

Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas



ÁREA: ~~E2~~ 
MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES Y MEDIDAS EN EMBOQUILLES

PONENTES: Davor Simic Sureda

I.C.C.P.

FERROVIAL-AGROMÁN

Día: 18/05/07

Hora: 16:00 a 18:00

PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES Y MEDIDAS EN EMBOQUILLES

1.- Introducción

El emboquille de un túnel consiste, en su acepción más general, en excavar a cielo abierto en una ladera hasta obtener un talud más o menos vertical desde el que comenzar la ejecución del túnel. El talud o frente desde el que se excavará el túnel se conoce como talud frontal, y los taludes situados a ambos lados de éste se denominan taludes laterales. La situación básica puede modificarse en función de las circunstancias especiales de cada túnel. Así en algunas ocasiones tan sólo se contará con un talud lateral y otro frontal, dependiendo del ángulo de incidencia de la traza del túnel y de la forma de la ladera. En otras ocasiones, como puede ser el caso de los túneles urbanos, las boquillas podrán acometerse desde el fondo de pozos.

Cuando se trata de boquillas convencionales en macizos rocosos, es interesante recordar algunos puntos del clásico Manual del U.S. Corps of Engineers, que resume los principales condicionantes generales de los emboquilles:

1. Se sitúan habitualmente tan cerca de la superficie de la ladera como sea posible con el fin de reducirlos taludes de excavación. Por ello, el macizo rocoso es también el más superficial, y por lo tanto el más alterado y meteorizado.
2. La excavación del túnel puede afectar directamente a la estabilidad de los taludes.
3. Suelen ser lo primero que se ejecuta en la obra, de manera que posiblemente los técnicos y demás personal aún no han tenido tiempo para adaptarse al trabajo en equipo. Por otra parte, tampoco se ha ganado experiencia alguna sobre lo que cabe esperar del comportamiento del terreno.
4. Históricamente los emboquilles resultan problemáticos y a menudo se producen fallos debidos tanto a deficiencias del proyecto como a una

(2)

errónea selección del sistema constructivo. Afortunadamente suponen una parte muy pequeña de la obra, de manera que se puede ser conservador y actuar del lado de la seguridad, sin que en general suponga un incremento global de coste significativo.

2.- Encaje topográfico

Desde el punto de vista del diseño, la ubicación de las boquillas depende de dos factores fundamentales. El primero es de carácter geométrico y contempla la topografía de la ladera, el ángulo de incidencia de la traza del túnel sobre la misma y otros aspectos relacionados. El segundo deriva de las condiciones geológicas e hidrogeológicas existentes (tipo de material, estructura del macizo, grado de meteorización, características geomecánicas, presencia y afluencia de agua, etc.).

límite económico de trabajo
Del análisis combinado de ambos factores se debe alcanzar una respuesta apropiada a una cuestión fundamental: ¿Desde dónde empieza a ser rentable ejecutar el túnel verdadero y hasta dónde es más rentable avanzar en desmonte?

Como criterio general, para comenzar la excavación del túnel verdadero es deseable que exista un recubrimiento suficiente por encima de su clave de manera que se pueda desarrollar un arco autoportante de terreno. Lógicamente la altura de montera mínima dependerá en cada caso del tipo de terreno, de sus características geomecánicas y demás factores geotécnicos.

Como quiera que lo más probable es que el macizo en la zona de boquillas sea el más alterado, es habitualmente recomendable contar con un recubrimiento mínimo de al menos 2 diámetros por encima de la clave. En zonas de roca suficientemente sana, es posible reducir esta montera hasta un diámetro o así. Evidentemente, para decidir sobre este punto será necesario llevar a cabo las investigaciones geológicas y geotécnicas necesarias, poniendo especial énfasis en la obtención de un mapa de isopacas del terreno meteorizado, situación de los niveles freáticos, censado de discontinuidades, etc.

