

# Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

## Tema 6. Emboquille de túneles



**Rubén Pérez Álvarez**

Departamento de Transportes y Tecnología  
de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## TEMA 6: EMBOQUILLE DE TÚNELES

- 6.1. Introducción.**
- 6.2. Corrección de inestabilidades.**
- 6.3. Sostenimientos especiales.**
- 6.4. Ubicación y avance.**
- 6.5. Fases en la construcción del emboquille.**



«Túnel Coto de Formigueiro». Ministerio de Fomento.

<https://www.flickr.com/photos/fomentogob/5859278809/in/photolist-https://flic.kr/p/b8CWAT>.

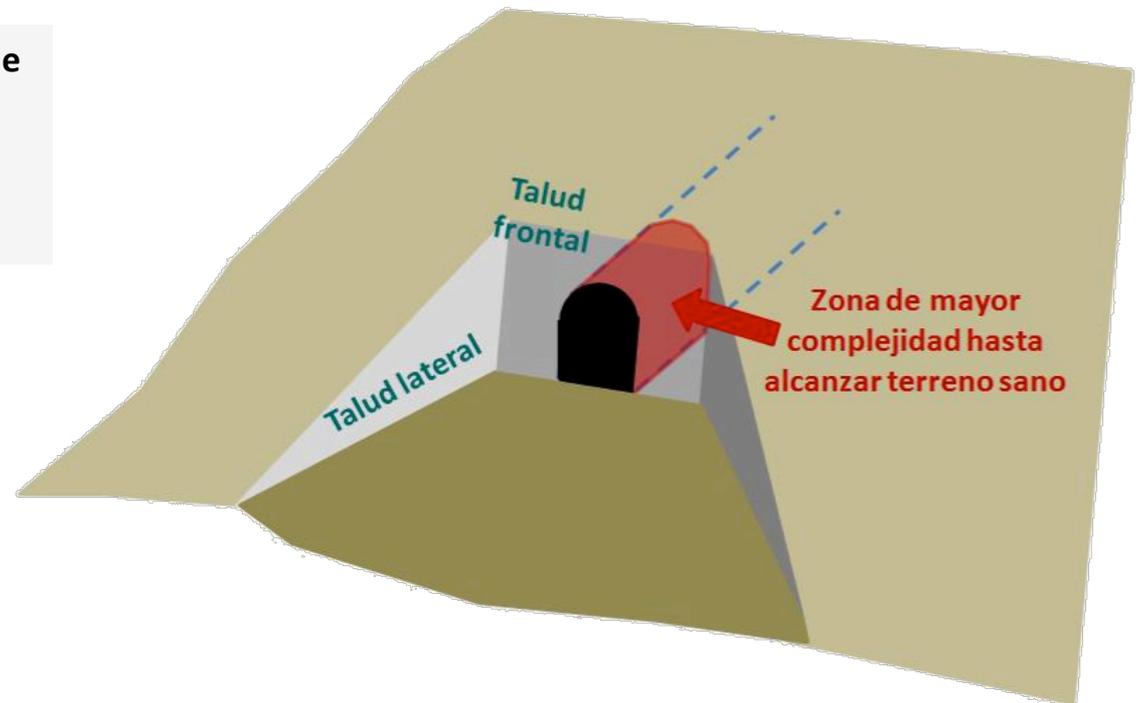
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>.

# Introducción

## Definición

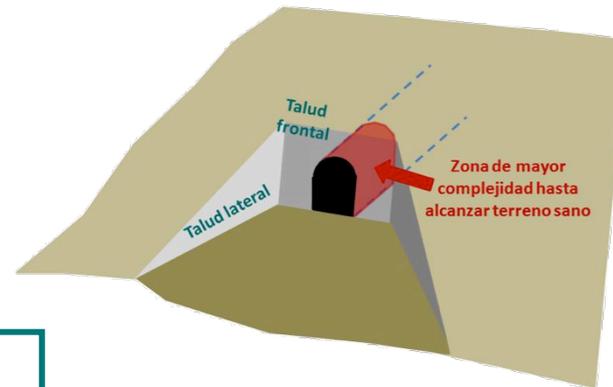
Excavación a cielo abierto en una ladera hasta obtener un talud desde el cual comenzar la ejecución del túnel. Los emboquilles son una de las zonas más complejas en la construcción de un túnel, dado que constan de menor montera y en ellas, el macizo rocoso suele ser el de peor calidad debido a la meteorización. Las dificultades irán ligadas por tanto a la estabilidad de los taludes de desmante del emboquille, y a la propia estabilidad de la zona más externa del túnel. En el emboquille se pueden distinguir las partes siguientes, si bien en determinados emboquilles únicamente se contará con un talud lateral:

- 🗝 **Talud frontal:** talud o frente desde el que se excavará el túnel.
- 🗝 **Talud lateral:** talud situado a un lado del talud frontal.



## Circunstancias y objetivos

Se trata por tanto del primer paso de excavación, conllevando una **inestabilización** en la pendiente del terreno suprayacente, alterando el equilibrio que existiese inicialmente. Es por ello que se requiere la ejecución de una serie de trabajos rápidos que permitan comenzar con la excavación en adecuadas condiciones de seguridad. Dada su visibilidad, deberán **integrarse** adecuadamente **en el entorno**.



### PRINCIPALES CIRCUNSTANCIAS

- ❖ La roca está más fracturada y meteorizada puesto que son zonas cercanas a la superficie, por lo cual se necesitará un sostenimiento más potente.
- ❖ Tramos poco profundos, no se desarrolla un efecto bóveda suficientemente: aparecen tensiones tangenciales fuertes que pueden superar la resistencia a corte de los materiales .

- ❖ Es necesario analizar la estabilidad de los taludes para penetrar lo suficiente y comenzar la excavación con seguridad.
- ❖ Es necesario resolver la construcción del túnel en sus primeras fases.

## Funcionalidad del Emboquille

- ❖ **Protección de la calzada:** debe proteger la calzada de la posible caída de rocas y tierras, para lo cual el emboquille ha de ser estable y disponer de una estructura de protección.
- ❖ **Integración ambiental.**
- ❖ **Visibilidad:** esto es fundamental, sobre todo a la salida del túnel.
- ❖ **Disipación de sobrepresiones en los túneles de líneas de alta velocidad.** En los túneles de líneas de alta velocidad especialmente si la vía está colocada sobre una placa de hormigón, se producen picos de presión transitorios a las salidas de los túneles debido a la compresión del aire en el interior del túnel.
- ❖ **Funcionalidad durante la propia ejecución,** posibilitando la excavación.



«A-4, Despeñaperros (Jaen)», Ministerio de Fomento.  
<https://www.flickr.com/photos/fomentogob>.  
<https://flic.kr/p/9VcPVg>.  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>.

## PRINCIPALES FORMAS DE INESTABILIDAD DE LOS TALUDES

- 🏰 Desprendimientos.
- 🏰 Deslizamientos planos y/o rotacionales.
- 🏰 Cuñas.
- 🏰 Vuelco de estratos.

## MEDIOS DE ESTABILIZACIÓN

### MODIFICACIÓN GEOMÉTRICA

- 🏰 Alternativa más económica, suele plantear la ejecución de **bermas intermedias**, escolleras, descabezado, tacones de hormigón, o incluso tendiendo los taludes.

### APLICACIÓN DE ANCLAJES

- 🏰 Introducción de fuerzas contrarias a la inestabilidad, evitando deslizamientos. Sólo en caso de rocas resistentes o en combinación con otros métodos, como muros de contención.

### DRENADO

- 🏰 Aplicación de drenes horizontales, verticales o cunetas perimetrales destinadas a reducir el contenido en agua del terreno.

