

EMBOQUILLE DE TÚNELES Y LA SEGURIDAD

Luis del Cañizo Perate

Dr. Ingeniero de Caminos C. y P.

1. Introducción

El emboquille de un túnel en general tiene mucho menor peso económico que el resto del túnel, suele presentar mucha menor dificultad de construir, y ya en servicio su seguridad es mayor, lo que hace que se escriba poco sobre él, pero es un punto singular, que se encuentra en la senda crítica y que tiene una serie de particularidades que deben también tratarse. Incluye las problemáticas sumadas de la estabilidad del talud y la de la excavación en mina.

Además del coste y plazo de obra, los condicionantes de seguridad y espacio durante la obra y durante la explotación inciden en la elección del punto del emboquille y en el trazado, así como en la solución estructural y constructiva, con los sistemas de soporte y refuerzo necesarios.

Seguidamente se analizan los condicionantes y problemas de los diferentes aspectos, relativos a la calidad y morfología del terreno, el talud frontal y los laterales, y las soluciones técnicas aconsejables para resolverlos, tanto en la obra exterior como en el primer tramo interior en mina. En ocasiones la salida de emergencia se realiza en las proximidades del emboquille, donde también deben situarse instalaciones relacionadas con la seguridad y la explotación. Además de los aspectos de la obra civil,

se tratan los de adaptación psicológica del usuario al cambio de medio, el cambio de luz y el riesgo de deslumbramiento.

2. Particularidades morfológicas, geológicas y geotécnicas

La orografía y la geología condicionan el encaje de los emboquilles, tanto en su ubicación como en la dirección del eje de la vía. A partir de esos dos puntos queda fijada de modo aproximada la longitud del túnel. El trazado intermedio se suele ajustar con radios lo más amplios posibles, salvo que haya que evitar alguna falla geológica o deba cortarse con un ángulo más favorable, o se quiera evitar un tramo de montera de magnitud demasiado grande o pequeña.

Cuando el túnel debe atravesar una zona montañosa, su trazado mas corto busca los collados, los cuales suelen situarse en una **zona de falla** y de peor calidad del terreno, próxima al túnel en la mayoría de su longitud.

Cuando una carretera sigue el curso de un río en un valle en V y se incluye un túnel para evitar una curva fuerte, el río también suele situarse en una zona de falla, siendo normal que ésta venga acompañada por fallas secundarias paralelas que coincidan con el eje del túnel. Además de ello el túnel recibe unas cargas muy asimétricas, que suelen dificultar la ejecución de la obra y obligan a reforzar el sostenimiento.

Si una carretera es paralela a una cordillera larga, con trazado a media altura o inferior, corta perpendicularmente a los valles que bajen de la cordillera, y a priori no atravesará las fallas paralelas a sus ríos o a los collados, pero el túnel y sus emboquilles tendrá una montera asimétrica, con pendiente transversal, que si es fuerte puede crear problemas en el túnel en mina y también en el emboquille, posiblemente con esviaje del talud.

Además de estas circunstancias que afectan a todo la longitud del túnel, donde **la montera es más reducida es en el emboquille**. Ello implica menor carga vertical a soportar, pero es la zona de terreno que está mas alterada, meteorizada y descomprimida, siendo por tanto el terreno más deformable y menos resistente.

Es recomendable por consideraciones mecánicas que en los primeros avances cercanos a la boca exista un espesor mínimo de montera menos meteorizada de una altura una o dos veces la anchura del túnel, donde pueda desarrollarse un pequeño arco de terreno que colabore a la resistencia, a sumar a elementos artificiales como cerchas, paraguas, etc.

