

## **EMBOQUILLES: INTERSECCIÓN DE TALUD Y TUNEL**

ROMANA RUIZ, Manuel. Universidad Politécnica de Valencia. STMR

### **RESUMEN:**

El emboquille de los túneles es la intersección del talud y del túnel y tiene características diferentes a ambos. Hay muy pocos desarrollos completos de este punto en la literatura técnica, más allá de la presentación de casos concretos. Sin embargo la boca de un túnel es un punto delicado porque presenta riesgos específicos tanto durante su construcción como durante su explotación. En esta conferencia se presenta la tipología de las inestabilidades que pueden aparecer en el talud frontal en función de las posiciones relativas de talud y túnel y de la forma de la posible trinchera de acceso. Se comenta, a través de la presentación de casos concretos, la evolución de las técnicas constructivas aplicadas en boquillas difíciles durante los últimos 40 años. Se concluye que no es posible la aplicación de las clasificaciones geomecánicas convencionales; se presenta una clasificación para bocaminas y unas nuevas recomendaciones de emboquille de túneles que incluyen los métodos de excavación del emboquille el uso de paraguas y viseras, el tratamiento del talud frontal mediante bulonados y gunitados, y el uso de redes o mallazos de protección contra caída de piedras. Finalmente se añade una breve nota sobre los riesgos, en emboquilles de túneles, debidos a sismos.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La boquilla de un túnel es un punto singular tanto en el talud, o ladera, en que se inserta como en el propio túnel. El talud queda siempre, de alguna manera, debilitado tanto por la extracción de material en su pie – a menudo su punto crítico – como algunas veces por las voladuras requeridas para el emboquille. En cuanto al túnel la excavación de emboquille es siempre bidimensional, con pérdida de las ventajas tensionales que aporta la tridimensionalidad del frente cuando se sitúa ya a una cierta profundidad.

Además la boca de un túnel es un verdadero cuello de botella de la obra, porque todo tiene que entrar por la boquilla (personal, aire limpio, agua, energía, líneas de comunicaciones, materiales, maquinaria) o tiene que salir (escombros de la excavación, aire y agua sucios, desechos, personal y maquinaria de recogida)

Durante la explotación la boca del túnel, y la zona próxima a ella, sigue siendo un punto con riesgo de que se produzcan inestabilidades, avalanchas y caídas de terreno (o rocas sueltas) en el talud. Por poner un solo ejemplo, el día 3 de Enero del año 2003 el tren “Estrella”, que enlaza La Coruña y Vigo con Barcelona, encontró un “desprendimiento de piedras y tierra” a la salida del túnel 30 en la zona del Bierzo, sin tiempo de alerta para que el conductor aminorara la marcha o detuviera el tren. La locomotora descarriló y, por suerte, no hubo heridos. El accidente trajo a la memoria uno de los más graves que han sufrido los ferrocarriles españoles. El 3 de Enero de 1944, por la mañana, el expreso correo Madrid-Galicia colisionó con otro convoy sin viajeros dentro del túnel 20, cerca de Torre del Bierzo. Se produjo un fuego y el túnel tardó una semana en ser despejado. No se sabe bien el número de muertos: 87 según los datos oficiales y 350 según otras estimaciones.

Por lo tanto las bocas de los túneles son un punto con riesgo, a considerar en proyecto, durante la construcción o en la explotación. La seguridad es la primera obligación del ingeniero que diseña cualquier estructura: seguridad, en primer lugar, para los operarios que la construyen, seguridad para los usuarios que la utilizan, seguridad para terceras personas y bienes colindantes, seguridad para el medio ambiente, y seguridad, finalmente, para la propia estructura frente a cualquier combinación previsible de circunstancias adversas. Después de construida el testigo de la seguridad pasa al explotador que debe estar atento a los cambios que puedan producirse en la propia estructura, en sus modalidades de uso y en las solicitudes ambientales.

A diferencia de los programas de ordenador, la seguridad no puede comprarse a un suministrador. Es preciso que durante todo el proceso de diseño y construcción, y especialmente al principio, cuando se formaliza la primera idea-imagen de la estructura, la seguridad sea uno de los criterios de actuación. Por lo tanto no basta con encargar programas informáticos sofisticados o instalar “hilos de Ariadna” sino que es preciso asumir responsabilidades.

En la literatura técnica española sobre túneles se ha publicado muy poco de emboquilles, más allá de citar una serie de casos concretos. Hay un capítulo, con mucha información y referencias en el libro 1º de Ingeotúneles (Ortuño, 1998) y destaca el intento de Celada (2000) que reunió a varios autores, y dedicó a los emboquilles la tercera parte de su “II Curso sobre Diseño de Túneles”.

