

# Aspectos constructivos de los túneles de la línea de alta velocidad ferroviaria Córdoba-Málaga (España) a su paso por el valle de Abdalajis

## Constructive aspects of the tunnels of the high speed rail line Córdoba-Málaga (Spain) in the valley of Abdalajis

Germán Martínez\*, M<sup>a</sup> Carmen Rubio\*, Javier Ordóñez\*, Javier Alegre\*

\*\* ETS de Ingenieros de Caminos, Universidad de Granada, Granada, ESPAÑA  
mcrubio@ugr.es

Fecha de recepción: 29/ 06/ 2004  
Fecha de aceptación: 21/ 03 2005

### Resumen

En la actualidad se encuentra en ejecución la Línea de Alta Velocidad Española (AVE), entre las poblaciones de Córdoba y Málaga. A lo largo de la traza aparecen obras singulares como son los Túneles del Valle de Abdalajis, que con una longitud aproximada de 8 Km., se están realizando mediante tuneladoras. Las dimensiones del escudo de ataque y algunos aspectos organizativos hacen interesante su detallado estudio. De igual modo, la aparición de metano en el avance está condicionando la planificación y evolución de los tajos. En el artículo se recogen estas circunstancias así como aspectos generales relacionados con los aspectos constructivos de la alta velocidad ferroviaria que permiten encuadrar el proyecto estudiado en un contexto internacional.

Palabras Clave: Procedimientos de construcción. túneles, líneas férreas, alta velocidad

### Abstract

The high speed rail which connects Córdoba city to Málaga city (both placed in the south of Spain) is currently under construction. Across the alignment important structures are being constructed, such as the eight-kilometer tunnels of the Valle of Abdalajis where a tunnelling machine is being utilized. At the beginning of the works, the machine used had reached an international record. The paper deals with the general aspects of construction procedures, and problems related to the execution stage of high speed railways, a fact that makes this project of international interest

Keywords: Construction procedures. high-speed, railway. tunnels

## 1. Introducción

El diseño de la primera línea de alta velocidad ferroviaria en España, Madrid-Sevilla (en España se han definido finalmente cinco corredores de alta velocidad ferroviaria, correspondientes a Corredor Norte-Noroeste, Norte-Nordeste, Corredor de Levante, Corredor Andaluza y Corredor Extremadura, confirmado la estructura radial principal de las grandes infraestructuras del país), responde a dos hechos perfectamente definidos y que son: la celebración en esta última ciudad de la Exposición Universal de 1992 y la saturación de la línea de comunicación principal del país del centro al sur del estado, paso de Despeñaperros. Esta circunstancia supuso un reto técnico organizativo que se tradujo finalmente en un record mundial de rapidez en construcción de una línea ferroviaria de alta velocidad (solo cuatro años y medio para la totalidad del recorrido).

Esta circunstancia, junto al aumento de la cuota

de mercado desde el 13% al 41% en la actualidad (López-Pita et al., 2003), ha ido a corroborar el acierto e idoneidad del diseño ferroviario para distancias que encajan perfectamente en la geografía española, imponiéndose el TAV frente a otros modos de transporte como es el avión (López Pita, 2001).

Todo ello ya había sido recogido con anterioridad es los estudios que, sobre idoneidad de los distintos sistemas de transportes se redactaron en el marco de la Comunidad Europea y que se sintetizaron en el Libro Blanco del Transporte (Comisión Europea, 2001).

Como razón de continuidad de la citada línea se plateaba en la planificación ferroviaria española la ejecución de la línea Córdoba-Málaga, consiguiendo con ello reducir el tiempo de viaje entre la capital y la costa sur de España a menos de dos horas y treinta minutos.

La velocidad comercial adoptada para la

solución definitiva se centra en los 250-300 Kilómetros/h (López-Pita, 1999), entendiéndose que con ello se conseguían los objetivos de tiempo de recorrido y se evitaban a la vez los problemas derivados del consumo energético, el cual puede aumentar más de un 40% pasando de velocidades de 300 Kilómetros/h a 350 Kilómetros/h, así como el aumento de ruido y vibraciones, disminuyendo el concepto de transporte de calidad, uno de los aspectos o elementos de venta de la alta velocidad ferroviaria. Francia ha sido el país que más ha colaborado en el desarrollo tecnológico de los trenes de alta velocidad, desde el inicio hasta nuestros días (es obligado apuntar que Francia ha sido un referente a nivel europeo en la alta velocidad ferroviaria, estableciendo en 1955 un record de velocidad de 331 Kilómetros/h que no fue superado hasta veinticinco años más tarde por otro tren francés) (Delfosse, 1991).

