

GRADO EN INGENIERIA Y TECNOLOGIA DE
MINAS

TRABAJO FIN DE GRADO

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

ANEJO 6- SOSTENIMIENTO DE LA GALERÍA

Alumno/Alumna: MILAGROS, LOPEZ, ENRIQUE

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

Curso: 2017-2018

Fecha: 15-02-2018



Anejo Sostenimiento Galería

Contenido

1	Objetivo del Presente Anejo	7
2	Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM) I.T.C 04.6.05. 8	
2.1	Nivel del Proyecto	8
3	Métodos para el cálculo del sostenimiento	10
3.1	Predimensionamiento mediante Métodos Empíricos	10
3.1.1	Sistema RMR.Bieniawski (1973).....	10
3.1.2	Clasificación Romana (2000).....	12
3.1.2.1	Recomendaciones de Sostenimiento Romana.....	13
3.1.3	Clasificación Q de Barton (1974).....	16
3.1.4	Resumen de las Recomendaciones de los métodos Empíricos	19
3.2	Comprobación del Sostenimiento Propuesto	20
3.2.1	Unwedge.....	20
3.2.1.1	Presión de Sostenimiento Requerida	20
3.2.1.2	Comprobación Romana	23
3.2.1.2.1	Bulonado.....	25
3.2.1.2.2	Bulonado y Hormigón Proyectado	26
3.2.1.3	Comprobación Q de Barton	27
4	Paraguas	30
4.1	Recomendaciones de Emboquille	30
4.1.1	Recomendaciones Propuestas por Romana (2000).	30
5	Conclusiones	33
5.1	Selección Bulones	33
5.1.1	Bomba de Inflación	36



5.2	Factor de Seguridad Implementando los bulones Swellex Pm24	38
6	Análisis de la información del Software utilizado	39
6.1	Programa Unwedge	39

Índice de Ilustraciones:

ILUSTRACIÓN 1 NIVELES DE PROYECTO. I.T.C 04.6.05 RGNBSM.....	9
ILUSTRACIÓN 2 RECOMENDACIONES INDICATIVAS PARA EL SOSTENIMIENTO Y EXCAVACIÓN DE TÚNELES EXCAVADOS EN ROCA. BIENIOWSKI 1989.	11
ILUSTRACIÓN 3 CLASIFICACIÓN MODIFICADA DE BIENIAWSKI EN SUBCLASES Y COMPARACIÓN CON LA ORIGINAL. ROMANA RUIZ 2001.	13
ILUSTRACIÓN 4 RECOMENDACIONES PARA EL SOSTENIMIENTO DE TÚNELES PARA TÚNEL DE 10-14 M. DE ANCHO. RUIZ ROMANA (2000)	15
ILUSTRACIÓN 5 CATEGORÍAS DE SOSTENIMIENTO. CORNEJO ÁLVAREZ Y SALVADOR, 1995.....	17
ILUSTRACIÓN 6 NUEVO PROCEDIMIENTO PARA EL SOSTENIMIENTO REQUERIDO. CORNEJO ÁLVAREZ Y SALVADOR, 1995.	19
ILUSTRACIÓN 7 PRESIÓN UNIFORME A LO LARGO DE TODA LA SECCIÓN QUE SERÍA NECESARIA APLICAR PARA CONSEGUIR UN FACTOR DE SEGURIDAD 3. ELABORACION PROPIA.....	21
ILUSTRACIÓN 8 PRESIÓN NECESARIA PARA CONSEGUIR $F.S=3$, .ELABORACIÓN PROPIA	22
ILUSTRACIÓN 9 CUÑAS PERIMETRALES DEL TÚNEL. ELABORACIÓN PROPIA	24
ILUSTRACIÓN 10 ILUSTRACIÓN BULONES ROMANA. ELABORACIÓN PROPIA	25
ILUSTRACIÓN 11 SECCIÓN CON BULONES Y HORMIGÓN PROYECTADO RECOMENDADO POR ROMANA. ELABORACIÓN PROPIA.	27
ILUSTRACIÓN 12 SOSTENIMIENTO PROPUESTO POR BARTON. ELABORACIÓN PROPIA	28
ILUSTRACIÓN 13 IMAGEN DONDE PODEMOS OBSERVAR LAS CUÑAS INESTABLES 6(PARTE SUPERIOR IZQUIERDA EN MORADO) Y 8 (CUÑA CENTRAL PEQUEÑA COLOR VERDE). ELABORACIÓN PROPIA	29
ILUSTRACIÓN 14 RECOMENDACIONES PARA EL SOSTENIMIENTO DE EMBOQUILLES. ROMANA (2000).....	31
ILUSTRACIÓN 15 CARACTERÍSTICAS PERNOS DE ANCLAJE SWELLEX. ATLAS COPCO	35
ILUSTRACIÓN 16 LONGITUDES Y PESOS DISPONIBLES PARA BULÓN PM24. ATLAS COPCO.....	36
ILUSTRACIÓN 17 INFLADO DE UN BULÓN SWELLEX. ATLAS COPCO	37
ILUSTRACIÓN 18 DATOS TÉCNICOS BOMBA ELÉCTRICA SWELLEX E1. ATLAS COPCO.....	37

Índice de tablas:

TABLA 3-1 SUGERENCIAS BARTON ET AL (1974) PARA EL VALOR DEL ESR.ROCSCIENCE	16
TABLA 3-2 SOSTENIMIENTO RECOMENDADO POR BARTON ($4 < Q < 40$).CORNEJO ÁLVAREZ Y SALVADOR, 1995	17
TABLA 3-3 RESUMEN RECOMENDACIONES DE SOSTENIMIENTO SEGÚN MÉTODO APLICADO. ELABORACIÓN PROPIA.....	19
TABLA 3-4 FACTORES DE SEGURIDAD ALCANZADOS TRAS APLICAR LA PRESIÓN NECESARIA. ELABORACIÓN PROPIA	22
TABLA 3-5 FACTORES DE SEGURIDAD PARA CADA CUÑA FORMADA. ELABORACIÓN PROPIA.....	25
TABLA 3-6 FACTORES DE SEGURIDAD CON BULONADO RECOMENDADO POR ROMANA. ELABORACIÓN PROPIA	26
TABLA 3-7 FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS APLICANDO LAS RECOMENDACIONES DE ROMANA. ELABORACIÓN PROPIA.....	27
TABLA 3-8 FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS APLICANDO LA CONFIGURACIÓN DE SOSTENIMIENTO PROPUESTA POR BARTON. ELABORACIÓN PROPIA	28
TABLA 5-1 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS. ELABORACIÓN PROPIA.....	33
TABLA 5-2 FACTORES DE SEGURIDAD APLICANDO SWELLEX PM24.ELABORACION PROPIA	38





1 Objetivo del Presente Anejo

En el presente Anejo, se estudiara de forma principal el sostenimiento necesario para evitar que el terreno pierda propiedades por efecto del proceso constructivo, o incluso que las mejore. El anillo de roca que rodea al túnel será el principal elemento que proporcione estabilidad a la excavación.

Decimos que se estudiara de forma principal, ya que solamente en segundo lugar se situara la capacidad resistente por si misma del sostenimiento, que será muy pequeña comparada con las grandes tensiones que pueden existir en el interior del macizo rocoso, debido entre otras cosas al enorme peso que ejercerá la cobertera.

2 Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM) I.T.C

04.6.05.

Siguiendo las recomendaciones del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, RGNBSM de aquí en adelante, I.T.C 04.6.05 Sostenimiento de obras, nos encontramos ante una labor no asociada a explotación.

El documento nos indica los aspectos que deberemos contemplar para llevar a cabo correctamente el sostenimiento, y el grado o nivel de proyecto que nos dará unas recomendaciones sobre la correcta metodología que deberemos aplicar para el cálculo del proyecto de sostenimiento así como la caracterización mínima que deberemos contemplar en cuanto a la caracterización del terreno a atravesar.

2.1 Nivel del Proyecto

Según la ITC 04.6.05, los proyectos se clasifican en cuatro niveles A, B, C y D.

Para clasificar la obra se atienden a dos parámetros de clasificación:

- Tiempo de utilización de la obra.
- Cociente $\dot{a}(c)/h$, siendo :
 - $\dot{a}(c)$, resistencia a compresión simple del litotipo mas representativo de la excavación (MPa).
 - h , profundidad medida de la excavación respecto a la superficie exterior (m).

Con todo ello el valor de nuestros parámetros son:

$$\frac{\dot{a}(c)}{h} = \frac{288.8^1}{118^2} = 2.44$$

Con este cociente entramos en la siguiente tabla:

¹ Ver Anexo Geología y Geotecnia.

² Ver Anexo Cálculo de Voladuras.

$\dot{a}(0) / h$ (MPa/m)	Menor de 15 años	Mayor de 15 años
> 0,1	A	B
0,1 - 0,05	B	C
< 0,05	C	D

Ilustración 1 Niveles de Proyecto.I.T.C 04.6.05 RGNBSM.

Teniendo en cuenta un tiempo de utilización mayor de 15 años y el cociente obtenido anteriormente obtenemos un nivel de proyecto B.

Las características mínimas que debe cumplir este proyecto son las que se indican a continuación:

- Nivel B. Cada litotipo debe ser caracterizado por su resistencia a compresión simple, que puede evaluarse mediante ensayos de laboratorio o ensayos in situ de rotura bajo carga puntual o el martillo de Schmidt.

El sostenimiento puede dimensionarse utilizando modelos empíricos acreditados o numéricos, y admitiéndose la simplificación de la sección de excavación,

considerándola un círculo a los efectos de facilitar los cálculos de estabilidad

Debe hacerse un levantamiento de discontinuidades estimando sus propiedades resistentes mediante los procedimientos empíricos habitualmente admitidos.

El coeficiente de seguridad del sostenimiento debe ser mayor que 3, considerando exclusivamente la acción estática de la gravedad.

3 Métodos para el cálculo del sostenimiento

Para determinar el sostenimiento de un túnel es necesario llevar a cabo un detallado diseño del mismo.

Este diseño se basa fundamentalmente en dos tipos de métodos:

- Métodos Empíricos.
- Métodos Numéricos.

3.1 Predimensionamiento mediante Métodos Empíricos

Los métodos empíricos de sostenimiento son recomendaciones de diseño ligados a la caracterización geomecánica del macizo rocoso utilizando la experiencia como base del diseño.

