

# El túnel de La Cabrera

## The Cabrera Tunnel

Revista de Obras Públicas  
nº 3.522. Año 158  
Junio 2011  
ISSN: 0034-8619  
ISSN electrónico: 1695-4408

**Raúl Miranda Miguel.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Jefe de Infraestructura. Línea de Alta Velocidad Este. Adif. Madrid (España). rop@ciccp.es  
**David Beltrán Martín.** Ingeniero de Minas  
Construcciones Sánchez Domínguez-SANDO, S.A. Madrid (España). rop@ciccp.es

**Resumen:** El túnel de La Cabrera, con una longitud de 7,2 km, es el más largo de la Línea de Alta Velocidad Este. Se describe la geología del macizo, los métodos constructivos de ejecución por métodos convencionales y tuneladora de doble escudo, el singular desmontaje en caverna de la máquina tuneladora y los excepcionales rendimientos obtenidos. A modo de conclusión, se señala que han influido de forma positiva todos los factores que interviene en la construcción de un túnel de estas características: correcta elección de la maquinaria, una buena planificación de la logística, un equipo humano con experiencia y un terreno de fácil perforabilidad y suficiente resistencia (1).

**Palabras Clave:** La Cabrera; Tuneladora; Alta Velocidad; Karst; Desmontaje; Caverna

**Abstract:** The 7.2 km long La Cabrera Tunnel is the longest tunnel on the Levante High-Speed Railway Line. The article describes the geology of the massif, the construction process using conventional methods and double shield TBM, the particular TBM dismantling cavern, the safety measures adopted and the exceptional performance obtained. The article concludes by referring to the positive influence of all the factors intervening in the construction of a tunnel of these characteristics: the correct choice of machinery; good logistical planning; an experienced workforce; and terrain suitable for boring and of sufficient strength (1).

**Keywords:** La Cabrera; TBM; High-Speed; Karst; Dismantlement; Cavern

### 1. Introducción

El tramo Siete Aguas – Buñol de la línea de Alta Velocidad Madrid-Castilla-La Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia pertenece íntegramente a la provincia de Valencia, y atraviesa los términos municipales de Siete Aguas (al oeste), y de Buñol (al este). El trazado discurre, descendiendo desde la denominada altiplanicie de Utiel – Requena, en su extremo oriental y dentro del término municipal de Siete Aguas, hacia la Hoya de Buñol, pasando por la abrupta Sierra de La Cabrera (2).

El túnel de La Cabrera, con una longitud de 7,2 km, es el más largo de la Línea de Alta Velocidad Este. Está compuesto por dos tubos de 8,75 m de diámetro interior y 53 m<sup>2</sup> de sección libre. Dispone de galerías de interconexión cada 400 m entre los dos tubos. Se ejecuta con distintos procedimientos según las

características geológicas del terreno y condicionantes externos.

Se excavaron 1.157 m con métodos convencionales por el lado oeste (lado Madrid) salvando las zonas de menor cobertura y de mayor dificultad geológica debido a la presencia de yesos y margas, la continua aparición de agua y la afección a una línea aérea de alta tensión de 400 kV situada sobre el tubo 2 (sur).

Por el lado este (lado Valencia) se excavaron 5.998 m mediante una tuneladora de doble escudo de 9,72 m de diámetro exterior, que ejecutó los dos tubos sucesivamente.

### 2. Geología del macizo

En general, en todo el tramo que atraviesa la Sierra de La Cabrera, las rocas son carbonatadas y de

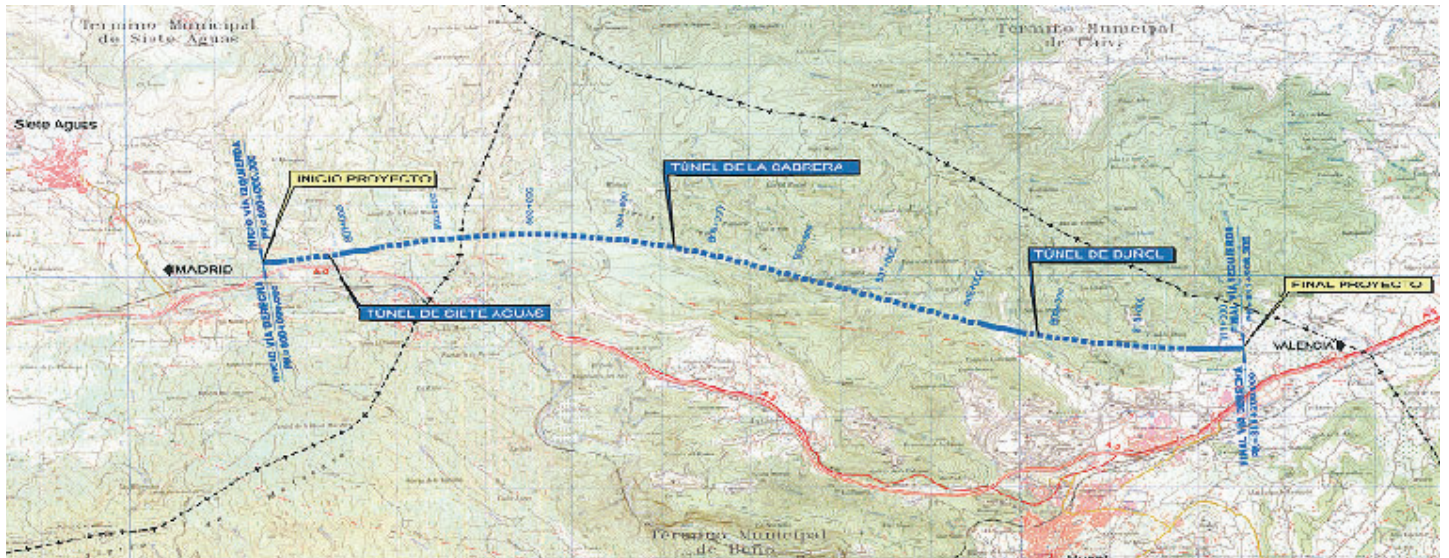


Fig. 1. Mapa de situación del Túnel de La Cabrera.

edad jurásica, estando formadas por dolomías y calizas, muy carstificadas en algunas zonas, en especial en la mitad más occidental. Estructuralmente, esta zona es la que presenta la mayor complejidad de todo el trazado debido a la presencia de cabalgamientos, así como varios sistemas de fallas. Esto, unido a la resistencia a la erosión del conjunto calcáreo, ha originado el abrupto relieve de la Sierra de La Cabrera, que a su vez es cortado por profundos barrancos y ramblas, como el Barranco de Moneri y la Rambla del Gallo.