Con las premisas anteriores, si se supone un diámetro de túnel de unos 8 m, los taludes de desmonte de las boquillas podrán alcanzar unos 24 m, siendo éste un valor razonable en la mayoría de los casos, si bien en ocasiones pueden alcanzarse alturas del orden de 40 m o más.

3. Aspectos constructivos de la estabilidad de la boquilla

Un aspecto favorable a considerar durante la construcción, cuando la topografía lo permite, es la ejecución de una berma horizontal por encima de la clave del túnel. Los objetivos de esta berma son múltiples:

- Sirve de plataforma de recepción de eventuales caídas de bloques y piedras que puedan provenir de las zonas altas de la ladera, mejorando así la seguridad en la zona de trabajo.
- Facilita la ejecución de anclajes y bulones verticales, o cualquier otro tipo de tratamiento del terreno, justo por encima de la traza del túnel. Esto permite crear una zona reforzada y aumentar significativamente la estabilidad del macizo por encima de la clave del túnel en las primeras fases de la excavación.
- Se puede emplear para recoger y desviar las aguas de escorrentía de la ladera, evitando que se dirijan hacia el talud frontal.
- Constituye una excelente plataforma para la instalación de instrumentación para el seguimiento tanto de los taludes como de los primeros y más conflictivos metros de túnel.

Como en cualquier problema de estabilidad de taludes, es necesario prever las medidas de sostenimiento o estabilización necesarias para asegurar un buen comportamiento de los desmontes de las boquillas.

En algunos casos en los que el macizo rocoso surge sano y sin discontinuidades desfavorables puede resultar factible excavar los taludes sin sostenimiento alguno, dotando a las boquillas, en todo caso, de una visera de hormigón que aumente la seguridad del personal de obra frente a eventuales caídas de piedras.

Sin embargo, ya se ha señalado que lo habitual es precisamente lo contrario, que el macizo se encuentre en las peores condiciones por su proximidad a la superficie. En esas circunstancias es necesario adoptar medidas de refuerzo y estabilización, y es precisamente aquí donde resulta imposible apuntar reglas generales, dado que cada boquilla será un caso particular. En cualquier caso, cuando se trata de túneles en roca las medidas más clásicas sin duda son las constituidas por bulones y anclajes.

Cuando se puede contar con una berma, desde su plataforma se pueden ejecutar bulones verticales que alcancen la clave del futuro túnel con anterioridad a la finalización de la excavación del talud frontal de la boquilla. Estos elementos suelen ser pasivos, es decir, sin tensión inicial. Su utilidad, entre otras cosas, radica en el soporte que proporcionan durante las primeras fases de excavación del túnel.

A continuación, a medida que se excavan los taludes en sucesivas etapas o escalones se pueden instalar bulones y anclajes subhorizontales, que en este caso suelen ser activos.

Con esta disposición se consigue un cosido de las discontinuidades de la roca en todas direcciones, proporcionando un grado de estabilidad considerable a la boquilla ya sus taludes.

Obviamente, en función del grado de alteración de la roca y del espaciamiento y orientación de sus discontinuidades, puede ser recomendable acudir a la instalación de otras medidas tales como mallazos, gunitas, muros de hormigón o escollera, etc.

4.- Medidas de refuerzo en boquillas de túneles

4.1. Paraguas de micropilotes

Uno de los métodos más difundidos actualmente para acometer la excavación de túneles en la zona de influencia de las boquillas y en condiciones difíciles del terreno es el de los paraguas de micropilotes, empleado en combinación muchas veces con robustos sostenimientos y revestimientos en los primeros metros de túnel que atraviesan los terrenos de peor calidad.

Básicamente un paraguas de micropilotes es un conjunto de perforaciones subhorizontales en cuyo interior se aloja una tubería de acero y a continuación se rellena con lechada de cemento.