De otro lado en la literatura técnica sobre taludes existen aún menos referencias a los emboquilles de túneles (salvo un par de comunicaciones en el IV Simposio Nacional de Túneles, celebrado hace ocho años en Granada).

Tampoco hay referencias en la literatura técnica no española. Por citar solo dos ejemplos: las recomendaciones para el diseño de túneles de ITA (1988) no dicen nada sobre las boquillas, y el Manual de Ingeniería de Túneles del Ejército Americano (USA Army, 1997, referencia EM 1110-2-2901), en su Capítulo 4, sobre Investigación Geotécnica para el proyecto de túneles, dice que el estudio de campo de un túnel debe empezar por las boquillas “con especial atención” y da especial énfasis al reconocimiento de deslizamientos “nuevos o antiguos”, pero no vuelve a comentar el asunto

Destacan, en este desierto editorial, las “Instrucciones y recomendaciones para redacción de proyectos de plataforma. IGP-4. Instrucciones y recomendaciones sobre túneles. IGP-4.3. Recomendaciones sobre el proyecto de la excavación y sostenimientos de túneles” del

ADIF (antes GIF) con fecha de 2004. De los veintitantos puntos considerados en las recomendaciones siete se dedican a los emboquilles dando prácticamente el mismo énfasis a las cuestiones de estabilidad y sostenimiento del talud y a las del propio túnel en la boquilla. Reconoce así el ADIF la existencia del problema y colabora en su solución.

## **2. TIPOLOGÍA DE LAS ROTURAS EN LAS ZONAS DE BOQUILLAS**

Hay que considerar dos clases de tipologías: la que clasifica las roturas e inestabilidades por su forma, y la que estudia la interacción entre talud y túnel en función de la propia forma geométrica de la trinchera de acceso a la boquilla y del que podríamos llamar “ángulo de ataque”, que es el ángulo formado por el eje del túnel y el rumbo de buzamiento del talud (dirección de su máxima pendiente).

La tipología de las inestabilidades de talud tiene las mismas variedades que las de un talud sin túnel: deslizamientos con roturas planas y/o de cuñas, vuelcos de estratos, o roturas en masa por el interior del talud con directrices total o parcialmente curvas. Pero 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 del Pando, o en el de la boquilla Norte del Túnel II de la variante de Gandia, Romana, 2005)

El acceso al túnel tiene dos geometrías básicas: excavación del emboquille en un talud o ladera frontales de traza plana o casi plana, y de desarrollo importante respecto al ancho de cada boca (como es muchas veces el caso de las dos bocas de un túnel con dos tubos), o emboquille en el “fondo” de una trinchera relativamente estrecha, con talud frontal de poco ancho en la base y taludes laterales.

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 N 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 S. 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 deslizamientos planos o en cuña 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). Esa disposición también agrava los riesgos de colapso sobre la bóveda del túnel, a causa de la asimetría de cargas, con resultante inclinada (lo que contribuyó mucho al colapso de la boquilla Norte del Túnel del Pando, ya citado).

Aunque no se trata de una inestabilidad conviene reseñar aquí que los procesos de descompresión de laderas producen juntas, más o menos paralelas a la superficie del terreno. Por encima de la junta el terreno suele estar sujeto a alteraciones y meteorizaciones. Los suelos arcillosos se oxidan, los macizos rocosos se alteran y aumenta mucho su fracturación, acusada por los valores más bajos del RQD. Los espesores de alteración son frecuentemente reducidos, del orden de varios metros, pero en macizos sujetos a fuertes tensiones tectónicas dichos espesores pueden ser notablemente grandes. Por ejemplo en el Túnel 2 de la línea férrea Duala-Yaundé, excavado en un macizo de gneises y migmatitas, con un recubrimiento máximo de solamente 120 metros, la zona descomprimida inicial alcanzó los 53 metros. Más hacia el interior se produjeron fenómenos de rotura frágil, con caída de lajas del techo, que indicaban un estado inicial de tensiones tectónicas con la tensión principal mayor horizontal, aunque no se realizaron medidas de tensiones (Towa-Fotso et al, 1986).

En la zona del terreno más próxima a la superficie actúa el gradiente térmico debido a las variaciones climáticas. Hay además deformaciones producidas por los cambios barométricos y las mareas gravitatorias terrestres. El resultado suele ser una junta de descompresión más abierta, por la que circula el agua freática superficial, y una fisura transversal completa en el revestimiento del túnel, acusada frecuentemente por filtraciones de agua, en las cercanías de la boca.

