



**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS**

**EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS
MASTER DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**

TEMA VI

**EMBOQUILLES, TRATAMIENTOS TALUD
EMBOQUILLE, VISERAS Y PORTAL DE LOS
TÚNELES**

Versión 2014

**Francisco J. Castanedo Navarro
Ingeniero de Caminos
UCM**

TEMA VI

**EMBOQUILLES, TRATAMIENTOS TALUD EMBOQUILLE, VISERAS Y PORTAL DE
LOS TÚNELES**

INDICE

1.	DEFINICIONES.....	3
2.	TRATAMIENTO DEL TALUD FRONTAL DE EMBOQUILLE.....	8
	2.1 Descripción	8
	2.2 Método de diseño y cálculo.....	11
3.	PARAGUAS DE EMBOQUILLE	14
4.	VISERA DE PROTECCIÓN	17
5.	BOCA DE TÚNEL O PORTAL	20
6.	TIPOLOGÍA DE LAS ROTURAS EN LAS ZONAS DE BOQUILLAS.....	21
	6.1 Algunos tratamientos característicos utilizados en emboquilles	23
	6.2 Uso de las clasificaciones geomecánicas de Bieniawski y Barton en las boquillas de los túneles	28
	6.3 Clasificación propuesta por Rogers y Haycocks (1989)	31
	6.4 Nuevas recomendaciones para predimensionamiento de emboquilles.....	34
7.	NUEVAS RECOMENDACIONES APRA PARA EL PREDIMENSIONADO DE EMBOQUILLES.	36
	7.1. Participación de la sección.....	36
	7.2. Paraguas de emboquille	36
	7.3. Bulones en el talud frontal.....	38
	7.4. Hormigón proyectado en el talud	39
	7.5. Red de protección sobre el talud frontal	40
	7.6. Mallazo.....	40
	7.7. Viseras de protección.....	40
	7.8. Drenaje del talud frontal.....	41
	7.9. Perfilado de la zona superior del talud frontal.....	41
8.	EFFECTO DE LA SISMICIDAD.....	42

TEMA VI

EMBOQUILLES, TRATAMIENTOS TALUD EMBOQUILLE, VISERAS Y PORTAL DE LOS TÚNELES

1. DEFINICIONES

En la construcción de túneles se entiende por emboquille el punto donde comienza el túnel subterráneo

Para que pueda realizarse el comienzo del túnel subterráneo es necesario contar con una cierta cobertera sobre clave, lo que obliga a que en los emboquilles se realice una trinchera de suficiente profundidad, como puede verse en la foto 1.1.



Foto 1.1 – Trinchera de emboquille

Desde el punto de emboquille hasta la superficie original del terreno, manteniendo unas dimensiones de trinchera compatibles con los condicionantes de estabilidad y medioambientales, se realiza un tramo de falso túnel o túnel artificial que se rellena hasta restituir una superficie sensiblemente igual a la original del terreno.

Dentro de un proyecto de túneles deben incluirse el proyecto y justificación de los siguientes puntos:

- Tratamiento del talud frontal de emboquille, para garantizar su estabilidad incluso frente al riesgo de roturas por debilitación de la sección durante la excavación del tramo inicial de túnel (foto 1.2).



Foto 1.2

- Dimensionado del refuerzo en bóveda de la excavación inicial del túnel subterráneo o paraguas de emboquille (foto 1.3).



Foto 1.3

- Visera de protección frente a desprendimientos en el talud frontal de emboquille, realizado mediante cerchas y chapa Bernold, como puede verse en la foto 1.4 y foto 1.5.



Foto 1.4

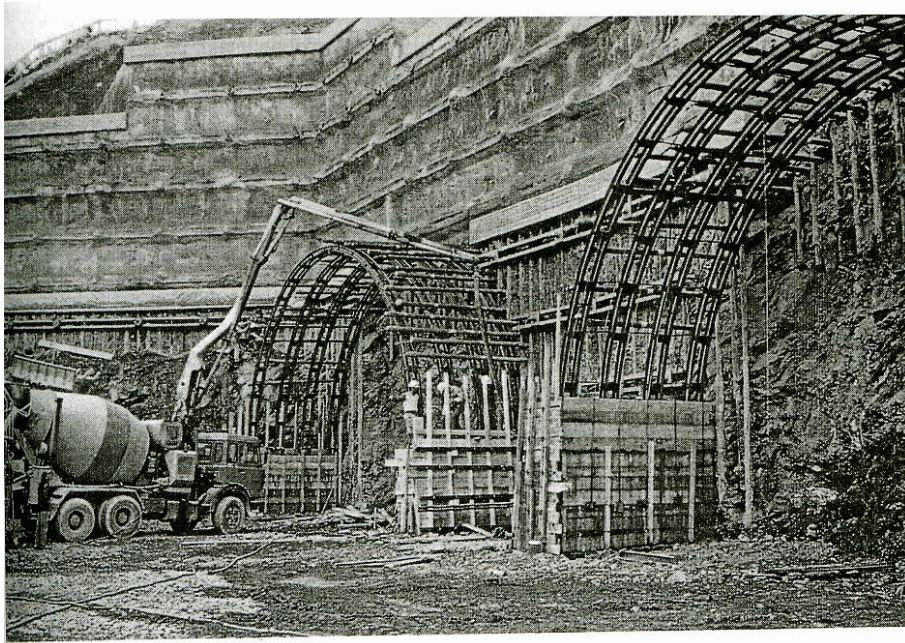


Foto 1.5

- Dimensionado del sostenimiento en los tramos iniciales del túnel desde el emboquille, en que pueden ser las acciones superiores a la del resto del túnel ya más introducido dentro del macizo.

2. TRATAMIENTO DEL TALUD FRONTAL DE EMBOQUILLE

2.1 Descripción

El tratamiento del talud frontal de emboquille se realiza normalmente mediante el empleo de los siguientes elementos estructurales:

- Gunita con mallazo. Suelen utilizarse espesores de gunita de 10 a 25 cm, y uno o dos mallazos ϕ 8 a 0.15 (foto 2.1).



Foto 2.1

- Bulones provisionales de barra (también serían viables los de cable), con longitudes de 6 a 16 m. Para longitudes superiores a 12 m es obligada la utilización de barras empalmables tipo Gewi, Diwidag o similar (foto 2.2).



Foto 2.2

- Drenes tipo California (horizontales) para garantizar que no se aproxima al paramento de la trinchera el nivel piezométrico en zonas en donde sea previsible el riesgo de importantes aportes de agua al interior de la trinchera (en zonas áridas o de climas similares secos, no suele ser necesario este tipo de tratamiento), como puede verse en la foto 2.3.



Foto 2.3 – Dren tipo California

También pueden realizarse otros sistemas más complejos de tratamiento del talud del emboquille, como los representados en la figura 2.1 o en la figura 2.2.