Además del argumento mecánico, la optimización económica hace que se **re-trase el punto de emboquille** hasta donde el coste unitario del túnel en mina sea igual al de la rebanada similar de la trinchera de acceso, existe la lógica tendencia a forzar una mayor altura y pendiente del talud frontal, cuya estabilidad puede peligrar. La igualdad de coste entre una rebanada de túnel y el de la rebanada más alta del talud frontal se presenta para alturas del orden de 30 m, y 40 m en auto-vías, aunque es mejor referirlo al cociente entre la altura máxima del desmonte y el diámetro del túnel, siendo la altura el triple de la luz cuando se trata de una carretera, o bien altura cuádruplo de la luz para autovía con dos tubos, los cuales suelen separarse una distancia de un diámetro, no variando mucho estas proporciones si se trata de suelo o de roca, pues la diferencia del coste de excavación en roca o suelo se compensa con la diferencia de volúmenes movidos por la diferente inclinación de los taludes.

Conviene que el eje del túnel en las boquillas sea aproximadamente ortogonal a las curvas de nivel a fin de que su bóveda no sufra empujes asimétricos, precisamente donde la calidad del terreno es peor.

Puede haber motivos para incumplir esta recomendación, como son un cambio brusco lateral del piso geológico, existencia de coluviones o paleodeslizamientos, no disponer de espacio suficiente para continuar la vía a cielo abierto, o como mas adelante se comenta, para disponer en su proximidad un amplio espacio para las instalaciones de obra.

A fin de reducir el riesgo de deslumbramiento, sobre todo en terrenos llanos donde el entorno no resguarda de la luz a la salida del túnel, conviene evitar la orientación Este-Oeste del eje del túnel, punto que se comenta mas adelante.

Cuando se prevé un desdoblamiento futuro o cambio de túnel con doble sentido a doble túnel de sentido único, conviene estudiar el trazado en planta desde un principio, pues el encaje a posteriori suele presentar muchas dificultades, que obligan a sobrecostos desproporcionados y a una pérdida de calidad.

Si por razones medioambientales, paisajísticas o de otro tipo se va a prolongar el túnel en mina con túneles artificiales, tapando con estructura la alta trinchera de acceso, la solución a elegir teniendo en cuenta la geología y la morfología del lugar, puede cambiar el trazado óptimo, como más adelante se trata.

Un punto a tener en cuenta en el tazado vertical es que conviene que avance en contra pendiente antes del emboquille y también en la excavación en mina, de modo que las aguas evacuen por gravedad.

En el talud frontal del emboquille cada punto del interior del terreno las tensiones tienen inclinada su elipse de tensiones, con una tensión cortante desfavorable que se concentra especialmente en el pie del talud, por donde podría pasar la posible línea de rotura de un deslizamiento, sea recta, circular o de otra forma.

En el emboquille puede ser por ello necesario reforzar el talud como tal, y reforzar también el arco del túnel para compensar la debilitada colaboración del arco natural de descarga en un terreno de suelo o de roca muy alterada, pese a que la magnitud de la montera y por ello las cargas verticales sean menores que lejos de la boca.

En el frente de excavación del túnel en mina existe un efecto tridimensional favorable, ya que la colaboración del terreno no es un arco de descarga a modo de bóveda para soportar la montera, sino que en el frente hay cierto efecto de cúpula, lo que implica menores tensiones tanto de compresión vertical como de corte.

En cambio la proximidad del emboquille es desfavorable, pues dicho efecto tridimensional del frente del túnel en mina se reduce mucho o desaparece, y no ayuda al arco de descarga que soporta la montera, pues el cercano pie del talud resta apoyo y resistencia a la cúpula virtual mencionada.

Otro factor morfológico es la presencia de una trinchera que llega hasta el emboquille. Su presencia es algo favorable para la estabilidad del talud frontal, pero solo si el túnel es estrecho y no hay dos tubos. Lo más frecuente es que el talud frontal, pese a tener esa pequeña colaboración del efecto tridimensional, se proyecta con mayor pendiente, por el ahorro marginal de acortar unos metros el costoso túnel en mina. Como consecuencia se encarece dicho talud frontal, recurriendo a diferentes sistemas de refuerzo.