Las ventajas que presentan estos métodos frente a los métodos numéricos son:

- Uso muy extendido.
- Sencillos de utilizar en las primeras fases del proyecto.
- Normalizan el sostenimiento a emplear.

Para realizar una primera estimación de las necesidades de sostenimiento que presentara la excavación, se recurrirá a los siguientes métodos empíricos de diseño:

- Sistema RMR publicado por Bieniawski (1973).
- Modificación a Bieniawski por Romana (2000).
- Sistema Q descrito por Barton (1974).

3.1.1 Sistema RMR.Bieniawski (1973)

El sistema de clasificación Rock Mass Rating fue desarrollado por Z.T Bieniawski en los años 1972-1973 siendo modificado en 1976 y 1979, en base a más de 300 casos reales de túneles, cavernas, taludes y cimentaciones.

Para determinar el índice RMR se hace uso de los parámetros del terreno descritos en:

« Anejo Geología y Geotecnia. Punto 4.3.2.2

Clasificación Geomecánica de Bieniawski o RMR >>

En el estudio geotécnico obtuvimos un valor para el RMR de 73.1, que representa un macizo rocoso de clase II de una buena calidad.

Para cada clase de roca Bieniawski propone una cuantía de sostenimiento, tal y como se ve en la siguiente tabla.

CLASE	RMR	EXCAVACIÓN (PASE)	SOSTENIMIENTO		
			BULONES (Longitud en m)	HORMIGÓN PROYECTADO	CERCHAS METÁLICAS
I Muy buena	81-100	Sección completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
II Buena	61-80	Sección completa (1-1.5 m). Sostenimiento terminado a 20 m del avance	Localmente en clave. L = 3 m. Espaciados a 2.5 m con mallazo ocasional	50 mm en clave donde sea necesario	No necesarias
III Media	41-60	Avance y destroza (1.5-3 m en avance) Sostenimiento empezado en el frente y terminado a 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastial. L = 4 m. Espaciados 1.5 a 2.0 m. Mallazo en clave.	50-100 mm en clave. 30 mm en hastiales.	No necesarias
IV Mala	21-40	Avance y destroza (1.0-1.5 m en avance) Sostenimiento empezado simultáneamente con la excavación y hasta 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 a 5 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo.	100-150 mm en clave. 100 mm en hastiales.	Ligeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala	1-20	Galerías múltiples. (0.5-1.5 m en avance) Sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura.	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo. Bulonar la contrabóveda.	150-200 mm en clave. 150 mm en hastiales. 50 mm en el frente.	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m, con forro y longarinas donde sea necesario. Contrabóveda

Notas (de BIENIAWSKI): Sección del túnel en herradura. Ancho 10 m. Tensión vertical < 25 MPa. Excavado por voladuras.

Ilustración 2 Recomendaciones Indicativas para el sostenimiento y excavación de túneles excavados en roca. Bieniawski 1989.

La tabla anterior es aplicable cuando se dan las siguientes circunstancias:

- Sección del túnel en herradura.
- Anchura o vano comprendida entre 5-10 metros.
- Túneles excavados mediante perforación y voladura.
- La tensión vertical debe ser menor a 25 MPa.

Por lo que teniendo en cuenta las circunstancias de aplicación anteriores y que nuestro túnel tiene una anchura de 11.50 metros, este método se quedaría fuera de aplicación, además la tensión vertical supera los 25 MPa:

$$p = \frac{100 - RMR}{100} * \gamma * b$$



$$p = \frac{100 - 73.1}{100} * 27 * 11.50 = 83.52 \text{ MPa}$$

3.1.2 Clasificación Romana (2000)

Como hemos visto en el apartado anterior la clasificación de Bieniawski no es aplicable a nuestro túnel. Además la clasificación de Bieniawski divide el rango completo del RMR en cinco clases con denominaciones desde Muy buena a Muy mala, cubriendo cada clase un intervalo de 20 puntos. Situación que en la práctica hace que las clases propuestas no sean equiparables entre sí.

Por ejemplo, la clase III (Media o Regular), que es normalmente la más frecuente cubre un rango demasiado amplio. Las necesidades de sostenimiento de un túnel de RMR=40 serán muy diferentes de las de un túnel de RMR=60 (el primero incluirá cerchas mientras que el segundo casi nunca se construirá con cerchas. Y los espesores de hormigón proyectado o la longitud de pase serán también diferentes).

Para ello Manuel Romana Ruiz (2000), propuso la sustitución del sistema de 5 clases por el de 10 subclases.

Para mantener un cierto grado de correlación con la división de 5 clases de Bieniawski Romana denominó con el numeral romano que utiliza Bieniawski seguido de una letra: a para la mitad superior y b para la mitad inferior de cada clase.

RMR	MODIFICADO		BIENIAWSKI ORIGINAL	
	CLASE	DENOMINACIÓN	DENOMINACIÓN	CLASE
100	la	EXCELENTE	MUY BUENA	I
90	lb	MUY BUENA		
80	II a	BUENA A MUY BUENA	BUENA	II
70	II b	BUENA A MEDIA		
60	III a	MEDIA A BUENA	MEDIA	III
50	III b	MEDIA A MALA		
40	IV a	MALA A MEDIA	MALA	IV
30	IV b	MALA A MUY MALA		
20	V a	MUY MALA	MUY MALA	V
10	V b	PÉSIMA		

Nota Las clases Ia (Excelente) y Vb (Pésima) no aparecen prácticamente nunca

Ilustración 3 Clasificación Modificada de Bieniawski en subclases y comparación con la original. Romana Ruiz 2001.

3.1.2.1 Recomendaciones de Sostenimiento Romana

Romana propone las siguientes recomendaciones de sostenimiento:

- Ancho de excavación entre 10-14 metros.
- Se recomienda un factor de ajuste complementario para los diversos métodos de excavación:
 - Excavación con TBM, $\Delta RMR = 10$.
 - Excavación Mecánica, $\Delta RMR = 5$.
 - Excavación por voladuras cuidadosas, $\Delta RMR = 0$.
 - Excavación por voladuras deficientes, $\Delta RMR = -5$ a -10 .



Deberá elegirse el valor más pesimista cuando:

- El ancho del túnel sea mayor al propuesto.
- El valor del RMR sea más bajo dentro de la subclase.
- Cuando las condiciones de la obra aconsejen mayor seguridad durante la construcción.

Dicho lo anterior, presentamos a continuación las recomendaciones propuestas según el RMR.

El RMR que utilizaremos para el cálculo de las recomendaciones de sostenimiento teniendo en cuenta el factor de ajuste propuesto en el párrafo anterior será:

$$RMR = 73.1 - 5 = 68.1$$

RMR	CLASE	BULONADO			HORMIGÓN PROYECTADO			ARMADURA		CERCHAS		MÉTODOS ESPECIALES	
		L (m)	b/m ²	s' (m)	e (cm)	CAPAS	SELLADO	MALLAZO	FIBRAS	TIPO	S' (m)		
100	Ia	-	-	-	-	-	-						
90	Ib	2/3	0.10	Ocasional	2	Ocasional	No	SENCILLO OCASIONAL	FIBRAS	TH-21 TH-29 HEB	No		
80	IIa	3	0.10/-0.25	Ocasional	5	1	Ocasional				No		
70	IIb	3	0.25/0.44	2 x 2/1.5 x 1.5	6-10	1/2	Si				No		
60	IIIa	3/4	0.44/0.66	1.5 x 1.5/1 x 1.5	8-15	2/3	Si	SENCILLO OCASIONAL	FIBRAS	TH-21 TH-29 HEB	Ocasional		
50	IIIb	4	0.66/1	1 x 1.5/1 x 1	12-20	2/3	Si				1.5		
40	IVa	4/4.5	0.80/1	1 x 1.25/1 x 1	16-24	3	Si	DOBLE	FIBRAS	TH-21 TH-29 HEB	1		
30	IVb	4.5/5	1	1 x 1	20-30	3	Si				0.75/1		
20	Va	-	-	-	30-40	3/4	Si				0.5/0.75	BERNOLD PARAGUAS	
10	Vb	SISTEMAS ESPECIALES											
0													

Notas:

- Las unidades para el bulonado son: L, longitud en metros (m); densidad en bulones por m² (b/m²) y s, espaciamiento en metros (m)
- La unidad para e, espesor mínimo de hormigón proyectado, es el centímetro (cm). No se ha tenido en cuenta la sobreexcavación.
- El número de capas de hormigón proyectado incluye la capa de sellado
- La unidad para S, separación entre cerchas, es el metro (m).
- Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
- Las líneas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces.

Ilustración 4 Recomendaciones para el sostenimiento de túneles para túnel de 10-14 m. de ancho. Ruiz Romana (2000)

Las recomendaciones que se nos proponen son las siguientes:

- Bulonado:
 - o Longitud, 3m.
 - o Densidad de bulones por m², 0.25-0.44.
 - o Espaciamiento³, 2x2 o 1.5x1.5.
- Hormigón Proyectado:
 - o Espesor mínimo, 6-10 cm. (No se tiene en cuenta la sobreexcavacion).

³ El espaciamiento entre bulones se refiere a mallas cuadradas de implantación y es solo indicativo. En cada caso debe ajustarse la distribución a las densidades de bulonado propuestas y a la longitud real de pase.



- Numero de capas, incluida la capa de sellado, 1-2.
- Se recomienda o es habitual el uso de armadura de fibras.
- No se recomienda o no es habitual el uso de Cerchas.

3.1.3 Clasificación Q de Barton (1974)

Se recomienda acudir al

<< Anejo Geología y Geotecnia. Punto 4.3.2.3 Clasificación de Barton et al. (1974) >>

En él se obtuvo un valor del parámetro Q:

$$Q = 21.06$$

Una vez obtenido el valor de Q, Barton propone es sostenimiento a emplear. Para ello es necesario un nuevo parámetro dependiente de las dimensiones del túnel, llamado Dimensión Equivalente:

$$D_{eq.} = \frac{\text{Vano o Altura del Tunel}}{ESR}$$

Donde:

- ESR, Excavation Support Ratio, parámetro relacionado con las intenciones de uso de la excavación y el grado de seguridad que se le demanda al sistema de soporte instalado para mantener la estabilidad de la excavación.

