

# El Túnel de Puruchuco: una obra urbana de gran dificultad técnica

ALDESA y PROACON desarrollan el Proyecto de los Túneles de Puruchuco y Accesos, que consiste en la construcción de dos túneles viales paralelos urbanos, de unos 70 m de longitud, denominados Túnel Puruchuco Norte y Sur, ambos con una sección de excavación de 119 m<sup>2</sup>. Los túneles proyectados se ubican en el Cerro Mayorazgo, para interconectar la circulación del tráfico vehicular entre las Avenidas Javier Prado con Nicolás Ayllón en el distrito de Ate, provincia y Región Lima (Perú).

Palabras clave: COBERTERA, EXCAVACIÓN POR FASES, FALLA, INYECCIÓN, REVESTIMIENTO, ROCA, SECCIÓN, SOSTENIMIENTO, TÚNEL VIAL, URBANO.

Manuel ARLANDI (\*); Mariano MORENO (\*\*), y Antonio ALONSO JIMÉNEZ (\*\*)  
 (\*) TÚNELES Y GEOMECÁNICA, S.L.;  
 (\*\*) PROACON, S.A.

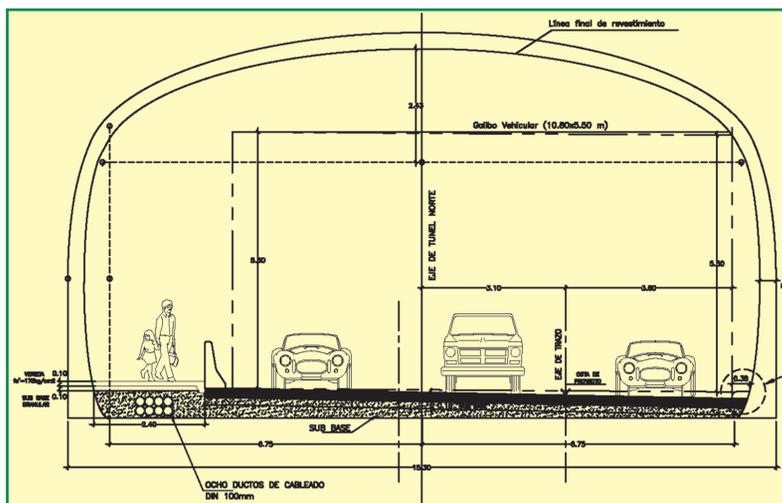
Aunque se trata de túneles muy cortos, su ejecución reviste una grandísima dificultad técnica. En efecto:

- Se trata de un túnel en roca dura compacta, con cobertera escasa, una zona densamente poblada, con importantes restos arqueológicos en la montera del túnel. Por ello, las *Especificaciones Técnicas* del contrato restringen por completo el uso de explosivos. Se trata pues de un túnel de difícil excavabilidad.
- En su vertical se ubica un sitio arqueológico, lo que obliga a ejecutar el túnel *en mina*. Al no disponerse apenas de espacio en cota, ha sido necesario proyectar un túnel con un techo bajo, casi plano, lo cual no es geotécnicamente lo más favorable. Aun así, La cobertera es muy escasa, entre 8 y 4 m según la zona del trazado. A pesar de la escasa montera, es necesario asegurar que no se desarrolle ninguna subsidencia.
- Gran sección de excavación muy grande, en torno a los 120 m<sup>2</sup>. La situación se complica aún más, pues entre ambos túneles existe apenas un pilar de 5 m de roca.
- El túnel es atravesado longitudinalmente por cuatro fallas subverticales, de espesor métrico-decimétrico.

En el presente artículo se detalla el proceso constructivo y los desarrollos de proyecto que se han realizado para asegurar la ejecución exitosa de este proyecto.