# Corrección de inestabilidades

## Criterios de diseño

- 1 **Adecuada caracterización del terreno.** La construcción del emboquille modifica desfavorablemente la pendiente del terreno, por lo que se disminuye el factor de seguridad. Asimismo, se suelen realizar sobre terrenos poco competentes y alterados, por lo que constan de baja resistencia. En desmontes importantes (más de 20 m de altura) los desplazamientos del terreno debidos a la descompresión causada por la excavación puede ser suficiente para causar el colapso del talud.
- 2 **Minimizar el desmonte.** Al emboquillar con un recubrimiento elevado existe un riesgo de inestabilidad de los taludes debido a que, al aumentar la altura, disminuye el coeficiente de estabilidad del talud. Asimismo, al minimizar el desmonte se favorece la integración ambiental.
- 3 **Asegurar la estabilidad del talud frontal.** La situación más segura y económica es el diseño de taludes de emboquille autoestables. Para ello se deberá escoger la mejor orientación de la excavación con respecto a las discontinuidades. Para terrenos sedimentarios hay que tener en cuenta que, a igualdad de altura, uno de los taludes laterales será favorable y el otro desfavorable desde el punto de vista de estabilidad. En caso de no poder actuar de otro modo sino reforzando los taludes:
  - 🔧 **Las medidas de refuerzo se tomarán a medida que avanza la excavación.**
  - 🔧 **Es preferible refuerzo con bulonaje a refuerzo con hormigón proyectado, salvo que los terrenos se degraden fácilmente en presencia de agua.**
  - 🔧 **En el caso de usar bulonaje, se utilizarán, preferentemente, los redondos corrugados anclados con lechada de cemento.**

## Criterios de diseño

- 4 **Optimizar el talud frontal.** Una vez minimizada la altura de talud del emboquille, se puede reforzar el talud frontal, puesto que es el más débil. Se deberá tener en cuenta que el plano de la sección de emboquille se sitúe lo más paralelo posible a la superficie del terreno. En el caso de dos emboquilles paralelos, para reducir la anchura del talud frontal, se puede desfasar ambos emboquilles, creando un machón central en el talud, que disminuirá su anchura efectiva y contribuirá a estabilizar la excavación.
- 5 **Proyectar un falso túnel para integrar ambientalmente el emboquille.** Muchas veces la altura resultante del talud frontal es excesiva a efectos de integración medioambiental, por lo que es imprescindible construir un falso túnel para rellenar y remodelar la superficie final. Su longitud será optimizada atendiendo a las dimensiones de los taludes provisionales y la pendiente de la superficie final.



# Sostenimientos especiales

## Criterios para el cálculo

- 1 Estabilidad de taludes.** Los métodos de cálculo de estabilidad se dividen en dos categorías:

  - 🌿 Métodos que evalúan la estabilidad de los bloques de roca inestables debido a la orientación de la cara del talud con las discontinuidades del macizo rocoso.
  - 🌿 Métodos de cálculo para terrenos tipo suelo o rocas muy alteradas.

Ambos métodos se basan en el equilibrio límite y no tienen en cuenta la deformabilidad del terreno.
- 2 Caída de rocas.** Esto de solventa mediante la construcción e bermas o barreras.
- 3 Falsos túneles.** Se calculan como una estructura portante que debe admitir cierta altura de tierras, que transmite la presión al terreno a través de las zapatas de cimentación.
- 4 Paraguas de protección.** Como norma general, todos los emboquilles se deberían iniciar bajo la protección de un paraguas adecuadamente dimensionado. Para evaluar el dimensionado, se aplica un modelo geomecánico.
- 5 Cálculos en tres dimensiones.** Normalmente se simplifica y se realizan los cálculos en dos dimensiones, lo cual está justificado en las secciones convencionales del túnel, pero no en los emboquilles, por lo que se deben asumir ciertos errores de cálculo.

# Corrección de inestabilidades

## Criterios de control de la inestabilidad

Existen tres razones para extremar el **control de estabilidad** de emboquilles durante su construcción:

- ☛ Los terrenos de los emboquilles presentan variaciones en su comportamiento, debido a la alteración superficial.
- ☛ Debido a la baja calidad del terreno, el efecto arco sobre la sección de emboquille puede disminuir respecto a las secciones convencionales y se puede producir hinchamiento o colapso del terreno.
- ☛ Las posibilidades de corregir el refuerzo para el control de la estabilidad de un talud son menores y más ineficaces que en una sección convencional.

### CRITERIOS TIPO PARA EL CONTROL DE EMBOQUILLES

- ☛ **Auscultación/Nivelaciones.** En la superficie exterior sobre el emboquille y en la clave de la estructura. Deben iniciarse antes de la construcción del emboquille y mantenerse hasta construido el tramo de completo y retomarse con la destroza. Precisión  $\pm 1$  mm y frecuencia semanal.
- ☛ **Medidas de convergencia.** Precisión  $\pm 0,1$  mm. resulta imprescindible una medida de convergencias en el emboquille del túnel en cuanto se realice la primera excavación. Deben reanudarse cuando se haga la destroza del emboquille.
- ☛ **Inclinómetros y extensómetros.** Información sobre los desplazamientos en el interior del terreno en el que se ha excavado un talud. La acumulación de movimientos en un plano determinado indica un posible punto de fractura. Los extensómetros miden los niveles de deformación del terreno en el que el talud está excavado, relacionado con el grado de estabilidad del mismo. Como inconveniente, son medidas más caras que los dos métodos anteriormente presentados.

## TALUDES DE DESMONTE

Fuentes: Ortuño Abad, L., Uriel, P. & Asociados, S.A. (1998): «*Emboquille de Túneles*». En López Jimeno, C. (Ed.). IngeoTúneles, Vol. 1. Móstoles: Entorno Grafico, S.L.



Solución conjugada de bulones, malla electrosoldada y gunita.

«Shotcrete ops at Wall # 34», NCDOTcommunications.

<https://www.flickr.com/photos/ncdot>.

<https://flic.kr/p/dTYpLk>

<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Es necesario prever medidas de mantenimiento de los taludes de desmonte de los emboquilles. Normalmente el macizo se encuentra en peores condiciones por su proximidad a la superficie y sea necesario promover medidas de refuerzo y estabilización. Lo más habitual son los bulones y los anclajes. En función del grado de alteración de la roca del espaciamiento y orientación de sus discontinuidades es posible recurrir a otras soluciones como **mallazos, gunita, muros de hormigón, etc.**



«Shotcrete», B.C. Ministry of Transportation and Infrastructure.

<https://www.flickr.com/photos/tranbc/>.