Descripción	Valor ESR
Galerías Temporales en Minas	3-5
Pozos Verticales : circulares/rectangulares	2,5-2
Galerías Permanentes en Minas , túneles hidráulicos , galerías piloto o galerías de avance	1,6
Cavernas pequeñas, túneles de acero, túneles de carretera.	1,3
Cavernas, túneles de carretera, boquillas, intersecciones.	1
Cavernas para fábricas , centrales , estaciones de FF.CC , plantas nucleares	0,8

Tabla 3-1 Sugerencias Barton et al (1974) para el valor del ESR. Rocscience

Con lo que obtenemos una dimensión equivalente de:

$$D_{eq.} = \frac{7.87}{1} = 7.87 \text{ m.}$$

Nota: Usamos el valor de ESR=1, por ser el más desfavorable.

Con el valor de la dimensión equivalente y el valor del índice Q, entramos en la siguiente tabla, que nos dará las recomendaciones de sostenimiento:

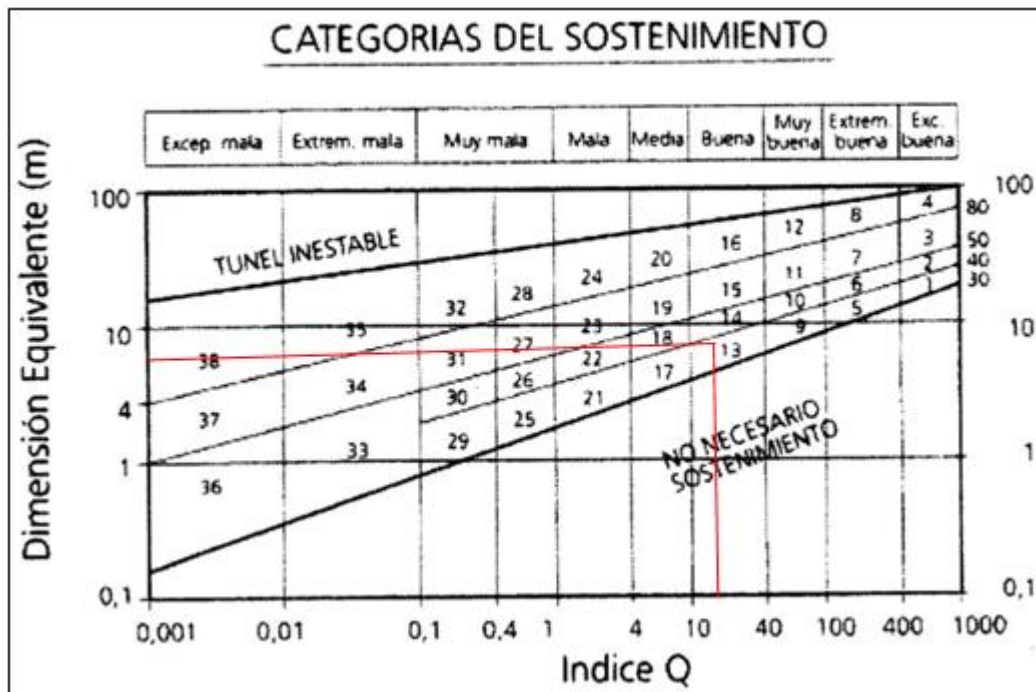


Ilustración 5 Categorías de Sostenimiento. Cornejo Álvarez y Salvador, 1995.

Obtenemos una categoría de sostenimiento 13, que corresponde a las siguientes recomendaciones:

Categoría	Q	RQD/Jn	Jr/Ja	Diámetro Equivalente	Presión (Kp/cm ²)	Sostenimiento	Notas
13	40-10	>10	>1,5		0,5	sb (utg)	1
			<1,5			B (utg) 1,5-2 m	
		<10	>1,5			B (utg) 1,5-2 m	
			<1,5			B (utg) 1,5-2 m + S2-3	

Tabla 3-2 Sostenimiento recomendado por Barton (4<Q<40). Cornejo Álvarez y Salvador, 1995

Donde:

- Sb, Bulonado puntual.
- Utg, bulones pasivos inyectados.



- B, Bulonado sistemático con el espaciado entre bulones en metros.
- S, Hormigón proyectado con el espesor en centímetros.

La nota Numero 1 hace referencia a la siguiente (Cornejo Álvarez y Salvador, 1995):

- Nota Número 1, Para casos de explosiones de roca, colocar bulones con placas grandes separadas 1 m o menos. El revestimiento final cuando termine el desconche de la roca.

Nuestros valores para los parámetros necesarios para usar la tabla son⁴:

- $RQD/J_n > 10$.
- $J_r/J_a > 1.5$.

Se nos aconseja utilizar bulonado puntual de bulones pasivos inyectados.

Una manera más intuitiva y reciente, Barton 1992, de calcular el sostenimiento que es necesario colocar según los valores de Q y de la dimensión equivalente se muestra a continuación:

⁴ Ver Anejo Geología y Geotecnia. Punto 4.3.2.3 Clasificación de Barton et al. (1974).

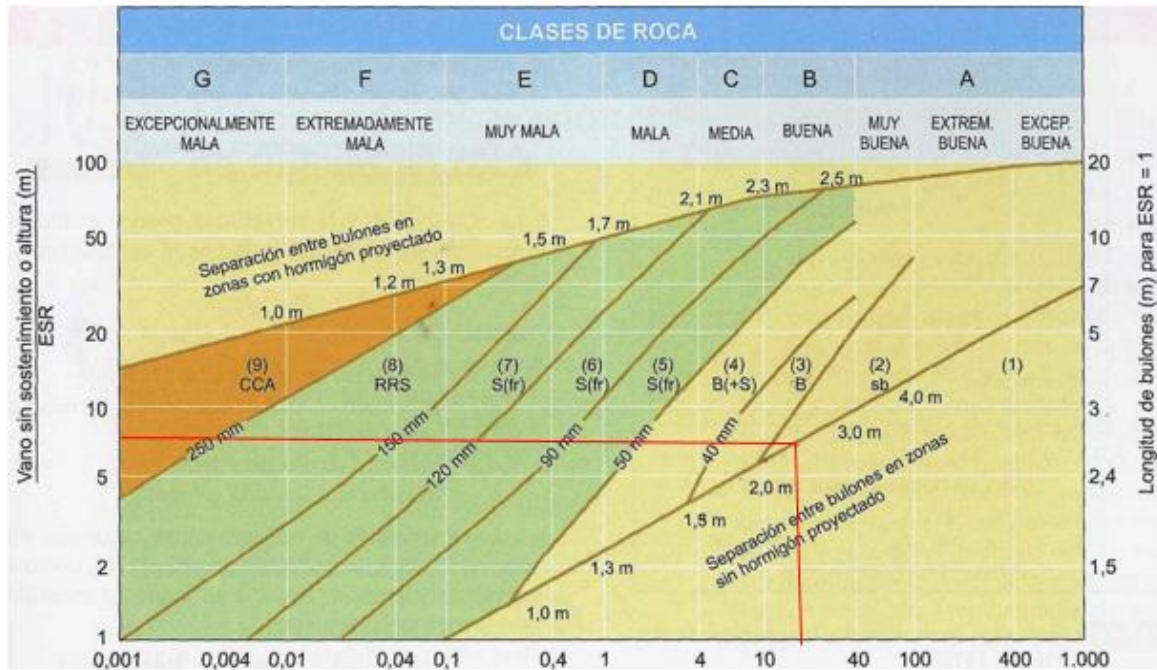


Ilustración 6 Nuevo procedimiento para el sostenimiento requerido. Cornejo Álvarez y Salvador, 1995.

Como podemos observar la recomendación es la misma (aunque cabe señalar que esta última edición puede proporcionar sostenimientos algo diferentes a la de la edición de 1974).

Se nos recomienda bulonado puntual con una separación de bulones de 2.2 metros.

3.1.4 Resumen de las Recomendaciones de los métodos Empíricos

De los métodos empíricos estudiados basados en las diferentes clasificaciones geomecánicas resumimos el sostenimiento recomendado por cada uno de ellos:

Método	Sostenimiento	
RMR (Bieniawski)	No Aplicable	
Romana (2000)	Bulonado	L.3m , 1,5x1,5 o 2x2
	Hormigón Proyectado	E.6-10 cm ,1-2 Capas , Capa de Sellado
	Recomendada Armadura de Fibras	
	Cerchas No	
Q (Barton 1974)	Bulonado Puntual de Bulones pasivos Inyectados	

Tabla 3-3 Resumen Recomendaciones de Sostenimiento Según método aplicado. Elaboración Propia

- Sistema RMR.Bieniawski (1973).No es aplicable por los motivos expuestos en el punto 4.1.1 del presente Anejo.

- Clasificación de Romana (2000).
 - Bulonado:
 - Longitud, 3m.
 - Densidad de bulones por m², 0.25-0.44.
 - Espaciamiento, 2x2 o 1.5x1.5.
 - Hormigón Proyectado:
 - Espesor mínimo, 6-10 cm. (No se tiene en cuenta la sobreexcavacion).
 - Número de capas, incluida la capa de sellado, 1-2.
 - Se recomienda o es habitual el uso de armadura de fibras.
 - No se recomienda o no es habitual el uso de Cerchas.
- Clasificación Q de Barton (1974)
 - Bulonado Puntual.
 - Separación, 2.2 metros.

A continuación y utilizando los métodos numéricos, que nos darán una mayor precisión a la hora de calcular el sostenimiento, veremos si las recomendaciones anteriores son aplicables a nuestro proyecto.

3.2 Comprobación del Sostenimiento Propuesto

A continuación calcularemos mediante software específico las recomendaciones propuestas por los métodos empíricos anteriores, viendo si son correctas y si hay que añadir más sostenimiento o incluso rebajarlo.

3.2.1 Unwedge

El programa Unwedge es usado para analizar roturas por cuña alrededor de excavaciones construidas en roca donde las discontinuidades son persistentes.

3.2.1.1 Presión de Sostenimiento Requerida

La presión de sostenimiento requerida es la presión de sostenimiento uniforme aplicada perpendicularmente a la excavación, que sería requerida para alcanzar el factor de seguridad deseado.

Atendiendo a la ITC 04.6.05 el factor de seguridad deberá ser mayor de 3.