Como ya se ha indicado la menor magnitud de la montera junto al emboquille respecto al resto del túnel en mina, implica la influencia de cierto espesor de suelo o terreno de transición y una mayor alteración de la roca a efectos de calidad del terreno. En general se estima que en las clasificaciones geomecánicas el parámetro Q de Barton es de 2 a 4 veces menor que en la misma formación geológica existente

en el interior del túnel, donde la montera es mayor. Respecto al RMR de Beniaowsky debe restarse del orden de 15.

Debe tenerse en cuenta que todos los túneles perforados en mina necesitan un emboquille, pero la aplicación de las clasificaciones geomecánicas es algo distinta, y el valor de RMR definido se puede corregir de modo diferente si se emplea el método austriaco u otros tradicionales, bien con voladuras, con excavación mecánica o bien se excaven con tuneladora.

Lógicamente conviene determinar directamente estos parámetros con sondeos, geofísica y estaciones geomecánicas específicos para los emboquilles, pero aún así debe contrastarse el resultado con los datos, más abundantes, de los disponibles para toda la longitud del túnel o de esa formación geológica en los alrededores.

En la práctica en los emboquilles no se suelen hacer cálculos, como se hace sistemáticamente en los sostenimientos de los túneles con el nuevo método austriaco, sino que se definen unos refuerzos con un grado de robustez variable según la calidad del terreno y las dimensiones de la boca, que no obstante conviene apoyar en un buen conocimiento del terreno, que muy frecuentemente incluye la cuantificación de diferentes parámetros y valores, entre ellos las clasificaciones geomecánicas mencionadas.

3. Medidas constructivas empleadas en los emboquilles

3.1. Talud Frontal

La mayor pendiente del talud frontal, y la mayor seguridad que debe exigirse frente a caídas de rocas sobre la propia boca del túnel, obliga con frecuencia a emplear diferentes sistemas de refuerzo, adaptados a cada caso particular.

Los tipos de rotura posibles que pueden presentarse son muy variados: caídas de cuñas de roca, vuelco de estratos, desprendimientos, deslizamientos planos o rotacionales. En los casos de reptación del talud los problemas se pueden agravar cuando está el emboquille medio construido.

En terrenos malos el estudio del talud debe ser concienzudo, y deben disponerse los medios de estabilizarlo previamente a la terminación de la excavación de la trinchera del emboquille, para que se disponga de un coeficiente de seguridad suficiente para que no se produzcan deformaciones post-constructivas.

Un caso extremo es el de construir un **muro vertical o subvertical**, con muros pantalla o mejor con pilotes, o micropilotes si el terreno rocoso lo requiere, de modo que la altura del talud libre se reduce. Dichos muros pueden requerir anclajes, para reducir su flexión.

La alternativa en terrenos rocosos donde la perforación de muros pantalla o pilotes es inviable o muy costosa, es hacer un muro formado por damas o paneles rectangulares anclados ejecutados por bataches, en escalones descendentes, con las damas al trebolillo. En obras urbanas para construcción de sótanos este sistema se emplea con muro vertical, pero en este caso se puede emplearse un paramento inclinado, que resulta más económico.

Independientemente de su resistencia y coste, debe tenerse en cuenta el aspecto estético, e incluso el psicológico del usuario, para que no sume al cambio de entrar en un espacio reducido y más oscuro, una sensación de problemática de estabilidad de la ladera. La construcción de un portal que enmascare esa aparente debilidad y ayude estéticamente al paisaje, puede ser la solución.

Otras alternativas son el empleo de **bulones** o de **anclajes, mallas**, etc. La gunita puede ser eficaz, pero estéticamente no es fácil salvarla con aditivos colorantes.

Por encima de la clave, a mayor o menor altura, puede existir una **berma**, que sirva para construir el posible muro de pilotes, o que actúe como amplio cuentón si hubiese riesgo de desprendimientos de rocas.

Los anclajes situados sobre el propio túnel y no muy por encima del mismo, pueden prolongarse y ayudan a algo al trabajo del sostenimiento del túnel en mina.

En el caso de autovías en que existen dos tubos, se ha dejado a veces un machón intermedio, pero no ayuda mucho y su estética es discutible. Puede justificarse mejor si el machón está ligado a una berma, que se prolonga sobre las calzadas a modo de túnel artificial.