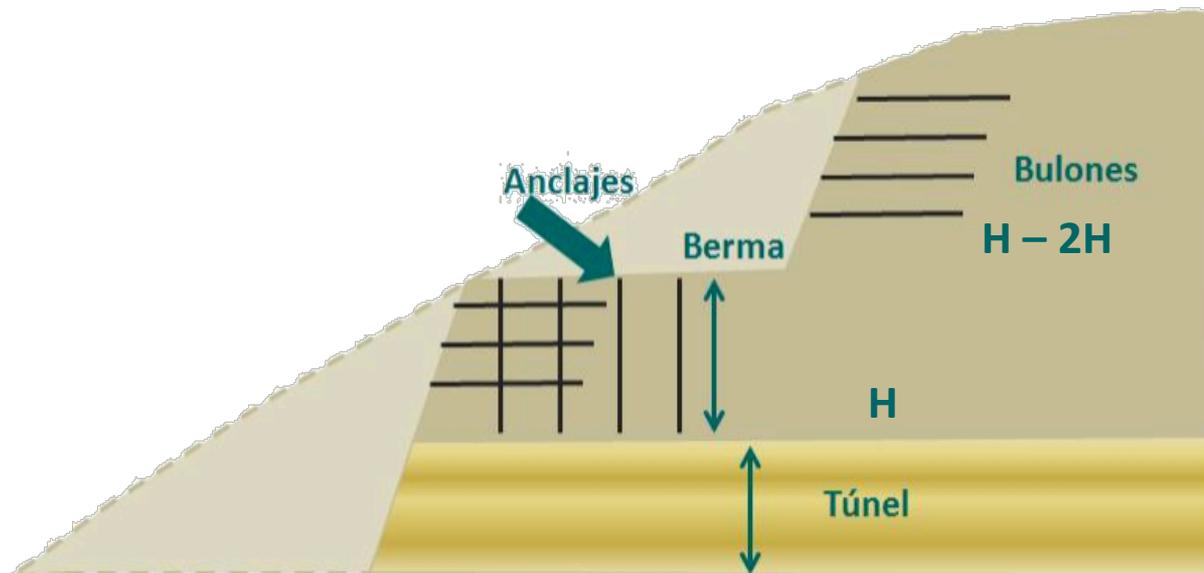
<https://flic.kr/p/8Xrxpa>.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>.

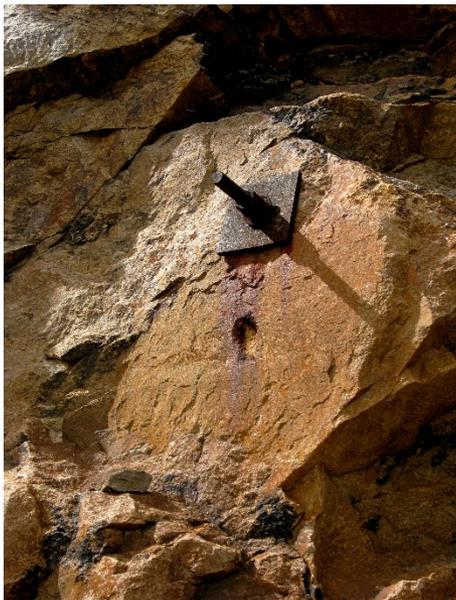
## EJECUCIÓN DE BERMAS SOBRE EL TALUD FRONTAL

### VENTAJAS

- Mejora la seguridad del área de trabajo, puesto que actúa de plataforma en la recepción de eventuales caídas de bloques o piedras provenientes de zonas más elevadas.
- Facilita la ejecución de actividades de tratamientos del terreno, como bulones horizontales y anclajes justo por encima de la clave del túnel, aumentando la estabilidad del macizo rocoso superior al mismo.
- Recogida y desvío de aguas de escorrentía procedente de las laderas.
- Plataforma para la instalación de instrumentación de los taludes y los primeros metros de túnel.



## EJECUCIÓN DE BERMAS SOBRE EL TALUD FRONTAL

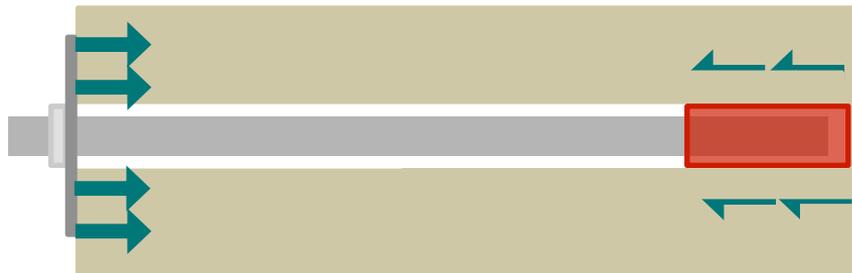


Bulón en roca. «Bolt», Richard Johnson.

<https://www.flickr.com/photos/tab2space/>.

<https://flic.kr/p/5qokom>.

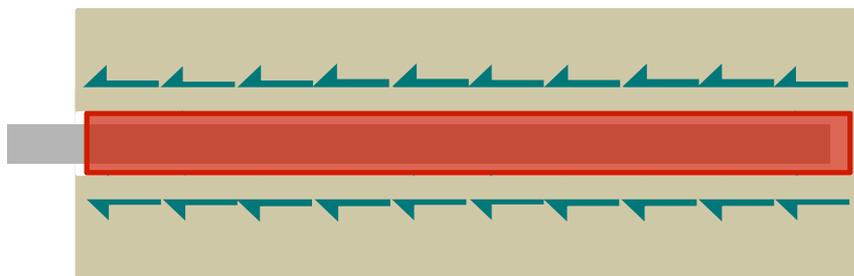
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/>.



Animación, ejemplo de colocación de un bulón: <http://youtu.be/YNmkkOhMYnU>.

**Bulón activo:** bulón unido en fondo a la roca, y tensado mediante placa base que transmite tensión al terreno

**Bulón pasivo:** la adherencia con el terreno se produce a lo largo de la totalidad de la longitud. El bulón actúa sólo en caso de existir movimientos en el macizo.



Si se ha ejecutado una berma, se pueden instalar bulones **pasivos verticales**. Conforme se excavan los taludes en escalones, se pueden instalar bulones subhorizontales. Ambos contribuyen al cosido de las discontinuidades. Otras alternativas ya mencionadas podrán resultar adecuadas en función de las características del macizo.

# Sostenimientos especiales

## Generación de pantallas como elemento de contención

### EJECUCIÓN DE PANTALLAS

Existen varias modalidades de pantallas:

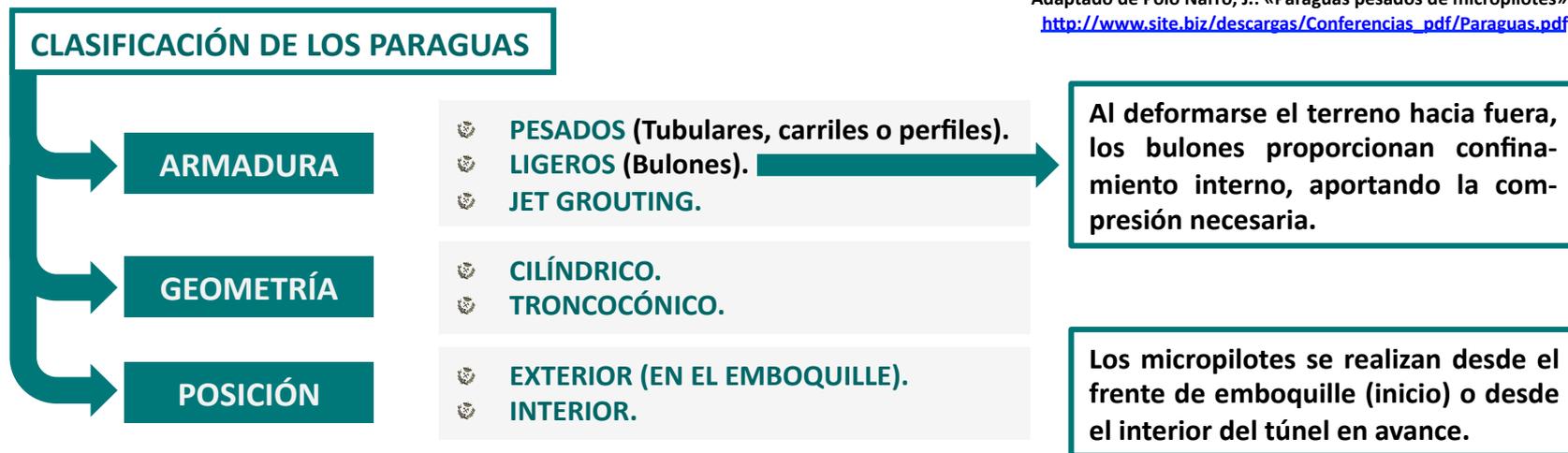
- 
**Pantalla clásica (continua o de pilotes):** muy habitual en ciudades (bocas de metro). Para materiales en los que no se requiera el empleo del trépano.
- 
**Pantallas de micropilotes:** los pilotes se perforan verticalmente desde la superficie del terreno. Una de las principales ventajas radica en la forma de ejecución que permite atravesar cualquier terreno (similar a los sondeos convencionales). Se emplea de forma extensiva en macizos rocosos complejos. Se construyen en uno o varios niveles. Este tratamiento se complementa con el gunitado de la pantalla, para evitar los escapes de terreno entre micropilotes. Es un sistema costoso pero que proporciona gran seguridad, limpieza y facilidad de trabajo.