## Descripción del proyecto inicial

Se trata de dos túneles paralelos de 15.80 m de ancho y 8.80 m de altura máxima, con un pilar de separación de roca entre ellos de 5.52 m de ancho. La sección transversal es polilíptica con una bóveda bastante plana (**Fig. 1**). Cada túnel aloja una calzada de tres carriles de 3.60 m, más una vereda peatonal de 2.40 m. La sección de gálibo libre reflejada en Planos es de 10.80 m x 5.50 m.



[Fig. 1].- Sección Tipo definida en el Proyecto Original.

Como se ha indicado, el túnel es bitubo, de unos 70 m de longitud en cada sentido de circulación. De esta longitud, en mina se excavarán unos 40 m, y el resto se ejecutará en Falso Túnel. En la **Tabla I** se resumen las longitudes de los túneles.

A grandes rasgos, el terreno está compuesto por un macizo rocoso de Diorita, con una fracturación intensa constituida por tres familias de juntas que dan lugar a bloques de forma aproximadamente cúbica. Se señala la presencia de unas familias de juntas y fallas

paralelas a los ejes de los túneles muy desarrolladas y de gran continuidad. También se señalan tramos de sondeo con huecos (**Foto 1**).

La roca matriz tiene una alta resistencia, en torno a los 100 MPa. En la **Tabla II** se resumen los valores modales de los ensayos de laboratorio para la diorita. Se trata de una roca resistente, constituida por minerales abrasivos.

Se han detectado cuatro fallas de espesor métrico – decimétrico, subverticales, que atraviesan el túnel longitudinalmente, lo cual supone una dificultad geotécnica añadida (**Foto 2**).

	TÚNEL NORTE (EJE 2)			TÚNEL SUR (EJE 3)		
	PK INI	PK FIN	LONG. (m)	PK INI	PK FIN	LONG. (m)
PORTAL	1+210.80	1+221.00	10.20	1+194.00	1+204.20	10.20
TRANSICIÓN	1+221.00	1+226.80	5.80	1+204.20	1+210.00	5.80
FALSO TÚNEL	1+226.80	1+231.10	4.30	1+210.00	1+213.60	3.60
TÚNEL EN MINA	1+231.10	1+270.45	39.35	1+213.60	1+256.18	42.58
FALSO TÚNEL	1+270.45	1+276.34	5.89	1+256.18	1+262.67	6.49
TRANSICIÓN	1+276.34	1+281.50	5.16	1+262.67	1+267.84	5.17
PORTAL	1+281.50	1+286.33	4.83	1+267.84	1+272.67	4.83
			75.53			78.67

[TABLA I].- Longitudes de los túneles.

Densidad aparente (t/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión simple (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
2.97	100	8000	0.29

[TABLA II].- Valores modales de los ensayos de laboratorio para la diorita.

## Excavación



[Foto 1].- Aspecto del macizo rocoso donde se excavará el Túnel. Se aprecia una roca sana, pero con fuerte fracturación, y a la presencia fallas con caja triturada de 1 - 0,5 m de espesor.



[Foto 2].- Fallas presentes en el trazado del túnel. En total el túnel es atravesado por cuatro fallas de estas características.

En el Proyecto Original, la excavación se realiza por fases, en pases de 3 m de longitud, siguiendo un esquema de Método Alemán:

- Fase 1: Excavación de dos galerías laterales en avance.
- Fase 2: Excavación de las destrozadas de las galerías laterales.
- Fase 3: Excavación de la calota del avance.
- Fase 4: Excavación de la destrozada central.

Originalmente se preveía que el método de excavación se basase en la ejecución de taladros de 1,5 m de longitud por medio de martillos hidráulicos de mano, en malla muy cerrada y utilización de dispositivos pirotécnicos tipo *PYROBLAST-C* (con detonadores electrónicos), similares en características deflagrantes a lo que podría ser una pólvora de mina.

