16	86,54	272	358,54	2,77	129,96	216,50	498,50	20,66	5	5	103,32	103,32	18596,7	2,08
364	4,16	87,50	272	359,50	2,77	131,41	218,91	500,91	20,66	5	5	103,32	103,32	18803,33	2,09
368	4,16	88,46	272	360,46	2,77	132,85	221,31	503,31	20,66	5	5	103,32	103,32	19009,96	2,10
372	4,16	89,42	272	361,42	2,77	134,30	223,72	505,72	20,66	5	5	103,32	103,32	19216,59	2,11
376	4,16	90,38	272	362,38	2,77	135,74	226,12	508,12	20,66	5	5	103,32	103,32	19423,22	2,12
380	4,16	91,35	272	363,35	2,77	137,18	228,53	510,53	20,66	5	5	103,32	103,32	19629,85	2,13



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
384	4,16	92,31	272	364,31	2,77	138,63	230,94	512,94	20,66	5	5	103,32	103,32	19836,48	2,14
388	4,16	93,27	272	365,27	2,77	140,07	233,34	515,34	20,66	5	5	103,32	103,32	20043,11	2,15
392	4,16	94,23	272	366,23	2,77	141,52	235,75	517,75	20,66	5	5	103,32	103,32	20249,74	2,16
396	4,16	95,19	272	367,19	2,77	142,96	238,15	520,15	20,66	5	5	103,32	103,32	20456,37	2,17
400	4,16	96,15	272	368,15	2,77	144,40	240,56	522,56	20,66	5	5	103,32	103,32	20663	2,18
404	4,16	97,12	272	369,12	2,77	145,85	242,96	524,96	20,66	5	5	103,32	103,32	20869,63	2,19
408	4,16	98,08	272	370,08	2,77	147,29	245,37	527,37	20,66	5	5	103,32	103,32	21076,26	2,20
412	4,16	99,04	272	371,04	2,77	148,74	247,77	529,77	20,66	5	5	103,32	103,32	21282,89	2,21
416	4,16	100,00	272	372,00	2,77	150,18	250,18	532,18	20,66	5	5	103,32	103,32	21489,52	2,22
420	4,16	100,96	272	372,96	2,77	151,62	252,59	534,59	20,66	5	5	103,32	103,32	21696,15	2,23
424	4,16	101,92	272	373,92	2,77	153,07	254,99	536,99	20,66	5	5	103,32	103,32	21902,78	2,24
428	4,16	102,88	272	374,88	2,77	154,51	257,40	539,40	20,66	5	5	103,32	103,32	22109,41	2,25



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
432	4,16	103,85	272	375,85	2,77	155,96	259,80	541,80	20,66	5	5	103,32	103,32	22316,04	2,26
436	4,16	104,81	272	376,81	2,77	157,40	262,21	544,21	20,66	5	5	103,32	103,32	22522,67	2,27
440	4,16	105,77	272	377,77	2,77	158,84	264,61	546,61	20,66	5	5	103,32	103,32	22729,3	2,28
444	4,16	106,73	272	378,73	2,77	160,29	267,02	549,02	20,66	5	5	103,32	103,32	22935,93	2,29
448	4,16	107,69	272	379,69	2,77	161,73	269,43	551,43	20,66	5	5	103,32	103,32	23142,56	2,30
452	4,16	108,65	272	380,65	2,77	163,18	271,83	553,83	20,66	5	5	103,32	103,32	23349,19	2,31
456	4,16	109,62	272	381,62	2,77	164,62	274,24	556,24	20,66	5	5	103,32	103,32	23555,82	2,32
460	4,16	110,58	272	382,58	2,77	166,06	276,64	558,64	20,66	5	5	103,32	103,32	23762,45	2,33
464	4,16	111,54	272	383,54	2,77	167,51	279,05	561,05	20,66	5	5	103,32	103,32	23969,08	2,34
468	4,16	112,50	272	384,50	2,77	168,95	281,45	563,45	20,66	5	5	103,32	103,32	24175,71	2,35
472	4,16	113,46	272	385,46	2,77	170,40	283,86	565,86	20,66	5	5	103,32	103,32	24382,34	2,36
476	4,16	114,42	272	386,42	2,77	171,84	286,26	568,26	20,66	5	5	103,32	103,32	24588,97	2,37