El **drenaje** de la ladera frontal es muy importante. Las aguas superficiales deben recogerse y desviarse de modo que nunca lleguen a la calzada. La realización de **drenes californianos** en el talud frontal es prácticamente obligada si el freático está alto, no solo para estabilizar el talud, sino también para facilitar la realización de los primeros avances del túnel en mina, donde la calidad del terreno suele ser peor.

En algunos casos se ha recurrido a pozos verticales con bombeo, pero requiere unas circunstancias muy particulares.

Los taludes laterales no afectan realmente al emboquille, salvo cuando la trinchera es muy estrecha, en que mejoran su estabilidad ligeramente.

Cerca de las bocas de los túneles puede ser conveniente que exista un espacio libre, y ello puede influir en el diseño de los taludes laterales. Las instalaciones de obra se suelen ubicar alejadas del túnel cuando el tramo de carretera es importante y el túnel es corto, pudiendo pesar múltiples razones para ello, pero en túneles largos que tiene un peso económico importante en el conjunto de la obra, sobre todo cuando se perforan con tuneladora y dovelas prefabricadas, suele interesar que dichas instalaciones no se alejen demasiado del emboquille. Pero en general si conviene que exista un mínimo de espacio para instalaciones del propio túnel, como puede ser un Centro de Control, instalaciones de energía, balsas de recogida de vertidos y decantación, salidas de emergencia, cambio de sentido si se trata de túnel con dos tubos, etc., lo cual incide en el diseño de los taludes laterales.

3.2. Emboquille

Si el terreno es bueno, no siempre resulta imprescindible un tratamiento específico complejo, pero la responsabilidad de un buen inicio de la obra, el cuello de botella que constituye el túnel, el riesgo de causar un retraso en la senda crítica de la obra, con el mayor costo que ello implica, hace que sea habitual el disponer un emboquille cuidadoso, a veces sobrado, por ignorancia o conscientemente por conservadurismo.

El tratamiento más típico es la ejecución de un presostenimiento mediante un **paraguas** en el emboquille, con bulones cortos, de 6 a 12 m y diámetro de 25 o 32 mm si el túnel es de poca sección y el terreno es bueno. Mas frecuente y mucho mas eficaz es el empleo de micropilotes, más o menos gruesos y de hasta 20 m y 30 m de longitud, con diámetros de 120 a 165 mm y armadura tubular del orden de 70 a 125 mm de diámetro y espesores entre 5,5 y 10 mm. La separación entre taladros suele estar entre 30 y 60 cm, variando el diámetro según el terreno sea de clase buena, media o mala, y el diámetro del túnel, llegándose en los casos peores a realizar dos paraguas concéntricos al tresbolillo. También se emplean a veces paraguas de carriles, sobre todo en obras ferroviarias.

El paraguas debe tener una conicidad prácticamente nula, debiendo cuidarse al máximo las desviaciones del taladro, sobre todo si son largos.

A diferencia del paraguas de emboquille los paraguas interiores, con conicidad y con un solape con el consecutivo, apoyan en la primera cercha y cargan sobre las siguientes a través de un cierto espesor de terreno. En vez de una ligera tracción, podrían llegar a tener una ligera compresión transitoria a medida que avanza la excavación del túnel por el efecto tridimensional o de cúpula en el frente del túnel, aspecto que no merece ser tenido en cuenta.

Los paraguas llevan una robusta viga de atado en el exterior, contenida en un plano inclinado o vertical y siguiendo la directriz en arco del túnel, y a medida que avanza la excavación se apoyan directamente sobre cerchas de esa misma directriz, debiendo trabajar a flexión como una viga continua sobre apoyos equidistantes que son las cerchas. Conviene que al avanzar la excavación del túnel se descubran los micropilotes para asegurar su apoyo en las cerchas. Realmente el paraguas puede sufrir también algo de tracción, al atravesar una hipotética línea de deslizamiento del talud frontal.