El sostenimiento considerado en el Proyecto Original se basa en:

- Inicialmente, ejecución sistemática de inyecciones de consolidación de lechada en todo el perímetro del túnel en taladros de 3.0 m de longitud con una inclinación de 25°.
- Una vez excavado un pase, proyección de dos capas de hormigón proyectado con fibras (1000 Julios), cada una de 5 cm.
- Aplicación de bulones  $\phi$  25 mm de 4.5 m de longitud con resina, distanciados 2 m entre sí.
- Bulones pasantes  $\phi$  25 mm en la zona de pilar entre ambos túneles, enroscados en ambos lados.

Una vez calado y excavado todo el túnel, con un sostenimiento de 10 cm de *shotcrete* y bulones, se aplicaría el revestimiento, formado

por cerchas reticulares de acero distanciadas 1080 mm entre ejes, 22 cm de hormigón bombeado, y como acabado final una capa de *shotcrete* de 3 cm. En la zona del arco superior del túnel (calota), se utiliza chapa tipo Bernold como encofrado perdido del hormigón bombeado, mientras que en la zona inferior del túnel (riñones), se añaden dos paños de malla de acero electrosoldado, debiéndose encofrar con paneles para poder verter el hormigón bombeado.

Como puede apreciarse, en la idea del Proyecto Original, existe un momento crítico, justo antes de comenzar la colocación del revestimiento, en el cual los dos túneles están excavados y sostenidos tan solo por 10 cm de *shotcrete*.

### Desarrollo del proyecto

Con el fin de optimizar el proceso constructivo del túnel y mejorar su seguridad, se decidió desarrollar una serie de modificaciones en el Proyecto Constructivo Original, en colaboración con la empresa *TÚNELES Y GEOMECAÍNICA S.L.*

En la ejecución de los túneles de *Puruchuco* confluyen factores geométricos, geotécnicos y de afección al entorno que es preciso tener muy presentes a la hora de optimizar el método de ejecución.

Entre los factores geométricos, destaca la gran sección de los túneles (en torno a los 120 m<sup>2</sup> de excavación) ya que debe albergar tres carriles por calzada y una amplia vereda peatonal. Como se ha comentado, los gálbos verticales interiores de los carriles de 5.5 m, obligaba al proyectista a diseñar una sección de túnel muy ancha y con un techo muy aplanado. La existencia de este techo plano implica

un riesgo claro de descompresión de la clave del túnel y que el hormigón quede sometido a importantes esfuerzos a tracción, por lo que el riesgo de fisuración de la clave es muy alto.

En segundo lugar, la cobertera de los túneles apenas alcanza los 8 m, existiendo tramos importantes del trazado, donde la cobertera no llega a los 4 m. Hay que tener en cuenta que en el Proyecto Original se han diseñado unos soportes que incluyen bulones de acero corrugado de 4,5 m de longitud. Esto implica que en una parte importante del trazado, los bulones instalados en el interior del túnel sobresaldrían de la superficie. Además, el macizo rocoso está muy descomprimido, con las diaclasas bastante abiertas. Este factor, junto a la eventualidad de que los bulones pudieran sobresalir en superficie, se conjuntan para hacer temer que el sistema de bulonado planteado sea ineficaz.

En efecto, la ejecución de los túneles implica que durante el tiempo que transcurre desde la excavación de un nuevo tramo de túnel, hasta el momento en el que se instalan los bulones, no hay ninguna fuerza de soporte que estabilice las cuñas y bloques de roca que gravitan en la clave del túnel. Únicamente el rozamiento existente entre los labios de las discontinuidades se opondría a la caída de estos bloques.

Ahora bien, esta fuerza de rozamiento es directamente proporcional a las tensiones horizontales a las que están sometidos los labios de las diaclasas. Si esta tensión horizontal es pequeña o incluso es negativa al ser de tracción, y por tanto no queda ninguna fuerza que se oponga a la caída del bloque. Se formarían sobre-excavaciones sistemáticas en clave que pueden progresar hasta superficie, durante la

## Excavación

excavación, sin haber dado siquiera tiempo a iniciar la instalación de los bulones.