Las perforaciones se ejecutan rodeando la excavación a realizar desde el frente excavado. De esta forma se consigue contar con una prebóveda resistente inicial, como si de un forjado se tratara, cuya función es la de sostener el terreno situado por encima y reducir sensiblemente sus deformaciones.

Las perforaciones tienen usualmente entre 100 y 200 mm de diámetro. Con maquinaria convencional se requieren usualmente entre 3 a 5 posicionamientos para conseguir un paraguas de 15 a 20 micropilotes.

Se suele dotar a los micropilotes de una ligera inclinación, entre 5 y 15°, de forma que el paraguas completo tiene la forma de un tronco de cono. Cuando se emplea como presostenimiento al avance, se hacen solapar sucesivos paraguas, de manera que uno proporciona el necesario sostenimiento mientras se ejecuta el siguiente. En lo que respecta a la longitud de los micropilotes de cada paraguas, es necesario alcanzar un equilibrio técnico-económico. Desde el punto de vista meramente económico sería mejor cuanto mayor longitud tuviera cada paraguas.

Técnicamente, sin embargo, dicha longitud viene limitada por las desviaciones que siempre se producen en la perforación y que tienden a separar en exceso los micropilotes del perímetro de la sección de túnel a excavar. Si la desviación es excesiva y las perforaciones divergen entre si demasiado, pueden quedar zonas de terreno inestable entre micropilotes; dejar inestable un volumen excesivo de terreno entre el mismo paraguas y el túnel a excavar. Por ello, en términos generales la inclinación del paraguas deber ser tal que no se exceda una distancia de 2 m entre éste y la clave del túnel.

En otro orden de cosas, en una situación ideal la distancia entre micropilotes contiguos, contando con las desviaciones en la perforación, debe permitir que las lechadas de inyección, mejor dicho, sus zonas de influencia, solapen, asegurando así la formación de una prebóveda más o menos continua. Con estas premisas, las longitudes típicas de los paraguas oscilan entre 12 y 18 m.

Los micropilotes así contruidos trabajan a flexión, empotrados por delante en el terreno situado más allá del frente de excavación, y por detrás en el revestimiento ya construido. Cuando se trata de boquillas, es habitual recoger sus extremos exteriores en un anillo de hormigón o visera, lo que les proporciona el apoyo necesario.

Ver Uge de 27/10/82

Este método se encuentra muy difundido en Italia, en donde resulta común prolongar las tuberías de los micropilotes unos 3 o 4 m por fuera del plano de la boquilla. Apoyándolas en cerchas metálicas similares a las empleadas como sostenimiento y hormigonando el conjunto, se consiguen unas viseras de apoyo del paraguas realmente efectivas, así como una importante protección adicional.

En la Tabla 1, se recogen un buen número de túneles italianos recientes, la mayoría de ellos emboquillados mediante este procedimiento. Como ejemplos de dimensionamiento, la Tabla 2 muestra las características principales de los paraguas de micropilotes para algunas de las boquillas de los túneles anteriores.

Tabla 1.- Ejemplos de túneles italianos

TÚNEL	SECCIÓN (m²)	DIFICULTADES	TIPO DE EMBOQUILLE	AVANCE
Serre la Voute (Turín)	78 (doble)	Autopista sobre túnel (5 m de montera). Boquilla en talud rocoso previamente deslizado	Paraguas de micropilotes	Media sección
Pietratagliata	78 (doble)	Boquilla en talud deslizado. Arcilla con grandes bloques de caliza	Paraguas de micropilotes	Media sección
Spallanzani	60	Talud en margas arenosas muy alteradas. Tras un colapso se optó por el paraguas de micropilotes	Pantalla de micropilotes	Sección completa
Frejus	95	Talud en morrena inestable. Boquilla muy desviada.	Pantalla anclada de pilotes	Sección completa
Clap Forat	78	Alternancia centimétrica de calizas y margas buzando 45° hacia la boquilla. Deslizamiento.	Anclajes pasivos (micropilotes) y paraguas	Media sección
Pontebba	78	Pequeña montera. Roca estratificada	Paraguas de micropilotes y anclajes	Sección completa
Spallanzani	60	Roca muy alterada. Talud inestable y edificios próximos	Paraguas y pantalla de micropilotes	Media sección