Para conseguir este factor de seguridad necesitamos aplicar una presión de 2.9 t/m².

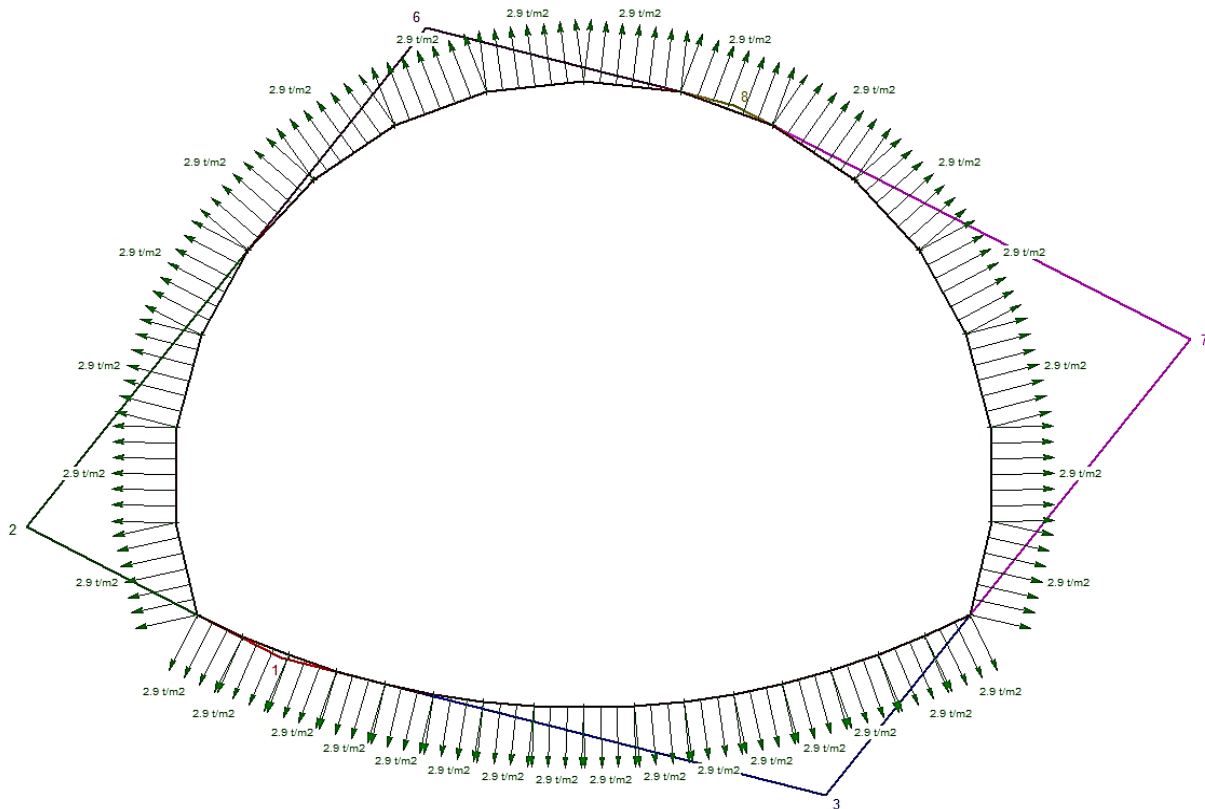


Ilustración 7 Presión Uniforme a lo largo de toda la sección que sería necesaria aplicar para conseguir un factor de seguridad 3.Elaboracion Propia

Concretamente la presión requerida para conseguir el factor de seguridad deseado tendrá que ser implementada en las siguientes zonas:

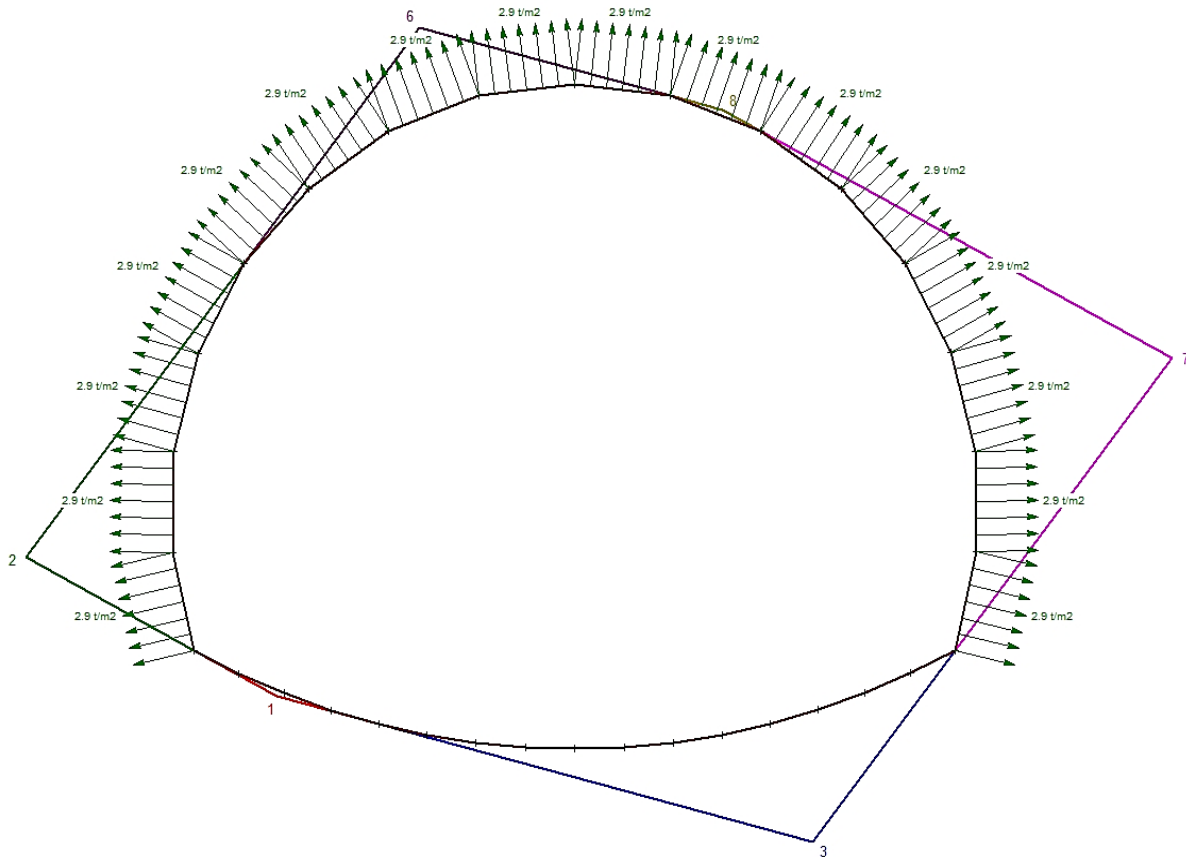


Ilustración 8 Presión Necesaria para conseguir F.S=3, .Elaboración Propia

Con esta presión alcanzamos unos factores de seguridad:

Cuña	Factor Seguridad	F.S Aplicada Presión
Inferior Izquierda (1)	4,946	4.946
Inferior Izquierda (2)	1,917	5.474
Cuña del suelo (3)	Estable	Estable
Cuña Techo (6)	0,185	3.008
Superior Derecha (7)	1,587	4.412
Cuña Techo (8)	0	36.354

Tabla 3-4 Factores de seguridad alcanzados tras aplicar la presión necesaria. Elaboración Propia

Con ello nos podemos hacer una idea , como punto de partida , de la presión que tendrá que ejercer el sistema de sostenimiento , estimar la capacidad que necesitaran los bulones , longitud de estos , espaciado...etc.

3.2.1.2 Comprobación Romana

A continuación comprobaremos que factores de seguridad obtenemos si implementamos el sostenimiento propuesto por Romana.

Recordamos que el sostenimiento propuesto es:

- Clasificación de Romana (2000).
 - Bulonado:
 - Longitud, 3m.
 - Densidad de bulones por m², 0.25-0.44.
 - Espaciamiento, 2x2 o 1.5x1.5.
 - Hormigón Proyectado:
 - Espesor mínimo, 6-10 cm. (No se tiene en cuenta la sobreexcavacion).
 - Numero de capas, incluida la capa de sellado, 1-2.
 - Se recomienda o es habitual el uso de armadura de fibras.
 - No se recomienda o no es habitual el uso de Cerchas.

Datos de Entrada al Programa:

Ya que se trata de un programa para calcular el sostenimiento ante roturas por cuñas, las familias de juntas serán las mismas que se utilizaron para calcular la estabilidad del talud ante las roturas por cuña⁵, es decir:

- Familia de Juntas 1:
 - Buzamiento, 45°.
 - Rumbo, 105°.
 - Phi, 27°.
- Familia de Juntas 2:
 - Buzamiento, 70°.
 - Rumbo, 250°.
 - Phi, 27°.

⁵ Ver : Anejo Taludes y Emboquille: Punto 2.3.1.2 Rotura Por Cuña y Punto 4.1.2 Rotura Por Cuña (Datos de Entrada a los Programas)

- Familia de Juntas 3:
 - Buzamiento, 60°.
 - Rumbo, 270°.
 - Phi, 27°.

Para todas ellas se designa la cohesión más desfavorable de cero t/m².

Introduciendo estos datos obtenemos las siguientes cuñas perimetrales.