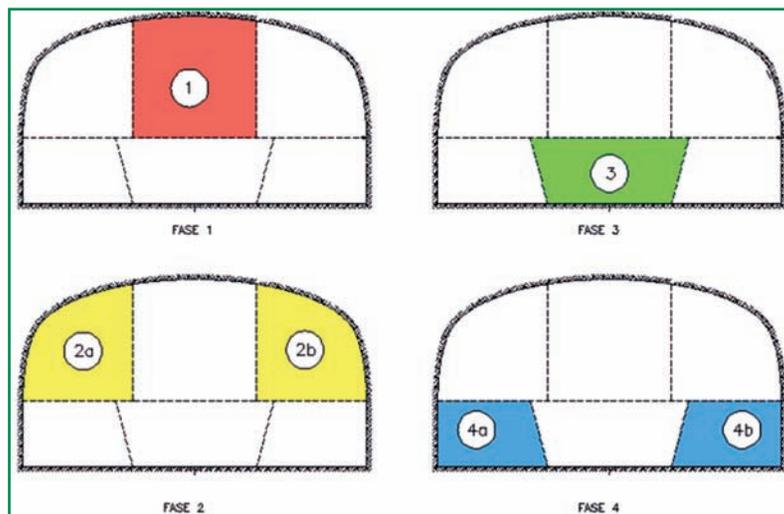
Los reconocimientos geotécnicos realizados hasta el momento, han detectado la presencia de una serie de fallas de rumbo paralelo a los ejes de los túneles. Seguramente, estas fallas precisarían la colocación de cerchas metálicas para evitar inestabilidades en los túneles. No obstante, con el método de ejecución que se describe en los Planos del Proyecto Original, la colocación de las cerchas reticulares se demora hasta la finalización de la excavación de los túneles, formando parte del revestimiento y no del soporte. Entre tanto, el perímetro de los túneles estaría únicamente soportado por los bulones y por 10 cm de *shotcrete*. Esto supone un alto riesgo, aconsejándose la instalación de las cerchas reticulares lo antes posible.

Otro factor a considerar es que en la superficie del túnel se localizan restos arqueológicos. Por esta razón, no es aconsejable utilizar un sostenimiento flexible, como el definido en el Proyecto Original, siendo aconsejable que el sostenimiento se instale cuanto antes y que además fuera lo más rígido que fuera posible para reducir al mínimo la deformación de la roca.

Como respuesta a esta problemática relacionada respecto a los sostenimientos del Proyecto Original, se plantea un desarrollo del mismo que empleando los mismos elementos de soporte considerados en el Proyecto Original, resuelve todos estos inconvenientes, y posibilita la ejecución del túnel con mayor rapidez y seguridad. Este desarrollo, se basa en:

- Ejecución previa de paraguas de micropilotes en la clave del túnel. Estos micropilotes estarán preparados para aplicar la técnica de la inyección mediante *tubo manguito*.
- Supresión de los bulones en bóveda, que son sustituidos por los micropilotes.
- Aplicación de bulones horizontales para reforzar el pilar central de separación entre ambos túneles.
- Adopción de un método de excavación con fases similares a las empleadas en el *Método Belga*.
- Colocación de las cerchas inmediatamente después de la excavación, en lugar de retrasar su aplicación a la fase final de revestimiento.

La primera medida, paraguas de *tubo manguito*, supone conjugar la técnica de presostenimiento de los paraguas de micropilotes con la inyección de tratamiento de diaclasas. De este modo, se cierran con cemento las fracturas que hubiera en el macizo rocoso, aumentando su resistencia. Por otro lado, las posibles cuñas o bloques de roca



[Figura 2].- Esquema de fases modificado para el túnel.

que aun así se pudieran formar en clave estarían sostenidas por los micropilotes de acero, antes de comenzar la excavación del túnel.