Tabla 2.- Detalles de dimensionamiento de paraguas de micropilotes

DETALLES \ TÚNEL	SERRE LA VOUTE	PIETRATAGLIATA	SPALLANZANI
Perforación (mm)	180	160	140
Inclinación respecto al eje del túnel	15	4	2
Longitud del paraguas (m)	14	18	15
Separación entre micropilotes Proyección horizontal (m)	0,75	0,8	0,6
Nº de micropilotes por paraguas	18	13	22
Díámetro exterior de tubería (mm)	140	101	135
Espesor (mm)	10	10	3,2

4.2. Refuerzo de los taludes frontales y laterales mediante pantallas de micropilotes

Como alternativa al cosido clásico de los taludes mediante bulones o anclajes, en ocasiones es más interesante ejecutar auténticas pantallas de contención.

Este procedimiento no es más que una variante de lo que sería la ejecución de un muro anclado por fases (muro de damas, ejecutado por bataches a medida que avanza la excavación). La diferencia fundamental en el caso de las pantallas es que con ellas se consigue tener ejecutado el elemento de contención más importante con anterioridad a la excavación de los taludes de emboquille. Las posibilidades, como siempre, son muy variadas y dependientes de las condiciones del terreno y de las circunstancias especiales de la obra.

La primera y más sencilla sería la pantalla clásica, ya sea continua o de pilotes, en todo similar a la de cualquier vaciado urbano. Su aplicación es muy habitual dentro de las ciudades, por ejemplo para la construcción de las boquillas de las obras de Metro. En lo que se refiere al terreno, su empleo se circunscribe a materiales tipo suelo en los que la excavación de los bataches de pantalla o de los pilotes no requiere el penoso empleo del trépano (salvo que se opte por utilizar medios más sofisticados como las hidrofresas). Más adelante se tratan algunos problemas especiales de este tipo de boquillas.

Como una alternativa a las pantallas convencionales, en los últimos años han alcanzado bastante difusión las pantallas de micropilotes. En esta solución los micropilotes se perforan verticalmente desde la superficie del terreno acomodándose a lo que serán los taludes de emboquillado, tanto frontales como laterales. La distancia libre entre micropilotes contiguos depende del tipo de terreno, y sus cabezas se encepán en superficie mediante una viga de hormigón, que rigidiza y hace solidario al conjunto.

Una de sus principales ventajas radica en su forma de ejecución, similar a las de los sondeos convencionales, que permite atravesar cualquier tipo de terreno, lo que hace que el sistema resulte en verdad muy versátil y se emplee con profusión en macizos rocosos complejos.

La excavación de las boquillas se ejecuta por fases al abrigo de las pantallas de micropilotes ya construidas, instalando a medida que progresa los niveles de anclaje que requieran por cálculo. Las cabezas de los anclajes se recogen

en vigas horizontales, metálicas o de hormigón, cuya función es la de repartir la fuerza de anclaje a lo largo de toda la pantalla.

Con este tratamiento de los taludes se consigue un elevado grado de seguridad y una considerable limpieza y sencillez en los trabajos que, habitualmente y gracias a su pequeña extensión, pueden compensar sobradamente su coste.

En muchas ocasiones el tratamiento se completa con el gunitado del frente de la excavación, con lo que se evita que el terreno escape entre micropilotes contiguos. Asimismo, también es bastante común combinarlo con la ejecución de los paraguas y viseras de micropilotes descritos en el apartado anterior, formando así una solución integral para el emboquillado.

Por su sencillez y versatilidad, este sistema se ha convertido en un procedimiento prácticamente estándar en muchos túneles. De hecho y como puede comprobarse, bastantes de los ejemplos de la Tabla 1 fueron resueltos con este procedimiento.