**Son la alternativa al tratamiento clásico de taludes con bulones o anclajes.** Con las pantallas se consigue tener ejecutado el elemento de contención. El tratamiento se puede completar con el gunitado del frente de la excavación. Asimismo, es bastante común la ejecución de los paraguas y viseras de micropilotes, formando una solución integral para el emboquillado.

## Soluciones integrales: generación de paraguas

En función el **tipo de elemento** resistente podrá hablarse de paraguas pesados (aquellos en los que se emplean micropilotes o incluso se hincan carriles de ferrocarril), y paraguas ligeros, que hacen uso de bulones. Romana considera igualmente paraguas intermedios. Es posible plantear la ejecución de paraguas mediante jet-grouting (ver diapositivas posteriores), si bien conviene introducir una armadura.

Adaptado de Polo Narro, J.: «Paraguas pesados de micropilotes».  
[http://www.site.biz/descargas/Conferencias\\_pdf/Paraguas.pdf](http://www.site.biz/descargas/Conferencias_pdf/Paraguas.pdf)



	BULÓN		MICROPILOTE				
Diámetro de perforación (mm)	65	65	125	125	150	165	180
Armadura (mm)	25	32	73 · 5,5	89 · 6,5	114 · 7	127 · 9	139 · 9
Momento de inercia (cm <sup>4</sup> )	1,917	5,147	66,866	144,219	338,193	584,074	780,21
Límite elástico (kg/cm <sup>2</sup> )	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Resistencia a cortante (t)	9,021	14,78	21,43	30,96	43,24	61,315	67,55
Resistencia a flexión (t·m)	0,077	0,161	0,916	1,62	2,967	4,599	5,613

## Soluciones integrales: generación de paraguas

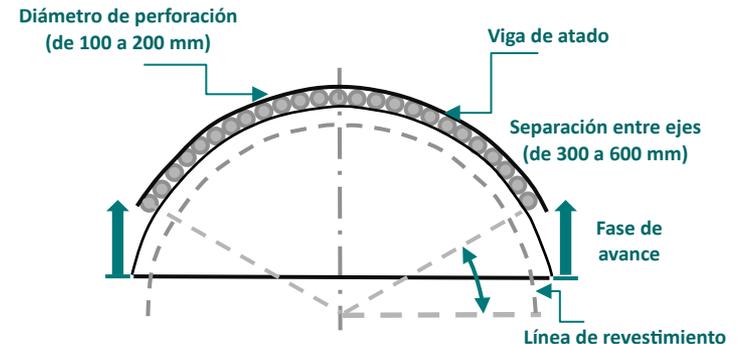
### PARAGUAS DE MICROPILOTES

Fuentes: Ortuño Abad, L., Uriel, P. & Asociados, S.A. (1998): «Emboquille de Túneles».  
En López Jimeno, C. (Ed.). IngeoTúneles, Vol. 1. Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

En ocasiones se emplea en la ejecución de emboquilles este tipo de aplicación, consistente en la **yuxtaposición de micropilotes**, un **conjunto de perforaciones subhorizontales de 100 a 200 mm de diámetro**, en cuyo interior se encuentra una tubería de acero, la cual se rellena con cemento, hasta conseguir **superficies de revolución**. La perforación se ejecuta desde el exterior, rodeando la excavación a realizar. Con esto se obtiene una **bóveda inicial** que sostiene el terreno superior, aproximadamente troncocónicas o cilíndricas, de eje prácticamente paralelo al del propio túnel.

Con maquinaria convencional se requieren, habitualmente, de 3 a 5 posicionamientos para obtener un paraguas de 20 a 25 micropilotes.

Ejecución de micropilote autoperforante:  
<https://www.youtube.com/watch?v=fPB0Bo5JxtI>.



ESQUEMA FRONTAL DEL  
PARAGUAS DE MICROPILOTES

Fuente: «Guía para el proyecto de ejecución de micropilotes en obras de carretera». Serie Normativas. Ministerio de Fomento.

## Soluciones integrales: generación de paraguas

### PARAGUAS DE MICROPILOTES

Fuentes: Ortuño Abad, L., Uriel, P. & Asociados, S.A. (1998): «Emboquille de Túneles».  
En López Jimeno, C. (Ed.). IngeoTúneles, Vol. 1. Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

La longitud de los micropilotes está delimitada por las desviaciones producidas durante la perforación. Si las perforaciones divergen en exceso, pueden quedar zonas de terreno inestable. Por este motivo, la inclinación del paraguas debe ser la adecuada para no exceder una distancia de 2m entre el paraguas y la clave del túnel. (Pueden señalarse como longitudes típicas de paraguas para que las áreas de influencia se solapen las comprendidas entre 10-12 y 18-25).

Uno de los métodos más difundidos para condiciones de terreno difíciles, **usado en conjunto con sostenimientos robustos y revestimientos\***, sobre todo en los primeros metros de túnel en los que se atraviesa terreno de peor calidad. **Igualmente pueden plantearse al atravesar rellenos de falla**, o zonas de debilidad que aconsejen la mejora de la capacidad resistente de la sección, debiendo excavar con anterioridad a ésta. Su aplicación podría no limitarse al emboquille del túnel, sino que podría ampliarse a la totalidad del mismo.



### Excavación bajo los paraguas de micropilotes (Cotas a modo de ejemplo)

Fuente: «Guía para el proyecto de ejecución de micropilotes en obras de carretera». Serie Normativas. Ministerio de Fomento.

\* Se suelen emplear junto con el sistema Bernold para los 15 - 20 m de la sección de emboquillado.

[http://www.dfdurofelguera.com/catalogo\\_tedesas/prod/prod\\_cat/chapa/Bernold/bernold.pdf](http://www.dfdurofelguera.com/catalogo_tedesas/prod/prod_cat/chapa/Bernold/bernold.pdf)

\* Pueden combinarse además con sostenimientos reforzados, cerchas y hormigón proyectado con espesor de hasta 20 cm.

# Sostenimientos especiales

## Soluciones integrales: generación de paraguas

### PARAGUAS DE MICROPILOTES

#### VIDEOS:

- Ejecución de paraguas de micropilotes en las obras de El Carmel:  
<https://www.youtube.com/watch?v=sD8be0tI0gM>.
- Inyección de lechada de cemento en micropilotes:  
<https://www.youtube.com/watch?v=ol-WawSvVKk>.

Sistema Bernold

Paraguas



«Paraguas de micropilotes en el túnel de El Guincho (Tenerife)».  
Fuente: Barral Ramón, N.

# Sostenimientos especiales

## Emboquilles con micropilotes

### PARAGUAS DE MICROPILOTES

#### FASES DE CONSTRUCCIÓN DEL PARAGUAS DE MICROPILOTES

Adaptado de: Polo Narro, J.: «Paraguas pesados de micropilotes». [http://www.site.biz/descargas/Conferencias\\_pdf/Paraguas.pdf](http://www.site.biz/descargas/Conferencias_pdf/Paraguas.pdf).