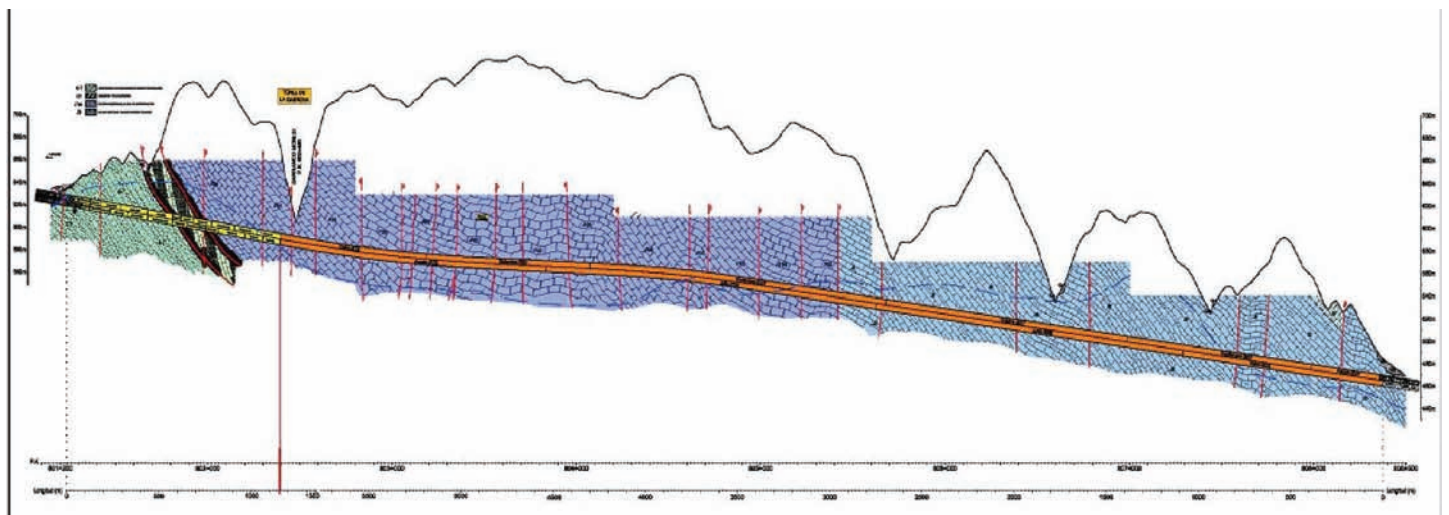
En el tramo de túnel ejecutado con métodos convencionales, la mayor parte fue Cretácico superior – Terciario (Paleógeno) C-T, algo de cretácico C1 y parte de  $J1(K)$  hasta el encuentro con la tuneladora próximo al Barranco de Moneri. El tramo ejecutado con

tuneladora atravesó dos tipos de litologías pertenecientes al Jurásico:  $J1(K)$  y  $J2$ .

**2.1. Formación C-T. Cretácico superior-Terciario (Paleógeno), con alternancia de conglomerados, margas y margocalizas**

Esta formación está constituida por una alternancia de conglomerados y microconglomerados cuarcíticos y calcáreos de tipo pudingas, con alguna intercalación margocaliza, de tonos rojizos, rosáceos, grises claros y blanquecinos, así como de margas y arcillas blanquecinas y rosadas respectivamente. El tamaño de grano de los cantos que forman los conglomerados suele ser de milimétrico a centimétrico, son de aspecto subredondeado a redondeado. La

Fig. 2. Perfil geológico longitudinal del Túnel de La Cabrera.



matriz es de naturaleza arcillo-limosa a limo-arenosa con cemento carbonatado. El conjunto se encuentra alterado con destacable presencia de agua por lo que es fácilmente excavable mediante medios mecánicos. Se ha detectado un nivel de arenas muy ricas en granos de cuarzo, posiblemente procedente de la disgregación de los conglomerados afectados por una falla.

## **2.2. Formación C1. Cretácico inferior, presentando arcillas margosas con yeso**

Esta formación está constituida por arcillas margosas abigarradas de colores variados rojo-verde-negro con presencia de yesos sacaroideos que se disponen irregularmente y de forma dispersa asociados a las arcillas verdes y negras, dentro del conjunto.

En la base de los bancos se observan intercalaciones lenticulares biconcavas de areniscas de color gris a gris claro y de granulometría positiva grosera con contenido en cantos dispersos de Cuarzo y Cuarzitas y de tamaño de milimétrico a centimétrico. El conjunto se encuentra alterado con destacable presencia de agua.

## **2.3. Formación J1 (k). Jurásico (Lías), dolomías oquerosas, calizas dolomíticas y calizas**

Estos depósitos están constituidos por diversos tipos de rocas carbonatadas que afectan prácticamente a toda la totalidad del túnel de La Cabrera. Las dolomías oquerosas y calizas dolomíticas son los materiales calcáreos más abundantes, junto a la formación J2, que se encuentra en la traza del túnel de La Cabrera.

La característica más importante que presentan estos materiales calcáreos es la abundante carstificación que presentan, que en algunos puntos suele ser bastante importante con la formación de cuevas. Es constante la presencia de alvéolos, oquedades y conductos de disolución que en muchas ocasiones están recubiertos y rellenos por cristales de calcita y dolomita bien recristalizada. En la gran mayoría de los casos, dichos huecos están rellenos por la típica arcilla roja de descalcificación, bastante plástica y que en ocasiones suelen presentar espesores de relativa importancia en función del tamaño del hueco relleno.

