

Túnel de Abdalajís ejecutado con TBM para la línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga

Abdalajís tunnel executed with TBM for the Córdoba-Málaga High Speed Line

Jesús M. de la Fuente González. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de las obras. Ineco. jmfuente@ciccp.es

Juan A. Gil Gandía. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Jefe de la A.C.O. Ute Ayegeo (Ayasa-Geocontrol). jgil@ayasa.es

Noelia Alonso Fernández. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

SPICC. naf@spicc.e.telefonica.net

Resumen: El artículo describe la ejecución de las obras de los Túneles de Abdalajís, que forman parte de las obras de la L.A.V. Córdoba-Málaga. El proyecto comprende la ejecución de dos túneles paralelos, con una longitud de 7.000 m cada uno, que atraviesan las complejas formaciones geológicas de la Sierra del Valle de Abdalajís y la Sierra de Huma, en la Cordillera Bética. La construcción se realiza con dos tuneladoras tipo doble escudo de roca dura, de 10 m de diámetro, diseñadas de acuerdo a las características de los terrenos a atravesar.

Palabras Clave: Abdalajís, Alta Velocidad, Cordillera Bética, Revestimiento, Tuneladora doble escudo

Abstract: The article describes the execution of the Abdalajís Tunnels, a part of the construction of the High Speed Line Córdoba-Málaga. The Project includes the excavation of two twin tunnels, 7,000 m long, that will be excavated through a complex geological formations in Sierra del Valle de Abdalajís and Sierra de Huma, in the Bética Mountain Range. The tunnel will be dug with two tunnel boring machines, double shield type, with a diameter of 10 m, designed accordingly for the different kinds of soil that will be excavated.

Keywords: Abdalajís, High Speed, Cordillera Bética, Lining, Double Shield TBM

El trazado la nueva Línea de Alta Velocidad entre Córdoba y Málaga discurre de norte a sur por las provincias de Córdoba, Sevilla y Málaga, y está diseñado para una velocidad máxima de circulación de 350 km/h. La longitud total de la línea es de 155 km y está dividida en 22 tramos; cuenta con una longitud total de túneles de 19 Km, destacando de entre ellos el túnel de Abdalajís que, desde las cercanías de la estación de Bobadilla y al oeste del embalse de Guadalhorce, atraviesa la sierra del mismo nombre con una longitud de 7.300 m.