La viabilidad técnica, económica y social del citado tramo de alta velocidad ha sido analizada en multitud de foros y documentos siendo interesantes los resultados del estudio realizado por la fundación Ciedes (Fundación Ciedes, 2000). Estos aseguran que los beneficios derivados de la puesta en servicio del Córdoba – Málaga corresponderían a un 51.4 en concepto de ingresos por tráfico, un 32.0% por ahorro de costes de transporte, un 8.2% en ahorro de tiempo y otros relativos a la disminución de la siniestralidad y de la congestión de tráfico.

Estos datos no se distancian en absoluto de los resultados reales que se han producido en ciudades localizadas en el corredor de alta velocidad como es el caso de Ciudad Real (Ureña, 2002). En este último caso se ha producido un crecimiento sostenido de la población censada superior al 1.5%, muy por encima de los valores medios del entorno inmediato que quedan al margen de los efectos del corredor ferroviario.

No obstante es importante señalar el coste relativo de construcción en España de este tipo de infraestructuras, consecuencia directa de la orografía del país (El relieve del suelo español ofrece una gran diversidad y una notable altitud media, sólo superada por la de Suiza, siendo Madrid la capital más alta de Europa. La meseta central, que ocupa el 55% del territorio, oscila entre los 400 y los 1000 metros, con una elevación media de 660 metros. Además, la presencia de importantes cadenas montañosas hace que el 18% del suelo esté por encima de los 1000 metros y el 1% a más de 2000. Esta diversidad orográfica condicionó desde un comienzo la estructura de la red ferroviaria nacional. El peculiar ancho

de vía nacional no fue elegido por razones de índole estratégico, a fin de impedir invasiones, sino de carácter técnico. Este ancho, según los ingenieros, permitía el usos de locomotoras de mayor potencia que eran las que requerían los tendidos y la orografía nacional), especialmente en la zona sur en la cual se enmarca el corredor objeto de la presente publicación).

No cabe la menor duda que el diseño de redes alta velocidad presentan características en cada país que las hace singulares y por tanto interesantes de estudiar. Este es el caso de las líneas alta velocidad japonesas, las cuales disponen, dadas las exigentes condiciones meteorológicas del norte del país de un sistema de eliminación de nieve mediante chorro de agua caliente. Igualmente, y dada la alta sismicidad de Japón, todas las líneas de alta velocidad están conectadas a una red de sismógrafos situados a una distancia de 40 a 100 Kilómetros. de las líneas, de tal forma que permiten detectar el avance de una onda sísmica y reducir de forma automática la velocidad.

Otro de los aspectos que caracteriza una línea de alta velocidad ferroviaria, consecuencia de las exigencias del trazado geométrico (tanto en planta como en perfil), es la construcción de grandes longitudes en túnel. Ello obliga a tener en consideración las condiciones de obras subterráneas, que en España han quedado condensadas en la Instrucción de Obras Subterráneas IOS-98 (Ministerio de Fomento, 1998).

En España se han realizado muchos kilómetros de infraestructuras en túneles, siendo en algunos aspectos pioneros a nivel mundial en el desarrollo de procedimientos constructivos que han permitido alcanzar record mundiales en producción, como ha sido el caso de las ampliaciones del metro de Madrid (Comunidad de Madrid, 2003). Los rendimientos medios por día de calendario han sido de 10.4 metros, Línea 4, 10.2 metros, Línea 7 tramo Arroyofresno - Valdezarza, 8.1 metros Línea 9 y 8.1 metros, Línea 7 tramo Valdezarza – Islas Filipinas.

Pese a la disposición de sofisticados sistemas y controles de seguridad, que naturalmente obligan a una velocidad de excavación lenta y controlada como se ha llevado, los avances obtenidos suponen para las tres obras citadas unos record mundiales.

A lo largo del presenta artículo se presentan las singularidades constructivas de los tramos construidos en túnel, y en particular aquellas relativas a los denominados Túneles de Abdalajis, construidos mediante túnel adoras (tipo TBM doble escudo).

## 2. Caracterización de la línea Ave Córdoba-Málaga

### 2.1 Descripción de los tramos

La línea de alta velocidad Córdoba-Málaga, que se inscribe dentro del corredor de Andalucía, tiene unos 155 kilómetros de longitud y supone una inversión de más de 1.300 millones de euros.

La infraestructura comienza a 14 kilómetros de la capital cordobesa, en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla, concretamente en Almodóvar del Río. En este punto se inicia el primero de los tramos, de 6,3 kilómetros, que llega hasta Guadalcazar y cuenta con un viaducto de 860 metros sobre el río Guadalquivir y dos estructuras más que permiten la conexión con el AVE sevillano.

El tramo Guadalcazar-Fuente Palmera tiene 8,4 kilómetros y cuenta con dos viaductos de longitudes 471 y 381 metros respectivamente, y sendos túneles de pequeña longitud. Otros 21,5 kilómetros constituyen el recorrido Fuente Palmera-Santa ella y 12,8 más el Santa ella-Puente Genil, este último con dos viaductos sobre el Arroyo del Salado y el Río Cabra, con longitudes de 923 y 415 metros, respectivamente.