### **3. ALGUNOS TRATAMIENTOS CARACTERISTICOS 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 una 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  $\phi$  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)

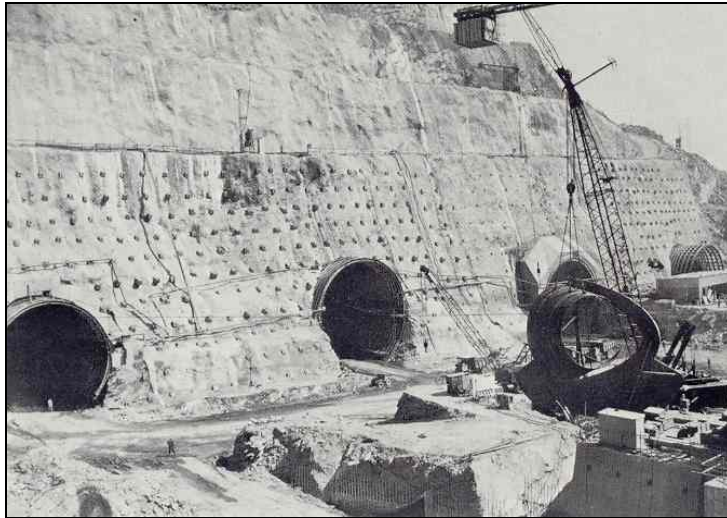


Figura 1. Anclajes tipo Perfo en los taludes de emboquille de algunos túneles hidráulicos en la presa de Tarbela en Pakistán (Becker, 1972)

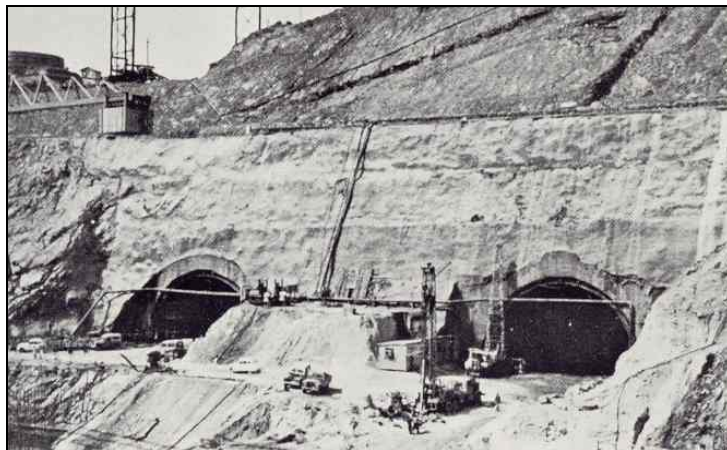


Figura 2. Taludes de emboquille de algunos túneles hidráulicos en la presa de Tarbela en Pakistán. (Becker, 1972) Obsérvense los arcos de sostenimiento de hormigón esquematizados en la figura 3.

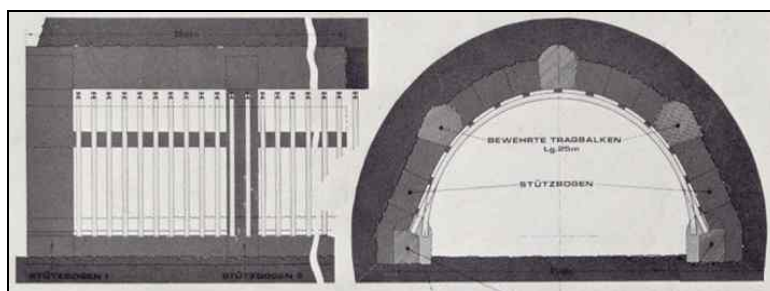


Figura 3. Esquema del sostenimiento de la zona de emboquille de la figura 2 mostrando cerchas metálicas rígidas y arcos de hormigón arriostrados mediante vigas, también de hormigón (Becker, 1972)

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 metros”, que aparentemente constituían la zona inferior de un corrimiento, y tenían potencias variables entre 12 y 19 metros (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 m<sup>2</sup>), el emboquille mediante un paraguas de jet-grouting y la continuación de la excavación mediante otros dos paraguas sucesivos, los tres de 13 metros de longitud.