1. Descripción general del proyecto

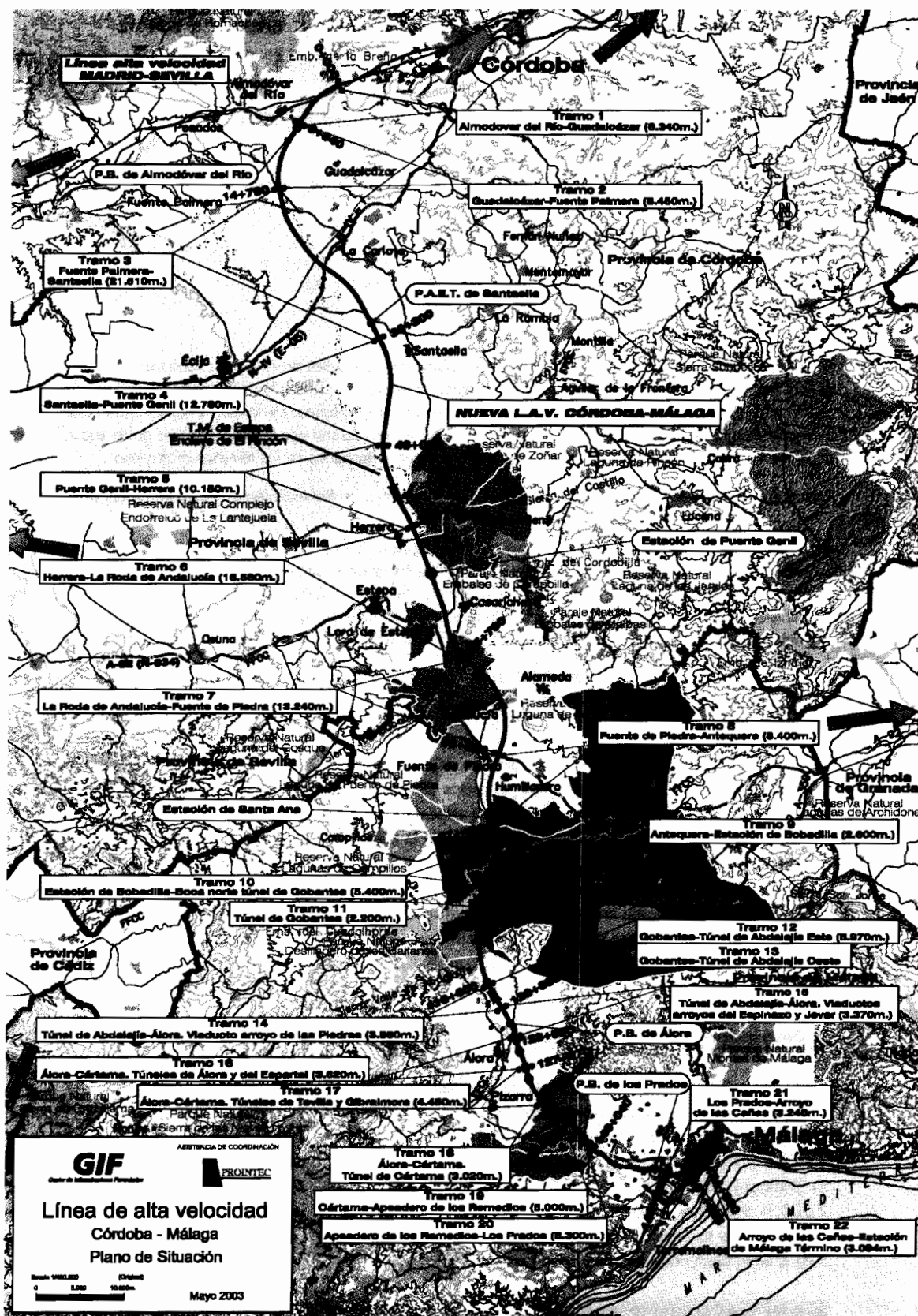
El tramo "Gobantes-Salida del Túnel de Abdalajís" incluye la construcción del túnel de este nombre más el acondicionamiento de sus dos bocas. El tramo discurre del P.K. 800+000 al 808+970, por los términos municipales de Antequera y Álora (Málaga), con una longitud total de 8.970 m. De éstos, 7.300 m constituyen el túnel, atravesando la Sierra del Valle de Abdalajís y la Sierra de Huma, y 1.670 m a cielo abierto, 920 m en la boca norte y 750 m en la boca sur.

The route of the new High Speed Line between Córdoba and Málaga runs from north to south through the provinces of Córdoba, Seville and Málaga, and is designed for a maximum circulation speed of 350 km/h. The total length of the line is 155 km and is divided into 22 sections; it has a total length of 19 km of tunnels, among these being the Abdalajís tunnel which, from close to Bobadilla station and to the west of the Guadalhorce reservoir, will cross the Sierra of the same name with a length of 7,300 m.

1. General description of the project

The section "Gobantes-Abdalajís Tunnel Exit" includes the construction of the tunnel of that name plus the conditioning of its two entrances. The section runs from P.K. 800+000 to 808+970, through the municipal districts of Antequera and Álora (Málaga), with a total length of 8,970 m. Of this length, 7,300 m constitute the tunnel, traversing the Sierra del Valle de Abdalajís and the Sierra de Huma,

Fig. 0. Situación geográfica de la LAV Córdoba-Málaga, División en tramos.
Fig. 0. Geographical location of the Córdoba-Málaga HSL Division in sections.