En ocasiones las oquedades que afectan a estos materiales calcáreos pueden aparecer aisladas entre

sí en un entorno de la roca o formar una densa red en cuyo caso la masa rocosa presenta una estructura caótica de bloques de dimensiones variables en una matriz de arcilla roja de descalcificación también variable.

## **2.4. Calizas micríticas y calizas margosas tableadas. Dogger. J2**

Esta formación se caracteriza, de forma general, por la presencia de calizas tableadas, muy bien estratificadas en bancos de 10 a 30 centímetros de espesor, de tonos grises. Es una serie rítmica en la que se han reconocido dos tipos de secuencias: una primera de calizas micríticas con juntas de estratificación milimétricas o finas intercalaciones centimétricas margolimosas y una segunda de alternancias regulares de bancos de calizas micríticas y de bancos de calizas arcillosas o de margocalizas limo - arenosas de aspecto laminado.

Se distingue una clara alternancia de calizas micríticas con niveles de margas de tonos grisáceos y negras, ricas en materia orgánica y muy bien estratificadas, con rellenos de arcilla plástica. No se han observado procesos de carstificación importantes. Las oquedades que presentan los niveles de calizas micríticas son milimétricas, y no hay presencia de arcilla roja de descalcificación. Tampoco se ha detectado la existencia de cuevas o cavidades que pudieron incidir de forma negativa en la ejecución del Túnel.

## **3. Ejecución por métodos convencionales**

Las condiciones del macizo por el lado oeste (lado Madrid) presentaban dificultad geológica para la excavación del túnel por la presencia de yesos y margas, la poca cobertera y la continua aparición de agua; además, el trazado del tubo 2 (sur) debía pasar bajo la torre de una línea aérea de alta tensión de 400 kV. Por ello, se decidió ejecutar la excavación desde el lado oeste utilizando métodos convencionales y avanzando en los dos tubos simultáneamente.

La excavación se realizó a sección completa y, debido a la alternancia de los materiales atravesados, se emplearon alternativamente medios mecánicos o bien perforación y voladura. Con este procedimiento se excavaron los primeros 1.157 metros del túnel.



Tabla 1.

TIPO APLICACIÓN	Y	SOSTENIMIENTO			
		Bulones Swellex Mn-24	Hormigón proyectado	Cerchas de acero	Otros
Tipo III RMR:41-60		Longitud de 4 m Malla 1,5 (T) x 1,5 (L) m	H-30 reforzado con fibra (500 J de energía) 15 cm de espesor.	Ninguna	Ninguna
Tipo 0-A (Emboquille)		Ninguno	H-30 reforzado con fibra (700 J de energía) 26 cm de espesor.	Cerchas HEB-160 a 1,20 m	1 capa de mallazo 150x150xØ6

### 3.1. Tipos de sostenimientos empleados

A partir de las formaciones consideradas en la fase de proyecto, se definieron seis tipos de sostenimientos distintos basándose en las teorías de Barton. Los sostenimientos finalmente empleados, partir de los datos geotécnicos obtenidos del levantamiento de los sucesivos frentes atacados, se redujeron a sólo dos tipos: el Tipo III (aplicado en 1.153 metros) y el Tipo 0-A (aplicado en 1.162 metros). Se resumen en la tabla 1.

El Tipo III fue el empleado en aquellos materiales que tuvieron un comportamiento de roca dura, como ocurrió a lo largo de toda la formación J1(k), compuesta por dolomías oquerosas y calizas dolomíticas, y también en algunos tramos de la formación denominada C-T en los que se hacía más patente una predominancia de las calizas.

El Tipo 0-A se utilizó en el resto del tramo, donde se encontraron gran diversidad de materiales: Margas y conglomerados con diferentes grados de disgregación, pertenecientes a la formación C-T; alternancias entre areniscas y arcillas abigarradas del Keuper incluidas en la formación C1.

#### 3.1.1. Sostenimiento Tipo 0-A

Dicho tipo de sostenimiento consiste en la colocación de Cerchas HEB-160 (con separaciones variables dependiendo del tipo de material atravesado, entre 1,20 m y, 1,5 ml en el mejor de los casos), entrelazadas por medio de tresillones de acero corrugado cada 0,60 m a lo largo del desarrollo de la cercha, mallazo de acero B-500-S de 150\*150 Ø6 y Hormigón Proyectado HP-30 con fibra de acero (espesor medio de 0,30 m) y sellado del frente de un espesor medio de 0,05 cm.

La duración del ciclo de excavación por medios mecánicos, en el caso del sostenimiento tipo 0-A, dependía del tipo de material que se estuviese atravesando, variando entre 10-12 horas para terrenos del tipo C-T y 16-18 horas para terrenos del tipo C1. La mayor parte del ciclo se empleaba en la etapa de picado del frente y desescombro, siendo necesarias unas 3-4 horas para las restantes etapas (saneo y estabilización el frente, colocación de cercha, gunitado del pase y acondicionamiento de la zona de trabajo).

Fig. 3. Sostenimiento Tipo 0-A. Montaje de cerchas y gunitado de frente.





Fig. 4. Perforación y carga de voladura a sección completa. Sostenimiento III.

### 3.1.2. Sostenimiento tipo III

Consiste en el bulonado del terreno excavado en malla de 1,5x1,5 m, con bulones tipo SWELLEX MN-24 de 4 m de longitud y hormigón proyectado HP-30 con fibra de acero (espesor medio de 0,15 m) y sellado de 0,05 m con hormigón proyectado del frente.

Para estas labores fue necesario el empleo de un Jumbo robotizado de última generación, con tres brazos de donde montaban martillos perforadores, con un alcance de 5,10 m. de perforación/barreno, con unos diámetros de perforación empleado de 42 mm para los barrenos de carga y de 102 mm para el barreno de cuele.