El cambio al método de ejecución Belga, no supone más que una modificación en el orden de ejecución de las fases del túnel, pero permite adelantar al máximo la colocación de las cerchas reticulares previstas que son las que dan rigidez al soporte, disminuyen el riesgo de inestabilidades al atravesar fallas y disminuyen las deformaciones del macizo rocoso (Fig. 2).

Los bulones en el pilar central de separación entre túneles, permitirán confinarlo, aumentando la estabilidad estructural de ambos túneles.

El proceso optimizado de aplicación del sostenimiento (Fig 3), es el siguiente:

- 1) Nada más concluir la excavación del pase, aplicación de una capa de 50 mm de *shotcrete* reforzado con fibra metálica, para sellado del terreno.
- 2) Colocación de la cercha reticular de acero con 1080 mm de separación entre ejes de cerchas.
- 3) Colocación de una capa de mallazo electrosoldado, tipo 8 x 100x100 mm, pegada a la capa de *shotcrete* de sellado.

4) Aplicación de una capa de *shotcrete* de 220 mm de espesor que cubriría totalmente la cercha.

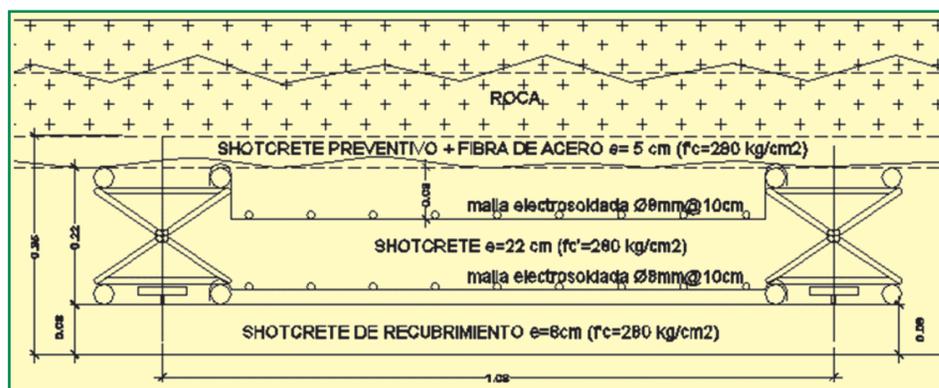
5) Colocación de la segunda capa de malla electrosoldada de  $\varnothing$  8 mm y 100x100 mm de retícula

6) Aplicación de bulones pasantes  $\varnothing$  25 mm en la zona de pilar entre ambos túneles, enroscados en ambos lados.

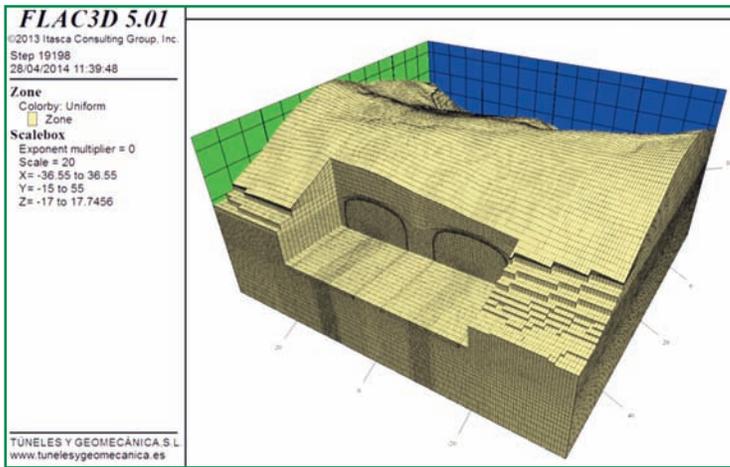
7) Aplicación de la última capa de *shotcrete* de 80 mm de espesor, una vez finalizada la ejecución del túnel.