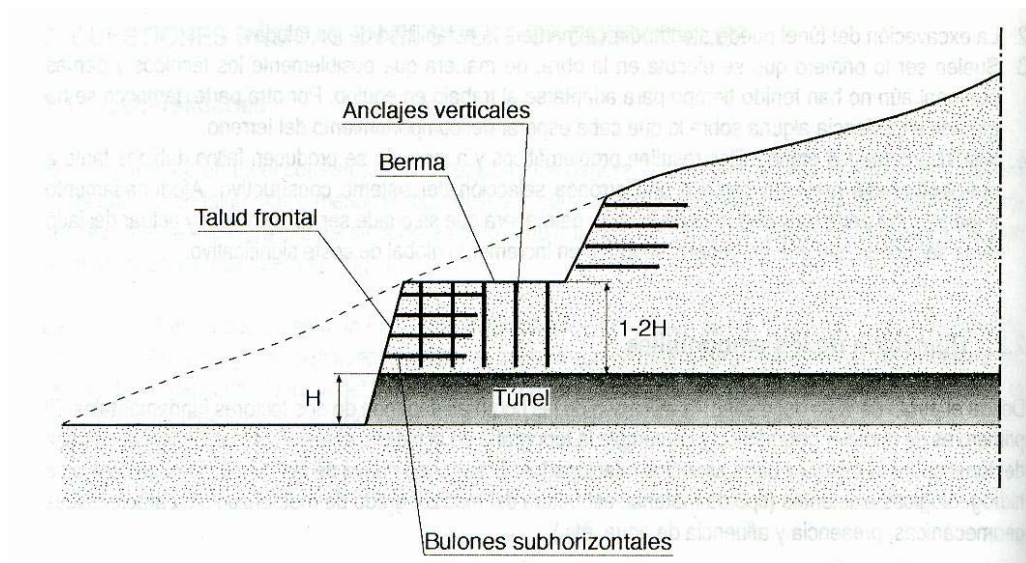


Figura 2.1

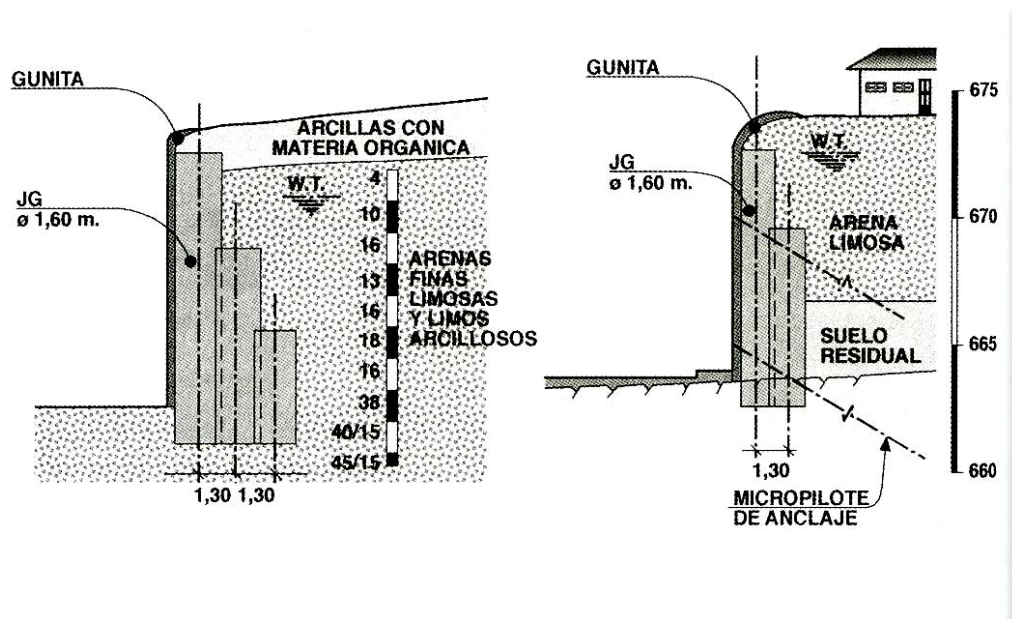


Figura 2.2

2.2 Método de diseño y cálculo

El método de diseño y cálculo deberá realizarse mediante el empleo de programas de estabilidad de taludes, **que permitan incorporar el efecto de debilitamiento debido a la excavación del propio túnel.**

En la figura 2.3 puede verse un perfil longitudinal con los tratamientos de emboquille para un túnel ejecutado.

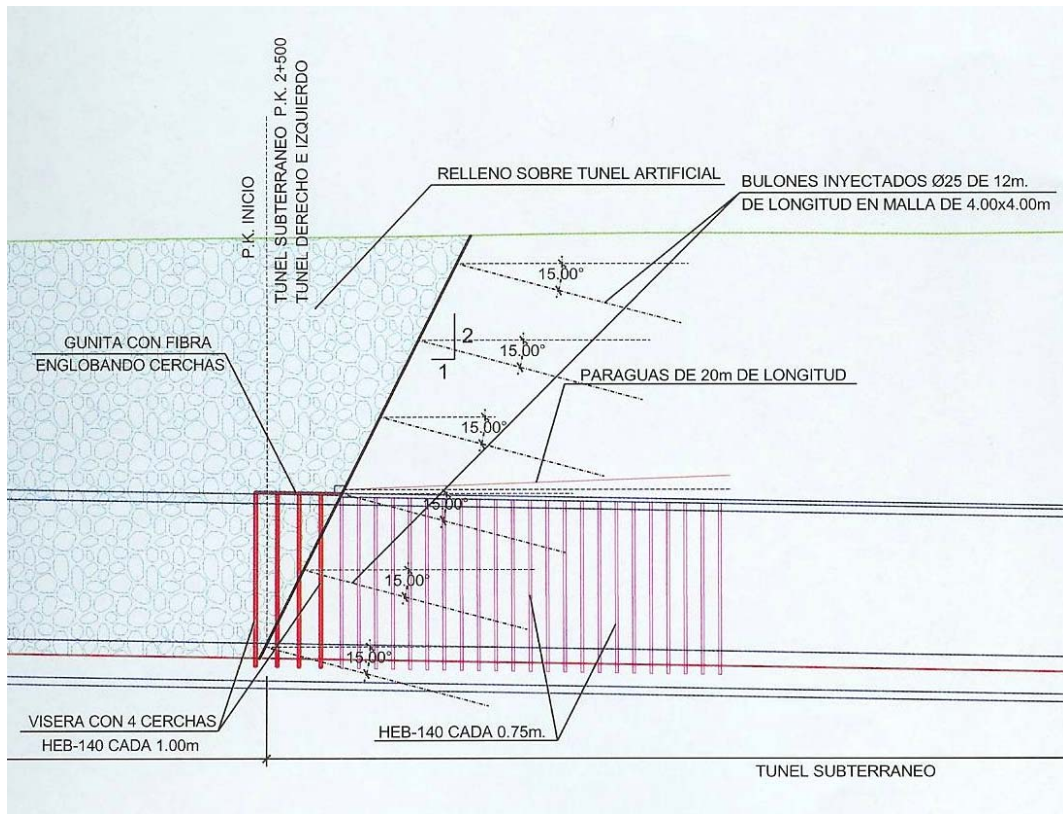


Figura 2.3 – Sección longitudinal emboquille túnel

En la figura 2.4 puede verse la discretización realizada para el estudio de estabilidad del talud de emboquille considerando la eliminación de material durante la fase de excavación del túnel y sin haber colocado el sostenimiento.

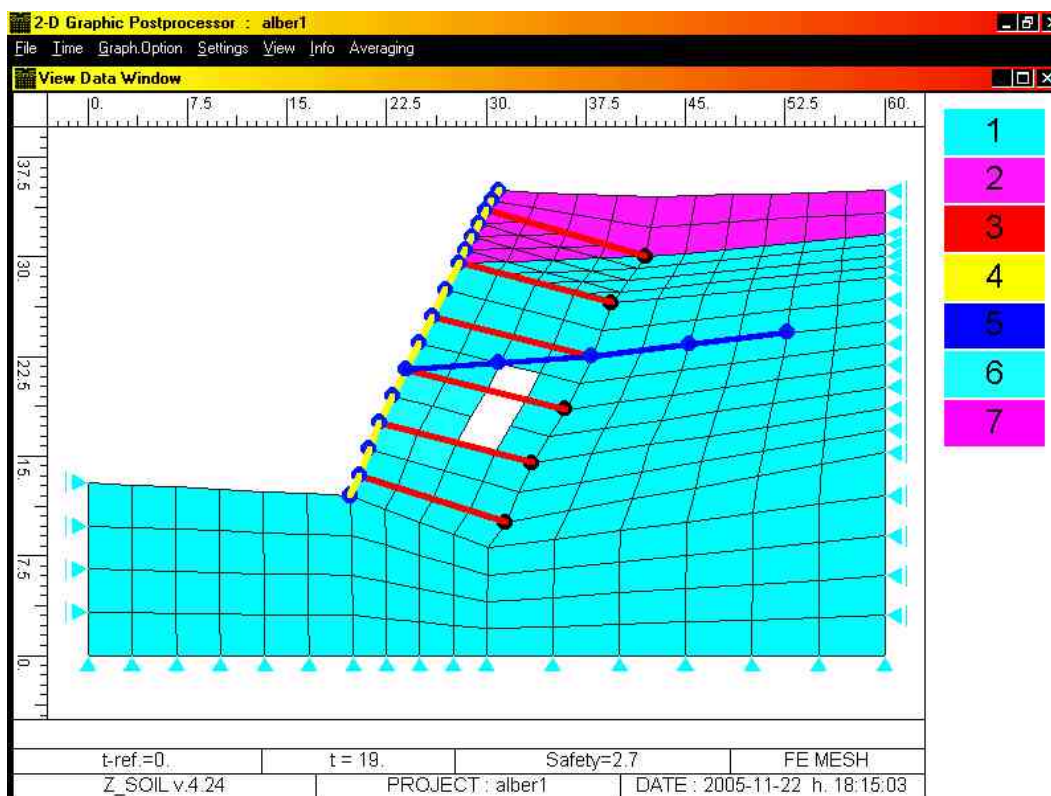


Figura 2.4

3. PARAGUAS DE EMBOQUILLE

En general para definir en un proyecto u obra un paraguas de micropilotes, es preciso especificar los siguientes parámetros:

- Diámetro de perforación
- Dimensiones de la armadura
- Tipo de acero
- Sistema de inyección
- Tipo de lechada o mortero de inyección
- Longitud de los micropilotes
- Separación entre micropilotes
- Número de micropilotes
- Posición relativa respecto a la sección del túnel
- Inclinación vertical y horizontal
- Solape (en paraguas sucesivos)

El paraguas de micropilotes está formado por una serie de perforaciones en las cuales se pueden introducir distintos elementos metálicos resistentes, que son las armaduras. Mediante inyecciones de lechada o cemento se rellenan los huecos existentes entre la armadura y el terreno dando continuidad al mismo.

Según el diámetro de perforación y el tipo de armadura, pueden diferenciarse de forma coloquial los siguientes tipos de paraguas:

- Paraguas ligero, con perforaciones de 50 a 80 mm y armadura de redondo ϕ 32 a ϕ 40 ó tubo de diámetro hasta ϕ 60 mm.

Este tipo de paraguas se aplica al caso de emboquilles en roca masiva, alterada grado III ó inferior.

- Paraguas medio, constituido por perforaciones de 80 a 120 mm y con armadura de tubo de hasta diámetro ϕ 98 ó de barras o grupos de barras ϕ 32 a ϕ 40.