4.3. Tratamiento de jet grouting

Una de las técnicas de mejora del terreno que más aceptación está teniendo en los últimos años en el ámbito de los túneles es la del jet -grouting, especialmente cuando se trata de construir túneles atravesando suelos en entorno urbano.

Como es sabido, el jet grouting es una técnica de mejora basada en la inyección de una lechada de c/a alta presión. El sistema consiste en ejecutar una perforación similar a la de un sondeo, con la particularidad de que a cabeza de perforación está provista de una o más toberas de inyección perpendiculares al eje del taladro.

Una vez alcanzada la profundidad deseada y a medida que se recupera el varillaje, se inyecta por las toberas la lechada, en ocasiones complementada o precedida por agua y/o aire, consiguiendo una disgregación del terreno en torno a la perforación y una mezcla íntima del mismo con la lechada.

Imprimiendo un movimiento de rotación al varillaje durante su recuperación, se pueden conseguir así columnas de suelo-cemento de características francamente mejores en cuanto a resistencia e impermeabilidad que el terreno original.

Al igual que en el caso de los micropilotes, las columnas dejet grouting pueden ejecutarse formando paraguas subhorizontales con el fin de crear prebóvedas de sostenimiento.

Un caso particularmente interesante por la amplitud de tareas asignadas al jet grouting para resolver emboquilles como solución integral es el de dos túneles gemelos de 125 m de sección y de unos 300 m de longitud en la ciudad de Campinas (Sao Paulo), diseñados para comunicar dos autopistas en una zona densamente poblada. La montera en la zona de emboquilles resultaba especialmente reducida, de tan sólo 3,5 y 4 m en los accesos Norte y Sur respectivamente, con el nivel freático situado a 2 m por encima de la clave. El terreno resultaba asimismo bastante desfavorable, con un primer estrato de rellenos y arcillas arenosas coluviales blandas (SPT de 1 a 5), de unos 15 m de espesor. Subyaciendo a esta capa se detectaban arenas y arcillas limosas en los 13 m siguientes, cuya compacidad aumentaba con la profundidad (SPT de Sa 40). Por último, el sustrato estaba constituido por un suelo residual de gran resistencia.

Los emboquilles de estos túneles fueron resueltos mediante varias aplicaciones de la técnica de jet-grouting. Los taludes verticales de las excavaciones para las boquillas se llevaron a cabo al abrigo de muros de gravedad ejecutados por medio de columnas verticales secantes de jet. En los 80 m de talud de la boquilla Sur, la sección transversal del muro constaba de 203 columnas de 160 m de diámetro. Tan sólo en una pequeña zona con edificaciones próximas se ejecutó una pantalla de 2 columnas, que fue anclada mediante dos filas de micropilotes. Habida cuenta de que los muros así realizados tendrían carácter definitivo, se ejecutó un acabado superficial mediante mallazo y gunita.

En la boquilla Norte las condiciones fueron más complicadas, habida cuenta de que las entradas de los túneles se encontraban en distintos planos, existía un ferrocarril en servicio a tan sólo 3,5 m por encima de la clave y la autopista con la que conectarían los túneles se encontraba justo al pie de los taludes de las boquillas. En esta ocasión se optó también por ejecutar muros de gravedad de jet grouting de hasta 16 m de altura.

Por último, en lo que respecta a la perforación de los túneles, en la boquilla Sur se efectuó una prueba mediante columnas verticales de jet. En la boquilla Norte hubo de optarse por paraguas ejecutados desde el mismo frente, dada la existencia del ferrocarril en la superficie del terreno sobre la clave.

5.- Sistemas de estabilización de taludes y laderas inestables

Existe una gran variedad de sistemas de contención y estabilización de taludes, utilizados a lo largo del tiempo para resolver problemas de derrumbes o desprendimientos de grandes masas de terreno. Podríamos plantear una clasificación general, en la que se tenga en cuenta el objetivo de la intervención sobre el talud o la ladera.