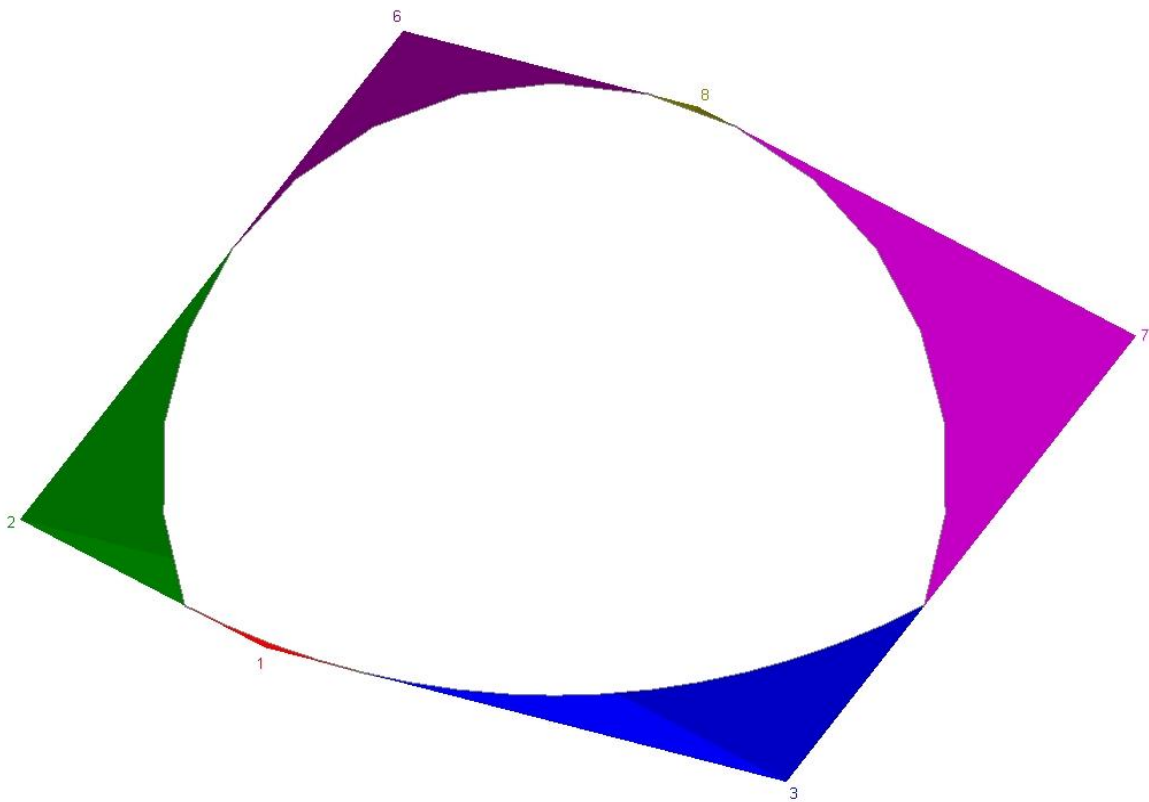


Ilustración 9 Cuñas perimetrales del túnel. Elaboración Propia

Obteniéndose unos factores de seguridad de:

Cuña	Factor Seguridad
Inferior Izquierda (1)	4,946
Inferior Izquierda (2)	1,917
Cuña del suelo (3)	Estable
Cuña Techo (6)	0,185
Superior Derecha (7)	1,587
Cuña Techo (8)	0

Tabla 3-5 Factores de Seguridad para cada Cuña formada. Elaboración Propia

3.2.1.2.1 Bulonado

Implementando el bulonado propuesto por romana, obtenemos los siguientes resultados:

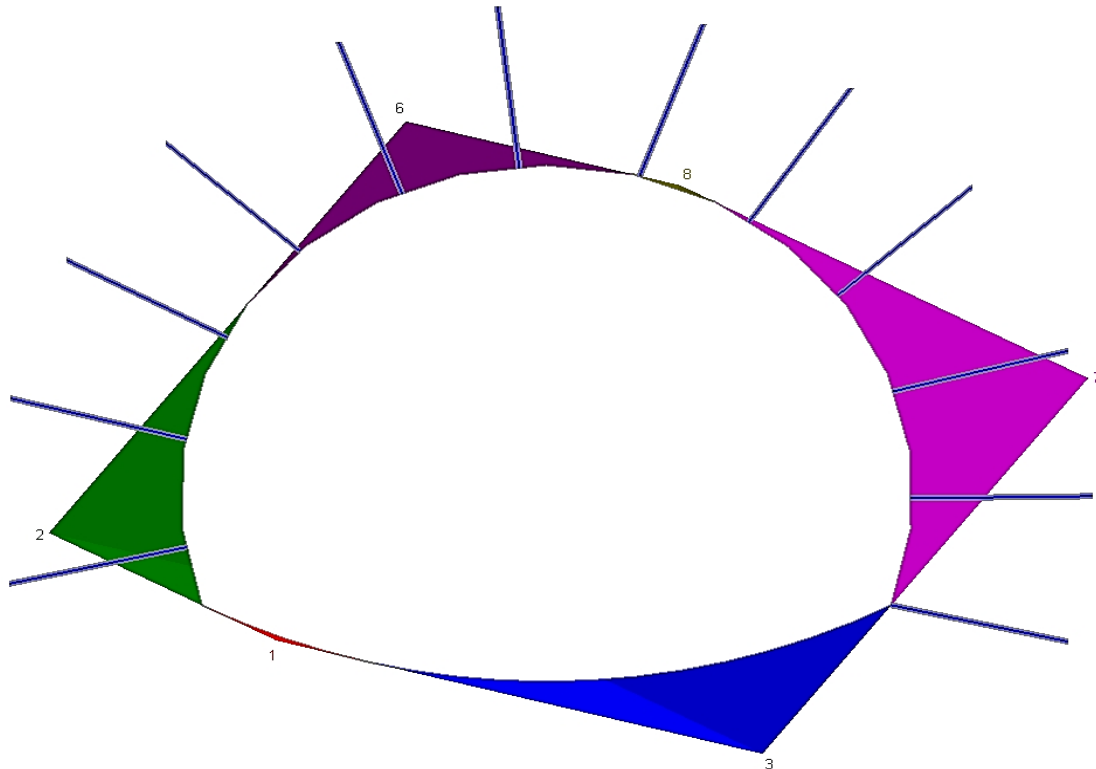


Ilustración 10 Ilustración Bulones Romana. Elaboración Propia

Para la introducción de los datos de los bulones al programa Unwedge se han utilizado Bulones tipo Swellex⁶

Cuña	Factor Seguridad
Inferior Izquierda (1)	4,946
Inferior Izquierda (2)	9.536
Cuña del suelo (3)	Estable
Cuña Techo (6)	4.864
Superior Derecha (7)	4.651
Cuña Techo (8)	0

⁶ Ver Punto 4.1 : Selección de Bulones

Tabla 3-6 Factores de Seguridad con bulonado recomendado por Romana. Elaboración Propia

De la colocación del bulonado propuesto por Romana se desprende que:

- La longitud de los bulones propuesta de 3 m, es correcta ya que la longitud máxima existente desde el vértice de la cuña a la sección de excavación es de 3.18 m, dándose en la cuña 7 (Superior Derecha).
- El bulonado propuesto es correcto para conseguir el factor de seguridad de 3, a excepción de una pequeña cuña existente en la parte superior (8) que debido a su tamaño no es estabilizada mediante el bulonado (el peso de esta cuña es de 0.013 ton). Habrá que garantizar su estabilidad mediante Hormigón Proyectado.

3.2.1.2.2 Bulonado y Hormigón Proyectado

Añadiendo a lo anterior el Hormigón Proyectado recomendado obtenemos los siguientes resultados:

- Propiedades del Hormigón Utilizado:
 - Resistencia Cizallamiento, 1 t/m².
 - Espesor, 10 cm.
 - Peso, 2.6 t/m³.

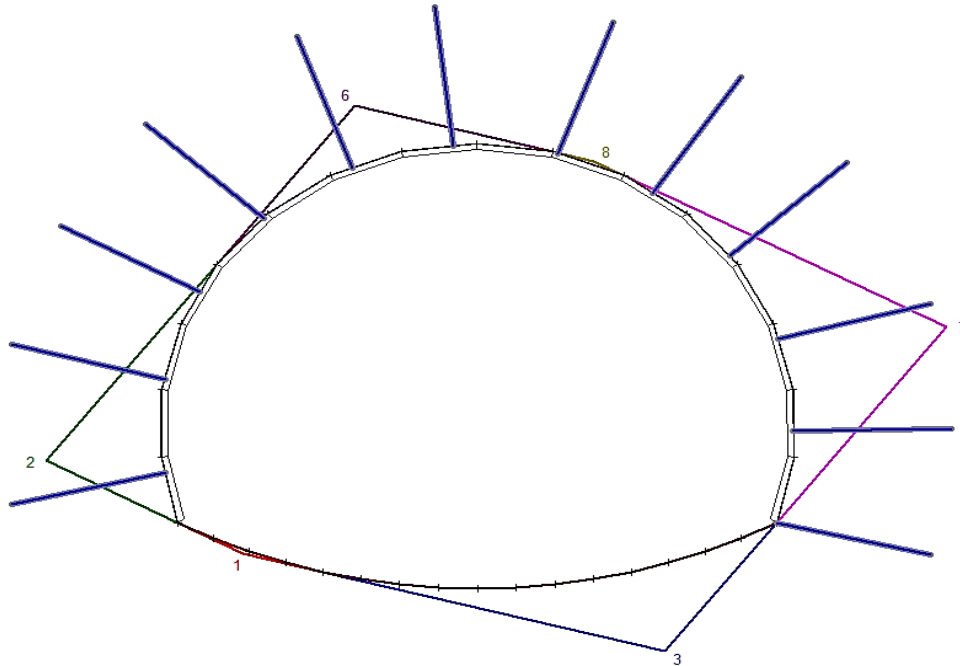


Ilustración 11 Sección con Bulones y Hormigón proyectado recomendado por Romana. Elaboración Propia.

Cuña	Factor Seguridad
Inferior Izquierda (1)	4,946
Inferior Izquierda (2)	8.974
Cuña del suelo (3)	Estable
Cuña Techo (6)	4.237
Superior Derecha (7)	4.568
Cuña Techo (8)	6.592

Tabla 3-7 Factores de seguridad obtenidos aplicando las recomendaciones de Romana. Elaboración Propia

Como podemos observar en los resultados del factor de seguridad, incluir el hormigón proyectado eleva el valor del factor de seguridad a valores por encima del factor de seguridad deseado.

3.2.1.3 Comprobación Q de Barton

Las recomendaciones propuestas por Barton han sido las siguientes:

- Clasificación Q de Barton (1974)
 - Bulonado Puntual.
 - Separación, 2.2 metros.