Este tipo de paraguas se utiliza en emboquilles en macizos de calidad media, siempre con índice RMR superior a 50-60, en terreno poco alterado y fracturado.

Este tipo de paraguas puede realizarse con el propio jumbo de perforación del túnel, por lo que no es necesario contar con maquinaria auxiliar.

- Paraguas pesado, constituido por perforaciones de diámetro superior a 120 mm, y hasta de 250 mm, aunque el diámetro habitual es 180 mm, y dentro de él se incluyen tubos metálicos de diámetro no inferior a 120 mm.

Este tipo de paraguas se realiza en el caso de rocas alteradas o muy fracturadas, o suelos firmes.

En el caso de suelos puede incluso realizarse una solución de doble paraguas.

También pueden realizarse paraguas especiales, bien sea mediante el empleo de jet grouting, que en el caso de ser secante puede permitir además la impermeabilidad y normalmente dejando la tubería de inyección perdida, lo que debe tenerse en cuenta de cara a la estimación del coste de este elemento de contención.

También en casos muy singulares pueden realizarse paraguas con inyecciones mediante tubo-manguito, lo que sería equivalente a un paraguas pesado pero con la realización de perforaciones y disposición de manguitos que permitan distintas fases de reinyección.

En cabeza los paraguas se unen mediante una viga de atado, que puede ser de hormigón armado o incluso de gunita, según el esquema de la figura 3.1.

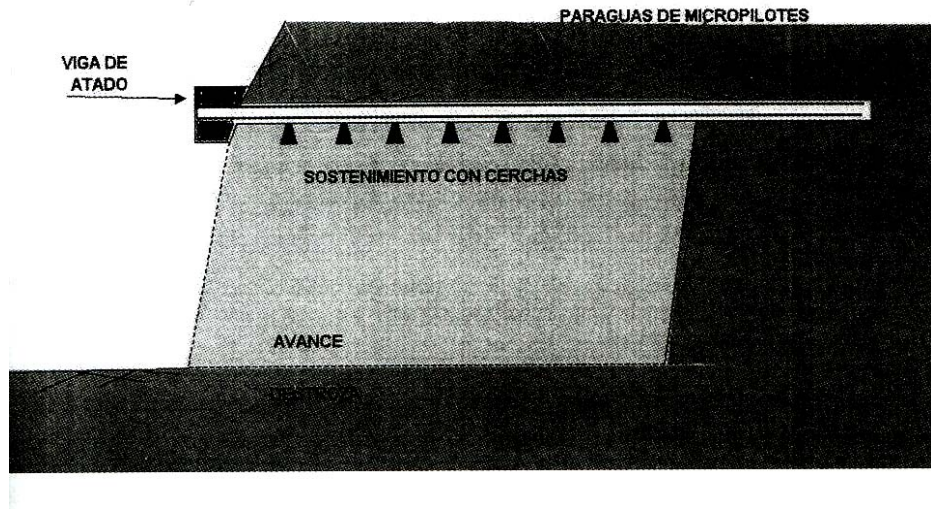


Figura 3.1

El cálculo del paraguas se realiza a flexión, considerando la sobrecarga de túnel y el apoyo en el sostenimiento colocado y con el vano libre apoyado en el frente. Igualmente se introduce el paraguas como elemento tipo anclaje por encima de la excavación, como puede verse en la figura 2.4.

4. VISERA DE PROTECCIÓN

Es un elemento constituido por cerchas y chapa Bernold que permite garantizar que no se producen caídas de bloques del frente que afecten al paso de la maquinaria en el emboquille.

Las longitudes de visera pueden variar desde 4-5 m (3 ó 4 cerchas cuya base quedaría ya dentro de la propia zona de túnel subterráneo), hasta la longitud necesaria en el caso de que se haya profundizado mucho la trinchera.

Los elementos que constituyen la visera van a ser por tanto:

- Cerchas en general HEB, que permitan la colocación entre ellas de la chapa Bernold (foto 4.1).



Foto 4.1

Las cerchas pueden apoyar sobre patas de elefante, como las que se representan en la foto 4.2.



Foto 4.2

- Chapa Bernold de 3 mm de espesor (aunque también existe de 2 mm de espesor, pero con menor capacidad resistente), como puede verse en la foto 4.3.



Foto 4.3

- Traviesas de redondos ϕ 32 ó perfiles especiales para garantizar la separación de las cerchas HEB y servir de apoyo intermedio a las planchas de chapa Bernold.
- Gunita colocada por delante y por detrás recubriendo las cerchas y la chapa Bernold, y en la que se incluye la viga de emboquille.

5. BOCA DE TÚNEL O PORTAL

Como ya se ha citado anteriormente, entre el emboquille subterráneo del túnel y la boca o portal se dispone un tramo en que la trinchera se rellena contra una estructura de hormigón que se denomina como túnel artificial.

El acabado del túnel artificial puede realizarse con distintas geometrías y/o estéticas, pero siendo hoy la forma más habitual la de pico de flauta, que puede estar incluso decorada como la que se representa en la foto 5.1.



Foto 5.1 - Vista emboquille M-12

6. TIPOLOGÍA DE LAS ROTURAS EN LAS ZONAS DE BOQUILLAS

La tipología de las inestabilidades del talud frontal de un emboquille tiene las mismas variedades que las de un talud sin túnel:

- Deslizamientos con roturas planas y/o de cuñas,
- Vuelcos de estratos,
- Roturas en masa por el interior del talud con directrices total o parcialmente curvas.

Además hay que añadir una variedad específica, la rotura por hundimiento de una parte del terreno situada sobre el túnel, produciendo un área vacía en la base del talud o una chimenea en las inmediaciones de dicha base según que el colapso sobre el túnel se produzca en la misma boca o ligeramente hacia el interior.

Este tipo de rotura puede deberse a escasez de sostenimiento del túnel (como en el caso de la boquilla Sur del Túnel de Pancorbo), o a operaciones de excavación extemporáneas (como en el caso de la boquilla Norte del primer Túnel de Pando, o en el de la boquilla Norte del Túnel II de la variante de Gandia, Romana, 2005).

Si denominamos ángulo de ataque el formado por el eje del túnel y el rumbo del buzamiento del talud de emboquille, cuando el talud frontal está bien desarrollado y el ángulo de ataque del túnel es pequeño –caso en el que son casi perpendiculares el túnel y la traza horizontal del talud-, son relativamente frecuentes los problemas de estabilidad, con caídas parciales o incluso roturas planas generalizadas (como en la boquilla Sur del primer túnel de Lorca). Especialmente los problemas de vuelco de estratos suelen sorprender durante la ejecución, a causa de la inclinación vertical o casi vertical del talud frontal, al menos en la parte baja. Y así como en un talud normal el vuelco suele ser un proceso lento que rara vez es catastrófico, en los taludes frontales de las bocas de los túneles el vuelco desorganiza la masa rocosa situada sobre la clave del túnel y daña las medidas de emboquille construidas previamente (como en la boca Norte del túnel de Paracuellos, Romana, 1997), lo que puede evitarse tratando previamente el talud frontal, antes de que se desarrolle el vuelco incipiente (como en el caso de la boquilla Sur del túnel de Torrecilla, Romana, 2005).

Cuando existe una trinchera de acceso relativamente estrecha el talud frontal tiene poco desarrollo horizontal, y muchas veces los riesgos de inestabilidad del talud no se estudian debidamente, confiando solamente en el efecto tridimensional de la trinchera de acceso y en la dimensión relativamente reducida de la base. Es evidente que esta geometría reduce el tamaño de las posibles inestabilidades de tipo general, pero no las hace desaparecer. Los desplazamientos planos o en cuñas tendrán un volumen reducido. En cuanto a los vuelcos la contención lateral de los taludes de la trinchera suele ser suficiente para que no aparezcan, o para que, si aparecen, no lleguen a la rotura total (como en el caso de la boquilla Norte del Túnel de Alhama).

Cuando el ángulo de ataque del túnel es grande –son poco oblicuos o incluso casi paralelos el túnel y la traza horizontal del talud- son especialmente frecuentes los problemas de estabilidad, a causa de la asimetría de la excavación del túnel. Si además la ladera tiene pendiente lateral respecto al túnel, con coberturas diferentes en cada hastial, pueden producirse problemas graves de inestabilidad (como en la boquilla Oeste del primer Túnel de Contreras en la antigua carretera N-III, o en los taludes de la boca del Túnel del Turonell, con dos tubos, en la Autovía A-2). Esta disposición también agrava los riesgos de colapso sobre la bóveda del túnel, a causa de la simetría de cargas, con resultante inclinada (lo que contribuyó mucho al colapso de la boquilla Norte del Túnel de Pando, ya citado). En la foto 6.1 puede verse un ejemplo de este tipo de inestabilidad.



Foto 6.1 – Inestabilidad en emboquille

6.1 Algunos tratamientos característicos utilizados en emboquilles

La necesidad de tratamientos especiales tanto en los taludes frontales como en los emboquilles fue reconocida hace mucho tiempo. Pero se ha producido un evolución clara en los procedimientos constructivos a lo largo del tiempo.