Superados los dos siguientes tramos (Puente Genio-Herrera, 10,1 kilómetros, con dos viaductos de un total de 1.758 metros; y Herrera-La Roda de Andalucía, 16,6 kilómetros, que incluye la construcción de un viaducto sobre el río Yeguas de 288 metros y la infraestructura para la estación de Puente Genil), se llega a la provincia de Málaga.

Esta transición se logra a través del trayecto La Roda de Andalucía-Fuente de Piedra (13,2 kilómetros), al que sigue Fuente de Piedra-Antequera (8,4 kilómetros de longitud, con un túnel de 380 metros) y concluye con el tramo Antequera-Bobadilla, cuyos 26 kilómetros discurren íntegramente en la provincia de Málaga.

Tras recorrerse 7,6 kilómetros más desde la estación de Bobadilla, y superando el túnel de Gobantes, de 1,7 kilómetros, se encuentra la obra más representativa de la línea: el túnel de Abdalajís. En realidad se trata de dos galerías gemelas (el este y la oeste) para vía única, y que cuentan con conexiones transversales de seguridad cada 350-400 metros. La sección tipo de los tubos tiene un diámetro interior final de 8,80 metros.

Hasta Málaga, los algo más de 35 kilómetros restantes se distribuyen en seis tramos más: Túnel de Abdalajís-Álora, Álora-Cártama, Cártama-Los Remedios, Los Remedios-Los Prados, Los Prados-Arroyo de las Cañas y Arroyo de las Cañas-Málaga.

### 2.2 Túneles ferroviarios presentes

Dentro de los tramos anteriormente enumerados, destacan aquellos que incluyen la construcción de túneles

ferroviarios. De éstos, los más representativos son los situados entre las localidades de Antequera y Cártama, y que son los siguientes:

- Túnel de Gobantes.
- Túneles de Abdalajís.
- Túneles de Álora y el Espartal.
- Túneles de Tevilla y Gibralmora.
- Túnel de Cártama.

No obstante, por la singularidad de los mismos serán los correspondientes al Valle de Abdalajís los que sean tratados con un mayor detalle

## 3. Túneles de Abdalajís

### 3.1 Características generales

El tramo Gobantes-Salida del túnel de Abdalajís de la Línea Ferroviaria de Alta Velocidad entre Córdoba y Málaga se desarrolla a lo largo de 8.970 metros entre el P.K. 800+000 y el P.K. 808+970. De esa longitud, unos 7.300 metros transcurren en túnel atravesando la Sierra de Abdalajís, y tan solo 1.670 metros a cielo abierto (920 metros en la boca Norte y 750 metros en la boca Sur).

El tramo comienza junto al apeadero de Gobantes, perteneciente al tramo anterior, de la línea ferroviaria Bobadilla-Málaga, y cruza el Arroyo de Los Higuerones y la carretera o pista que va desde el Cortijo del Granadino a la cola del embalse del Guadalhorce mediante un viaducto de 124 metros de longitud, tras el cual el trazado atraviesa en trinchera una loma llegando a alcanzar el desmonte un máximo de 40 metros de altura.

A pesar de la altura de esta trinchera, su situación intermedia entre los túneles de Gobantes, perteneciente al tramo anterior, y de Abdalajís, interfiriendo con las zonas de auxilio para emergencias previstas junto a las bocas de estos, ha desaconsejado la adopción de una solución en falso túnel. Para minimizar el impacto ambiental de la trinchera se ha diseñado con unos taludes suficientemente tendidos, que permiten fácilmente la integración en el medio.

A continuación, y justo antes de entrar en los túneles, se configura mediante relleno una amplia explanada, de 220 metros de longitud por 150 metros de anchura. Su cometido es el de servir de zona de auxilio en caso de emergencia, así como para ubicar todos aquellos elementos e instalaciones auxiliares necesarias durante la explotación de la línea.

El entre-eje de vía es variable en todo este tramo, comenzando con 4,76 metros y aumentado paulatinamente hasta 20 metros en la boca de los túneles.

La configuración básica utilizada para atravesar la Sierra de Abdalajís es la de dos túneles gemelos de vía única, separados por una distancia entre ejes variables entre 19,6 metros en la boca Norte y un máximo cercano a los 50 metros. Estos dos túneles están comunicados entre sí mediante galerías de conexión separadas entre 350 metros y 400 metros con el fin de garantizar la evacuación de un túnel a través del otro, caso de presentarse tal necesidad.

La sección tipo de cada uno de los túneles de vía única es circular y de diámetro interior 8,80 metros en su zona central correspondiente a un espesor de dovelas de 0,45 metros. Se han dispuesto dos pasillos laterales de 1,68 metros de anchura, bajo los cuales discurren alojadas en conductos embebidos las diferentes instalaciones propias del túnel y las ferroviarias. La vía se asienta mediante traviesas de hormigón sobre una banqueta de balasto de 40 cm. de espesor bajo traviesa. Véase figura 1 en donde se observa la sección del túnel excavado.