- ❁ **Replanteo:** en el caso del paraguas la alineación debe estar muy bien marcada, o de lo contrario los taladros podrían cruzarse o incluso penetrar en la sección del túnel. A través de un punto materializado en el frente, en el que se habrá de colocar la boca de perforación, y una línea marcada por dos puntos tras el equipo, se orientará debidamente el equipo de perforación.
- ❁ **Perforación:** se recurrirán a perforación rotopercutiva con martillo en cabeza o en fondo en función del diámetro, pero la primera opción conllevará mayores desvíos.
- ❁ **Introducción de la armadura:** tras finalizar la ejecución del barreno se introducirá la armadura correspondiente. Es importante que si se recurre a varios tramos de armadura queden perfectamente rosca-dos. Es habitual dejar fuera del barreno una sobre-longitud de armadura de medio metro, para arriostar los micropilotes.
- ❁ **Inyección en el barreno:** bombeo de lechada o mortero de cemento desde la boca por el interior de la armadura tubular. La lechada circulará por el interior de la tubería hasta el final, retornando a la boca por el exterior de la tubería, estando en contacto con las paredes del barreno. Es necesario por tanto tapar la boca del taladro: dos tubos de polietileno permitirán inyectar y controlar la salida de lechada.

[http://www.site.biz/descargas/Conferencias\\_pdf/Paraguas.pdf](http://www.site.biz/descargas/Conferencias_pdf/Paraguas.pdf).

## Emboquilles con micropilotes

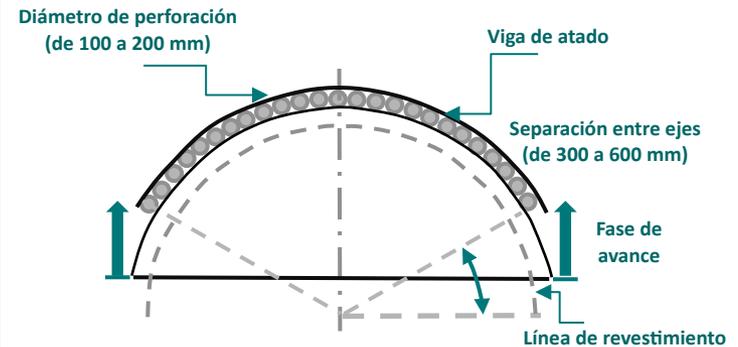
### PARAGUAS DE MICROPILOTES

Fuentes: Ortuño Abad, L., Uriel, P. & Asociados, S.A. (1998): «Emboquille de Túneles». En López Jimeno, C. (Ed.). IngeoTúneles, Vol. 1. Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

Al ser aplicados a emboquilles es habitual la generación de una viga de atado, o zuncho perimetral, que una las cabezas de los micropilotes. Los micropilotes trabajan a flexión, y el zuncho a torsión.

En excavaciones en túnel bajo paraguas de micropilotes podrán utilizarse disposiciones como la de la imagen, con longitudes de pilote por lo general inferior a los 25 m, e inclinaciones con respecto a la horizontal iguales o inferiores a los 15°. El solape entre micropilotes de avances sucesivos será función de la propia longitud de avance, de las características y de la propia geometría del emplazamiento, si bien suele prescribirse que sea mayor o igual a 3 m.

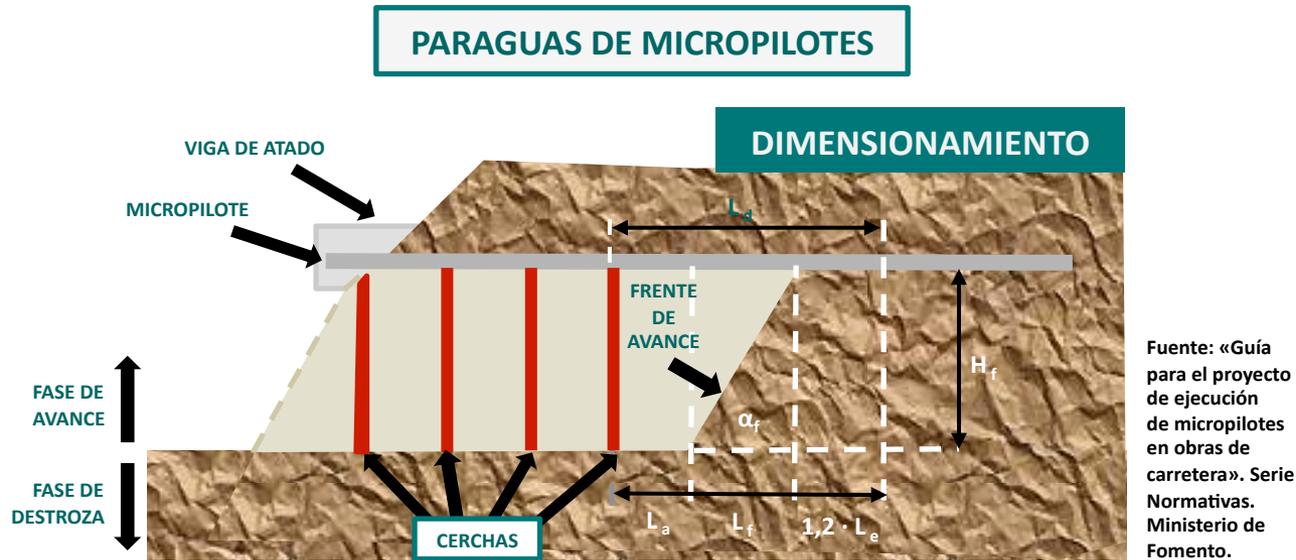
La separación entre pilotes de una misma sección transversal deberá resultar inferior a 60 cm entre ejes contiguos. La **separación entre micropilotes** y la **armadura tubular se puede calcular**, en ausencia de otra información de mayor especificidad, como vigas sometidas al peso de las **tierras que soportan, en base a los valores siguientes:**



Fuente: «Guía para el proyecto de ejecución de micropilotes en obras de carretera». Serie Normativas. Ministerio de Fomento.

# Sostenimientos especiales

## Soluciones integrales: generación de paraguas



La longitud del cálculo de la viga  $L_d$  se obtiene a partir de la aplicación de la expresión:

$$L_d = L_a + L_f + 1,2 \cdot L_e$$

- $L_d$ : longitud de cálculo de cada micropilote, considerándolo como una viga.
- $L_a$ : Longitud de avance de la excavación (asimilable a la separación entre cerchas del sostenimiento).
- $L_f$ : Longitud del frente de excavación, en planta.