Por ejemplo en los túneles hidráulicos de la Presa de Tarbela en Pakistán se protegieron algunos taludes frontales de emboquille mediante una malla, en su parte inferior, de anclajes tipo Perfo de ϕ 34 y 24 metros de longitud, inyectados y tensados a 20 T (figura 1). En otros taludes de la misma presa se construyó una berma, necesaria por razones de obra (figura 2) y se reforzó fuertemente el sostenimiento de la zona de emboquille con cerchas metálicas rígidas y arcos de hormigón (figura 3).

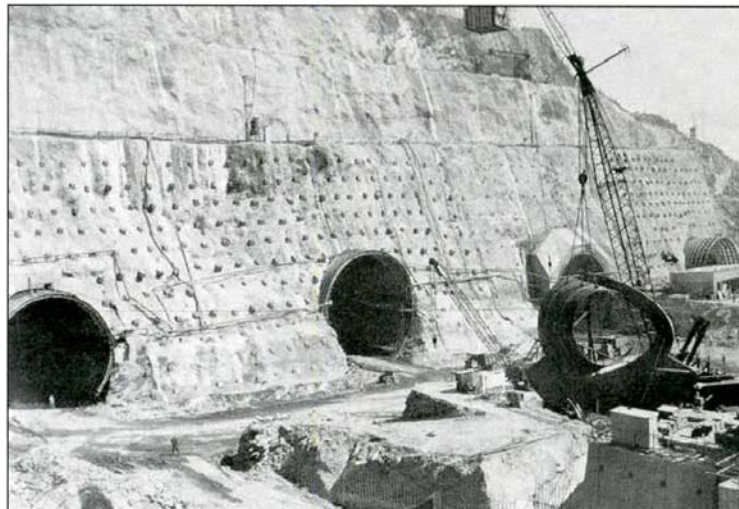


Figura 1.- Anclajes tipo Perfo en los taludes de emboquille de algunos túneles hidráulicos en la presa de Tarbela en Pakistán (Becker, 1972)



Figura 2.- taludes de emboquille de algunos túneles hidráulicos en la presa de Tarbela en Pakistán. (Beker, 1972) Obsérvense los arcos de sostenimiento de hormigón esquematizados en la figura 3

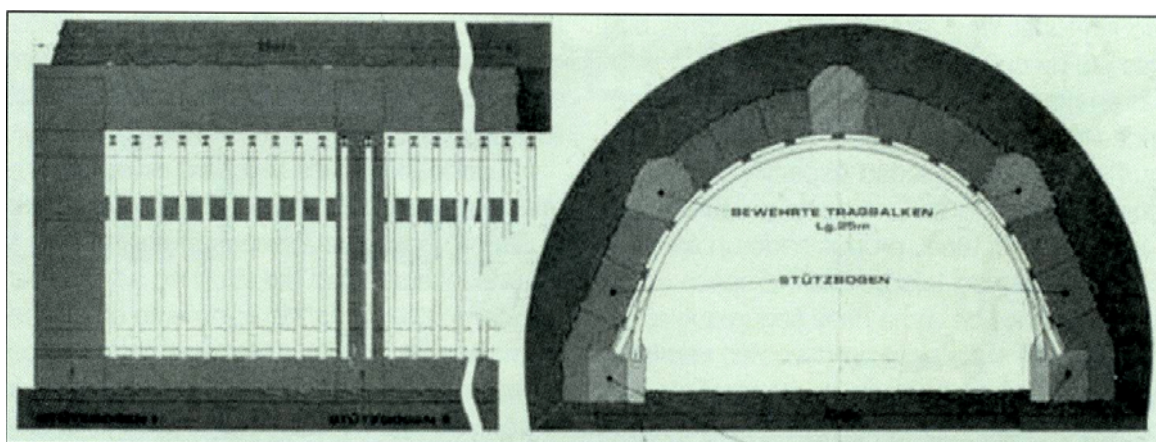


Figura 3.- Esquema de sostenimiento de la zona de emboquille de la figura 2 mostrando cerchas metálicas rígidas y arcos de hormigón arriostrados mediante vigas, también de hormigón (Beker, 1972)

En el Túnel de San Elías, en la Autopista Mesina-Palermo, una boquilla se encontraba inmediatamente bajo otra carretera en un terreno definido como *una mezcla caótica de derrubios de ladera con una matriz limo-arcillosa que englobaba bloques de roca con tamaño variable entre 0.1 y 1 m*, que aparentemente constituían la zona inferior de un corrimiento, y tenían potencias variables entre 12 y 19 m (Faoro et al, 1986). La solución, esquematizada en la figura 4, consistió en la construcción de un falso túnel para el cruce de la carretera. El falso túnel se cimentó mediante columnas de jet-grouting (una cada 3

m²), el emboquille mediante un paraguas de jet-grouting y la continuación de la excavación mediante otros dos paraguas sucesivos, los tres de 13 m de longitud.

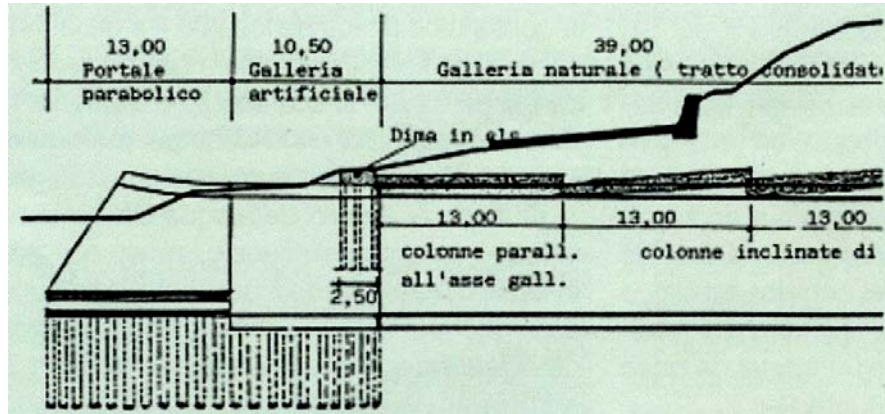


Figura 4.- Esquema de la construcción de la boquilla del Túnel de San Elías en la Autopista Mesina-Parlerno (Faoro et al, 1986)

En el túnel de L'Arzilier en la Autopista del Lemán, en Suiza, la boquilla se sitúa en un punto, bajo otra carretera, con muy poco recubrimiento de roca sobre la que había una formación de derrubios bajo una capa de loess. La figura 5 muestra el corte geológico (Betschen y Vuilleumier, 1986).

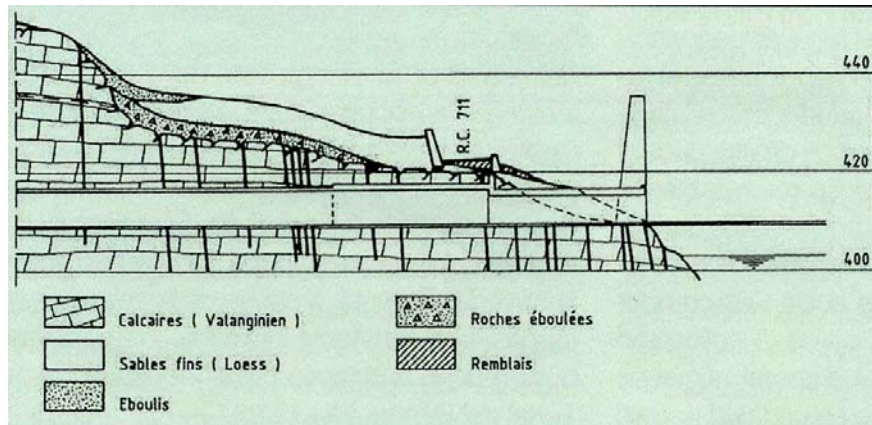


Figura 5.- Corte geológico en la boquilla del Túnel de L'Arzilier en Suiza (Betschen y Vuilleumier, 1986).

El emboquille se realizó bajo un paraguas de tubos metálicos separados a 50 cm. A causa de la gran oblicuidad de los dos tubos del túnel respecto a la ladera los tubos fueron de longitud variable: entre 8 y 21 metros en un tubo entre 26 y 32 en el otro. La figura 6 muestra el paraguas y el sostenimiento rígido interior, con el método Bernold, y en la figura 7 se muestran las fases de ejecución, que se realizó a sección completa,

pero excavando y sosteniendo por tongadas sucesivas desde la clave del túnel a la solera.