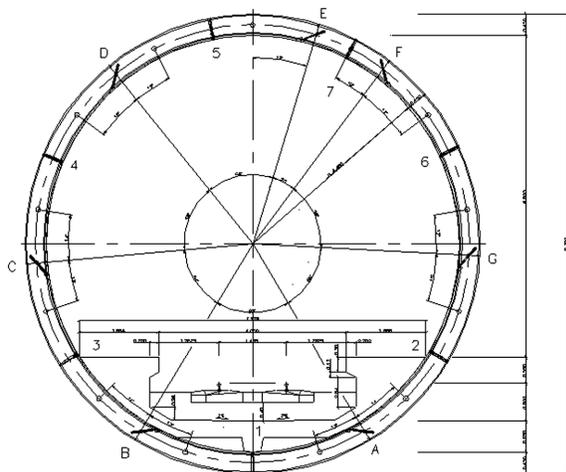


Figura 1. Sección tipo del túnel del Valle de Abdalajís. Fuente: Autor

La superficie libre aerodinámica es de aproximadamente 53 m<sup>2</sup>.

En cuanto al método constructivo, los dos túneles han sido proyectados para ser ejecutados mediante sendas máquinas túneladoras (TBM) atacando ambas desde el Sur en contrapendiente.

En la boca Sur se ha definido también una amplia explanada, que será utilizada durante el transcurso de las obras como ubicación de todas las instalaciones

necesarias para la construcción de los túneles (acopio de material, edificios para oficinas, etc.). Una vez finalizadas las obras se adecuará esta explanada de forma que pueda ser utilizada también para casos de emergencia y como ubicación de instalaciones complementarias del túnel, de forma análoga a lo dispuesto en la boca Norte.

Por último, y dado que la obra del tramo es muy excedentaria en tierras (en torno a dos millones de m<sup>3</sup> de tierras deberán llevarse a vertedero), se ha proyectado un gran vertedero junto a la boca Sur de los túneles con capacidad suficiente para alojar todo el volumen sobrante.

Para la ejecución se emplearán dos TBM de Doble Escudo idénticas, con un revestimiento de dovelas prefabricadas. La utilización de túneladoras en las grandes obras de ingeniería, cuenta ya con más de un siglo y medio de antigüedad, si bien las superficies de ataque, la instrumentación técnica y los rendimientos esperables han sufrido las lógicas transformaciones con el paso de los años. En este sentido es muy interesante conocer la evolución histórica de las TBMs, que a modo de resumen se adjuntan en la Tabla N<sup>o</sup>1

Tabla 1. Breve Resumen histórico de las TBMs. (Mendaña y Arnaiz, 2001)

Fecha de Aparición	Tipo de Máquina	Años desde origen (1818)
1818	Máquina de Brunel	0
1869	Máquina de Greathead	50
1875	Presurización integral	57
1962-1967	Anillos de Hormigón	145
1964-1984	Primeros Hidroescudos	155
1979-1989	Primeras EPBMs	170
1990-1999	TBMs Tipo Mixto	180

La justificación de la utilización de este tipo de maquinaria se debe principalmente a dos aspectos que han sido prioritarios en la planificación y desarrollo de esta obra: plazos de ejecución y seguridad y salud en el desarrollo de los trabajos subterráneos.

Las principales características de trabajo son un diámetro interior del revestimiento de 8,80 metros y un diámetro de excavación de 10,00 metros, considerando un espesor del revestimiento de 45 cm.

El revestimiento consiste en un sistema de anillo universal, con dovelas cónicas y clave trapezoidal (anillo cónico). La dovela de base es idéntica en todos los anillos, y tiene una canaleta para drenaje y una solera horizontal para fijar los carriles. El anillo universal es simétrico respecto al eje vertical, de forma que la dovela de clave (7 ó 10) se colocará a la derecha o a la izquierda de la clave del túnel.

### 3.2 Planificación de la Obra

Las obras de los túneles de Abdalajís comenzaron con la preparación de la explanada del emboquille sur, desde la cual se atacan ambos túneles, y que albergan todas las instalaciones necesarias para la construcción de los mismos, como son talleres, playas de vías, acopios de dovelas, sistemas de cintas transportadoras de escombros, etc. Para ello fue necesario ejecutar el encauzamiento del Arroyo del Quinto, una amplia explanada, la ejecución de una pantalla de pilotes para el emboquille de ambos túneles y la reposición de varios caminos de servicio, incluyendo la construcción de un paso superior sobre la traza de la línea de alta velocidad. También fue necesaria la ejecución de 10 kilómetros de carreteras para el transporte tanto de las piezas de las tuneladoras como de las dovelas prefabricadas, y de una captación de agua del río Guadalhorce y una impulsión de 2 kilómetros hasta un depósito situado sobre los emboquilles. El suministro de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de las TBM hizo necesaria la construcción de una nueva línea de transporte a 66 kV desde la línea Paredones-Nuevo Chorro a la obra, la consolidación de un tramo de dicha línea y la construcción de una subestación transformadora de 66-20 kV a pie de obra, con dos posiciones de salida independientes, una para cada túnel.