La duración del ciclo era de 12 horas desde que se comenzaba con la perforación y se concluía el desescombro; el ciclo se puede desglosar en: 3-3,5 horas para la perforación de un total de 121 taladros, 1-1,5 horas en la carga del explosivo (el explosivo venía encañado previamente), 0,15-0,3 horas para ventilación, 4-4,5 horas en el desescombro y el resto en el gunitado y acondicionamiento de la zona.

Las longitudes de pases reales fueron, para 3,00 m de perforación, un pase de 2,70-2,80 m de avance y para 4,50 m de perforación, el pase ejecutado fue de 4,20-4,30 m de avance.

### 3.2. Paraguas de micropilotes e inyección de microcemento

La escasa cobertera, por estar en las inmediaciones del emboquille en ladera suave, así como la presencia de una torre de alta tensión de 400 kV, motivó que se tuvieran que realizar un total de seis paraguas de micropilotes de 25 m de longitud en el tubo 1 y cinco en el tubo 2, (diámetro de perforación 150 mm; 24 tubos de acero ST-52,  $D_{ext}/D_{int}=101,6 / 81,6$  mm).

Para ejecutar las distintas perforaciones de cada tratamiento había que preparar una bancada y una rampa, para el posicionamiento y ejecución para la maquinaria de micropilotaje "Casa Grande", ya que perforaba a una altura máxima de 6 m y, en todo momento la altura de excavación a plena sección era superior a 9 m.

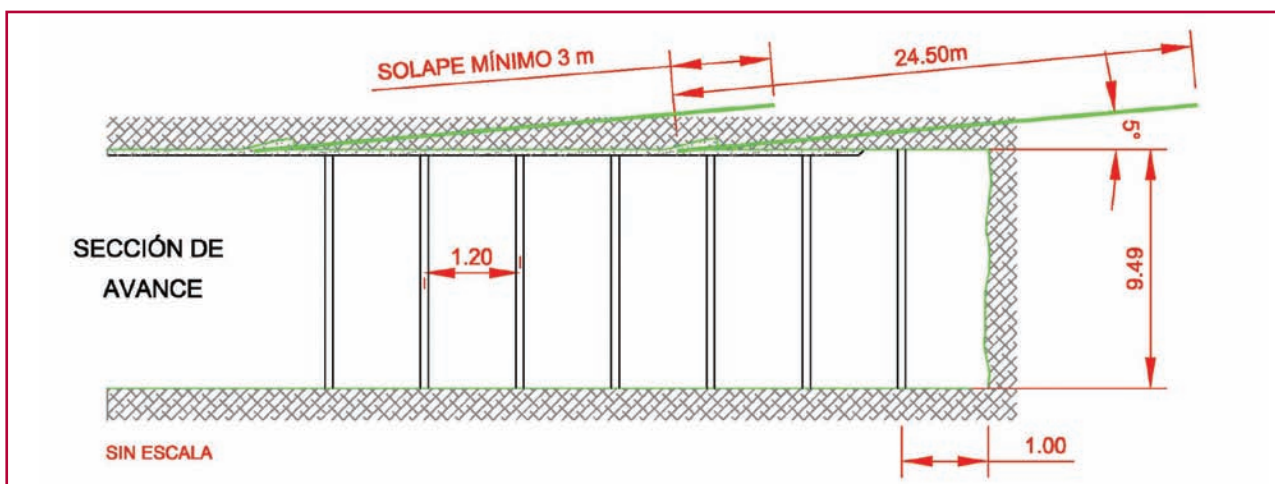


Fig. 5. Detalle de perforación de paraguas de micropilotes.



Al iniciarse la excavación en el quinto paraguas del tubo 2, situado por debajo de la torre de alta tensión, apareció un material de naturaleza arcillosa y arenosa, saturado en agua, por lo que el hormigón proyectado no era capaz de fijarse ni aguantar el frente. Inmediatamente, hubo que hacer un muro de contención con escollera para evitar el desprendimiento de éste.

Reducida la sección se preparó una rampa y se estabilizó el frente y techo con mallazo y hormigón proyectado. Debido a este problema se pensó en un tratamiento de consolidación de tubos micropilotes de PVC con manguitos, para la inyección de microcemento, lo que permitió una gran penetrabilidad, consolidación del macizo y agotamiento del agua. Realizado éste, se pasó por debajo de la torre de alta tensión sin ningún problema.

Las perforaciones eran de 25 m de longitud, en las cuales se introducían encamisados de PVC con

manguitos antiretorno cada 0,50 m; este tratamiento se realizó en dos fases, debido a la excesiva altura del túnel y las características de la máquina de micropilotaje, ejecutándose un total de 66 taldros.

#### **4. Ejecución con tuneladora de doble escudo**

Desde la boca este del Túnel de la Cabrera (boca lado Valencia), la excavación del tubo 1 se llevó a cabo con una tuneladora de doble escudo a lo largo de una longitud de 5.998 m hasta enlazar con el tramo excavado utilizando métodos convencionales desde la boca oeste (boca lado Madrid). En el punto de encuentro se ejecutó una caverna para el desmontaje de la tuneladora, para volver a ser montada de nuevo junto al emboquille lado Valencia y realizar la excavación del segundo tubo (3).



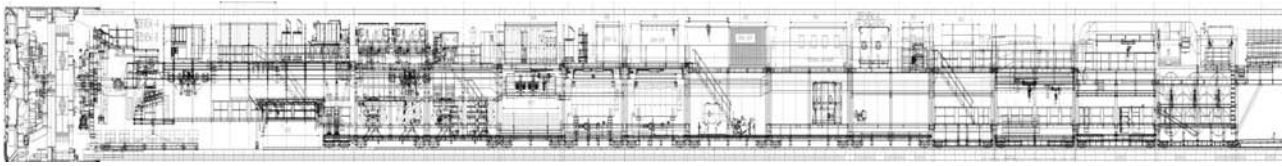


Fig. 6.  
Tuneladora  
doble escudo  
Herrenknecht S-  
373.