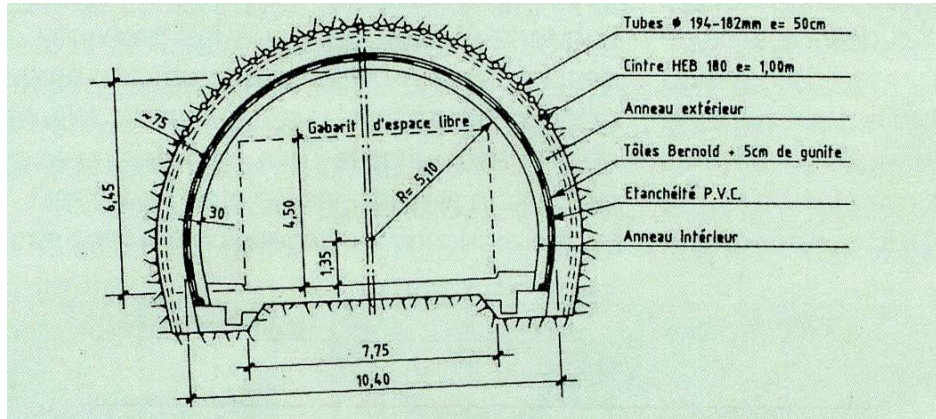


Figura 6.- Paraguas y sostenimiento en el emboquille del Túnel de L'Arzilier en Suiza (Betschen y Vuilleumier, 1986)

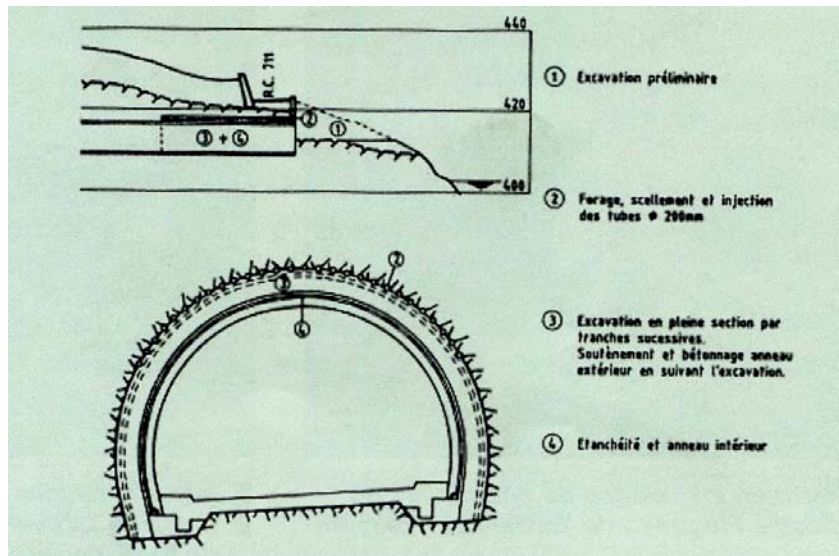


Figura 7.- Fases de ejecución de la excavación, paraguas y sostenimiento en el emboquille del Túnel de L'Arzilier (Betschen y Vuilleumier, 1986)

En los Túneles de la Corniche de San Remo en Italia, excavados en formaciones complejas de flysch, se emboquilló sosteniendo el talud con 9 niveles horizontales de anclajes de 40 T y 15 m de longitud y construyendo un paraguas de micropilotes ya con las tectónicas que actualmente están en uso (Borchi et al, 1992).

Los Túneles de Carenque, en el anillo exterior de Lisboa, son bastante notables. Se trata de dos tubos con un área de 173 m², y un ancho de casi 20 m cada uno, separados por un pilar de 8 m de ancho. El objeto de los túneles fue preservar un yacimiento de incnitas (huellas fósiles de dinosaurio) y se excavaron mecánicamente (Sarra Pistone y Oliveira, 1997). Las boquillas Suroeste tenían un recubrimiento de sólo 3 metros y se excavaron por galerías múltiples, siguiendo el antiguo método alemán (que es el usado en la excavación de estaciones del metro de Madrid, con una sección geoméricamente similar).

Los Túneles de la Autopista de Borg Bock en Alemania se excavaron en granito descompuesto (jabre). Es interesante constatar que la primera operación fue la perforación de una serie de drenes para baja el nivel freático colgado superficial. Después se construyó un paraguas de micropilotes y la excavación de la calota se realizó con una contrabóveda provisional y un machón central (Erichsen, 2003).

Finalmente, las boquillas Sur de los Túneles de Dölzschen, en la Autopista Dresde-Praga, emboquillan inmediatamente después de un puente y con una gran oblicuidad (Spang, 2003). La figura 8 muestra la solución adoptada. El talud se sujeta mediante anclajes y bulones y la base de la boca del túnel es a la vez el estribo del puente y se construye mediante un muro de hormigón anclado en cabeza.

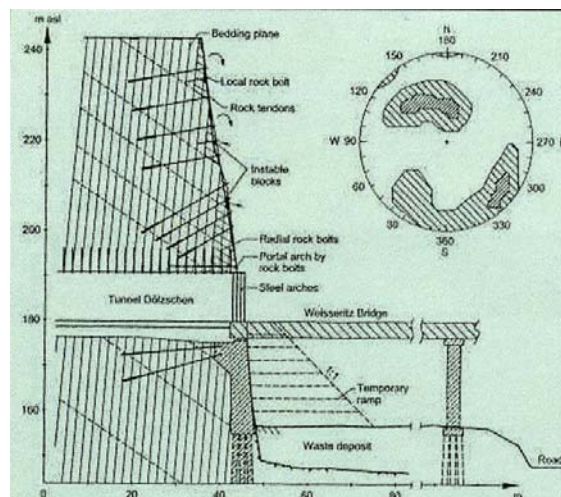


Figura 8.- Boquilla Sur del Túnel de Bölzschen y estribo Norte del Puente de Weiberitz. Soluciones constructivas y diagrama con el diaclasado (Spang, 2003)

Se han utilizado a lo largo de los últimos 40 años una gran variedad de soluciones, porque los emboquilles presentan una gran variedad de situaciones problemáticas. Pero se observa una convergencia general hacia soluciones más mecanizadas, menos artesanales y más estandarizadas, con el paraguas de micropilotes como elemento básico de emboquille.

6.2 Uso de las clasificaciones geomecánicas de Bieniawski y Barton en las boquillas de los túneles

Según Barton, la clasificación Q puede usarse para determinar el sostenimiento en las boquillas porque en todas las versiones de la clasificación Q (desde la de 1974 hasta la de 1993) aparece una nota que dice: **para boquillas úsese 2 J_n (en vez de J_n)**. Puesto que:

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$$

Parece que ello equivaldría a recomendar que en las boquillas se divida por 2 el valor de Q lo que supone reducir en una clase (o a veces mantener) la clase de sostenimiento. Pero eso no es cierto porque es preciso considerar que las boquillas están muy cerca de la superficie y, por lo tanto, **el valor correspondiente de SRF aumenta al menos de 1 a 2,5**. En conjunto y como regla general aproximada puede aceptarse que:

$$Q_{\text{boquilla}} = Q_{\text{túnel}} / 5 \quad Q_b = Q/5$$

No existe, en ninguna de las versiones de la clasificación RMR de Bieniawski, una recomendación específica para boquillas. Si se traslada la corrección Q de la clasificación de Barton, mediante la conocida fórmula:

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

Se obtiene:

$$RMR_b = 9 \ln Q_b + 44 = RMR - 9 \ln 5 \approx RMR - 15$$

Lo que equivaldría a una reducción de casi una clase de Bieniawski.

En la práctica española el incremento de 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 de RMR y Q. Por poner un ejemplo en ningún caso los valores reducidos de RMR y Q recomendarían colocar cerchas en las boquillas de túneles con RMR igual o superior a 65, y en la práctica sí se colocan.

El elevado número de incidentes (y de accidentes) en las boquillas de los túneles está motivando una actitud mucho más conservadora a la hora de diseñar sostenimientos, normalmente rígidos, para los primeros 10 a 20 metros de los túneles. Y el paraguas se ha convertido en una práctica habitual.

La clasificación de Barton no está prevista para taludes y en la de Bieniawski los factores de ajuste según la orientación de las juntas son mucho mayores para taludes que para túneles (tabla 1).

Orientación	Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable
Túneles	0	- 2	- 5	- 10	- 12
Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60
Diferencia de RMR	0	- 3	- 20	- 40	- 48
Diferencia de clase	0	< 1	1	2	> 2

Tabla 1.- Factores de ajuste en la clasificación de Bieniawski (1979)

Por lo tanto, las diferencias de clase (y el correspondiente incremento de las medidas de sostenimiento) resultarían mucho mayores si se analiza el problema como un talud en lugar de analizarlo como un túnel. El emboquille es precisamente la intersección de ambas cosas –talud y túnel- y por esta razón no pueden aplicarse (y de hecho nunca se aplican) las clasificaciones geomecánicas convencionales a los emboquilles.

Ni siquiera es siempre adecuado el uso de la clasificación SMR en los taludes frontales de excavación de emboquille por varias razones:

- Se trata de un talud provisional, que debe durar de tres a cuatro años.

**TEMA VI EMBOQUILLES, TRATAMIENTOS TALUD EMBOQUILLE, VISERAS Y PORTAL
DE LOS TUNELES.**

- En muchos casos el ancho del talud es reducido, porque está estribado por los taludes laterales de la trinchera de acceso.
- Se tiende a construir la parte baja del talud lo más subvertical posible, para facilitar la entrada en el túnel, mientras que en la parte superior el talud frontal puede tenderse (y debe tenderse en los casos de descompresión de la capa superior del terreno).
- En muchos casos se construyen bermas intermedias a la cota de cambio de inclinación del talud frontal.