Paralelamente, a la ejecución de la explanada de la boca Sur, dieron comienzo los trabajos en el emboquille Norte, consistentes en el encauzamiento del Arroyo del Salado, una explanada para el desmontaje de las TBM, un viaducto sobre el Arroyo Fresnillo (124 metros de longitud en cuatro vanos de 25, 37, 37 y 25 metros) y la reposición de varios caminos de servicio, incluyendo un paso superior sobre el tronco de la línea de alta velocidad.

Como obras complementarias, se han realizado una serie de sondeos y vertederos para el control de la unidad hidrogeológica atravesada por ambos túneles, y una campaña complementaria de sondeos de caracterización geotécnica.

### 3.2 Procedimientos de construcción y maquinaria

Para la construcción de los túneles de Abdalajís se ha decidido el empleo de dos máquinas tuneladoras tipo doble escudo, las cuales realizan las funciones de:

- Excavación.
- Revestimiento de dovelas prefabricadas.
- Protección de la zona de trabajo en el frente de excavación.

La principal ventaja de la TBM doble escudo (Askilrud et al., 1997) frente a los escudos sencillos es que el doble escudo es capaz de simultanear la excavación y el montaje, ya que la reacción necesaria para ejecutar el avance la obtiene mediante la presión que ejercen los grippers sobre los hastiales del terreno, en lugar de apoyarse en las dovelas ya colocadas, con lo que reduce la duración del ciclo de excavación. El guiado del escudo se realiza utilizando el sistema ZED, combinado con un teodolito motorizado equipado con un ocular láser, que realiza medidas sobre un blanco situado en la máquina, transmitiendo los datos a un ordenador.

Los principales elementos del tuneladora son:

- Cabeza de corte: Constituye el tape frontal del escudo y en él se sitúan los cortadores de disco y los cangilones de extracción del material. Está fijado a una corona circular sobre la que engranan los 14 motores que hacen girar el conjunto.
- Escudo delantero: En él se sitúan el soporte de la cabeza de corte, que es la corona dentada donde se alojan los motores eléctricos que transmiten el giro a la cabeza, la tolva que recibe el material excavado y lo vierte al sistema de cintas de extracción, las aletas estabilizadoras y el blanco del sistema de guiado (véase figura 2).
- Escudo telescópico: Contiene los motores eléctricos y sus reductoras, los cilindros de empuje principal, los cilindros de torque, que compensan el par de giro producido en la cabeza, y la articulación que permite el guiado de la máquina.
- Escudo de grippers: Contiene los cilindros de los grippers, que permiten el apoyo del doble escudo en el terreno.
- Escudo de cola: En él se sitúan los cilindros auxiliares, que permiten la operación de regripping o cierre de la máquina para poder realizar otro avance, el erector de dovelas, operado por control remoto y cinco capas de pletinas metálicas que impiden la entrada de mortero, tierras, etc.

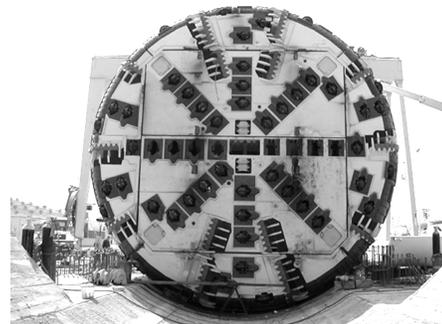


Figura 2. Vista general del escudo del túnel adora La Alcazaba.  
Fuente: El autor.

Además, montado en una corona sobre la estructura que conecta la TBM con el backup (véase figura 3) se encuentra situado un martillo hidráulico que permite la realización de taladros para tratamientos especiales tales como paraguas de micropilotes, inyecciones, etc.



Figura 3. Vista del Backup. Fuente: Autor

Unida al escudo mediante una estructura que soporta la cinta de la TBM se arrastra una estructura, el backup, que aloja los elementos auxiliares de apoyo al escudo, como son:

- Descargador de las mesillas de dovelas.
- Polipastos de descarga de silos de gravilla y mortero.
- Transportador de dovelas.
- Elementos auxiliares, tales como las cintas transportadoras, transformadores eléctricos, cassette para la tubería de ventilación, sistemas de engrase y refrigeración de la TBM, bombas hidráulicas, sistema de guiado, cabina del operador, ventiladores, bombas de inyección, etc.