Implementando esta configuración para el sostenimiento obtenemos los siguientes resultados:

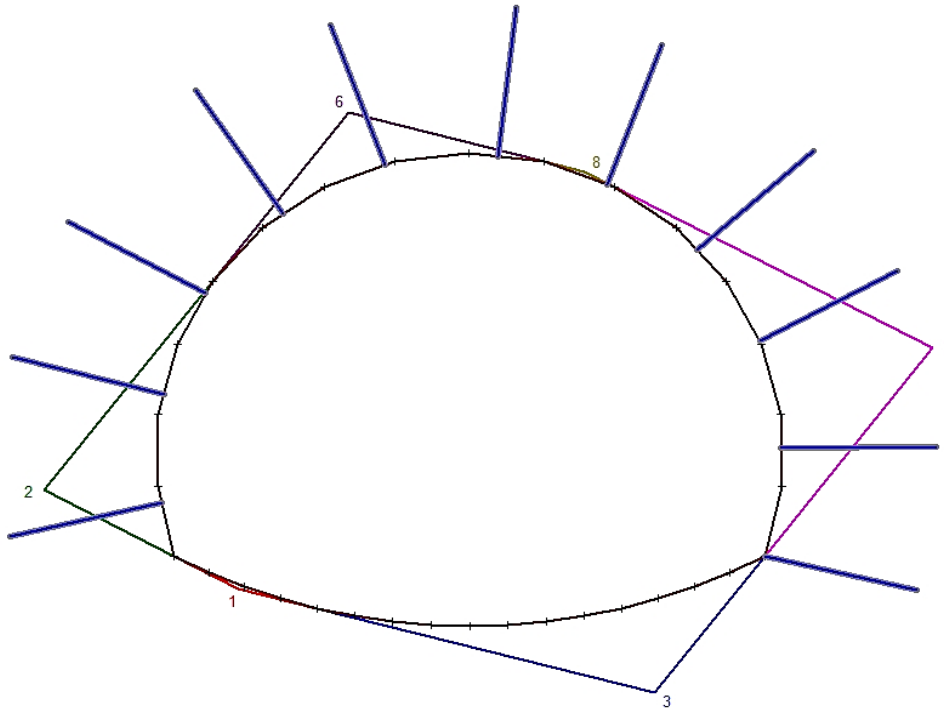


Ilustración 12 Sostenimiento propuesto por Barton. Elaboración Propia

Los resultados de los factores de seguridad son:

Cuña	Factor Seguridad
Inferior Izquierda (1)	4,946
Inferior Izquierda (2)	6.303
Cuña del suelo (3)	Estable
Cuña Techo (6)	0.185
Superior Derecha (7)	3.673
Cuña Techo (8)	0

Tabla 3-8 Factores de seguridad obtenidos aplicando la configuración de sostenimiento propuesta por Barton. Elaboración Propia

Como vemos, aplicando las recomendaciones de Barton obtenemos dos cuñas inestables, cuña techo (6) y cuña del techo (8).

La cuña del techo (8) es muy pequeña y no se ve sustentada por el bulonado, la cuña techo (6) con la separación propuesta por Barton ocurre lo mismo, tal y como muestra la siguiente imagen:

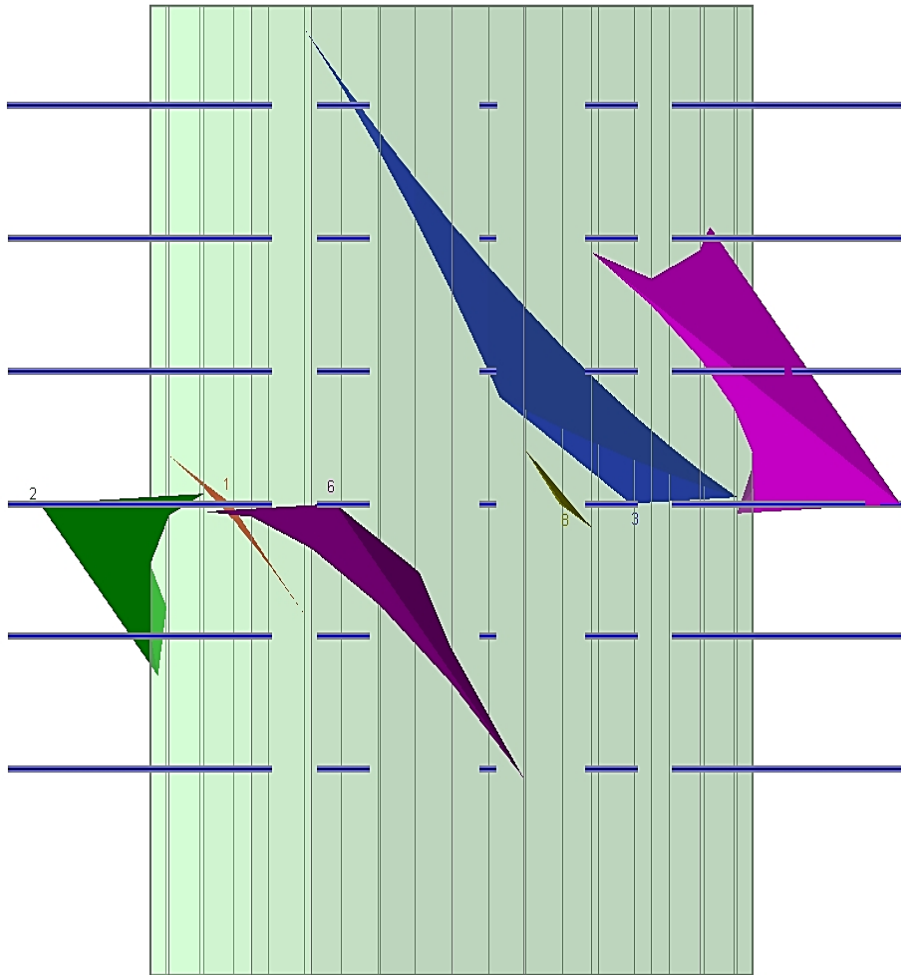


Ilustración 13 Imagen donde podemos observar las cuñas inestables 6 (parte superior izquierda en morado) y 8 (cuña central pequeña color verde). Elaboración Propia



4 Paraguas

La implementación de un Paraguas, hoy en día, se ha convertido en una práctica habitual, el elevado número de incidentes, y de accidentes, en las boquillas de los túneles está motivando una actitud muy conservadora a la hora de diseñar sostenimientos para los primeros 10-20 metros de los túneles.

Podemos comprobar esto observando que en todas las versiones de la clasificación Q de Barton existe una nota que dice “Para boquillas úsese $2J_n$ ”, lo equivaldría a recomendar que en las boquillas se divida por dos el valor de Q lo que supone reducir en una clase, o a veces mantener, la clase de sostenimiento para los emboquilles.

Por lo tanto en conjunto y como regla general aproximada puede aceptarse que:

$$Q_{Emboquilla} = Q_{Total}/5$$

Si trasladamos esta corrección de Q a la fórmula de cálculo del RMR de Bieniawski:

$$RMR = 9 * \ln Q + 44$$

Obtenemos:

$$RMR_b = 9 * \ln Q + 44 = RMR - 9 * \ln 5 \cong RMR - 15$$

Esto equivaldría a una reducción de casi una clase de Bieniawski.

En la práctica Española este incremento del sostenimiento en las boquillas y en los tramos de entrada de los túneles es mucho mayor de la que resultaría de la aplicación indiscriminada de estas reducciones de los valores del RMR y Q.

4.1 Recomendaciones de Emboquille

Existen varias recomendaciones para el dimensionamiento del sostenimiento del emboquille como pueden ser las propuestas por Rogers y Haycocks (1989), en el presente proyecto se utilizarán las recomendaciones propuestas por Romana (2000).

4.1.1 Recomendaciones Propuestas por Romana (2000).

En la siguiente tabla se pueden observar las recomendaciones de emboquille de túneles propuestas por Romana (2000).

CLASIFICACIÓN		EXCAVACIÓN		TRATAMIENTO DEL TALUD FRONTAL				
RMR	CLASE	PARTICIÓN DE EMBOQUILLE	PARAGUAS	BULONES			HORMIGÓN PROYECTADO O1 (cm)	RED/MALLA
				L (m)	b/m ²	s (m)		
100	Ia	SECCIÓN COMPLETA CALOTA Y DESTROZA GALERÍA CENTRAL GALERÍAS MÚLTIPLES CONTRABÓVEDA	Opcional	No	No	No	No	Opcional
90	Ib		Opcional	3/4	<0.10	Ocasional	No	Si
80	IIa		Ligero	3/4	0.11	3 x 3	No	Si
70	IIb		Ligero o medio	3/4	0.25	2 x 2	Ocasional	Si
60	IIIa		Medio	4	0.44	1.5 x 1.5	Ocasional	Si
50	IIIb		Medio	4/5	0.70	1.2 x 1.2	Ocasional	Si
40	IVa		Medio	5/6	1.00	1 x 1	0.10-0.15	No
30	IVb		Pesado	6	1.50	0.8 x 0.8	0.15-0.20	Mallazo opcional
20	Va		Pesado	No	No	No	0.20-0.25	Mallazo simple o doble
10	Vb		Pesado	No	No	No	0.25-0.30	Mallazo doble
0								

58.1

Ilustración 14 Recomendaciones para el sostenimiento de Emboquilles. Romana (2000).

Notas de la tabla anterior:

- Las unidades para el bulonado son: L, longitud en metros (m); densidad de bulones por m² (b/m²); s, espaciamento en metros (m).
- La unidad para el espesor del hormigón proyectado, e, es el centímetro (cm).
- El tipo de paraguas y de red/malla se discutirán más adelante si necesario.

Si aplicamos las recomendaciones expuestas en el punto anterior sobre la reducción del RMR, obtenemos que el RMR para entrar en la tabla anterior será:

$$RMR_b = RMR - 15 = 73.1 - 15 = 58.1$$

Para este RMR se nos recomienda la utilización de un paraguas Medio, las características de este tipo de Paraguas son las siguientes:

- Paraguas Medio ($30 < \text{RMR} < 70$), Paraguas constituido por micropilotes de tubo metálico de diámetro exterior igual o inferior a 90 mm y espesor igual o inferior a 7 mm. Estos tubos se introducen en perforaciones de diámetro inferior a 6'' (150mm) y se rellenan interiormente y exteriormente con mortero, que puede aplicarse con una ligera presión.