La calidad de la inyección de los micropilotes es importante, no para evitar la corrosión de la armadura, que tiene una función provisional, sino para rellenar el talaadro y conseguir la adherencia entre armadura y terreno. En terrenos de muy mala calidad se recurre a inyección con tubo manguito, que con la inyección a presión puede incrementar algo la rigidez a flexión y consigue cierto efecto de continuidad como arco normal o incluso bóveda delgada.

Al trabajar a flexión es mejor emplear tuberías usadas de minería roscada, con ensanche en su extremo, que mantienen en la práctica la resistencia a flexión en las uniones. De emplear tubería usadas de minería, roscadas de sección con ensanche constante, debe emplearse manguito exterior, pues tuberías con extremos de macho y hembra reducen a la mitad su resistencia. Los bulones resisten bastante a cortante, pero su resistencia a flexión es de un orden de magnitud inferior.

También se construyen paraguas de jet grouting, que al entrar en contacto los elementos contiguos, realmente forma una bóveda, y aunque su armadura central puede trabajar a cortante y algo a flexión, dicha bóveda trabaja a compresión.

El empleo de jet grouting se justifica en los emboquilles en terrenos malos, y en los paraguas que no son de emboquille, cuando hay también presencia de agua, que arrastraría los suelos entre los micropilotes. Al tratarse de un emboquille, la lucha contra el agua se resolvería menor con drenes californianos. En cualquier caso no

son buena solución, no solo por su elevado coste, sino también porque su ejecución en taladro horizontal no tiene la calidad del jet grouting con taladro vertical.

Una instrumentación sencilla y el control del comportamiento del emboquille desde el principio es importante, pues el talud frontal es alto y empinado y su excavación reciente, y aún con coeficiente de seguridad holgado puede tener deformaciones lentas, que afecten a la estructura del emboquille. Puede basta con una nivelación topográfica precisa, de puntos del talud a diferentes alturas y en particular del emboquille y su estructura, con bases lejanas, pero si el terreno es malo es aconsejable instalar un inclinómetro previamente a la excavación de la trinchera.

Bastante frecuente es el realizar, en prolongación de la viga de atado del paraguas, una **visera** o pico de flauta que permite pasar del talud inclinado a una boca artificial en un plano vertical exterior. Puede tener una longitud apreciable. Ayuda a proteger de la caída de piedras, ya desde el inicio de la obra, donde la actividad y tráfico en su proximidad puede ser importante.

Puede hacerse con cerchas similares a las del interior del túnel, con encofrado normal o bien chapa Bernold, y con gunita u hormigón armado. Su armadura y rigidez longitudinal aminora el mencionado problema de reducción del efecto tridimensional o de cúpula en los primeros avances del túnel en mina, pues supone una estructura de apoyo del empuje horizontal hacia el exterior que genera la cúpula virtual en el frente durante los primeros avances.

La visera puede tener además una función estética. Prácticamente no ayuda nada a resolver el problema de posible deslumbramiento del usuario.

3.3. Avances contiguos a la boca del túnel

Realmente el emboquille incluye el corto tramo inicial del túnel en mina en su tramo inicial, en una longitud de uno a cuatro diámetros, ya que su construcción tiene una problemática diferenciada por la proximidad e influencia del talud frontal, la longitud del paraguas exterior y la peor calidad del terreno y su grado de alteración. Emplea los mismos recursos que el resto del túnel en mina, pero adaptados, al igual que se ha adaptado el paraguas, que aquí es cilíndrico y no cónico. Por ejemplo, aunque es poco frecuente, se puede continuar empleando en esa zona la chapa Bernold.

La sección se excavará por fases, en caso de que el resto del túnel así se haga, debido al alcance en altura de la maquinaria de excavación. En algún caso excepcional,

aunque en el resto del túnel se avance a sección completa, por la peor calidad del terreno puede subdividirse en avance y destroza, o un número de fases mayor.