6.3 Clasificación propuesta por Rogers y Haycocks (1989)

En una comunicación que ha pasado casi desapercibida Rogers y Haycocks (1989 a) presentaron una *Clasificación de rocas para el diseño de portales* basada en un estudio de 300 casos de portales donde se comprobó que, desgraciadamente, la roturas tanto de superficie como de interior son frecuentes. Parece que la mayoría de los casos se referían a portales de minas (bocaminas), aunque se añadieron algunos casos de bocas de túneles. Los autores trabajaban en el Departamento de Ingeniería Minera y Mineralúrgica de la Universidad Estatal Politécnica de Virginia en Blacksburg (Virginia, USA) y habían presentado dos comunicaciones similares en Conferencias Internacionales sobre Minería (Roger y Haycocks, 1988, 1989 b).

El trabajo de Rogers y Haycock tiene tres partes. En la primera recomiendan el uso de los factores de ajuste, F_1 para taludes propuestos por Bieniawski y presentan en la tabla 2 para su definición en función del buzamiento, b , las discontinuidades más significativas (que en la minería del carbón suelen ser los planos de sedimentación (tabla 2) fue derivada para taludes frontales subverticales. Se ha añadido (entre paréntesis) el factor de corrección utilizado en el sistema SMR para talud vertical.

Buzamiento $b(^{\circ})$	Rumbo paralelo a talud		Rumbo perpendicular
	b hacia Ext.	b hacia Int.	a talud
0-15	-5 (-9)	0 (0)	0 (-1)
15-30	-25 (-24)	-5 (-6)	0 (-4)
20-60	-50 (-50)	-5 (-25)	-5 (-8)
60-90	-60 (-60)	-25 (-25)	-25 (-9)

Tabla 2.- Factores de ajuste, F_1 , para la estabilidad de taludes en las trincheras de acceso a los portales (Rogers y Haycocks, 1989a). B significa ángulo de rozamiento. Se han añadido (entre paréntesis) los valores deducidos del sistema SMR).

Puede observarse que hay una coincidencia notable entre los factores de ajuste propuestos por Rogers y Haycock en 1989 y los que se deducen del sistema RMR (Romana, 1985, 1997) que Rogers y Haycock probablemente desconocieron cuando realizaron su estudio.

En una segunda parte de la comunicación proponen una forma y dimensiones empíricas para la rotura en clave más frecuente en bocaminas de carbón (36% de todos los casos de rotura de boquillas estudiados), de sección rectangular, que es un tipo de sección frecuente en la minería sedimentaria (carbón, potasas, etc.). El modelo puede utilizarse para calcular las cargas sobre el sostenimiento del túnel en la zona de emboquille. La figura 9 reproduce el modelo y la figura 10 su definición geométrica con las dimensiones propuesta. El volumen de roca V , cuyo peso debería resistir el sostenimiento valdría:

$$V = 0.25 (W/2)^2 d$$

Donde:

V = volumen de roca

W = ancho del túnel

D = altura

$$D = W (100-RMR) / 100 \text{ (Unal, 1983)}$$

Y el ángulo crítico " α " vale:

$$\alpha = \text{arc tg} (25 / (100-RMR)) > 14^\circ$$

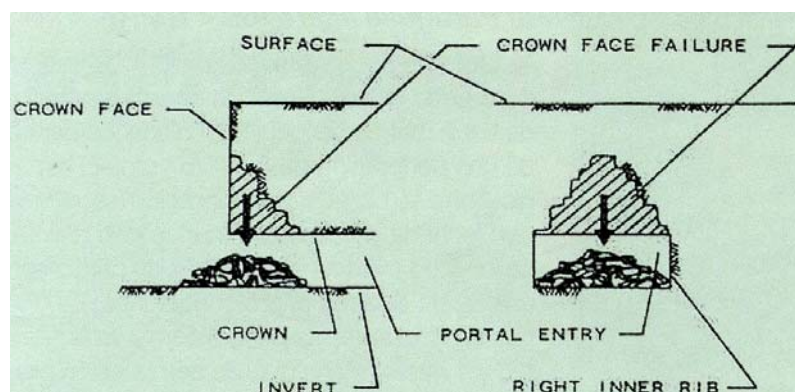


Figura 9.- Forma más frecuente (36%) de rotura encontrada por Rogers y Haycocks (1988).

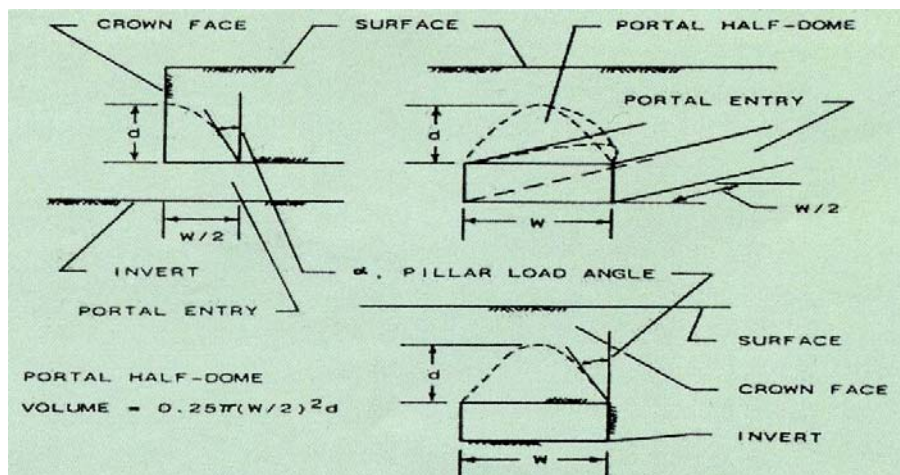


Figura 10.- Modelo geométrico de la rotura más frecuente (36%) encontrada por Rogers y Haycocks (1988)

En una tercera parte, proponen unas recomendaciones muy detalladas para los métodos de excavación, emboquille y sostenimiento, tanto de interior como de los taludes de la trinchera. Estas recomendaciones se basan en el valor del RMR corregido para las boquillas con los factores de ajuste correspondientes a los taludes (RMRB) y que consideran ligeramente más conservadoras que las recomendaciones de las clasificaciones RMR y Q. Este grado adicional de sostenimiento se considera necesario para evitar las roturas de portales encontrados comúnmente en las condiciones muy variables y a menudo adversas que se encuentran cerca de la superficie de las masas rocosas. Estas recomendaciones se presentan (traducidas y reordenadas) en la tabla 3.

1. Excavación		Recubrimiento (W)		Pase	Partición	Túnel	Berma en clave	Paraguas	Visera exterior
Clase	Superior	Lateral				piloto		L(W)	
RMR _B	I	0,5-1*	1,5*	Normal	Sección completa	Opcional	Opc.	0,5-1 (op)	Opcional
	II	1-2*	(1,5*)	Corto	Avance y destroza	Si	Si	1*	Ligera/1*
	III	2*	(2*)	Corto	Avance y destroza	Si	Si	1-1,5*	Media a pes./1*
	IV	2*	(2,5*)	Muy corto	Avance y destroza	Si	Si	1,5-2*	Pesada/1*
	V	2-3*	3*	Muy corto	Avance, dest., cont.	Si (escudo?)	(?)	2-3*	Cut-cover/1-2*

2. Tratamiento talud		Hormigón proyectado (cm)			Bulones			Malla	Anclajes	Otros
Clase	Frente	Lateral	Talud	Frente	Hast.	L(W)	S(m)			
RMR _B	I	5-10 (op)	No	No	No	-	-	No	No	-
	II	5-10	5	No	Si	No	0,5-1*	1,3-2	Si	No
	III	10-15	5-10*	5-10*	Si	Si	1*	1-1,3	Si	No
	IV	15-30*	15-30*	5-10*	Si	Si	1*	0,6-1	Si	Si
	V	20-60*	20-60*	5-10*	Si	Si	1*	0,6-1	Si	Si

3. Sostenimiento Int.		Hormigón proyectado (cm)			Bulones		Malla	Anclajes			Otros
Clase	Clave	Hast.	Frente	L(W)	S(m)		Tipo	S(m)	Forro		
RMR _B	I	5-10 (op)	No	No	0,5-1	Spot	-	No	-	-	-
	II	5-10	5	No	0,5-1*	1,0-2	Si	Lig.	1-2	Parcial	-
	III	10-15	5-10*	No	0,5-1*	1-1,3	Si	Med/Pes	0,6-1,3	Total	-
	IV	15-30*	15-30*	5*	1*	0,6-1	Si	Pesada	0,6	Total	Contrabóveda ¿Costillas?
	V	20-60*	20-60*	5*	1*	0,6-1	Si	Pesada	0,6	Total	Contrabóveda ¿Costillas?

Tabla 3.- Recomendaciones de Rogers y Haycocks para el sostenimiento de portales, de menos de 30 pies de ancho ($W < 30$ ft) y del talud frontal de sus trincheras de acceso. Los números con asterisco se refieren a anchos de portal (2+ significa 2W)

Desde la práctica española, estas recomendaciones parecen conservadoras en algunos aspectos (tratamiento de taludes, longitud de bulones) pero constituyen una buena lista de control de todas las medidas disponibles a la hora de diseñar una boquilla.