La longitud de estos paraguas varía entre 9-20 metros. Para longitudes mayores de 9 metros es preciso adicionar tubos por un sistema de rosca macho-hembra (la resistencia a flexión disminuye mucho en la sección roscada) o con manguitos exteriores. Generalmente los micropilotes asoman algo en cabeza y se arriostan con una viga armada de directriz curva paralela al límite teórico de la sección de emboquille.

Por lo que teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores, y sabiendo que estamos dimensionando el paraguas del emboquille para un RMR quince puntos menos al real (lo que nos dará una seguridad mayor).El paraguas para el emboquille estará constituido por:

- Paraguas Medio.
- Compuesto por 36 tubos de acero:
 - ØExterior, 90 mm.
 - ØInterior, 101.5 mm.
 - Longitud, 20 metros.
- Diámetro de Perforación 120 mm.
- Viga de atado HA-25 de 0.35x0.30 m.
- Longitud de Pase. 1 metro.

5 Conclusiones

Los datos obtenidos para cada uno de los métodos de predimensionamiento del sostenimiento han sido los siguientes:

Cuña	Factor Seguridad (Romana)	Factor Seguridad (Barton)
Inferior Izquierda (1)	4,946	4,946
Inferior Izquierda (2)	8.974	6.303
Cuña del suelo (3)	Estable	Estable
Cuña Techo (6)	4.237	0.185
Superior Derecha (7)	4.568	3.673
Cuña Techo (8)	6.592	0

Tabla 5-1 Resumen de los factores de seguridad obtenidos. Elaboración propia.

Como hemos visto el sostenimiento propuesto por Romana, teniendo en cuenta solamente el bulonado, esto sería:

- Bulonado:
 - Bulones tipo Swellex.
 - Resistencia a la tracción 20 ton.
 - Longitud, 3m.
 - Espaciamiento, 2x2 metros.

Sería adecuado para conseguir un factor de seguridad mayor de 3 en el túnel. A excepción de la existencia de una cuña de 0.013 ton. en el techo del túnel.

Si para soportar esa cuña añadimos Hormigón proyectado con una capacidad de 1 T/m², conseguimos que todos los factores de seguridad sean bastante mayores que 3.

5.1 Selección Bulones

Como ya se ha hablado en puntos anteriores el bulonado estará conformado por bulones redondos inyectados con resina epoxi.

Para ello se han seleccionado los pernos de anclaje Swellex (Atlas Copco).



Este tipo de bulón está sellado en uno de los extremos y en el otro extremo presenta una boquilla especial usada para la inflación, expandiéndose así el perno creando un roce y un ancla interlocking lo que entrega soporte a toda la columna y longitud del tiro.

Se han seleccionado los bulones Swellex revestidos en plástico, ya que otorgan una protección a largo plazo frente a la corrosión producida por el agua y a la corriente.

Dentro de esta línea se elige el Pm24, cuyas características son las siguientes:

Descripción	Unidad	Línea Swellex Premium				
		Pm12	Pm16	Pm24	Pm24C	Pm24H
Calidad del acero		S275JR / S 355MC				
Minima carga de rotura	kN	110	160	240	200	200
Mínima carga de deformación	kN	100	130	200	190	190
Mínimo estiramiento	%	10	10	10	10	10
Presión de inflación	bar	300	240	300	300	300
Diámetro de perfil	mm	28,0	36	36	36	36
Diámetro original de tubo	mm	41	54	54	54	54
Espesor de pared	mm	2	2	3	3	3
Diámetro superior boquilla	mm	28	38	38	38	38
Diámetro inflación boquilla	mm	30 / 36	41 / 48	41 / 48	41 / 48	-
Diámetros óptimos de tiros	mm	35 - 38	45 - 51	45 - 51	48 - 51	45 - 51
Rango de diámetros de tiros	mm	32 - 39	43 - 52	43 - 52	48 - 52	43 - 52
Diámetro de conexión incl. soldaduras	mm	-	-	-	43	-
Diámetro recomendado de collar	mm	-	-	-	-	53 - 55
Opción de revestido en bitumen		•	•	•	•	•
Opción de revestido en plástico		•	•	•	•	•

Ilustración 15 Características Pernos de Anclaje Swellex. Atlas Copco

Los cálculos realizados con el programa Unwedge , se han hecho con bulones de 20 toneladas de capacidad , como podemos ver en la tabla anterior los bulones escogidos presentan una mínima carga de rotura de 240 kN es decir 24.08 toneladas , cubriendo por exceso nuestras necesidades.

Como se ha calculado, también, con el programa Unwedge la longitud de estos bulones será de 3 metros.

Revestido en plástico			
SWX Pm24	2,1	7,2	9899 7014 95
SWX Pm24	2,4	9,5	9899 7012 84
SWX Pm24	3,0	11,8	9899 7005 72
SWX Pm24	3,6	14,0	9899 7004 77

Ilustración 16 Longitudes y Pesos Disponibles para Bulón Pm24. Atlas Copco.

Por lo tanto una vez aclarada la disponibilidad, en lo referente a las necesidades técnicas necesarias para nuestros bulones, resumimos que los bulones usados serán:

- Bulones Swellex Pm24.
- Revestidos en Plástico.
- Mínima Carga de Rotura 240 kN (24.08 ton.).
- Longitud, 3 metros.
- Peso Bulón, 11.8 kg.

5.1.1 Bomba de Inflación

El sistema de instalación de los pernos de anclaje Swellex está constituido por una bomba de agua de alta presión con un mandril de inflación que es empujado sobre la boquilla de la cabeza del perno para llevar el flujo de agua desde la bomba al interior del perno.

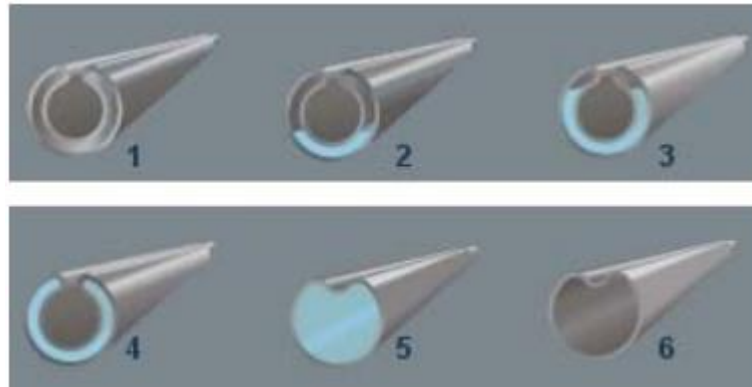


Ilustración 17 Inflado de un Bulón Swellex. Atlas Copco

Para la colocación de nuestros pernos será necesaria una presión de inflación de 300 bares, tal y como podemos observar en la ilustración 14.

Para ello se usara la bomba eléctrica Swellex E1, que nos proporcionara una presión máxima de funcionamiento para el agua de 320 bares.

Datos Técnicos	
Max. presión de funcionamiento para el agua	320 bars
Presión de agua de suministro	2 - 20 bars
Max. temperatura de agua	40 °C
Velocidad de flujo	12 l/min. / 50 Hz
Presión hidráulica	150 - 250 bars
Agua de conexión	Acoplamiento de tenaza (1/2)
Nivel de ruido en op. oído a 4 m de distancia	< 60 dB (A)
Vibraciones en el brazo de instalación	no medible
Dimensiones (D x W X H)	450 x 775 x 450 mm
Peso de brazo de instalación con válvula y mandril	6,5 kg

Ilustración 18 Datos Técnicos bomba eléctrica Swellex E1. Atlas Copco.

Con esta bomba el tiempo de expansión para un perno de 6 metros de longitud Pm24 es inferior a los 60 segundos.

5.2 Factor de Seguridad Implementando los bulones Swellex Pm24

Los bulones seleccionados tienen más capacidad que los que habíamos usado para el primer cálculo del sostenimiento mediante el programa Unwedge, por lo tanto a continuación se mostrarán los factores de seguridad que se obtendrán finalmente con la implementación de los bulones seleccionados Swellex Pm24.

Cuña	Factor Seguridad Swellex Pm24
Inferior Izquierda (1)	4,946
Inferior Izquierda (2)	9.510
Cuña del suelo (3)	Estable
Cuña Techo (6)	4.237
Superior Derecha (7)	4.957
Cuña Techo (8)	6.592

Tabla 5-2 Factores de seguridad aplicando Swellex Pm24.Elaboracion Propia



6 Análisis de la información del Software utilizado

6.1 Programa Unwedge

Datos del programa:

- Unwedge.Version 3.00.Rocscience Inc.

Nota: Se presenta el Análisis de Información obtenida al usar los Bulones Swellex Pm24

Unwedge Analysis Information

Document Name

File Name: Calculo Sostenimiento Tunel N-625

Project Settings

Project Title: Calculo Sostenimiento Tunel N-625
Wedges Computed: Perimeter and End Wedges
Units: Metric, stress as tonnes/m²

General Input Data

Tunnel Axis Orientation:
Trend: 45°
Plunge: 0°
Design Factor of Safety: 3.000
Unit Weight of Rock: 2.700 t/m³
Unit Weight of Water: 0.981 t/m³

Seismic Forces

Not Used

Scale Wedges Settings

Not Used

Joint Orientations

Joint 1
Dip: 45°
Dip Direction: 105°
Joint 2
Dip: 70°
Dip Direction: 250°
Joint 3
Dip: 60°
Dip Direction: 270°



Joint Properties

Joint Properties 1

Water Pressure

Constant: 0 tonnes/m²

Waviness: 0°

Shear Strength Model: Mohr-Coulomb

Phi: 27°

Cohesion: 0 tonnes/m²

Tensile Strength: 0 tonnes/m²

Bolt Properties

Bolt Property 1

Bolt Type: Swellex

Tensile Capacity: 24.08 tonnes

Plate Capacity: 10 tonnes

Bond Strength: 20 tonnes/m

Bond Length: 3 m

Shear Strength: Unused

Bolt Orientation Efficiency: Used

Method: Cosine Tension/Shear

Shotcrete Properties

Shotcrete Property 1

Shear Strength: 1.00 t/m²

Unit Weight: 2.600 t/m³

Thickness: 10.00 cm

Support Summary

Summary of Perimeter Shotcrete

Number of Shotcrete Layers on Perimeter: 1

Perimeter Shotcrete Layer: 1

Shotcrete Property: Shotcrete Property 1

Summary of Perimeter Support Pressure

No Support Pressure on Perimeter

Summary of Perimeter Bolt Patterns

Number of Bolt Patterns on Perimeter: 1

Perimeter Bolt Pattern: 1

Property: Bolt Property 1

Strength type: Swellex

Bolt Length: 3.00 m

Orientation: normal to boundary

Pattern Spacing - In Plane: 2.00 m

Pattern Spacing - Out of Plane: 2.00 m

Pattern Spacing - Out of Plane Offset: 0.00 m

Summary of End Bolt Patterns

No Bolt Pattern on Ends

Summary of End Support Pressure

No Support Pressure on Ends

Summary of End Shotcrete

No Shotcrete on Ends

Wedge Information

Lower Left wedge [1]