En la boca del túnel se sitúan las principales instalaciones de la obra, formadas por:

- Pórticos para manejo de dovelas.
- Zona de acopio de dovelas.
- Subestación transformadora.
- Depósito de agua para refrigeración.
- Playa de vías para maniobra de trenes.
- Foso de locomotoras.
- Silos de mortero y acopio de gravilla.
- Talleres.
- Ventiladores.
- Sistema de cintas transportadoras para el desescombro del material.
- Torres de refrigeración.

- Equipo de inyección de lechada de cemento.

Los suministros necesarios para realizar dos avances completos se introducen en el túnel por medio de un tren cuya composición es: una locomotora diesel, un vagón de mortero, dos vagones de gravilla, dos mesillas portadovelas y un vagón de personal. La vía tiene un ancho entre caras interiores de 900mm. Y el carril, de 45kg/m de peso, se va colocando según avanza el escudo fijándolo a la dovela de base mediante unas placas y tornillos de sujeción.

El personal se divide en cuatro turnos, que cubren 24 horas al día durante los siete días de la semana. Cada uno de ellos tiene un jefe de turno, y el personal a su cargo está compuesto por:

- Un operador de la TBM.
- Un operador del erector de dovelas.
- Un operador del polipasto.
- Dos operarios para la fijación de pernos.
- Cuatro operarios para la inyección de grava y mortero.
- Dos operarios para el montaje de vías, tubos y cinta.
- Un mecánico hidráulico.
- Un electricista.

El ciclo de trabajo se dimensiona con el condicionante fundamental de que no se produzcan tiempos de espera en el frente ocasionados por el transporte. De esta forma, tanto el sistema de transporte como las instalaciones auxiliares se han dimensionado en base al tiempo de excavación de la TBM, que es el que marca dicho ciclo.

Los modos de operación de la TBM pueden ser:

- Doble escudo: Apoyada en los grippers, con lo que simultanea la excavación y el montaje de dovelas, y el único tiempo de espera es el de regripping (5-10 minutos).
- Simple escudo: La excavación se realiza apoyándose en el anillo anterior, por lo que no se pueden simultanear las labores de excavación y montaje de dovelas. Sólo se usa en casos de terrenos muy difíciles.

Aunque son ciertas estas dos posibilidades de trabajo de la tuneladora, los tiempos de trabajo en uno y otro sistema dejan claro que el diseño de la misma (no tiene capacidad de modificación de la dirección) y la complejidad geológica encontrada (arcillas) no permiten tal dualidad. Los porcentajes a fecha de hoy han sido del 4% trabajando como simple escudo y del 96% como

doble escudo.

Los rendimientos obtenidos referidos, claro está, al funcionamiento como doble escudo, han evolucionado notablemente a lo largo de la vida de la obra, como es habitual en la excavación en túneles con TBM, dada la importancia de la curva de aprendizaje del equipo de trabajo. Los valores medios de avance han sido de 20 metros al día habiéndose llegado a un rendimiento máximo punta de 34.4 metros.

El ciclo comienza con la excavación de un avance de 1.500mm, suficiente para obtener el espacio necesario para colocar un nuevo anillo. A la vez que se realiza la excavación, se procede al montaje de un anillo de dovelas en el escudo telescópico, y se procede a la inyección de mortero y gravilla de consolidación en el trasdós de los anillos ya colocados.

Una vez terminada la excavación, se realiza el regripping, o cierre de la TBM, terminada la cual se está en disposición de iniciar un nuevo ciclo de excavación. Los tiempos de montaje de dovelas e inyecciones son menores que el de excavación, por lo que, en teoría, no deberían existir tiempos de espera.

Otras operaciones que se realizan simultáneamente al avance son las de prolongación de las redes del túnel, tales como soportes de la cinta transportadora, tubos de agua de refrigeración y vías. Además, cada 250 metros hay una parada para proceder al vulcanizado de un nuevo tramo de cinta transportadora y prolongar la línea eléctrica de 20.000V de alimentación de la TBM, y cada 125 metros se introduce con el tren de suministros un cassette con un nuevo tramo de tubería flexible para la ventilación del túnel.

### 3.3 Dovelas de Hormigón

Como ya se ha apuntado, la decisión de utilización de tuneladoras de doble escudo supone la ejecución simultánea de las tareas de excavación y sostenimiento-revestimiento de la sección final del túnel, siendo de una importancia superlativa el diseño y resistencia de las dovelas que conformarán el anillo definitivo.

El análisis sistemático en obra de los terrenos a atravesar, para lo cual se desarrolló un estudio complementario de sondeos, detectó en una zona de más de un kilómetro de túnel la presencia de sulfatos entre formaciones del Muschelkalk y Keuper además de la presencia de anhidritas. Con el fin de dimensionar las dovelas para el tramo de anhidrita en donde se esperan sobre presiones de 0.5 Mpa fue necesario un estudio específico para la fabricación de dovelas con cemento

resistente a sulfatos y que sea de mayor resistencia que la máxima sobrepresión que es capaz de soportar la dovela recogida en el proyecto original es de 0.3 Mpa.