$$L_f = H_f \cdot \cotg \alpha_f$$

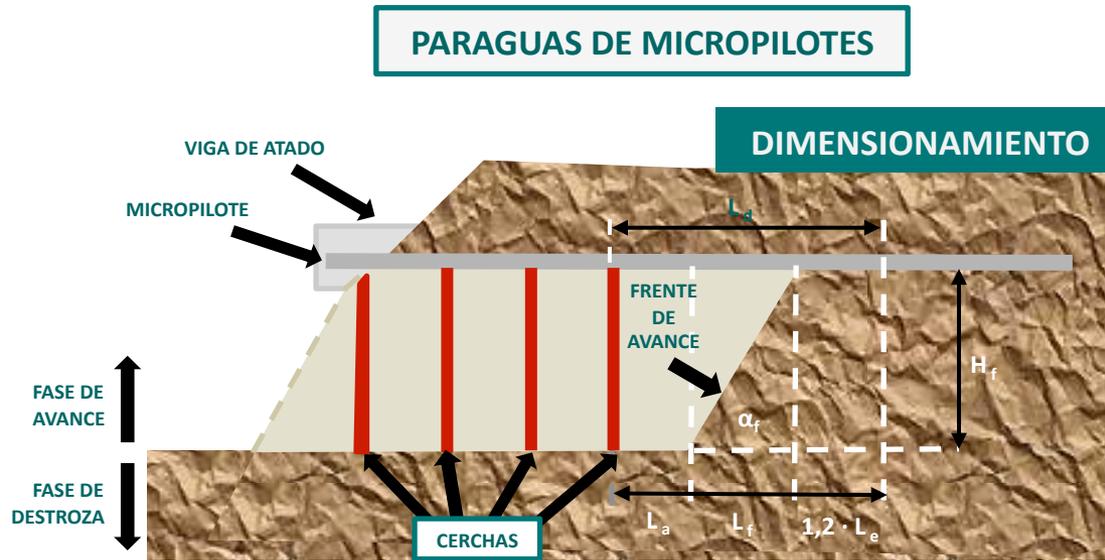
- $L_f$ : Longitud del frente de excavación, en planta.
- $H_f$ : Altura del frente de excavación
- $\alpha_f$ : Ángulo de inclinación del frente con respecto a la rasante.

- $L_e$ : longitud elástica del micropilote, considerándolo empotrado en el terreno.

$$L_e = \left( \frac{3 \cdot E_p I_p}{E} \right)^{\frac{1}{4}}$$

# Sostenimientos especiales

## Soluciones integrales: generación de paraguas



Fuente: «Guía para el proyecto de ejecución de micropilotes en obras de carretera». Serie Normativas. Ministerio de Fomento.

$$L_d = L_a + L_f + 1,2 \cdot L_e$$

•  $L_e$ : longitud elástica del micropilote, considerándolo empotrado en el terreno.

$$L_e = \left( \frac{3 \cdot E_p I_p}{E} \right)^{\frac{1}{4}}$$

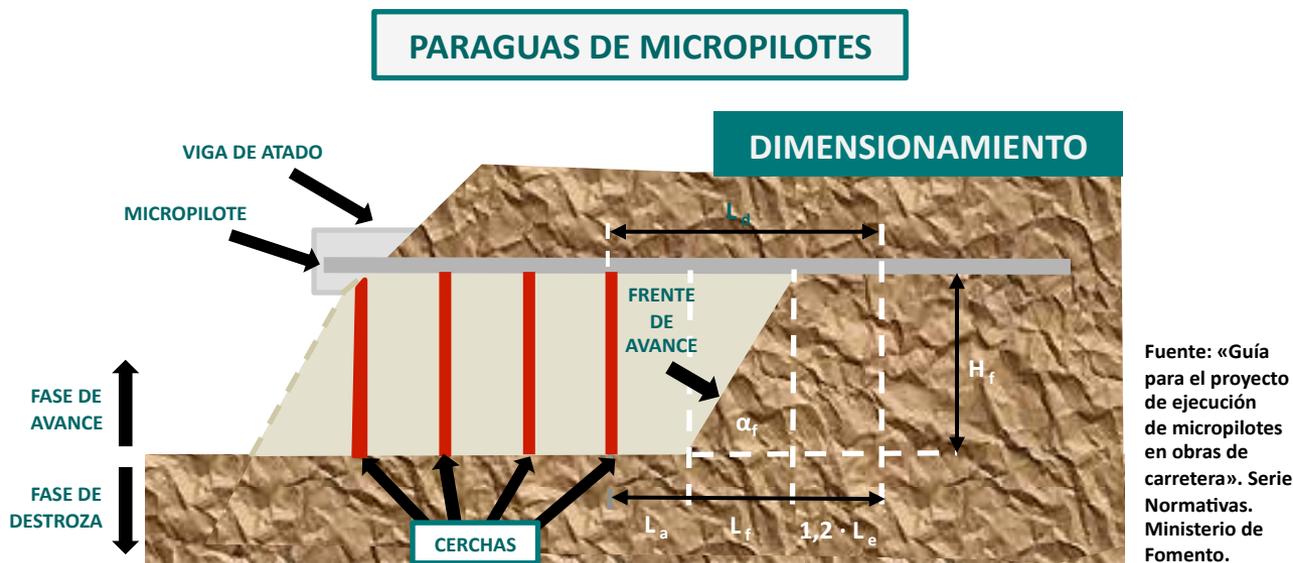
•  $E$ : Módulo de elasticidad del terreno.  
 •  $E_p I_p$ : Rigidez a flexión del micropilote, equivalente en este caso a la suma de las rigideces a flexión de la lechada o mortero y de la armadura.

$$E_p I_p = E_c I_c + E_a I_a$$

- $E_c$ : Módulo de elasticidad de la lechada o mortero.
- $I_c$ : Momento de inercia de la sección de lechada.
- $E_a$ : Módulo de elasticidad del acero.
- $I_a$ : Momento de inercia de la sección de acero.

# Sostenimientos especiales

## Soluciones integrales: generación de paraguas



$$L_d = L_a + L_f + 1,2 \cdot L_e$$

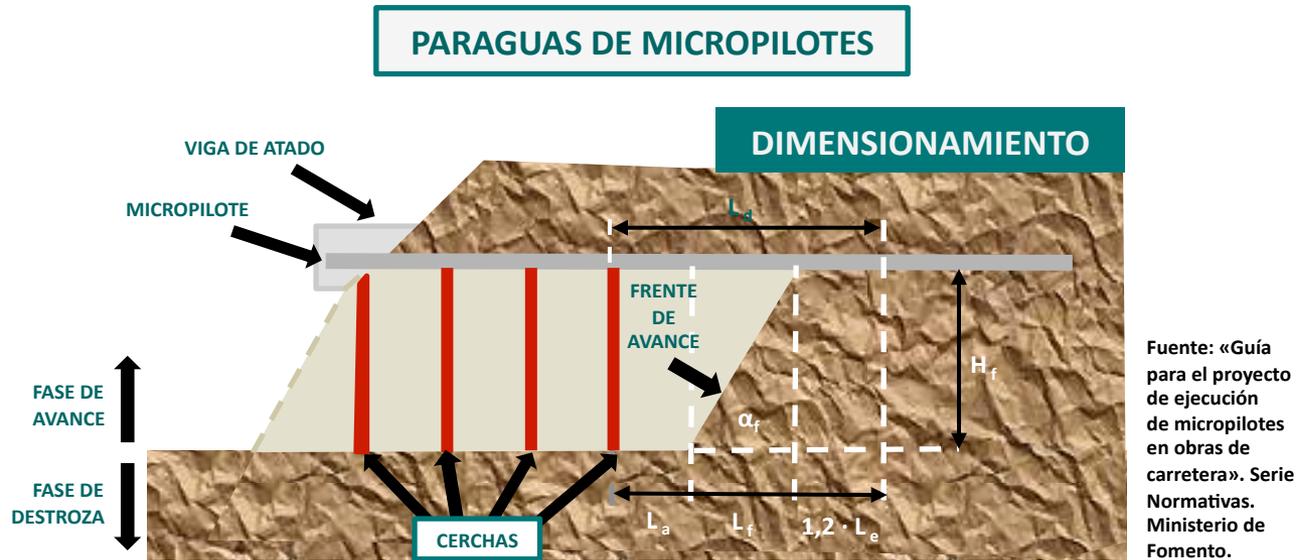
$$q = \gamma_{ap} \cdot h \cdot s$$

La carga del terreno que gravita sobre cada micropilote puede determinarse a través de la expresión.