#### 4.1. descripción de la tuneladora

La máquina tuneladora de doble escudo tiene la particularidad de poder permitir la excavación y la colocación del revestimiento de dovelas de manera simultánea. La parte delantera de la Tuneladora (cabeza de corte y escudo) tiene forma cilíndrica, con una longitud de 16,20 metros. El diámetro de la Cabeza de Corte y, por ende, del túnel excavado es de 9,72 m.. El escudo, de 9,66 m. de diámetro, se subdivide en escudo frontal, que contiene el accionamiento o motorización, escudo telescópico, escudo gripper y escudo de cola. El peso total de este conjunto alcanza las 1.500 toneladas.

La Cabeza de Corte está dotada de 55 'Discos cortadores simples' y 4 'Discos cortadores dobles', fabricados con un anillo de rodadura contra el frente, de 17 pulgadas (aproximadamente 430 mm) de acero de alta resistencia al desgaste. El accionamiento de la Cabeza de Corte está formado por 14 motores eléctricos, refrigerados por agua, de 350 kW cada uno, lo cual suma un total de 4.900 kW sólo en la rotación de la Cabeza de Corte.

La cadena cinemática necesaria para dotar a la Cabeza de la TBM del giro necesario para la excavación es capaz de transmitir un par de trabajo de 20.030 kNm (2.045 mt) y un par de desbloqueo de 29.140 mkN (2.970 mt) y se compone de 14 equipos electrónicos de variación de frecuencia que regulan la velocidad de giro de los 14 motores eléctricos. La potencia generada por estos motores es transformada a su vez mediante 14 reductores. Estos reductores hacen girar 14 piñones de 17 dientes cada uno, que a su vez hacen girar la corona principal de 5,16 m de diámetro primitivo en cuya pista exterior lleva tallados 209 dientes proporcionando una velocidad de rotación en la Cabeza de Corte de hasta 6 r.p.m.

El sistema de empuje dota a la Tuneladora de una fuerza de empuje total de 8.500 toneladas (unos 85.000 kN).

El Back-up tiene una longitud total de 200 m, está formado por 13 'gantries' o carros, con un peso total de unas 1.200 toneladas.

- En el primer carro, situado el más próximo al Escudo, está ubicada la cabina del piloto. Además, aquí se dispone la instalación de accionamiento de la Cabeza de Corte (los 14 equipos variadores de frecuencia y dos transformadores 20kV/690V de 3.200 kVA) y la unidad oleohidráulica de accionamiento del sistema de empuje, gripper, erector de dovelas y demás sistemas de la máquina (depósito de 8.000 litros y conjunto de moto-bombas oleohidráulicas).
- En el carro 2 se ubican las instalaciones destinadas a la inyección de mortero en el trasdós.
- En carro 3 se montan los equipos de inyección química a la cámara de escombros (espumas y otros compuestos biodegradables destinados a refrigerar y reducir el desgaste de las herramientas de corte, y a eliminar el polvo producido por al excavación). También se monta la centralita hidráulica para el filtrado y refrigeración del aceite de la motorización de la Cabeza de Corte.
- En el cuarto carro se ubica el contenedor con la aparamenta eléctrica de baja tensión que alimenta a los equipos instalados en el Back-up. En el piso inferior se almacenan los carriles que se irán montando a medida que avance la tuneladora.
- En el carro 5 se encuentra el transformador 20kV/400V de 2.000 kVA destinado a dar servicio al contenedor mencionado anteriormente. También se instala en este carro la cabina de primeros auxilios.
- En el sexto carro se encuentra el taller mecánico y el aseo.
- A continuación, en el séptimo carro, se dispone el taller eléctrico.
- En el carro 8 se ubica el comedor para el personal de la tuneladora, así como uno de los dos depósitos de agua necesarios para la refrigeración de la máquina.
- En el carro 9 se encuentra el segundo depósito de agua, el equipo de motobombas para el bombeo y circulación de la misma, y la oficina del ingeniero de turno.
- El carro 10 se destina a la ampliación de la cinta del túnel en el lateral izquierdo. Además, aquí se

encuentra una de las dos cámaras de emergencia de que dispone la tuneladora.

- En el carro 11 se ubica el otro contenedor de emergencia, ambos con capacidad para 12 personas, dotada de resistencia a altas temperaturas, y 24 horas de completa autonomía. En el lado izquierdo del piso inferior se encuentra la zona de almacenamiento y montaje de tubería que conforma el circuito de entrada y salida de agua que abastece a la tuneladora del agua de refrigeración.
- En el carro 12 se dispone el equipo electrógeno de emergencia, de 250 kVA.
- Por último, en el carro 13, se encuentra la zona de prolongación de tubería de ventilación.
- Por detrás del Back-up, y arrastrado por el mismo, se encuentra la rampa de acceso o 'cambio californiano', cuya función es la de permitir a los trenes de suministro el acceso al Back-up.

#### 4.2. Diseño, fabricación y montaje de la TBM

En el diseño de la TBM S-373-Unax, fabricada por Herrenknecht AG, se implementaron una serie de mejoras basadas en la experiencia de obras anteriores y la experiencia personal de técnicos:

- 1) Aperturas en el escudo telescópico interior tanto en la parte superior como inferior con el objetivo de permitir la fuga del terreno comprimido durante el proceso del regripping y de absorber las convergencias del terreno.
- 2) Una unidad de procesamiento de espumas para el acondicionamiento del terreno.
- 3) Un equipo de perforación situado detrás del erector para el contenimiento del terreno.
- 4) Plataformas desplazables entre el remolque 1 y el escudo para inyectar mortero entre el cuarto y quinto anillo.
- 5) Control del material excavado con ayuda de dos básculas y un detector de metales.
- 6) Un sistema de predicción geotécnica.

Los montajes de la TBM se dividieron en dos actividades principales y duró tres meses: el montaje del back-up y el montaje de los escudos y cabeza de corte.

El montaje del back-up se realizó de forma independiente, y cerca del viaducto de la Rambla del Gallo, y consistió en el montaje y conexión de todos y cada uno de los carros antes descritos.