Los datos de partida fueron los que se especifican a continuación:

- Utilización de cemento resistente a sulfatos (Norma UNE 80303): Se usa este tipo de cemento debido al ambiente agresivo por la presencia de sulfatos en el que se van a encontrar estas dovelas. Este tipo de cemento se caracteriza por su composición que debe cumplir con la normativa UNE vigente.
- Resistencia de proyecto  $f_{ck} = 80 \text{ N/mm}^2$ . Esta resistencia es suficiente para las sobre presiones esperadas en este tipo de terreno.
- Consistencia requerida: definida por su asiento en el cono de Abrams entre 3 y 7 cm.
- Tamaño máximo del árido 12 mm.
- Tipo de exposición: Qc. Este tipo de exposición se define por la EHE. Corresponde a una clase de exposición Química Agresiva, subclase fuerte correspondiente a elementos situados en ambientes contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media.

Tras el estudio pormenorizado y la realización de ensayos de idoneidad y de estricto cumplimiento de todas las normas de aplicación, la dosificación final empleada es la que se adjunta en la Tabla 2.

Tabla 2. Dosificación final del hormigón HA-80 empleado en las dovelas. Fuente: Elaboración propia

Componente	Dosificación
Árido 0-2	10%
Árido 0-5	40%
Árido 5-12	50%
CEM I 42.5R/SR	500 KG
Agua	145 LITROS
Aditivo reductor de agua de alta actividad súper plastificante	1.8% S.P.C.
Suspensión de sílice amorfa	3% S.P.C.

A los siete 7 días y a los 28 días se ha procedido a realizar las pruebas de laboratorio siguiendo la instrucción de Hormigón estructuras EHE. Artículos 86 (Pruebas en laboratorio. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de resistencias del Hormigón HA-80. Fuente: Elaboración propia

Identificación	Cono (cm.)	Rotura 7 días (N/mm <sup>2</sup> )	Rotura 28 días (N/mm <sup>2</sup> )
X-1A	3	74	88
X-1B	3	73	88
X-2A	4	75	89
X-2B	4	74	91
X-3A	3	74	89
X-3B	3	74	90
X-4A	4	73	89
X-4B	4	74	89

El cálculo resistente de las dovelas obligaba a un armado considerable de las mismas, siendo preparado todo ello en una central de producción diseñada específicamente para la obra.

En la figura 4 puede verse la jaula correspondiente a una dovela en el momento antes de ser introducida en el encofrado.



Figura 4. Parrilla de armado de dovela. Fuente: Autor

La organización del parque de dovelas era básica conseguir que el suministro y producción en frente de excavación y revestimiento no se viese afectado, por lo que se dispuso de una gran zona de acopio junto a la boca de entrada al túnel, ordenándose en altura juegos completos de dovelas (véase figura 5).



Figura 5. Juego completo de dovelas para la formación de anillo. Fuente: Autor

### 3.4 La presencia de Metano y las soluciones adoptadas

La ejecución de tramos suficientemente grandes de túnel lleva aparejado la aparición de problemas de seguridad que han de resolverse de la forma adecuada para conseguir unas condiciones de trabajo adecuadas, eliminando cualquier tipo de riesgo laboral que pudiera presentarse.

A lo largo de la construcción del presente túnel se produjo un pequeño accidente, por causa de la aparición de metano, que si bien en todo momento estuvo bajo los umbrales permitidos, obligó a reconsiderar la gestión de la seguridad de todo el túnel. Las medidas adoptadas fueron:

- **Modificación en la Ventilación:**
  - Colocación de dos tubos de aspiración en la zona comprendida entre el escudo delantero y el frente.
  - Aumentar el caudal de aire aspirado por el filtro antipolvo hasta 600 m<sup>3</sup>/min como mínimo.
  - Aumentar la velocidad de las corrientes de aire en la cabeza empleando tres toberas de chorro de aire comprimido.
  - Modificar el humedecimiento de la cabeza de corte, sustituyendo al menos siete de las toberas de agua y espuma existentes por unidades que tengan un diámetro interno de 5 mm, con el fin de que puedan utilizarse adicionalmente para inyectar aire comprimido en la zona de corte.
  - Colocación de dos toberas de chorro en la parte delantera del backup, para suministrar un caudal de 5 a 6 m<sup>3</sup>/s, en dirección al frente. Esto sirve de complemento al caudal aspirado por el filtro antipolvo, generándose altas velocidades de circulación y turbulencias en la zona.
  - Colocación de dos toberas de chorro adicionales en el borde del escudo telescópico, de forma perpendicular al eje de la máquina.
- **Monitorización de la concentración de metano.**
  - Se colocaron 7 metanómetros fijos para realizar una monitorización permanente de la concentración de metano, prestando especial atención a puntos críticos tales como áreas susceptibles de producirse afluencias de metano locales y áreas donde el metano saliente ya está completamente mezclado. Es decir, la zona comprendida entre el frente y el escudo delantero y la zona de la corriente de aire aspirada por el filtro antipolvo. Estas mediciones son contrastadas con otras realizadas con metanómetros manuales, cuyas medidas son registradas.
- **Monitorización del caudal emitido por el filtro antipolvo.**
  - Teniendo en cuenta la importancia del filtro por ser

el único responsable, junto con las toberas de chorro, de la ventilación de la zona de mayor peligro (comprendida entre el frente y el escudo delantero), se consideró conveniente controlar la corriente aspirada por él. Para la medida y registro de estos valores se colocó un caudalímetro estacionario.