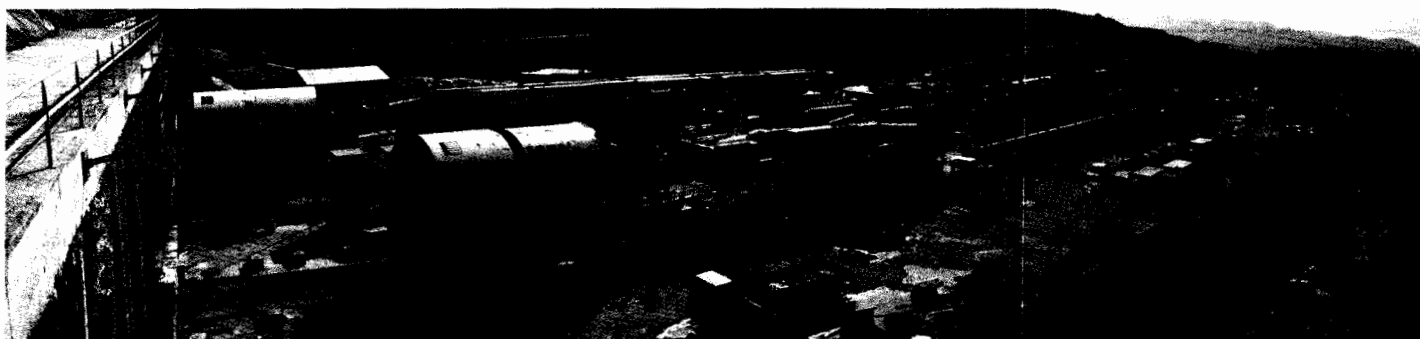


Foto 0. Vista general del emboquille sur del túnel de Abdalajís.
Photo 0. General view of the south entrance of the Abdalajís tunnel.

El diseño corresponde a la tipología bitubo, y comprende dos túneles gemelos de vía única de sección circular, de diámetro libre interior de 8,80 m. A efectos de construcción, el Proyecto se dividió en dos tramos independientes:

- Tramo 12. Comprende la excavación del túnel Este de 7.070 m de longitud y el acondicionamiento de la boca sur, donde se ha previsto una superficie de 125.000 m² para la ubicación del vertedero, instalaciones y servicios auxiliares de las tuneladoras que, una vez finalizada la obra, servirá como explanada de emergencia durante la explotación del túnel. Incluye también el acondicionamiento de los caminos de acceso a esta implantación sur de la obra.
- Tramo 13. Engloba la excavación del túnel Oeste de 7.053 m de longitud y el acondicionamiento de la boca norte, con una la explanada de emergencia de 30.000 m² sobre el arroyo Salado, el viaducto sobre el arroyo Higue-rón de 125 m de largo y un desmonte de 300 m de longitud y 45 m de altura.

Ambos tramos, licitados por el GIF en diciembre el 2001, fueron adjudicados a las siguientes uniones temporales de empresas:

- Tramo 12: UTE Abdalajís (Dragados-Seli-Tecsa-Jäger), con un presupuesto vigente de 125.882.531,70 € y un plazo de ejecución de 36 meses.
- Tramo 13: UTE Abdalajís Oeste (Sacyr-Somagüe), con un presupuesto vigente de 131.734.147,95 € y un plazo de ejecución de 41 meses.

Su construcción se inició en mayo de 2002. Previo al inicio de la excavación fue necesario el acondicionamiento de 8 Km de carreteras locales para permitir el transporte de las 2.400 toneladas de las tuneladoras y maquinaria del túnel, así como para absorber la alta densidad de tráfico de pesados estimada durante la ejecución del túnel, principalmente el transporte de las dovelas desde la fábrica a la explanada de la boca sur.

and 1,670 m are open cut, 920 m in the north exit and 750 m in the south entrance.

The design is a twin type solution, and comprises two twin tunnels of circular cross-section, of interior free diameter of 8.80 m. For the purpose of construction, the Project was divided into two independent sections:

- Section 12. This is comprised of the excavation of the East tunnel with a length of 7,070 m and the construction of the south entrance, where a ground area of 125,000 m² has been planned for the location of the dump, facilities and auxiliary installations for the TBMs. Once the work is completed, this area will serve as an emergency site during tunnel exploitation. It also includes conditioning of the access roads to this south site of the job.
- Section 13. Includes the excavation of the West tunnel 7,053 m long and the construction of the north exit, with an emergency site of 30,000 m² over the Salado river, the viaduct over the Higue-rón river of length 125 m and a cut with a length 300 m and height 45 m.

The two sections, bid on by GIF in December 2001, were awarded to the following joint ventures:

- Section 12: Abdalajís JV (Dragados-Seli-Tecsa-Jäger), with an existing budget of 125,882,531.70 € and an execution period of 36 months.
- Section 13: Abdalajís West JV (Sacyr-Somagüe), with an existing budget of 131,734,147.95 € and an execution period of 41 months.

Its construction started in May 2002. Before starting excavation, 8 km of local roads had to be upgraded in order to permit the transportation of the 2,400 tons of the TBMs and tunnel machinery, and also to absorb the high density of heavy traffic involved in the execution of the tunnel, mainly the transportation of the segments from the factory to the south site.