Anejo Voladuras



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
480	4,16	115,38	272	387,38	2,77	173,29	288,67	570,67	20,66	5	5	103,32	103,32	24795,6	2,38
484	4,16	116,35	272	388,35	2,77	174,73	291,08	573,08	20,66	5	5	103,32	103,32	25002,23	2,39
488	4,16	117,31	272	389,31	2,77	176,17	293,48	575,48	20,66	5	5	103,32	103,32	25208,86	2,40
492	4,16	118,27	272	390,27	2,77	177,62	295,89	577,89	20,66	5	5	103,32	103,32	25415,49	2,41
496	4,16	119,23	272	391,23	2,77	179,06	298,29	580,29	20,66	5	5	103,32	103,32	25622,12	2,42
500	4,16	120,19	272	392,19	2,77	180,51	300,70	582,70	20,66	5	5	103,32	103,32	25828,75	2,43
504	4,16	121,15	272	393,15	2,77	181,95	303,10	585,10	20,66	5	5	103,32	103,32	26035,38	2,44
508	4,16	122,12	272	394,12	2,77	183,39	305,51	587,51	20,66	5	5	103,32	103,32	26242,01	2,45
512	4,16	123,08	272	395,08	2,77	184,84	307,91	589,91	20,66	5	5	103,32	103,32	26448,64	2,46
516	4,16	124,04	272	396,04	2,77	186,28	310,32	592,32	20,66	5	5	103,32	103,32	26655,27	2,47
520	4,16	125,00	272	397,00	2,77	187,73	312,73	594,73	20,66	5	5	103,32	103,32	26861,9	2,48
524	4,16	125,96	272	397,96	2,77	189,17	315,13	597,13	20,66	5	5	103,32	103,32	27068,53	2,49



Distancia desde la boca del túnel (m)	Velocidad de ida (m/s)	Tiempo Viaje de ida (s)	T. carga llenad (s)	T Viaje ida y carga	V. de vuelta (m/s)	T. vuelta	T.Viaje	T.Ida+Carga+Vuelta+Descarga (s).	m3 por viaje	Viajes camio Nº1	Viajes camio Nº2	m³ Viaje camión Nº1	m³ viaje camión Nº2	m³ acumulados	T. total para desescombrar el pase (h)
528	4,16	126,92	272	398,92	2,77	190,61	317,54	599,54	20,66	5	5	103,32	103,32	27275,16	2,50
532	4,16	127,88	272	399,88	2,77	192,06	319,94	601,94	20,66	5	5	103,32	103,32	27481,79	2,51
536	4,16	128,85	272	400,85	2,77	193,50	322,35	604,35	20,66	5	5	103,32	103,32	27688,42	2,52
540	4,16	129,81	272	401,81	2,77	194,95	324,75	606,75	20,66	5	5	103,32	103,32	27895,05	2,53
544	4,16	130,77	272	402,77	2,77	196,39	327,16	609,16	20,66	5	5	103,32	103,32	28101,68	2,54
548	4,16	131,73	272	403,73	2,77	197,83	329,56	611,56	20,66	5	5	103,32	103,32	28308,31	2,55
552	4,16	132,69	272	404,69	2,77	199,28	331,97	613,97	20,66	5	5	103,32	103,32	28514,94	2,56
556	4,16	133,65	272	405,65	2,77	200,72	334,38	616,38	20,66	5	5	103,32	103,32	28721,57	2,57
560	4,16	134,62	272	406,62	2,77	202,17	336,78	618,78	20,66	5	5	103,32	103,32	28928,2	2,58
564	4,16	135,58	272	407,58	2,77	203,61	339,19	621,19	20,66	5	5	103,32	103,32	29134,83	2,59
568	4,16	136,54	272	408,54	2,77	205,05	341,59	623,59	20,66	5	5	103,32	103,32	29341,46	2,60

Tabla 8-2 Datos de la operación de desescombro del Avance en Destroza. Elaboración Propia.