- $q$ : carga del terreno en la zona de influencia de cada micropilote
- $\gamma_{ap}$ : Peso específico aparente del terreno
- $h$ : Altura del terreno que a efectos de cálculo se considera que gravita sobre el sostenimiento a corto plazo. Si se trata de un paraguas de presostenimiento al avance, se considera que está comprendido entre 0,5 y una vez el diámetro del túnel. Debería considerarse la configuración geométrica y geomorfológica del terreno, y la influencia del resto de actuaciones para la estabilización, pero se estima que debe considerarse al menos la carga actuante sobre el mismo paraguas.
- $s$ : Separación entre los ejes de los micropilotes.

# Sostenimientos especiales

## Soluciones integrales: generación de paraguas



Es habitual recurrir a la consideración de una situación intermedia entre viga biarticulada y biempotrada, obteniendo unas solicitaciones:

$$M_{Ed} = \frac{q_d \cdot L_d^2}{10}$$

$$V_{Ed} = \frac{q_d \cdot L_d}{2}$$

- 📍  $q_d$ : Valor mayorado de la carga del terreno.
- 📍  $M_{Ed}$ : Momento flector de cálculo
- 📍  $V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante de cálculo

Estos valores han de compararse con las resistencias estructurales.

## Soluciones integrales: generación de paraguas

### PARAGUAS DE MICROPILOTES

VALOR DEL PARÁMETRO	MÍNIMO	MÁXIMO	TÍPICO
Longitud (m)	10	25	12 a 20
Separación (m)	0,3	0,6	0,4
Nº de micropilotes	15	39	25
Inclinación vertical (°)	0	15	1 a 4
Solape	1	4	3
Diámetro de perforación	100	200	150
<b>Dimensiones de la armadura</b>			
Diámetro de perforación (mm)	73	168	89 a 144
Espesor (mm)	5	10	7
Área (cm <sup>2</sup> )	10	50	18 a 24
Inercia (cm <sup>4</sup> )	65	1500	150 a 300

### Parámetros a considerar del paraguas de micropilotes

Adaptado de Murillo Pérez, T. (2002): «Paraguas de micropilotes en la construcción de túneles». En López Jimeno, C. (Ed.). Ingeniería del Terreno, Ingeoter, Vol. 1.

# Sostenimientos especiales

## Soluciones integrales: Jet Grouting

### JET GROUTING

Técnica en la inyección de una lechada de cemento a alta presión. El proceso consiste en ejecutar una perforación similar a la de un sondeo, pero la 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 un varillaje, se inyecta por las toberas la lechada, en ocasiones complementada o precedida de agua y/o aire, consiguiendo una disgregación del terreno en torno a la perforación y una mezcla del mismo con la lechada. Mediante un movimiento de rotación del varillaje durante su recuperación se consiguen columnas de suelo-cemento de características superiores en cuanto a resistencia e impermeabilidad que el terreno original.

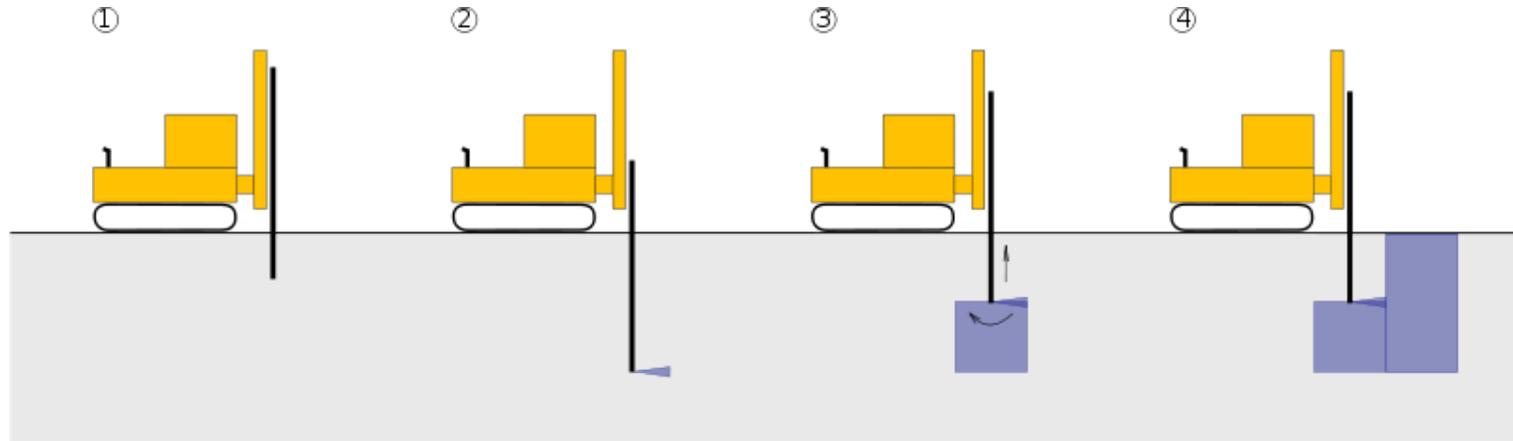
Al igual que con los micropilotes, las columnas de jet grouting pueden ejecutarse formando paraguas sub-horizontales con el fin de crear prebóvedas de sostenimiento. Se emplea en aquellos casos en los que recurrir a un paraguas pesado no resuelve la problemática. En la actualidad resulta más simple ejecutar un paraguas de micropilotes.

### APLICACIONES DEL JET GROUTING:

<http://www.terratest.cl/documentos/CAT-JG-01.pdf>.

## Soluciones integrales: Jet Grouting

### JET GROUTING



«Tratamiento mediante Jet Grouting». Jet Grouting Scheme By 5gon12eder.

GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC BY-SA 4.0-3.0-2.5-2.0-1.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0-3.0-2.5-2.0-1.0>). Via Wikimedia Commons.

### VIDEOS:

- Jet Grouting:  
<https://www.youtube.com/watch?v=e2aEEUvmLIM>.
- Animación Jet Grouting:  
<https://www.youtube.com/watch?v=i8x2xFCaR5o>.

«A jet grout rig drills columns near the historic piers».  
[https://www.flickr.com/photos/sdot\\_photos](https://www.flickr.com/photos/sdot_photos).  
<https://flic.kr/p/r7dBMZ>.  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>.



## Boquillas en túneles ejecutados con escudos a través de sueldos blandos saturados

Caso especial para suelos blandos en los que el emboquille se plantea mediante escudos abiertos o cerrados. En función de la geometría, puede recurrirse a la generación de un pozo mediante pantallas (de hormigón, tablestacas, etc). Con el fin de simplificar el acceso del escudo al material, suele demolerse mediante métodos ajenos a la propia intervención del escudo la sección correspondiente a la excavación, ya que resultaría un notable sobrecoste y una labor dificultosa para el escudo la demolición de dicho muro.

Como se verá en temas posteriores, el escudo recurre con frecuencia a la aplicación de fluidos estabilizantes para controlar el frente, si bien no será posible su empleo hasta que el escudo haya penetrado completamente en el terreno. Para suplir los requisitos de contención, contrarrestar la presión intersticial, y controlar avenidas incontroladas de agua, suele recurrirse a la aplicación **de tratamientos de mejora del terreno**, mediante alternativas como por ejemplo la **inyección**, que le aporten unas mejores características.

### RECOMENDACIONES PARA EL TRATAMIENTO

1. La permeabilidad del suelo mejorado debe reducir el gradiente hidráulico, pudiendo señalar como valor orientativo  $k = 10^{-6} \text{m/s}$ .
2. La longitud de la zona mejorada ha de ser igual al menos a la suma de la longitud del escudo más uno o dos anillos de dovelas. (Existen recomendaciones dispares en la bibliografía: de 0,5 a 2 veces la longitud del escudo).
3. La sección transversal asociada al alcance del suelo debe estar entre 1,5 y 2 veces el diámetro del túnel.