2. Descripción del túnel

La ejecución de los dos tubos que componen el túnel se acometió desde la boca Sur mediante el empleo de dos máquinas tuneladoras para roca, tipo doble escudo, con un diámetro de excavación de 10 m, con las que se espera alcanzar rendimientos medios superiores a 20 m/día, rendimientos que permitirán ejecutar la obra en los plazos establecidos.

Siguiendo el trazado Norte-Sur, el túnel atraviesa los complejos Alpujárride, Maláguide y Penibético pertenecientes a las unidades Internas y Externas de la Cordillera Bética. A su vez, durante la excavación y explotación el túnel se verá afectado por las unidades acuíferas de Sierra de Huma y Sierra del Valle de Abdalajís. Con el fin de evaluar la afección de la excavación de los túneles a los acuíferos atravesados, se está realizando un seguimiento con la ejecución de tres sondeos hidrogeológicos para el control piezométrico y los aforos de diversas surgencias.

La construcción de los dos tubos supone una longitud total de excavación de 14.000 m de túnel de sección circular y diámetro libre interior de 8,80 m, con una sección de 51,4 m² cada tubo (Figura 1). La distancia entre ejes varía desde un mínimo de 19,6 m en la boca Norte hasta un máximo cercano a 50 m en la parte intermedia del trazado del túnel, variaciones debidas a la adaptación a los acuerdos en planta del trazado.

En la Figura 3 se observa la planta del tramo Gobantes-salida del Túnel de Abdalajís cuyas principales características son las siguientes:

- Longitud total del tramo: 8.970 m
- Longitud del tubo este: 7.070 m
- Longitud del tubo oeste: 7.053 m
- Radio mínimo en planta: 6.900 m
- Pendiente máxima del tramo: 24,02 mm/m
- Pendiente máxima del túnel: 16,02 mm/m (descendente dirección Málaga)
- Parámetro mínimo de acuerdos verticales Kv: 50.000

2. Description of the tunnel

The execution of the two tubes making up the tunnel was tackled from the South entrance by means of using two tunnel boring machines (TBMs) for rock, double shield type, with an excavation diameter of 10 m, in which average yields of more than 20 m/day were expected to be achieved, an output that would allow the work to be completed within the established deadlines.

Following the North-South route, the tunnel traverses the Alpujárride, Maláguide and Penibético complexes belonging to the Internal and External Units of the Cordillera Bética. In turn, the excavation and operation of the tunnel will be affected by aquifer units of the Sierra de Huma and Sierra del Valle de Abdalajís. In order to evaluate the effect of excavating the tunnels, on the aquifers, monitoring is being carried out by means of executing three hydrogeological boreholes for piezometric control and gauging of various upwellings.

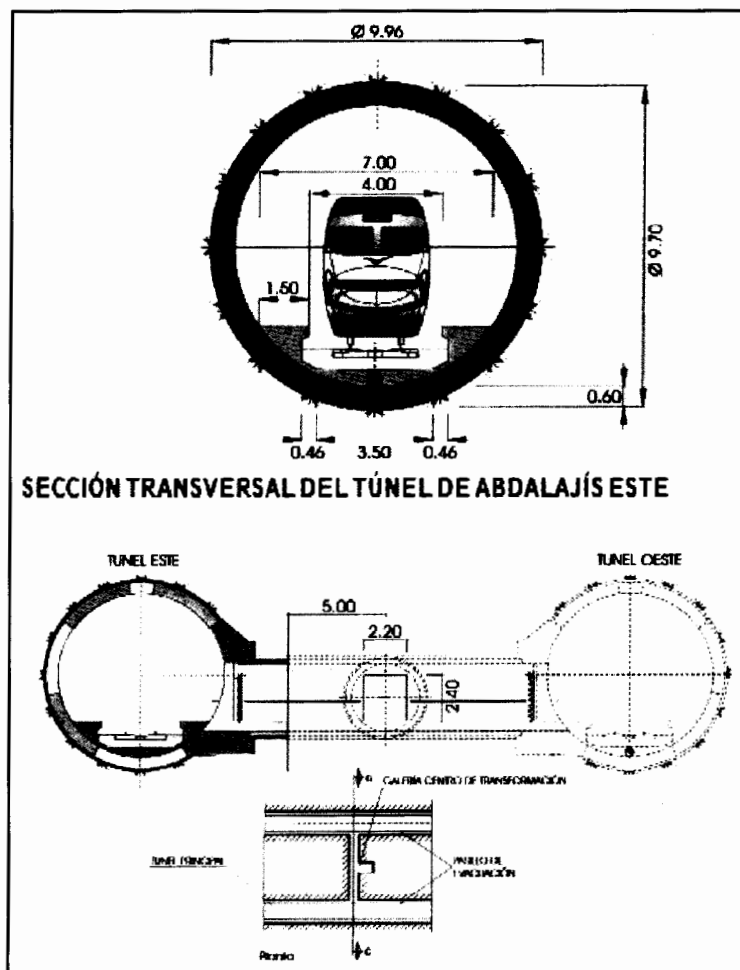
The construction of the two tubes implies a total excavation length of 14,000 m of tunnel of circular cross-section and interior free diameter of 8.80 m, with a cross-section of 51.4