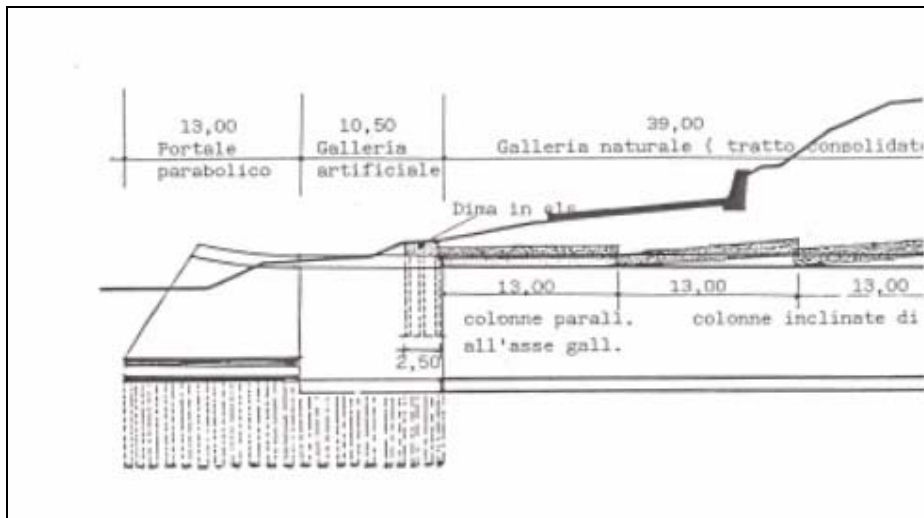


Figura 4. Esquema de la construcción del la boquilla del Túnel de San Elias en la Autopista Mesina-Palermo (Faoro et al, 1986)

En el Túnel de L'Arzilier en la Autopista del Lemán, en Suiza, la boquilla se situaba 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)

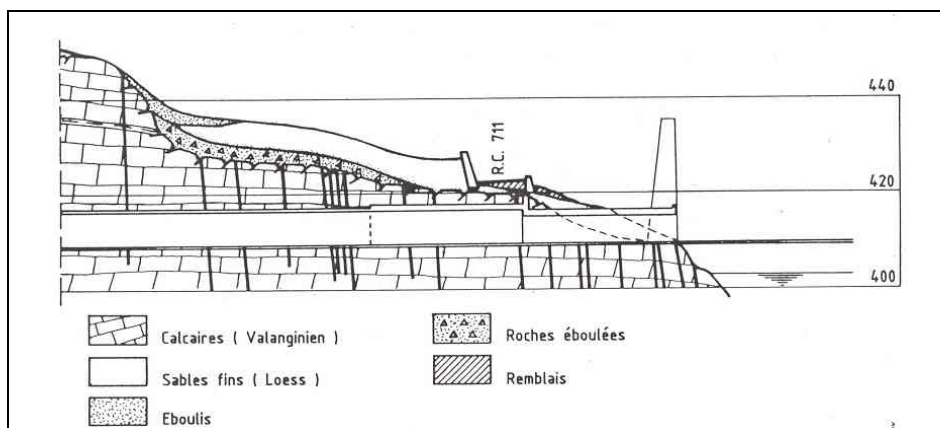


Figura 5. Corte geológico en la boquilla del Túnel de L'Arzilier en Suiza (Betschen y Vuilleumier, 1986)

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 y 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.

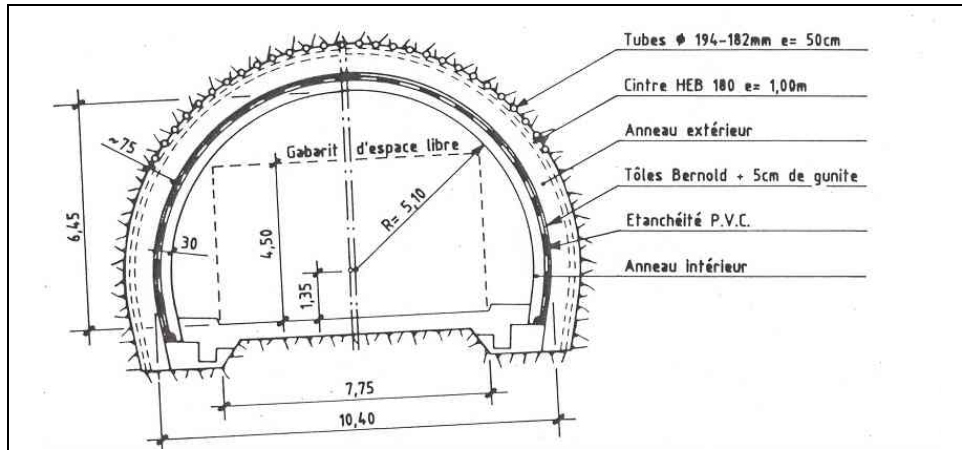


Figura 6. paraguas y sostenimiento en el emboquille del del Túnel de L'Arzilier en Suiza (Betschen y Vuilleumier, 1986)