6.4 Nuevas recomendaciones para predimensionamiento de emboquilles

Se carece, a diferencia de lo que ocurre con los sostenimientos de túneles, de unas reglas simples que permitan predimensionar los emboquilles en los estudios de viabilidad y en los anteproyectos. Como una primera aportación para cerrar esa laguna, en la tabla 4 se presentan las *Recomendaciones de emboquille de túneles* (modificadas por Romana, 2000) indicando varios aspectos específicos de la construcción y sostenimiento del túnel en la zona de emboquille y del talud frontal. Conviene hacer notar que estas recomendaciones no pretenden referirse al problema de la estabilidad global de los taludes laterales de la trinchera de acceso, que deben tratarse de la misma forma que en el resto de la traza.

Clasificación		Excavación		Tratamiento del talud frontal				
SMR	Clase	Partición de emboquille	Paraguas	Bulones			Hormigón proyectado	Red®/Mallazo
				L(m)	b/m ²	s (m)		
100	I a	SECCIÓN / COMPLETA CALOTA / DESTROZA GALERÍA CENTRAL GALERÍAS MÚLTIPLES CONTRABÓVEDA	Opcional	No	No	No	No	® Opcional
90	I b		Opcional	4	<0,10	Ocasional	No	® Si
80	II a		Ligero	4/5	0,11	3x3	No	® Si
70	II b		Ligero o medio	5/6	0,25	2x2	Ocasional	® Si
60	III a		Medio	6	0,44	1,5x1,5	Ocasional	® Si
50	III b		Medio	6/8	0,70	1,2x1,2	Ocasional	® Si
40	IV a		Medio	8	1,00	1x1	0,10-0,15	Mallazo opcional
30	IV b		Pesado	8	1,50	0,8x0,8	0,15-0,20	Mallazo simple
20	V a		Pesado	No	No	No	0,20-0,25	Mall. simple o doble
10	V b		Pesado	No	No	No	0,25-0,30	Mallazo doble
0								

Notas: • El tipo de paraguas se discute en el texto.
 • Las unidades para el bulonado son: L, longitud en metros (m); densidad de bulones por m² (b/m²) y s, espaciamiento en metros (m).
 • La unidad para el espesor de hormigón proyectado, e, es el centímetro (cm). El tipo de red y el uso de mallazo se discuten en el texto.
 • Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente.
 • Las líneas de trazas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces.
 • No se considera conveniente mantener el talud frontal cuando SMR<20. En esos casos el talud debe sustituirse por un muro, preferentemente anclado. Cuando 20<SMR<30 debe estudiarse la opción del muro como alternativa.

Tabla 4.- Recomendaciones de emboquille de los túneles (modificadas por Romana, 2000)

En estas recomendaciones se utiliza el sistema de subclases (con un intervalo de 10 puntos), dividiendo en dos cada una de las clases de Bieniawski (que tienen un intervalo de 20 puntos). Se mantiene el número romano asignado por Bieniawski y se añaden las letras “a” o “b” para designar la subclase superior o la inferior respectivamente.

Las recomendaciones que se presentan tratan de resumir la buena práctica actual española en el campo de los emboquilles. Dado el riesgo que para la obra supone un accidente en la boquilla del túnel la buena práctica es conservadora. El incremento de coste que esto supone es muy pequeño comparado con el coste de cualquier incidente (y de la parada de obra que suele conllevar). Además es preciso tener en cuenta la seguridad del personal de ejecución, que permanece en las inmediaciones de la boca más tiempo que en cualquier otro punto de la obra.

7. NUEVAS RECOMENDACIONES APRA PARA EL PREDIMENSIONADO DE EMBOQUILLES.

7.1. Participación de la sección

El uso de la maquinaria convencional de excavación de túneles requiere alturas libres no menores de 5 ó 5,5 m. Por lo tanto, los túneles de hasta 6 ó 7 m de ancho suelen excavarse a sección completa. En los túneles de ancho mayor (como son todos los túneles de carreteras y/o ff.cc de vía doble) puede plantearse la excavación a sección completa (que tiende a realizarse cada vez más) o a sección partida.

Las recomendaciones se refieren solo a la zona de emboquille. Para masas rocosas de buena calidad ($RMR > 70$) parece recomendable emboquillar a sección completa, si la excavación va a continuarse también a sección completa. Para masas rocosas de media calidad ($30 < RMR < 70$) el sistema habitual es la sección partida en dos: avance y destroza. Para masas rocosas de calidad mala ($30 > RMR$) es más conveniente el emboquille por galerías múltiples, con construcción de contrabóveda robusta para finalizar la sección. La galería central de avance se excava por delante de la calota (al menos unos metros) y proporciona una seguridad adicional, incluso cuando se emboquilla a sección partida y la calidad del macizo rocoso es media a baja ($50 > RMR$).

7.2. Paraguas de emboquille

El paraguas es siempre una buena práctica y se recomienda prácticamente en todos los casos, aunque4 podría obviarse cuando la calidad del macizo rocoso es muy buena ($80 > RMR$). Para los detalles constructivos y de perforación puede consultarse la excelente comunicación de Murillo (2000) o alguna de las comunicaciones sobre emboquilles del VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Hay muchas clases de paraguas pero por simplicidad se han considerado solo cuatro tipos:

a) Paraguas ligero ($60 < RMR$)

Constituido por bulones de ϕ 32 de acero corrugado (o por barras de acero especial) y de 6 a 9 metros de longitud, colocados dentro de una perforación de 2 ½" (67 cm). El espacio entre la barra y la perforación se rellena con lechada de cemento (nunca con resina). La longitud máxima es de 9 m y las barras son únicas sin solapes ni prolongaciones. La distancia usual entre las perforaciones varía entre 0,5 y 1 m. Conviene que las barras estén provistas de centradores.

b) Paraguas medio (30 < RMR < 70)

Constituida 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" (150 mm) y se rellenan interiormente y exteriormente con mortero, que puede aplicarse con una ligera presión. La distancia entre ejes de micropilotes oscila entre 40 y 70 cm. La longitud de estos paraguas varía entre 9 y 20 m. Para longitudes mayores de 9 m 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 arriostran con una viga de hormigón armado de directriz curva, paralela al límite teórico de la sección de emboquille.

c) Paraguas pesado (RMR < 3)

Puede estar constituido por micropilotes de tubo metálico de diámetro exterior superior a 90 mm y espesor superior a 7 mm, introducidos en perforaciones de diámetro superior a 6" (150 mm), rellenas interiormente y exteriormente por lechada que puede aplicarse con una ligera presión, o bien inyectarse con la técnica de los tubos-manguitos. La distancia entre los ejes de micropilotes es menor de 50 cm. La longitud de los paraguas pesados es, como mínimo de 20 m y está limitada técnicamente por la capacidad para mantener el paralelismo entre perforaciones próximas. Aunque se han citado paraguas de hasta 40 m de longitud la práctica habitual rara vez excede de 20-25 m. Debe estudiarse la resistencia a flexión de los solapes de tubos (reforzándola con manguitos exteriores). Las cabezas de los micropilotes deben arriostrarse con una viga de hormigón armado.

Un método antiguo de construcción de paraguas pesados sustituía los micropilotes por carriles ferroviarios, pero la longitud de los paraguas de carriles estaba limitada por la capacidad de perforación. El sistema fue ampliamente usado por ferroviarios pero

actualmente está en desuso, aunque puede encontrarse en casos de reparación de túneles ferroviarios.

d) Paraguas de jet-grouting

En terrenos sin cohesión el paraguas puede construirse mediante columnas de jet grouting, utilizando el método llamado de Jet 1 (con inyección a presión solo de lechada) por que la presión de aire y/o agua en los métodos llamados de Jet 2 o Jet 3 suele ser perjudicial para la estabilidad del talud. La distancia entre ejes de columnas es la necesaria para que resulten tangentes (o casi tangentes) entre si y debe determinarse haciendo pruebas de inyección en un talud semejante y próximo al frontal de la boquilla. Lo más usual es una distancia del orden de 60-70 cm. La longitud de los paraguas de jet grouting suele variar entre 12 y 20 m aunque se han construido paraguas de jet-grouting de hasta 25 m. En las columnas es conveniente introducir una armadura, a veces se deja la tubería de inyección.

7.3. Bulones en el talud frontal

Es normal la utilización de bulones de acero corrugado, o de acero de alta resistencia. El diámetro recomendado es $\phi 32$, aunque pueden utilizarse bulones de $\phi 25$ cuando la calidad del macizo rocoso sea alta. Los bulones deben anclarse por adherencia con lechada de cemento y es conveniente aplicar en cabeza una ligera tensión para que la placa transmita a la superficie del talud y prevenir así la descompresión superficial. La longitud de los bulones suele ser del orden de 6 m o inferior cuando se emplean para su colocación yumbos normales. Cuando se dispone de sondas o equipos específicos de perforación deben emplearse bulones de 8 ó 9 m de longitud, sin empalmes por solape. En todo caso la longitud nunca será inferior a un décimo de la altura del talud, medida sobre rasante. Las densidades iguales o superiores a 1 bulón por metro cuadrado (1 b/m^2) son altas y solo se recomiendan para valores del **RMR** inferiores a 30. En las recomendaciones (donde el bulón tipo previsto es el redondo de acero corrugado de $\phi 32$) se han propuesto longitudes (y densidades de bulonado) crecientes cuando disminuye la calidad del macizo rocoso.