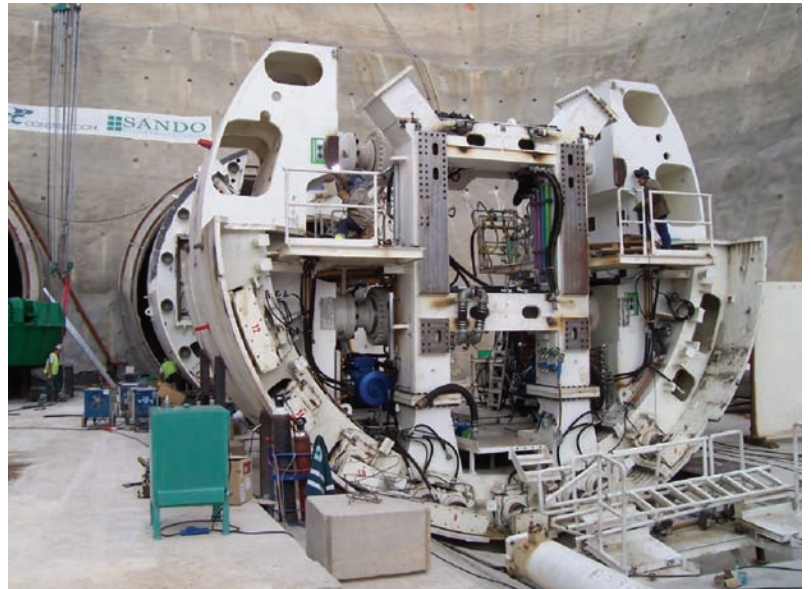


Fig. 7. Montaje de los escudos y cabeza de corte.

El acopio y desplazamiento de las piezas se realizó con una grúa telescópica de 700 t, junto con orejetas soldadas en los puntos necesarios, grilletes y eslingas de acero.

Para el montaje de los escudos fue necesaria la fabricación de una cuna donde se comenzaron a montar los distintos escudos. El proceso de montaje del escudo con todos sus elementos (motorización, zapatas gripper, cilindros de propulsión principales y auxiliares, etcétera) se dividió en dos partes: en la zona más alejada al emboquille dentro de la cuna se montaron escudo gripper, escudo telescópico interior y escudo de cola, y en la zona más cercana la emboquille, se montaron escudo telescópico exterior y escudo frontal.

Una vez montado ambas zonas por separado, comenzó el ripado o desplazamiento de una zona, hasta la unión de ambas partes. Posteriormente se montó la cabeza de corte con la ayuda de una grúa de cadenas, al igual que para el montaje de la motorización. Finalmente y una vez montado el escudo se procedió a la unión del escudo con el back-up y la realización de las pruebas de arranque que terminan a finales de julio de 2007.

#### 4.3. Parámetros de control en el ciclo productivo de la TBM

##### 4.3.1. Parámetros mecánicos de la TBM

Durante la excavación del túnel se realizó un proceso de control y seguimiento de los parámetros me-



cánicos de funcionamiento de la tuneladora: **Fuerza de empuje** (kN total y por sectores de cilindros hidráulicos), **velocidad de rotación de la cabeza de corte** (r.p.m.), **penetración** (mm/r.p.m.), **velocidad de avance** (mm/min), **fuerza de contacto** (kN), y **par de la cabeza de corte** (kNm)

La principal manera de actuar según el tipo de terreno encontrado fue: en terreno blando, baja velocidad y alto par y en terreno duro, alta velocidad y bajo par.

#### 4.3.2. Control del peso del material excavado

Para realizar un control preciso del peso del material excavado por la TBM se utilizaron dos básculas ubicadas en las cintas de extracción de escombros de la TBM. Dichas básculas fueron calibradas inicialmente y recalibradas periódicamente.

Fue fundamental controlar los pesos excavados durante los avances de la tuneladora, ya que el peso del material excavado fue notablemente inferior al previsto inicialmente durante casi toda la excavación del túnel en la zona del terreno J1(K) y especialmente cuando en el trazado de la tuneladora existían huecos vacíos de material (cuevas). Este tipo de terrenos fue conveniente atravesarlos lentamente (menos penetración), ya que la tuneladora podía desviarse sensiblemente del trazado del túnel.

#### 4.3.3. Control de inyección de mortero

La inyección de mortero en el trasdós del anillo tiene como objetivo evitar que las aguas subterráneas o el material excavado entren en interior del túnel. La inyección de mortero al trasdós de los anillos de dovelas se realizó mediante cuatro líneas de inyección (que salen de dos bombas de doble pistón), dos de ellas ubicadas en la parte inferior del escudo de cola, cuyo objetivo es el de proporcionar una cantidad suficiente de mortero en la parte inferior del anillo para que cuando el anillo "salga" del escudo de cola no caiga contra el terreno sino que quede apoyado sobre el mortero que se ha inyectado.

Para rellenar el resto de hueco del trasdós (laterales y superior) se dispusieron las otras dos líneas de inyección de mortero que inyectaban a través de las dovelas, a unos 5 ó 6 anillos del último colocado, distancia prudencial para evitar que el mortero se cuele

hacia delante por los laterales del escudo de la TBM. Estas dos líneas fueron colocadas en la parte superior del anillo para que el mortero cayera por gravedad hacia los laterales y de esta forma rellenara todo el hueco.

Extraordinariamente, la tuneladora tenía habilitada una séptima línea de inyección, que llegaba hasta el remolque 11 del back-up, y que permitía rellenar el hueco que pudiera dejar algún movimiento inesperado del terreno posterior al paso de la cabeza de la TBM por ese lugar. Se utilizó en varias ocasiones, para comprobar el relleno de mortero en el trasdós, en las zonas con detección de karst.

### 4.4. Incidencias durante la excavación con tuneladora

#### 4.4.1. Parada por detección de gas metano

El domingo 9 de septiembre de 2007, la tuneladora se paró de forma automática al superar los umbrales de seguridad los sensores de metano que dispone la TBM.

La tuneladora disponía de sensores de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> distribuidos en toda su longitud y conectados con el PLC (autómata). Los sensores de gas metano medían el % de gas con respecto al límite inferior de explosividad (LIE), y estaban programados de la siguiente manera:

- Sonaba una primera alarma discontinua al 10 % LIE
- Segunda alarma sonora continua del 10 al 20% LIE
- Tercera alarma: parada automática, con desconexión parcial de la TBM, si se superaba el umbral programado en el PLC como límite, el 20% LIE.