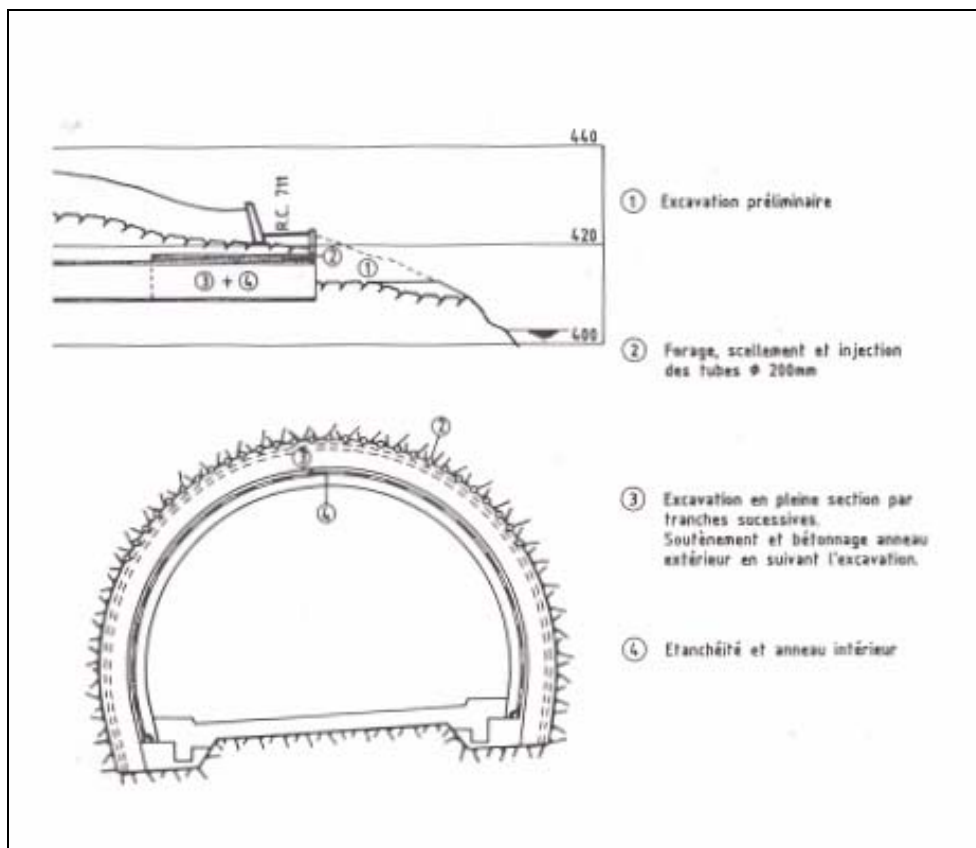


Figura 7. Fases de ejecución de la excavación, paraguas y sostenimiento en el emboquille del del Túnel de L'Arzilier (Betschen y Vuilleumier, 1986)

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 metros de longitud y construyendo un paraguas de micropilotes ya con las técnicas 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 m<sup>2</sup>, y un ancho de casi 20 metros cada uno, separados por un pilar de 8 metros de ancho. El objeto de los túneles fue preservar un yacimiento de icnitas (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 bajar el nivel freático colgado superficial. Después se construyó un paraguas de micropilotes y la excavación de la calota se realizo con una contrabóveda provisional y un machón central (Ericksen, 2003)

Finalmente, y para no alargar demasiado esta enumeración citaremos el caso de las boquillas Sur de los Túneles de Dölzschen, en la Autopista Dresde-Praga, que 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.

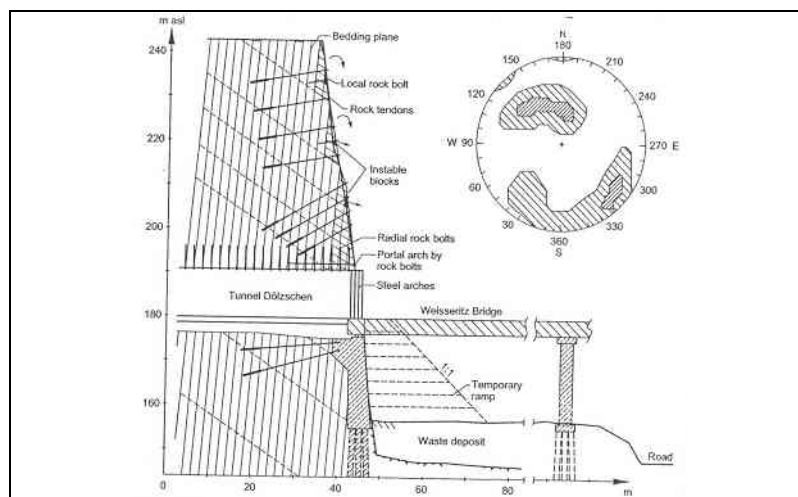


Figura 8. Boquilla Sur del Túnel de Dölzschen y estribo Norte del. Puente de Weißeritz.. Soluciones constructivas y diagrama con el diaclasado (Spang, 2003)

Se han utilizado a lo largo de los 40 años revisados una gran variedad de soluciones, porque los emboquillos 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



#### 4. USO DE LA CLASIFICACIONES GEOMECANICAS 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 de Q de la clasificación de Barton, mediante la conocida fórmula:

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

se obtiene  $RMR_b = 9 \ln Q_b + 44 = RMR - 9 \ln 5 \simeq RMR - 15$   
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.