Los bulones deberían perforarse e instalarse por bandas horizontales, al mismo ritmo de excavación talud, para evitar la descompresión de la masa rocosa. En ocasiones los bulones se disponen en coronas concéntricas alrededor del túnel para reforzar el terreno inmediatamente contiguo a él produciendo un efecto similar, aunque mucho menos significativo que un paraguas.

Para valores del **RMR** inferiores a 20 la masa rocosa se comportará como un suelo en el talud frontal y los bulones normales en macizos rocosos no están recomendados. Puede utilizarse una técnica de soil nailing (suelo claveteado).

7.4. Hormigón proyectado en el talud

El gunitado sistemático de todos los taludes no es deseable. La capa de hormigón proyectado puede dificultar el drenaje natural, aporta poca resistencia frente a un problema de inestabilidad del talud, enmascara los síntomas iniciales de roturas por deslizamiento y, además, tiene un mal aspecto desde el punto de vista estético. La adherencia del hormigón proyectado a la superficie del talud puede ser escasa en algunas zonas creando bolsas despegadas que se rellenan de agua y/o donde aparecen grietas de difícil interpretación.

El papel de hormigón proyectado debe reservarse a los casos en que es preciso regularizar algunos puntos del talud, para evitar descalces y roturas superficiales en masas rocosas de calidad media a buena ($40 < \text{RMR}$), y entonces debe aplicarse puntualmente, según la técnica del hormigón dental.

Para masas rocosas de calidad mala ($\text{RMR} < 40$) el hormigón proyectado puede ser útil para prevenir la erosión superficial debida al clima o a la escorrentía superficial de agua. En esos casos es preciso garantizar la adherencia a la superficie del talud, lo que puede hacerse con bulones muy cortos. Si el talud frontal va a quedar visible, total o parcialmente, al terminar la obra, conviene utilizar en la capa final de hormigón proyectado algún colorante para que el color superficial sea similar al del terreno, evitando el contraste visual que suele producir el color gris del cemento.

7.5. Red de protección sobre el talud frontal

La colocación de una red/malla metálica sobre el talud supone una importante protección contra la caída de piedras y es muy recomendable desde el punto de vista de la seguridad del personal, aunque no supone mejora de la estabilidad del talud. Debe elegirse el tipo de red o malla en función del tamaño del bloque tipo que pueda desprenderse y caer.

7.6. Mallazo

Se recomienda la colocación de mallazo como armadura de la capa de hormigón proyectado. Su función es evitar la rotura a tracción de la gunita y reforzar su resistencia a flexión frente a fenómenos de caída de fragmentos de la masa rocosa. Suele bastar un mallazo de 150x150x6 mm, que se duplica en macizos de calidad geotécnica muy mala. No es, en cambio, habitual el armado del hormigón proyectado mediante fibras metálicas en los taludes de emboquille, porque debe mantenerse la función de retención de bloques grandes que ejerce el mallazo.

7.7. Viseras de protección

Es una buena práctica construir un falso túnel provisional para proteger mejor a las personas y a los equipos de eventuales caídas de material de los taludes. Aunque en teoría resultaría adecuado construir una parte definitiva del falso túnel, en la práctica de las obras raramente es posible. El falso túnel provisional, comúnmente llamado visera, suele formarse a partir de cerchas metálicas, combinadas con chapas Bernold y mallazo, sobre cuyo conjunto se proyecta hormigón proyectado. En rigor no se trata de un sostenimiento del talud por lo que no se recoge en las recomendaciones para emboquilles. Pero es una buena práctica constructiva y parece que sustituye con ventaja a los medios de protección contra caída de piedras. Pero la visera está circunscrita al ancho de excavación del túnel y la trinchera puede ser bastante más ancha. En ese caso conviene recordar que la dinámica de la obra conducirá a colocar acopios, maquinaria o medios auxiliares en cualquier parte libre de la trinchera, que suelen ser los laterales a la excavación del túnel, y esos laterales no están protegidos por la visera.

7.8. Drenaje del talud frontal

Una buena práctica es la construcción de sistemas de cunetas de drenaje, con las correspondientes bajantes, para evitar la escorrentía superficial sobre las superficies de los taludes de la trinchera, que erosionaría y dañaría al talud.

7.9. Perfilado de la zona superior del talud frontal

Precauciones suplementarias contra accidentes son: la excavación suplementaria, tendiendo el talud en las zonas superiores meteorizadas, y la colocación de barreras y/o cercas para evitar las caídas de las personas que puedan circular en las zonas altas.

8. EFECTO DE LA SISMICIDAD

Las boquillas son un punto singular donde los sismos producen inestabilidades que no se extienden ni al resto del túnel ni a otras zonas del propio talud. El artículo seminal de *Dowding y Rozen (1978)* ha sido revisado y completado por diversos autores (por ejemplo *yoshikawa, 1981; Sharma y Judo, 1991* o *Bäckblom y Munier, 2002*) pero sus conclusiones se mantienen básicamente. La **figura 11** las resume. Puede observarse que abundan los daños en las boquillas a partir de aclaraciones de pico de 0.3 g. Además muchos de los daños importantes se refieren al gran terremoto de Kanto de 1923 en un túnel con poco recubrimiento en algunas zonas, que sufrió además un deslizamiento en una boquilla.

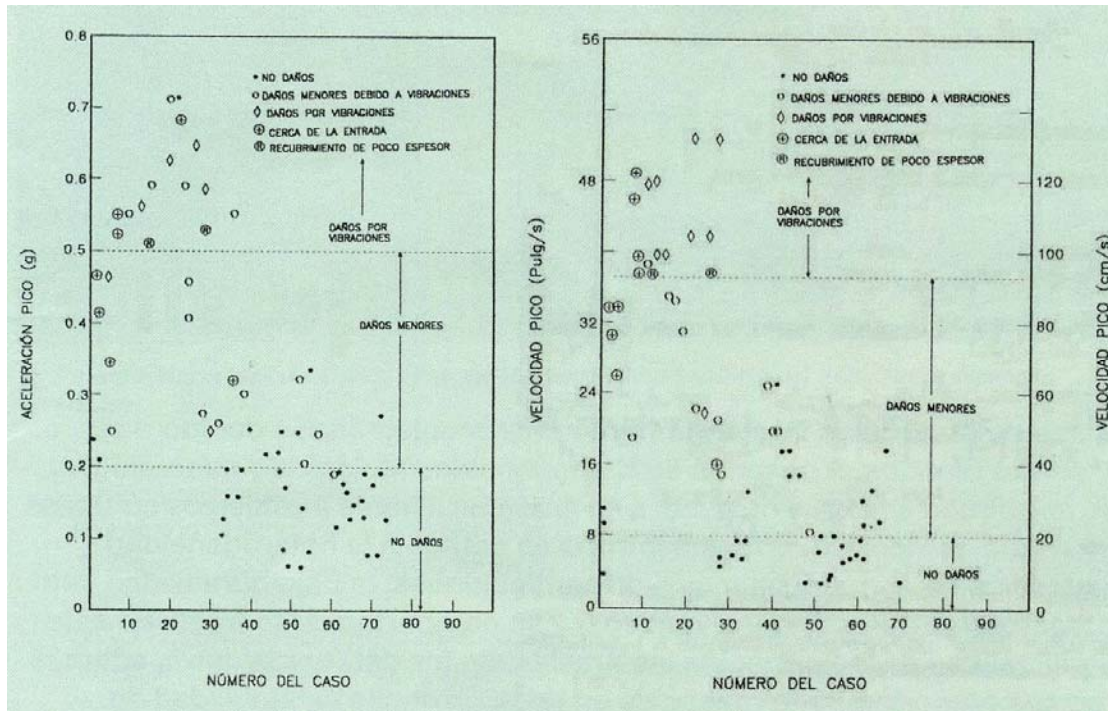


Figura 11.- Daños producidos por sismos en túneles según Dowding y Rozen (1978)

Bäckblom y Munier han revisado los efectos de los terremotos habidos en Japón desde el año 1923 (el ya citado de Kanto) hasta el año 1995 (el terremoto de Kobe) y concluyen:

- a) que la mayor parte de los daños tuvieron lugar en zonas débiles (fallas, zonas tectonizadas, etc) que ya habían dado problemas durante la construcción

- b) que los túneles de montaña solo sufren daños en el interior si están muy cerca del epicentro (por ejemplo a menos de 10 km de un sismo de magnitud 7 o a menos de 30 km de un sismo de magnitud 8

- c) que también se producen daños por problemas de estabilidad de laderas en las boquillas.

La **tabla 5**, debida a *Hansmire* resume las condiciones de riesgo en función de la aceleración de pico y/o la velocidad de pico de las partículas en la superficie del terreno. Puede observarse que se han registrado roturas de boquillas a partir de aceleraciones de 0.31 g y velocidades de 40 cm/sg.

Rango de movimientos máximos del terreno a nivel de superficie		Clasificación general de los daños constatados
a(g)	v(cm/s)	
<0,19	<20	No hay daños
0,19-0,25	20-40	Algunos casos de agrietamientos menores en túneles revestidos de hormigón.
0,25-0,52	40-80	Daños menores y un caso de colapso parcial en un túnel revestidos de ladrillos, debido a deslizamientos.
>0,52	>94	Varios casos de daños.

Tabla 5.- Daños ocasionados por los sismos en túneles en función de la aceleración y velocidad de las partículas en la superficie del terreno