Así, podríamos hablar de sistemas de estabilización propiamente dicha, en los que se pretende actuar sobre una gran masa de terreno inestable, que puede provocar fenómenos de deslizamiento profundo mediante planos o círculos de rotura; y sistemas de contención, aplicables a taludes de menor entidad o menor masa de terreno movilizada.

En el primero de los casos, que es el habitual, las acciones sobre la ladera o el talud suelen ser de varios tipos y combinadas entre sí, y todas ellas van encaminadas a conseguir un coeficiente de seguridad admisible frente al deslizamiento posible. Según lo anterior, podríamos destacar distintas actuaciones para conseguir dicho objetivo:

- Desmante de tierras de la ladera para descargar el talud, suavizando pendientes en las zonas más desfavorables, y refuerzo del pie del talud para contener y perfilar su derrame.
- Sistemas de drenaje para evacuar el agua de escorrentía y la existente en la capa freática. Se realizan zanjas de recogida de agua en coronación de talud y en su pie y pozos profundos con conexión horizontal entre ellos en profundidad para aumentar la eficacia del drenaje. También se disponen drenes californianos subhorizontales para evacuar el agua del interior.
- Refuerzo semi-profundo con bulonaje o soil nailing para coser capas de terreno inestable y evitar su desprendimiento.
- Construcción de elementos resistentes de contención, en superficie, mediante muros de gravedad o elementos por bataches, que van anclados al terreno para resistir los esfuerzos transmitidos por los empujes.
- Ejecución de elementos profundos mediante pantallas o cortinas de pilotes, rectangulares o circulares (pasadores), que tienen la misión de estabilizar el talud alcanzando y atravesando las posibles superficies de rotura, para evitar el deslizamiento de la masa de terreno. Estos elementos pueden ir arriostrados en cabeza mediante anclajes perforados en el terreno, colaborando para resistir los empujes sobre la cortina de pilotes.
- Realización de barreras de micropilotes o columnas de jet grouting para coser y rigidizar la masa de suelo inestable, atravesando las superficies de rotura, para mejorar la, estabilidad general del talud.
- Implantación de muros ecológicos con material geotextil, utilizando el propio terreno para contener las zonas inestables.
- Otras actuaciones, como estabilización del suelo con adiciones (cal) o plantación de árboles, que eviten la erosión de las capas superficiales y su posterior desprendimiento.

Junto con todos estos sistemas de estabilización y refuerzo de taludes es imprescindible la realización de un estudio geológico-geotécnico previo, que aporte información del suelo existente en cada caso y de las posibles razones que motivan su inestabilidad.

13

Así mismo, es necesario controlar los movimientos que se producen, mediante la instrumentación del talud y de los elementos de estabilización y contención; que debe ser implantada previa o simultáneamente con el comienzo de las actuaciones, manteniéndola durante todo el tiempo que dure la intervención, para controlar sus efectos y su evolución. Conviene controlar periódicamente, después de dichas actuaciones, el comportamiento del talud, verificando la efectividad del tratamiento.

La elección de uno u otro sistema de estabilización vendrá dada por la entidad del posible deslizamiento en cada caso y por la afección del mismo sobre construcciones o instalaciones existentes.

Hay casos en los que la intervención sobre taludes inestables se hace de forma progresiva, por fases, comprobando la eficacia de las actuaciones, con la intención de optimizar el costo de las mismas. Sin embargo, hay situaciones en las que es necesario acudir a soluciones más contundentes de entrada para eliminar el riesgo de que se produzcan daños humanos o materiales inadmisibles.

En cualquier caso, la solución adoptada debe ser compatible con el estado del talud, evitando que durante la fase de ejecución de los elementos de refuerzo o estabilización se acelere o aumente su inestabilidad, provocando un efecto contrario al deseado.