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
- 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 del cambio de inclinación del talud frontal

## 5. 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, las 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 la siguiente tabla para su definición en función del buzamiento,  $b$ , de las discontinuidades más significativas (que en la minería del carbón suelen ser los planos de sedimentación). La tabla 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 A TALUD
	$b$ HACIA EXT	$b$ HACIA INT.	
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 SMR (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 propuestas. 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  
 y el ángulo crítico  $a$  vale

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

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

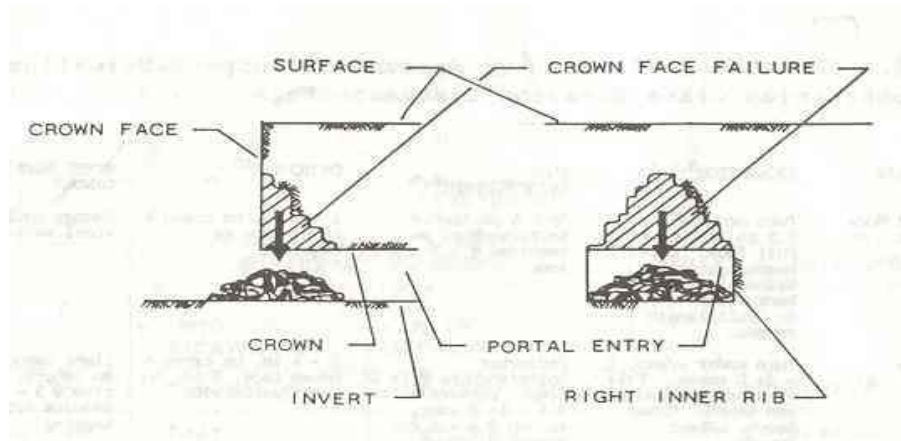
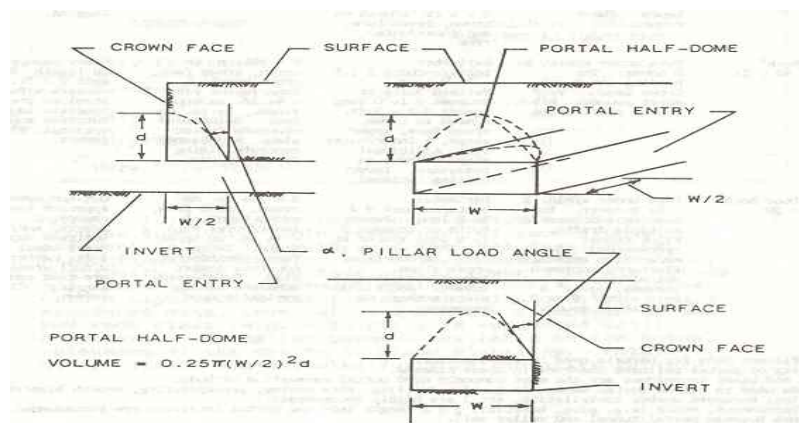


Figura 9. Forma más frecuente (36%) de rotura encontrada por Rogers y Haycocks (1988)



.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.

TABLA 3. RECOMENDACIONES DE SOSTENIMIENTO DE PORTALES (ROGERS y HAYCOCK, 1989)

1. EXCAVACIÓN	RECUBRIMIENTO (W)		PASE	PARTICIÓN	TÚNEL PILOTO	BERMA EN CLAVE	PARAGUAS L (W)	VISERA EXTERIOR	
	CLASE	SUPERIOR							LATERAL
RMR <sub>B</sub>	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	CLASE	HORMIGÓN PROYECTADO (cm)			BULONES				MALLA	ANCLAJES	OTROS
		Frente	Lat.	Talud	Frente	Hast.	L (W)	S (m)			
RMR <sub>B</sub>	I	5-10 (op)	No	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	Tender talud

3. SOSTENIMIENTO INT.	CLASE	HORMIGÓN PROYECTADO (cm)			BULONES		MALLA	CERCHAS			OTROS
		Clave	Hast.	Frente	L (W)	S (m)		Tipo	S (m)	Forro	
RMR <sub>B</sub>	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?

- W (ancho) < 30 ft ~ 9,4 m
- Se proyecta con carga total si w < 2,5 m
- Riesgo sísmico si  $\alpha/g = 0,2$  a  $0,5$
- Las unidades son metro (m), centímetro (cm) y ancho de túnel (w)

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. 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 presentamos en la Tabla 4 las "Recomendaciones de emboquille de túneles" (modificadas de 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.