Lo que si se debe cambia es la longitud del pase o avance, que suele reducirse bastante, por un lado para no forzar la flexión del paraguas, coincidiendo el pase con la separación de las cerchas y por otro como tanteo y entrenamiento al enfrentarse a un túnel nuevo.

En terrenos rocosos que precisen voladura, debido al mayor grado de meteorización, conviene en estos primeros avances realizar excavación mecánica en vez de voladura, o utilizar menor carga de explosivo, para afectar menos a la ladera.

4. La seguridad en la zona de emboquille

En los apartados anteriores, al tratar los conceptos relativos al diseño y construcción del emboquille y su entorno próximo, se contempla el modo de conseguir la funcionalidad debida, a la vez que los aspectos que influyen en la seguridad estructural, incluyendo el propio periodo de la obra. Es ahí donde la responsabilidad o colaboración a la seguridad del emboquille incide más.

En la mejora de seguridad vial para el usuario del túnel el emboquille tiene un contribución solo parcial, por su limitada longitud.

Debe ayudar a la adaptación psicológica del conductor que entra, aportándole una sensación de seguridad, pudiendo influir en ello el aspecto estético y bien acabado, cierta sobriedad para no distraerle, ya que un embellecimiento recargado o forzado pudiera ser negativo.

Es conveniente que exista amplitud en los accesos al túnel. Si hay espacio para las instalaciones de obra, independientemente de los posibles ahorros económicos, mejorará indirectamente la seguridad de la misma al exigir menos desplazamientos, racionalizar mejor su distribución, y acortará el tiempo para recibir unos primeros auxilios. No obstante es claro que esta ubicación de las instalaciones no es imprescindible y en general no supone mucha ventaja.

Pero si es más deseable disponer de cierto espacio próximo a las bocas durante la explotación, para ciertas instalaciones, como es el Centro de Control si lo hubiere, instalaciones de energía, balsas de recogida de vertidos y decantación, salidas de evacuación, cambio de sentido si se trata de túnel con dos tubos, etc.

La salida de la galería de evacuación implica una necesidad de espacio para el personal que sale, que puede ser numeroso, es difícil de controlar, y puede tener reacciones imprevisibles por el miedo. Además pueden llegar ambulancias, bomberos, policía u otros usuarios de la carretera atascados que pueden pretender ayudar. Lógicamente no se puede crear de modo forzado con carácter general en una trinchera un espacio amplio con este fin, pero cuando sea viable debe pensarse en su conveniencia e incluirlo en el proyecto.

El caso de un terreno muy movido con una alternancia de túneles y viaductos seguidos, supone verdaderas dificultades para realizar las obras, pero también para estos dispositivos de emergencia y de ayudas.

La mayor responsabilidad respecto la seguridad vial en las bocas se presenta cuando hay riesgo de deslumbramiento por su orientación Este Oeste. Aunque los cambios estacionales y horarios del movimiento solar implican que este peligro se da en un porcentaje pequeño de tiempo, debe paliarse en lo posible.

La única solución eficaz está en el trazado, pero éste no se puede forzar mucho. Se puede hacer un trazado en curva en la boca, pero el radio debe ser amplio, para evitar que el remedio no sea peor por la velocidad. También se pueden hacer sobreanchos, lo que complica el encofrado del revestimiento. Otra alternativa es limitar la velocidad, lo que posiblemente no respetarán muchos conductores, y prueba de ello es que hoy la limitación general impuesta por Tráfico de 80 km/h se incumple mayoritariamente en las autovías con velocidades entre 90 y 120 km/h.

El deslumbramiento no solo se produce por tener el sol de frente. Es mas frecuente el deslumbramiento que causa un sol alto pero muy intenso.

La solución de un parasol apenas se utiliza, e incluso es bastante desconocida, por su coste desproporcionado y longitud requerida. El aumento gradual de la intensidad de la iluminación artificial en el interior del túnel, para que sea eficaz resulta demasiado costoso de instalar y de mantener. Realmente no existen soluciones totales, y en la práctica hay que conformarse con mitigar en lo posible el problema.