La normativa minera marca que el túnel debe ser evacuado con una concentración del 2,5% de volumen de gas en el aire, lo que corresponde a un 50% LIE según las mediciones de los sensores de gas, pero la actividad en la tuneladora y la seguridad justificaba la fijación de un límite más restrictivo frente a la aparición de gas.

Una vez comprobada la causa de la parada, se informó de forma inmediata al Jefe de Equipo y Director Facultativo y se decidió evacuar el túnel y ventilarlo durante 8 horas. Pasado este tiempo de ventilación, y utilizando detectores de gas metano portátiles se comprobó la ausencia de este gas.



La parada atascó las líneas de inyección de mortero, quedando éste endurecido en los tanques y agitadores, lo que obligó a su desatascado, picado y limpieza. Este imprevisto provocó que la parada se prolongara durante un día y medio.

#### 4.4.2. Problemas en el avance por agua

La tuneladora, hasta llegar a la zona de los anillos 1300 al 1500 había pasado zonas húmedas o con agua sin notarlo durante la excavación, pero sí detectándose la presencia de agua a posteriori en el túnel.

Llegados a las zonas de los anillos 1348, 1353 y 1416 era muy difícil avanzar porque el abundante agua que salía del frente desplazaba el mortero de sujeción del anillo de revestimiento. Para solventar esta situación, se procedió a realizar un sellado completo o tapón en el cuarto anillo colocado, evitando que el agua pasase a los anillos del back-up y lavara el mortero de sujeción; la TBM avanzó lentamente en modo de simple escudo, para garantizar la estabilidad del revestimiento.

A partir del anillo 1500 no surgieron problemas de este tipo, lo que permitió que la TBM trabajara de forma continua en modo de doble escudo.

#### 4.4.3. Paso de la falla del Barranco de Moneri

Entre el p.k. 802+548 y el p.k. 802+453 aparecían dos fallas importantes, coincidentes con el Barranco de Moneri. Las características geotécnicas que presentaba el terreno en estos tramos eran de un RQD < 25%, Grado de meteorización: Tipo III, RMR < 20 y RMRTBM < 35. Inicialmente no estaba previsto atravesar esta zona con tuneladora, pero debido a los altos rendimientos obtenidos con la máquina, se decidió el avance para mejorar el plazo.

La TBM se detuvo 23 metros antes del punto de mínima cobertera (15 m), en el P.K. 802+530, correspondiente con el anillo 3658, hasta la evaluación de las características geotécnicas del terreno a perforar. Para ello, se realizó un taladro desde el interior de la tuneladora, con extracción de testigo de hasta 40 m en dirección longitudinal al avance de la máquina; además, se realizó un sondeo vertical desde la superficie del propio barranco.

Con estos dos sondeos, se comprobó la no existencia de cuevas y la no presencia de agua, obser-

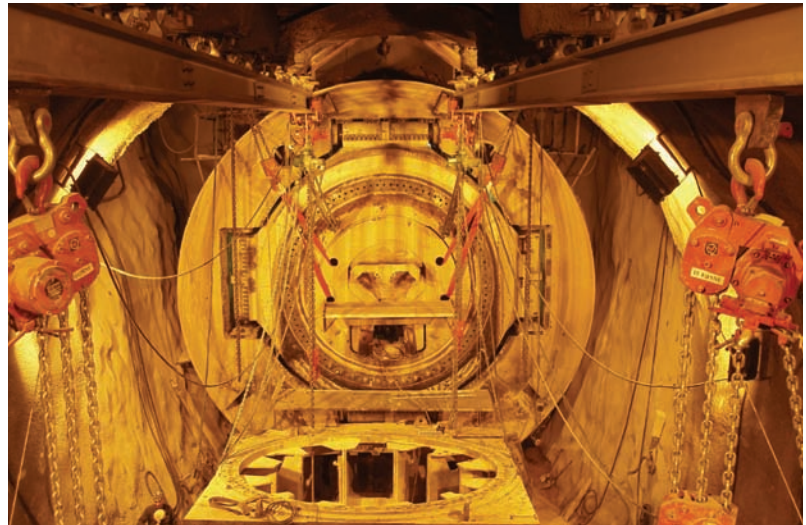


Fig. 8. Detalle de caverna, estructura metálica y colocación de polipastos.

vándose que el terreno sólo presentaba pequeñas oquedades por la erosión del agua. La tuneladora pasó la zona sin ningún contratiempo y en el modo de doble escudo.

### 4.5. Desmontaje en caverna

Los trabajos de desmontaje de la TBM en el interior del túnel comenzaron tras el cale del tubo 1, prolongándose tres meses, hasta completar el nuevo montaje de la TBM en el exterior.

Para la realización de los trabajos se dividió el personal en dos grupos, un equipo realizando el desmontaje del back-up, y el otro trabajando en la zona de los escudos.

Antes del desmontaje y traslado del backup, fue necesario desmontar la estructura de la cinta del túnel; a continuación se desmontó el erector y la cruz portante. Todos estos elementos fueron transportados sobre carriles, traccionando con dos locomotoras más tandem tirando en paralelo hasta la boca del inicio de la excavación.