8) Para obtener una terminación igualada, suave y pulida, esta última capa de *shotcrete* se fratasearía manualmente en la altura correspondiente a la vereda peatonal, para dar un mejor acabado al paramento.

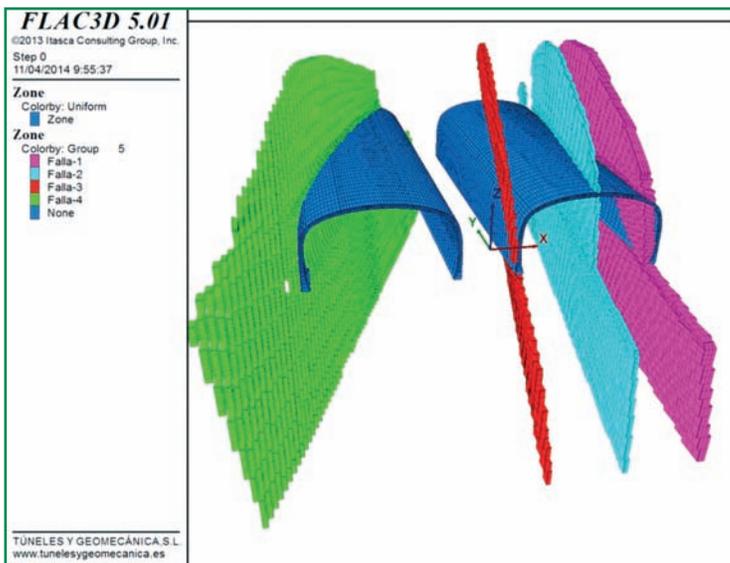
Para comprobar la idoneidad de las modificaciones propuestas en el método constructivo, se ha recurrido a la realización de cálculos de diferencias finitas que modelizan completamente el terreno del túnel, en tres dimensiones, incluyendo su superficie. Son modelos muy complejos, poco habituales en la práctica de la ingeniería de túneles, pero necesarios dada la complejidad del túnel. Estos modelos aportan la máxima fidelidad de cálculo posible con el actual estado del arte (Fig. 4).



[Figura 3].- Secuencia optimizada de colocación del sostenimiento



[Figura 4].- Modelo de diferencias finitas. Se modeliza completamente todo el terreno donde se ejecutará el túnel.



[Figura 5].- Modelo de elementos finitos de las cuatro fallas interceptadas por los túneles.

Los modelos realizados, simulaban también las fallas detectadas, en su ubicación real, tal como se muestra en el gráfico de la Fig. 5.

En la Tabla III se resumen los parámetros introducidos en el modelo para cada uno de los litotipos simulados.

### Métodos y fases de ejecución

Con las modificaciones derivadas del desarrollo del proyecto, el proceso constructivo que se emplea es el expuesto en las Fig. 6.