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

CLASIFICACIÓN		EXCAVACIÓN		TRATAMIENTO DEL TALUD FRONTAL				
SMR	CLASE	PARTICIÓN DE EMBOQUILLE	PARAGUAS	BULONES			HORMIGÓN PROYECTADO e (cm)	RED ® /MALLAZO
				L(m)	b/m <sup>2</sup>	s (m)		
100		SECCIÓN / COMPLETA						
90	I a		Opcional	No	No	No	No	® Opcional
80	I b		Opcional	4	<0.10	Ocasional	No	® Si
70	II a		Ligero	4/5	0.11	3 x 3	No	® Si
60	II b		Ligero o medio	5/6	0.25	2 x 2	Ocasional	® Si
50	III a		Medio	6	0.44	1.5x1.5	Ocasional	® Si
40	III b		Medio	6/8	0.70	1.2x1.2	Ocasional	® Si
30	IV a		Medio	8	1.00	1 x 1	0.10-0.15	Mallazo opcional
20	IV b		Pesado	8	1.50	0.8x0.8	0.15-0.20	Mallazo simple
10	V a		Pesado	No	No	No	0.20-0.25	Mal. simple o doble
0	V b	Pesado	No	No	No	0.25-0.30	Mallazo doble	

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

**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 m<sup>2</sup> (**b/ m<sup>2</sup>**) 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

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. COMENTARIOS SOBRE LAS NUEVAS RECOMENDACIONES PARA EL PREDIMENSIONAMIENTO DE EMBOQUILLES**

### **7.1. Partición 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 excavar a sección completa. En los túneles de ancho mayor (como son todos los túneles de carretera y/o fcc 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, aunque 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 a este Simposio. Hay muchas clases de paraguas pero por simplicidad se han considerado solo cuatro tipos:

#### a) Paraguas ligero ( $60 < RMR$ )

Constituido por bulones de  $\phi$  32 de acero corrugado (o por barras de acero especial) y de 6 a 9 metros de longitud, colocados dentro de una perforación de  $2^{1/2}$ " (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)

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" (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 < 30)

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-manguito. 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) porque 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, que suele ser un redondo corrugado, aunque 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 recomendable 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 la 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 o 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 ( $1 \text{ b/ m}^2$ ) 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 del 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 frontal**

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 del 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 donde 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 boque-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 150 x 150 x 6 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 recomendación 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.

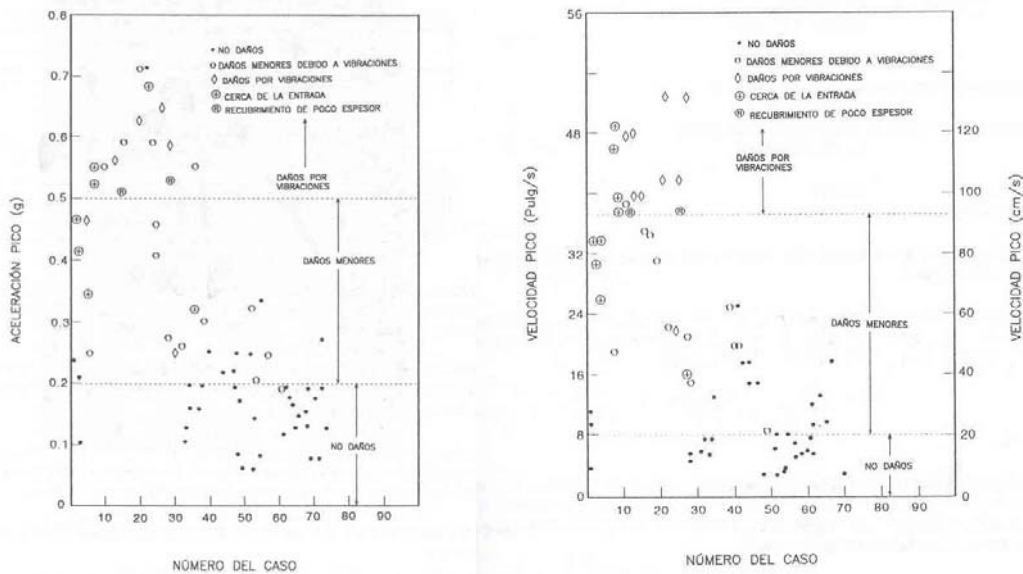
### **7.9 Perfilado de la zona superior del talud frontal**

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. 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 Judd, 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 aceleraciones de pico de 0,3g. 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. 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); y c) que también se producen daños por problemas de estabilidad de laderas en las boquillas



Figuras 11 Daños producidos por sismos en túneles según Dowding y Rozen (1978)

La siguiente tabla 5, debida a Hansmire resume la 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 0,31g y velocidades de 40 cm/ s

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 revestido 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