**Ejemplo de aplicación: Línea 5, Metro de Valencia:**

<http://www.begv.gva.es/arena/folletos/TT/T20.pdf>

## Recomendaciones para el sostenimiento en el emboquille

CLASIFICACIÓN		EXCAVACIÓN		TRATAMIENTO DEL TALUD FRONTAL				
RMR	CLASE	PARTICIÓN DEL EMBOQUILLE	PARAGUAS	BULONES			HORMIGÓN PROYECTADO e(cm)	RED/MALLA
				L(m)	b/m <sup>2</sup>	s(m)		
100		SECCIÓN COMPLETA						
	Ia		Opcional	No	No	No	No	Opcional
90								
	Ib		Opcional	3/4	<0.10	Ocasional	No	Sí
80								
	IIa		Ligero	3/4	0.11	3x3	No	Sí
70								
	IIb		Ligero o medio	3/4	0.25	2x2	Ocasional	Sí
60								
	IIIa		Medio	4	0.44	1.5x1.5	Ocasional	Sí
50								
	IIIb	Medio	4/5	0.70	1.2x1.2	Ocasional	Sí	
40								
	IVa	Medio	5/6	1.00	1x1	0.10-0.15	No	
30								
	IVb	Pesado	6	1.50	0.8x0.8	0.15-0.20	Mallazo opcional	
20								
	Va	Pesado	No	No	No	0.20-0.25	Mallazo simple	
10								
	Vb	Pesado	No	No	No	0.25-0.30	Mallazo simple o doble	
0								

Fuente: Romana, M. (2000): «Nuevas recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles y boquillas».

[http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR\\_Art\\_NuevasRecomendaciones.pdf](http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_NuevasRecomendaciones.pdf)

# Sostenimientos especiales

## Recomendaciones para el sostenimiento en el emboquille

### PARAGUAS

El paraguas es siempre una buena práctica, recomendable cuando la calidad del macizo rocoso no es muy buena ( $80 > \text{RMR}$ ):

- **Paraguas ligero** ( $60 < \text{RMR}$ ). Constituido por bulones de  $\phi$  32 y 6 metros de longitud colocados dentro de una perforación de 2<sup>1/2</sup>" (67 cm).
- **Paraguas medio** ( $30 < \text{RMR} < 70$ ). Constituido por micropilotes de tubo metálico de diámetro exterior igual o inferior a 90 mm y espesor igual o inferior a 7 mm.
- **Paraguas pesado** ( $\text{RMR} < 30$ ). 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).
- **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). En las columnas es conveniente introducir una armadura.

Fuente: Romana, M. (2000): «Nuevas recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles y boquillas».  
[http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR\\_Art\\_NuevasRecomendaciones.pdf](http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_NuevasRecomendaciones.pdf).

# Sostenimientos especiales

## Recomendaciones para el sostenimiento en el emboquille

### BULONES

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.

Las densidades iguales o superiores a 1 bulón/m<sup>2</sup> son altas y solo se recomiendan para valores del RMR inferiores a 30. Para valores del RMR inferiores a 20 la masa rocosa se comportará como un suelo y los bulones normales no están recomendados.

### HORMIGÓN PROYECTADO

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.

### MALLA METÁLICA

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, aunque no mejora la estabilidad del talud.

# Ubicación y avance

## FACTORES QUE CONDICIONAN LA UBICACIÓN DE LOS EMBOQUILLES

- 🔗 **Factores geológicos, hidrogeológicos y de estabilidad:** tipo de material, estructura, grado de meteorización, etc.
- 🔗 **Factores estéticos.**
- 🔗 **Factores económicos.**
- 🔗 **Factores geométricos:** contempla la topografía de la ladera, ángulo de incidencia de la traza del túnel, etc.

¿HASTA DÓNDE HA DE LLEGAR EL DESMONTE Y DÓNDE DEBERÁ COMENZAR EL TÚNEL VERDADERO?

**Criterio general:** para el comienzo de avance del túnel verdadero deberá existir un recubrimiento suficiente por encima de su clave para desarrollar un arco autoportante de terreno, condicionado por las características del terreno. A efectos prácticos, y dada la baja calidad general de los terreno de emboquilles, la altura mínima se toma de, al menos, **dos diámetros por encima de la clave**, pudiendo reducirse a un diámetro en macizos competentes.

**PARA TÚNEL DE 8 M DE ALTURA: DESMONTE DE LAS BOQUILLAS HASTA ALCANZAR LOS 24 M DE ALTURA**

## CRITERIOS ESTÉTICOS / NECESIDAD DE INTEGRACIÓN EN EL ENTORNO

En ocasiones la boca física del túnel puede no corresponder con el propio emboquille, por cuestiones de integración en el medio. En dichos casos, por reacondicionado de la superficie final se suele construir un falso túnel que une la sección de emboquille con la entrada real del túnel.

Los taludes de emboquille de obra son más altos e inclinados que los definitivos generados a posteriori, ya que éstos deben integrarse en la superficie natural del terreno. De esto se deriva que los taludes de obra sean menos seguros que los definitivos. Para mantener un coeficiente de seguridad razonable (1,2 para las condiciones más desfavorables que actúan sobre el talud) se recurre, como se ha señalado anteriormente, a alternativas como el bulonaje, el mallazo, las bermas intermedias y el empleo de hormigón proyectado en los taludes de obra.



Fuente: «Viaducto de Hurgas y entrada del túnel de Nocedo de Gordón». Rdaneel.  
<http://www.ferropedia.es/wiki/>.

Archivo: «Viaducto\_y\_tunel\_nocedo.jpg».  
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.es>.

## ¿SECCIÓN COMPLETA O SECCIÓN PARTIDA PARA EL AVANCE? RECOMENDACIONES PARA EL EMBOQUILLE

CLASIFICACIÓN		EXCAVACIÓN
RMR	CLASE	PARTICIÓN DEL EMBOQUILLE
100		
	Ia	
90		
	Ib	
80		
	IIa	
70		
	IIb	
60		
	IIIa	
50		
	IIIb	
40		
	IVa	
30		
	IVb	
20		
	Va	
10		
	Vb	
0		

**RMR > 70:** recomendable emboquillar a sección completa si la excavación va a continuarse también a sección completa.

**30 < RMR < 70:** el sistema de sección partida en dos: avance (calota) y destroza.

**30 > RMR:** es más conveniente el emboquille por galerías múltiples, con construcción de contrabóveda robusta para concluir.

**Para RMR inferior a 50** puede recurrirse a una galería centrada de avance que vaya unos metros adelantada con respecto a la propia calota (excavación de bóveda), aportando seguridad adicional.

Fuente: Romana, M. (2000): «Uso de clasificaciones geomécánicas en las boquillas de túneles». [http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR\\_Art\\_ClasifGeomecnicas.pdf](http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_ClasifGeomecnicas.pdf).

# Fases de construcción del emboquille

## ETAPAS GENERALES DE EJECUCIÓN DEL EMBOQUILLE

- ✿ **Excavación hasta alcanzar recubrimiento suficiente y sostenimiento de los taludes frontal y laterales generados.**
- ✿ **Replanteo y ejecución de los paraguas.**
- ✿ **Comienzo de la excavación, pudiendo ésta ser a sección completa, o recurrir a una ejecución fraccionada de la misma (avance y destroza, galería central en avance o galerías múltiples).**
- ✿ **Con posterioridad, posible ejecución de falso túnel e integración en el entorno con talud más tenido.**