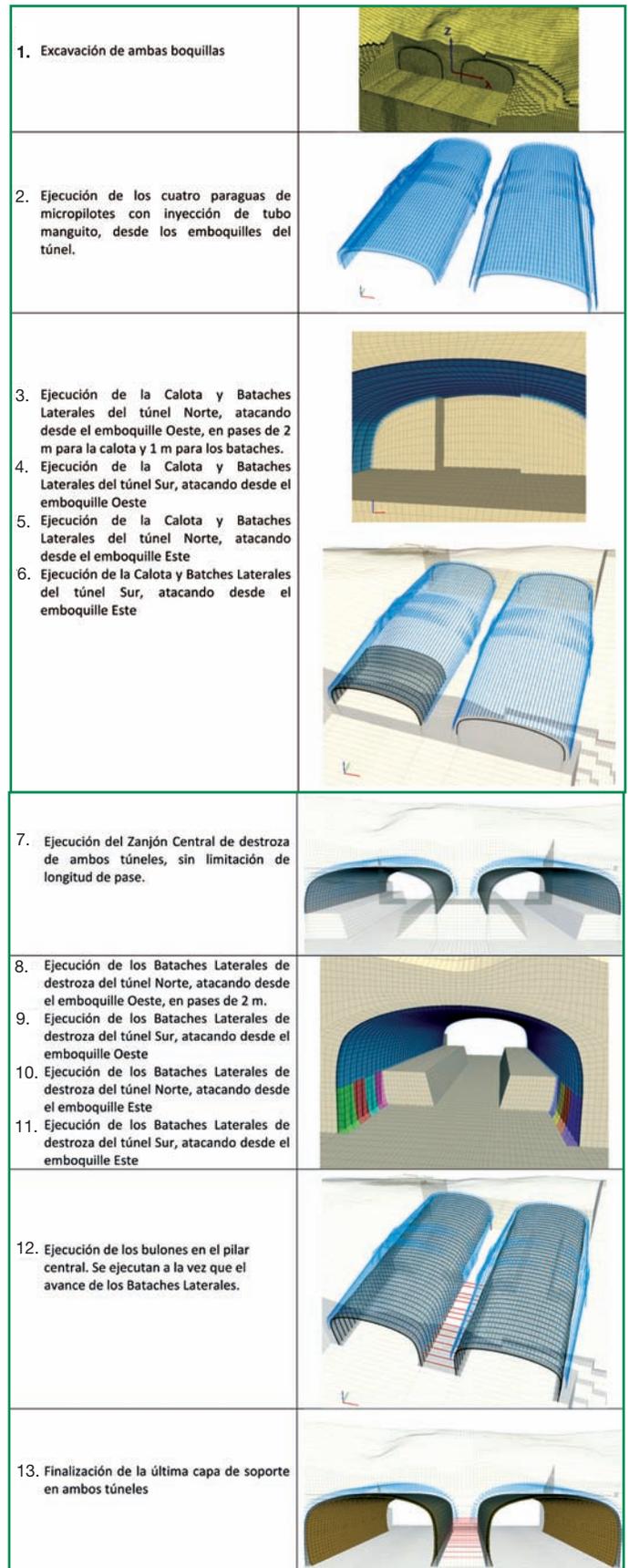
Para la ejecución de este túnel se dispone de la siguiente maquinaria en obra:

- Carro de perforación, que se encargará de perforar y colocar los micropilotes y los bulones horizontales del pilar central.
- Una retroexcavadora dotada de martillo demolidor.
- Una pala cargadora para desescombro, y

camiones dumperes para llevarlo a vertedero.

- Un equipo de proyección de shotcrete.

La excavación se realiza con retroexcavadora dotada de martillo demolidor. Para facilitar su trabajo, el carro perforador realiza perforaciones que se rellenan de cementos expansivos, de manera que se consigue realizar un cuele inicial, a partir del cual el martillo de la retroexcavadora puede trabajar con mayor facilidad.



[Fig. 6].- Proceso constructivo empleado.

Litotipo	GSI	Módulo de Young de macizo (MPa)	Coef. Poisson	Bulk (MPa)	Shear (MPa)	$m_b$	s	a	$\sigma_3^{cv}$ MPa
Diorita	50	3072	0.3	2560	1182	3.85658	0.00386592	0.505734	0
Roca Fracturada	30	814	0.3	678	313	1.88795	0.00041894	0.522344	0
Falla	20	457	0.3	381	176	1.32095	0.00013791	0.543721	0

[TABLA III].- Parámetros del modelo para cada uno de los litotipos simulados.

**PROACON, S.A.**  
 Bahía de Pollensa, 13  
 28042 Madrid  
 ☎: 917 721 700 • Fax: 917 732 120  
 E-mail: [info@proacon.es](mailto:info@proacon.es)  
 Web: [www.proacon.com](http://www.proacon.com)