## 9. REFERENCIAS

- ADIF (2004) "Instrucciones y recomendaciones para redacción de proyectos de plataforma. IGP-4. Instrucciones y recomendaciones sobre túneles. IGP-4.3.-Recomendaciones sobre el proyecto de la excavación y sostenimientos de túneles"
- Bäckblom G y Munier R, (2002) "Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden, based in case studies and preliminary model tests". SKB. Technical Report TR-02-24, 115 pp.
- Barton N, Lien R y Lunde J (1974) "Engineering Classification Of Rock Masses For The Design Of Tunnel Support". Rock Mechanics. Vol 6, nº 4, pp 183-236
- Becker H, (1972) "Bergdruck und seine Beherrschung in der Praxis". Internationales Symposium für Untertagbau. Schweizerische Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, pp 31-48
- Betschen G y Vouillemier F (1986) "Construction de voutes-parapluie por la realisation des portals sud des tunnels de L'Arzilier"" Proc Cong International sur Grands Ouvrages en< Souterrain. ITA-SIG Vol 1, p. 370-375
- Bieniawski, Z.T. (1973). "Engineering Classification of Jointed Rock Masses." Transactions, South African Institution of Civil Engineers. Vol. 15, No. 12 pp. 335-344.
- Bieniawski, Z.T. (1989) "Engineering Rock Mass Classifications". Ed. WILEY. Nueva York.
- Bieniawski, Z.T. (1976) "Rock mass classification in rock engineering". Proc. Symp. On Exploration for Rock Eng. Balkema Vol. 1, pp 97-106.
- Bieniawski, Z.T. (1979) "The Geomechanics Classification in rock engineering applications". Proc. 4th Int. Cong. On Rock Mech ISRM Montreux. Balkema, Boston. Chap. 5, pp 55-95.
- Celada B (2000) "Emboquilles" III Curso de Diseño de Túneles. Madrid
- Dowding C H y Rozen A. (1978) "Damage to rock tunnels from earthquake shaking" . ASCE. Proc Journal Geot Eng Div. Vol 104, pp. 175-191
- Erichsen C, (2003) "Berg Bock freeway tunnel: optimising the heading technique and the operational safety for the tunnel built by the Shotcrete method" International congress for Rock mechanics: Technology roadmap for rock mechanics. South African Institute of Mining and Metallurgy. PP 295-299
- Faoro L, Lunardi P y Pasquini M (1986) "Il jet.grouting nel consolidamento di imbocchi de gallerie austrostradali" Proc Cong International sur Grands Ouvrages en< Souterrain. ITA-SIG Vol 1, p. 438-448
- Grimstad E y Barton N (1993) (1993) "Updating of the Q-system for NMT" Proc Int. Symp. On Sprayed Concrete. Fagernes (Noruega) Ed Kompen, Upsahl y Berg. Norwegian Concrete Association, pp 46-66
- ITA Working Group (1988) "Guidelines for the design pf tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology. Vol 3. Nº 3. pp 237-249
- Ortuño, (1998)."Emboquilles". Ingeotúneles nº 1 . Ed. C. López Gimeno.
- Romana, M. (1997) "Corrección del talud de la boquilla N del túnel de Paracuellos en la nueva línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza. IV Simp. Nal. Sobre Laderas y Taludes Inestables. Granada, pp 457-469
- Romana M. (2000) "Uso de clasificaciones geomecánicas en las boquillas de los túneles". INGEOPRES. Junio.
- Romana, M. (2001) "Recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles". Revista de Obras Públicas. Mayo
- Romana M, (2005) "Emboquille Sur del Túnel de Torrecilla". VI Simposio Nacional de Laderas y Taludes Inestables. Valencia

- Romana M, Casado R, y Bonafé J, (2005) "Emboquille Norte del Túnel 2 en la Variante de Gandia". VI Simposio Nacional de Laderas y Taludes Inestables. Valencia
- Sharma S y Judd W R, (1991) "Underground openings damage from earthquakes" Engineering Geology. Vol 30, pp 273-276
- Shin H S, Han K C, SUNWOO C, y CHOI S O, (1999) "Collapse of a tunnel in weak rock and the optimal design of the support system". Proc 9<sup>th</sup> ICRM. Balkema, Tomo 1, pp237-239
- Spang R M, (2003) "Design and construction of tunnel portals under difficult Geotechnical conditions" International Congress for Rock mechanics: Technology roadmap for rock mechanics. South African Institute of mining and metallurgy. PP 1119-1124.
- Towa-Fotso L, Legrand M y Fruguglietti A (1986) "Realignement de la voie ferrée Douala-Yaounde. Construction de tunnels entre Eseka et Maloume. Proc Cong International sur Grands Ouvrages en Souterrain. ITA-SIG Vol 1, p. 308-312
- USA Army (1997) "Engineering and design- Tunnels and shafts in rock" Engineering Manual EM 1110-2-2901. Capítulo 4 ("Geotechnical Explorations for tunnels and shafts") Pp 4-1 a 4-11
- Yoshikawa K, (1981) "Investigations about past earthquake disasters of railway tunnels". Railway Technical Research Institute. Report 1123