- Protocolo de actuación en presencia de gas metano
  - Antes de cada avance se tomarán medidas de la concentración de gas dentro de la cámara.
  - Cuando el terreno lo permita, se aplicará en el frente de excavación agua o espumas lubricante mediante los aspersores situados en la cabeza de corte.
  - Todo el personal del turno, exceptuando al operador de la TBM y a un ayudante, se retirará a la zona del backup durante el ciclo de excavación.
  - Una vez termine la excavación, se comprobará la concentración de metano con los medidores manuales en el interior de la cabeza de corte, procediéndose después al montaje del anillo.
  - Se establecen dos umbrales de concentración con respecto al Límite Inferior de Explosividad o LIE, conforme a las indicaciones del departamento de Minas de la Junta de Andalucía (el LIE es el 5% de volumen total de CH<sub>4</sub> en aire):
    - 1º umbral: 5% del LIE. Cuando alguno de los metanómetros fijos alcanza esta concentración suena una alarma.
    - 2º umbral: 10% del LIE. Cuando se alcanza este umbral la máquina se detiene automáticamente.

#### 4. Consideraciones finales

En los últimos años la política de transporte en Europa, y por transposición en España, ha apostado por la configuración de una red de alta velocidad ferroviaria que se ha mostrado competitiva en las distancias existentes en la geografía española.

Las exigencias de trazado de las mismas supone la aparición de grandes tramos en túnel, lo que unido a las crecientes exigencias en materia de plazos y seguridad y salud, y la cada vez más usual utilización de túnel adoras, en este caso de doble escudo.

Las singularidades de la obra obligan a una correcta planificación de la misma, habiendo quedado patente en el presente artículo la importancia de las instalaciones auxiliares situadas al margen del propio túnel pero que condicionan totalmente el proceso constructivo y determinan finalmente las producciones

a obtener. Igualmente, uno de los elementos más estudiados, por su peso específico en la calidad y seguridad final de la obra subterránea, son las dovelas que conforman el anillo final de revestimiento. En el caso de los Túneles del Valle da Abdalajís ha sido necesario un nuevo diseño y cálculo de las mismas, para conseguir adecuar así la resistencia del anillo a las presiones previsibles tras los nuevos estudios geotécnicos que apuntaban la existencia de materiales de muy baja capacidad portante y con problemas ciertos de presencia de yesos.

De igual manera, la presencia continuada de metano y la necesidad de plantear una obra bajo el precepto de tolerancia cero a los riesgos laborales se han adoptado medidas singulares que afectan tanto a la monitorización de la obra como a los equipos de ventilación y a los protocolos de actuación.

#### 5. Referencias

- Askilrud O., y Dowden PB. (1997), TBM design philosophy for uncertain ground conditions. Proceedings of "Tunnelling'97". London.
- Comisión Europea (2001), Libro Blanco de la Comisión de 12 de septiembre de 2001: «La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad», COM (2001) 370. Bruselas.
- Delfosse P. (1991), Assessment of the programme of trials at very high-speed. Revue Générale des Chemins de Fer, 1991, October, pag 39-46.
- Fundación Ciedes (2000), Málaga: Economía y Sociedad. Boletín N°7. Málaga. ISSN:1137-5590. Pag 105-113.
- López-Pita A. (2001), Railway and plane in the European transport system. Ediciones UPC/CENIT.
- López-Pita A. (1999), La necesidad de nuevas infraestructuras de ferrocarril en la España del siglo XXI. Proceedings of the 3rd Nacional Civil Engineering Congreso, Barcelona, 1999, pag 45-52.
- López-Pita A., y Robusté F. (2003), The Madrid-Barcelona high-speed line. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 156, February 2003 Issue I, pag 3-8
- Mendaña F., y Arnaiz M. (2001), Tuneladoras. Documento disponible en la página web oficial del Metro de Madrid (www.madrid.org/metro). Consultada octubre de 2004ñ
- Ministerio de Fomento (1998), Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS-98). Madrid.

Ureña F. (2002), Efectos de la alta velocidad ferroviaria en las ciudades intermedias del corredor Madrid-Sevilla. Economía Aragonesa. Diciembre 2002.