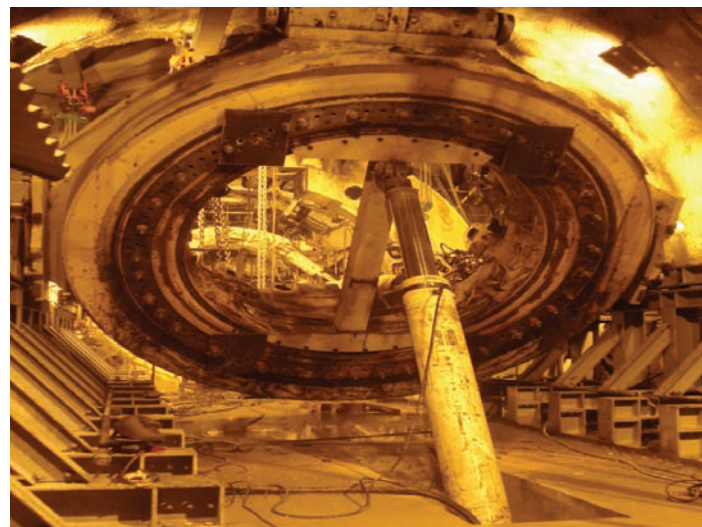
Para el desmontaje de los escudos fue necesaria la realización de una caverna con unas dimensiones superiores a la sección del túnel convencional, el montaje de estructuras metálicas ancladas al terreno y el montaje de polipastos neumáticos sobre dicha estructura.

#### 4.5.1. Desmontaje y extracción de la cabeza de corte

La maniobra de desmontaje de la cabeza de corte se subdivide en dos fases: (1) desmontaje de seg-







Izquierda, Fig. 9. Desmontaje del primer pétalo de la cabeza de corte. A la derecha, Fig. 10. Detalle de volteo del accionamiento principal.

mentos laterales I, II, III y IV, y (2) desmontaje de segmento central. El desmontaje de los segmentos laterales fue realizado mediante arrastre, tirando de la pieza a través de cáncamos roscados, eslingas y polipastos neumáticos para su elevación, rotación y carga en góndola.

Debido a la forma, dimensiones y peso del segmento central de la cabeza de corte, fue necesario diseñar para su desmontaje una estructura especial de "ripado" o avance, que junto al montaje de unos patines de carga, dos cilindros huecos y barras de Diwidac, permitieron el desplazamiento de la pieza de su posición inicial, para su posterior manipulación y carga sobre góndola, con la ayuda de cuatro polipastos neumáticos.

#### 4.5.2. Desmontaje y extracción del accionamiento principal

El accionamiento principal, también llamado motorización, con sus 220 t de peso y unas dimensio-

nes de 6,5 m de ancho y 7,7 m de largo, es la pieza más compleja en cuanto a desmontaje, manipulación, carga y transporte se refiere. Para su desmontaje se empleó un "sistema de ripado" similar al empleado durante el desmontaje del segmento central de la cabeza de corte, siendo necesario el montaje de un cilindro de desplazamiento auxiliar, posicionando la pieza en posición horizontal. Para la carga del accionamiento, sobre una góndola especial de 13 ejes, se utilizaron cilindros hidráulicos de gran tonelaje.

#### 4.5.3. Desmontaje y extracción de escudos

El desmontaje de los escudos frontales, escudo telescópicos exteriores e interiores, escudo de gripper y escudo de cola se realizó de forma similar, empleando los siguientes pasos: desmontaje del segmento superior, desmontaje de segmentos laterales y desmontaje de segmentos inferiores

### 4.6. Rendimientos de excavación con TBM de doble escudo

El túnel de La Cabrera ejecutado con tuneladora de doble escudo ha obtenido unos rendimientos espectaculares, estableciendo un máximo diario de 92,8 metros excavados y 58 anillos de hormigón colocados, récord mundial de avance con tuneladora de grandes dimensiones. En la tabla 2 se indican los máximos rendimientos diarios de avance conseguidos.

La tuneladora operó en modo de avance en doble escudo en un 95% del trayecto. El modo simple es-

Tabla 2.

	FECHA	LONGITUD EXCAVADA	ANILLOS COLOCADOS
TUBO 1	27/09/2007	65,6 m	41
	01/10/2007	67,2 m	42
	19/11/2007	72,0 m	45
	25/11/2007	80,0 m	50
	01/12/2007	83,2 m	52
TUBO 2	08/06/2008	89,6 m	56
	01/08/2008	92,8 m	58

cudo fue utilizado cuando las condiciones geológicas y geotécnicas empeoraban por la presencia de una falla, agua, oquedades en la paredes o por la presencia de un terreno con poca resistencia. En la ejecución del tubo 1, se utilizó en 338,65 m. por complicaciones en el terreno y en el tubo 2 sólo en 93,09 m. por la experiencia acumulada. Asimismo, la experiencia de los trabajadores en cada puesto de la tuneladora, propició una mejora de la producción con una disminución muy importante del tiempo total de paradas.

Las características del macizo rocoso también fueron idóneas para la utilización de esta TBM, pues no producía excesivo desgaste en los cortadores, con un consumo aproximado de 25 unidades por km. En casi la totalidad de los casos, el cambio de cortadores se debía al gripado de los mismos, provocado por la existencia de un material excesivamente blando, que

embozaba el hueco del cortador e impedía el giro del mismo.

Otros máximos obtenidos en la excavación del segundo tubo con la tuneladora de doble escudo fueron los siguientes: un avance de 48 metros en 12 horas, un avance de 462,4 metros en siete días y un máximo en los últimos 30 días de 1.864 metros.

## 5. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su felicitación a todos los trabajadores que han participado en esta obra, de las empresas contratistas, de la Asistencia Técnica y de ADIF y agradecer su colaboración en este artículo al Ingeniero Técnico Industrial, Pedro Rumín Padilla. ♦

### Referencias:

-(1) GESTOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS (GIF). *Proyecto de construcción de plataforma, nuevo acceso ferroviario de Levante*. Madrid-

*Castilla La Mancha-Comunidad Valenciana-región de Murcia*. Tramo: *Siete Aguas-Buñol*, 2004.

-(2) LÓPEZ JIMENO, Carlos; ALCOLEA, Eduardo. "El Túnel de La Cabrera. Tramo Siete Aguas-Buñol. Línea de Alta Velocidad Madrid-Levante". *INGEO*

*TÚNELES*. Vol. 16, capítulo 19. Madrid: E.T.S. Ingenieros de Minas, 2009. ISBN: 978-84-96140-30-1.

-(3) MÍGUEZ BAILO, Raúl. "Los túneles de Pajarés". *Revista de Obras Públicas (ROP)*, 2005, nº 3460, p.7-32.