Factor of Safety: 4.946
Wedge Volume: 0.006 m³
Wedge Weight: 0.016 tonnes
Wedge z-Length: 2.68 m
Excavation Face Area: 0.24 m²
Support Pressure: 0.00 tonnes
Resisting Force: 0.01 tonnes
Driving Force: 0.00 tonnes
Shear Force: 0.00 tonnes
Apex Height: 0.08 m
Apex Angle: 158.91 degrees
Scaling Parameter: 1.0000
Scaled by: NOT scaled
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 3
Joint 1: 45/105 Joint 3: 60/270
Sliding Direction (East, North, Up): -0.09, -0.98, -0.16
Sliding Direction (trend, plunge): 185, 9
Joint Codes (lower half-space = 1): 000
Joint Areas: 1) 0.24 m², 2) 0.05 m², 3) 0.07 m²
Joint Persistence: 1) 3.98 m, 2) 1.64 m, 3) 2.42 m
Joint Trace Lengths: 1) 4.01 m, 2) 1.64 m, 3) 2.40 m
Joint Normal Forces: 1) 0.01 tonnes, 2) 0.00 tonnes, 3) 0.01 tonnes
Joint Shear Strengths: 1) 0.01 tonnes, 2) 0.00 tonnes, 3) 0.01 tonnes

Lower Left wedge [2]

Factor of Safety: 9.510
Wedge Volume: 2.305 m³
Wedge Weight: 6.222 tonnes
Wedge z-Length: 3.02 m
Excavation Face Area: 3.35 m²
Support Pressure: 0.00 tonnes
Resisting Force: 26.97 tonnes
Driving Force: 2.84 tonnes
Shear Force: 2.84 tonnes
Apex Height: 2.20 m
Apex Angle: 76.53 degrees
Scaling Parameter: 1.0000
Scaled by: NOT scaled
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 2
Joint 1: 45/105 Joint 2: 70/250
Sliding Direction (East, North, Up): 0.17, -0.90, -0.40
Sliding Direction (trend, plunge): 169, 24
Joint Codes (lower half-space = 1): 001
Joint Areas: 1) 2.24 m², 2) 5.94 m², 3) 6.96 m²



Joint Persistence: 1) 3.75 m, 2) 5.88 m, 3) 5.74 m
Joint Trace Lengths: 1) 1.36 m, 2) 6.12 m, 3) 5.99 m
Joint Normal Forces: 1) 17.93 tonnes, 2) 0.00 tonnes, 3) 0.00 tonnes
Joint Shear Strengths: 1) 9.14 tonnes, 2) 0.00 tonnes, 3) 0.00 tonnes

Floor wedge [3]

Factor of Safety: stable
Wedge Volume: 3.659 m³
Wedge Weight: 9.880 tonnes
Wedge z-Length: 7.75 m
Excavation Face Area: 7.08 m²
Support Pressure: 0.00 tonnes
Resisting Force: 0.00 tonnes
Driving Force: 0.00 tonnes
Shear Force: 0.00 tonnes
Apex Height: 1.79 m
Apex Angle: 97.70 degrees
Scaling Parameter: 1.0000
Scaled by: NOT scaled
Sliding Mode: unconditionally stable wedge
Joint Codes (lower half-space = 1): 010
Joint Areas: 1) 5.24 m², 2) 4.93 m², 3) 9.88 m²
Joint Persistence: 1) 10.33 m, 2) 5.19 m, 3) 11.63 m
Joint Trace Lengths: 1) 7.25 m, 2) 5.23 m, 3) 11.85 m

Roof wedge [6]

Factor of Safety: 4.237
Wedge Volume: 1.060 m³
Wedge Weight: 2.863 tonnes
Wedge z-Length: 4.42 m
Excavation Face Area: 3.11 m²
Support Pressure: 0.00 tonnes
Resisting Force: 15.56 tonnes
Driving Force: 3.67 tonnes
Shear Force: 0.00 tonnes
Apex Height: 1.23 m
Apex Angle: 103.47 degrees
Scaling Parameter: 1.0000
Scaled by: NOT scaled
Sliding Mode: falling wedge
Sliding Direction (East, North, Up): 0.00, 0.00, -1.00
Sliding Direction (trend, plunge): 0, 90
Joint Codes (lower half-space = 1): 101
Joint Areas: 1) 2.05 m², 2) 2.61 m², 3) 4.82 m²
Joint Persistence: 1) 5.98 m, 2) 5.06 m, 3) 8.12 m
Joint Trace Lengths: 1) 4.02 m, 2) 5.27 m, 3) 8.78 m
Joint Normal Forces: 1) 0.00 tonnes, 2) 0.00 tonnes, 3) 0.00 tonnes
Joint Shear Strengths: 1) 0.00 tonnes, 2) 0.00 tonnes, 3) 0.00 tonnes

Upper Right wedge [7]

Factor of Safety: 4.957
Wedge Volume: 7.502 m³
Wedge Weight: 20.257 tonnes
Wedge z-Length: 4.75 m
Excavation Face Area: 8.35 m²

Support Pressure: 0.00 tonnes
 Resisting Force: 87.73 tonnes
 Driving Force: 17.70 tonnes
 Shear Force: 17.70 tonnes
 Apex Height: 3.18 m
 Apex Angle: 82.30 degrees
 Scaling Parameter: 1.0000
 Scaled by: NOT scaled
 Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 3
 Joint 2: 70/250 Joint 3: 60/270
 Sliding Direction (East, North, Up): -0.46, 0.41, -0.79
 Sliding Direction (trend, plunge): 312, 52
 Joint Codes (lower half-space = 1): 110
 Joint Areas: 1) 7.49 m², 2) 11.93 m², 3) 12.26 m²
 Joint Persistence: 1) 8.09 m, 2) 9.05 m, 3) 7.03 m
 Joint Trace Lengths: 1) 3.60 m, 2) 9.73 m, 3) 7.22 m
 Joint Normal Forces: 1) 0.00 tonnes, 2) 49.80 tonnes, 3) 68.77 tonnes
 Joint Shear Strengths: 1) 0.00 tonnes, 2) 25.37 tonnes, 3) 35.04 tonnes

Roof wedge [8]

Factor of Safety: 6.592
 Wedge Volume: 0.005 m³
 Wedge Weight: 0.013 tonnes
 Wedge z-Length: 1.33 m
 Excavation Face Area: 0.17 m²
 Support Pressure: 0.00 tonnes
 Resisting Force: 0.37 tonnes
 Driving Force: 0.06 tonnes
 Shear Force: 0.00 tonnes
 Apex Height: 0.08 m
 Apex Angle: 97.70 degrees
 Scaling Parameter: 1.0000
 Scaled by: NOT scaled
 Sliding Mode: falling wedge
 Sliding Direction (East, North, Up): 0.00, 0.00, -1.00
 Sliding Direction (trend, plunge): 0, 90
 Joint Codes (lower half-space = 1): 111
 Joint Areas: 1) 0.17 m², 2) 0.03 m², 3) 0.05 m²
 Joint Persistence: 1) 1.96 m, 2) 0.79 m, 3) 1.22 m
 Joint Trace Lengths: 1) 1.96 m, 2) 0.79 m, 3) 1.20 m
 Joint Normal Forces: 1) 0.00 tonnes, 2) 0.00 tonnes, 3) 0.00 tonnes
 Joint Shear Strengths: 1) 0.00 tonnes, 2) 0.00 tonnes, 3) 0.00 tonnes

Near End wedge [9]

Factor of Safety: stable
 Wedge Volume: 0.157 m³
 Wedge Weight: 0.425 tonnes
 Wedge z-Length: 0.00 m
 Excavation Face Area: 1.46 m²
 Support Pressure: 0.00 tonnes
 Resisting Force: 0.00 tonnes
 Driving Force: 0.00 tonnes
 Shear Force: 0.00 tonnes
 Apex Height: 0.32 m
 Apex Angle: 103.47 degrees

Scaling Parameter: 1.0000
Scaled by: NOT scaled
Sliding Mode: unconditionally stable wedge
Joint Codes (lower half-space = 1): 010
Joint Areas: 1) 0.05 m², 2) 3.25 m², 3) 2.15 m²
Joint Persistence: 1) 0.63 m, 2) 10.56 m, 3) 10.56 m
Joint Trace Lengths: 1) 0.28 m, 2) 10.56 m, 3) 10.56 m

Far End wedge [10]

Factor of Safety: 0.185
Wedge Volume: 0.157 m³
Wedge Weight: 0.425 tonnes
Wedge z-Length: 0.00 m
Excavation Face Area: 1.46 m²
Support Pressure: 1.03 tonnes
Resisting Force: 0.07 tonnes
Driving Force: 0.40 tonnes
Shear Force: 0.40 tonnes
Apex Height: 0.32 m
Apex Angle: 103.47 degrees
Scaling Parameter: 1.0000
Scaled by: NOT scaled
Sliding Mode: wedge sliding on joint 2
Joint 2: 70/250
Sliding Direction (East, North, Up): -0.32, -0.12, -0.94
Sliding Direction (trend, plunge): 250, 70
Joint Codes (lower half-space = 1): 101
Joint Areas: 1) 0.05 m², 2) 3.25 m², 3) 2.15 m²
Joint Persistence: 1) 0.63 m, 2) 10.56 m, 3) 10.56 m
Joint Trace Lengths: 1) 0.28 m, 2) 10.56 m, 3) 10.56 m
Joint Normal Forces: 1) 0.00 tonnes, 2) 0.15 tonnes, 3) 0.00 tonnes
Joint Shear Strengths: 1) 0.00 tonnes, 2) 0.07 tonnes, 3) 0.00 tonnes