m² for each tube (Figure 1). The distance between centre-lines varies from a minimum of 19.6 m in the North mouth up to a maximum of almost 50 m in the middle of the route through the tunnel, these variations being due to adaptation to transitions in the alignment.

Figure 3 shows the alignment in plain view of the section Gobantes – Exit of the Abdalajís Tunnel which main characteristics are as follows:

- Total length of section: 8,970 m,
- Length of east tube: 7,070 m Length of west tube: 7,053 m
- Minimum radius in lot plan: 6,900 m
- Maximum gradient of the section: 24.02 mm/m
- Maximum gradient of the tunnel: 16.02 mm/m (descending direction Málaga)
- Minimum parameter of vertical transitions Kv: 50,000

Fig. 1. Esquema de la sección del túnel.
Fig. 1. Diagram of the cross-section of the tunnel.



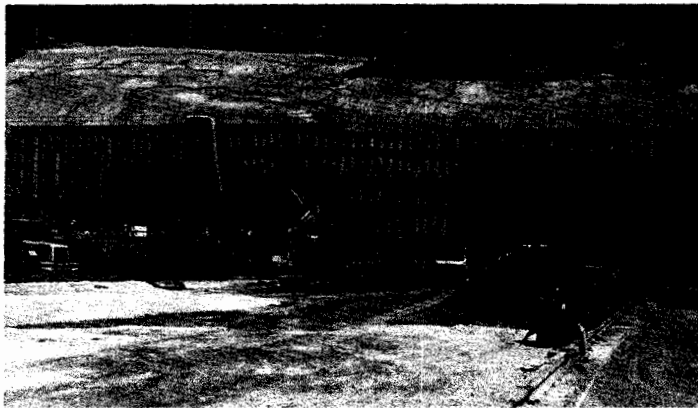


Foto 1. Vista general del emboquille sur del Túnel de Abdalajís. Pantalla de pilotes anclada/ Photo 1. General view of the south entrance of the Abdalajís Tunnel. Anchored pile screen.

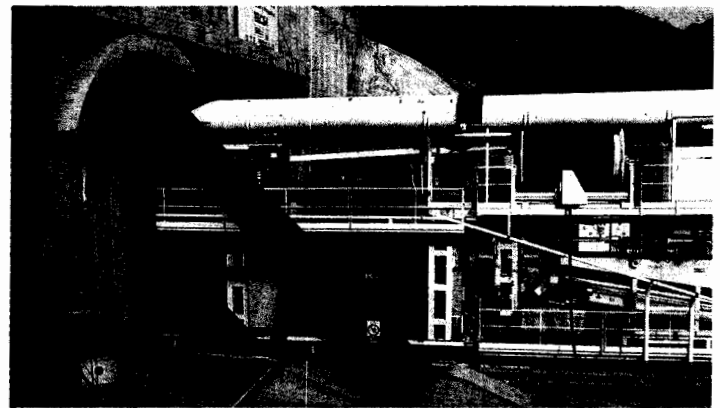


Foto 2. Estructura de reacción para iniciar la excavación del túnel. Photo 2. Reaction structure for starting the excavation of the tunnel.

La solución de proyecto para el sostenimiento del portal Sur, consistente en bulones, mallazo y gunita, hubo de modificarse visto el comportamiento de los materiales del macizo. Estudiados éstos con sondeos verticales y horizontales, se definió una pantalla de pilotes anclada (Foto 1) compuesta por 113 pilotes de diámetro 800 mm y separación entre ejes de 1 m. La longitud de los pilotes es de 20 m, con un empotramiento de 5 m. Se dispusieron 5 filas de anclajes con longitudes superiores a 20 m. También se construyó una red de drenes californianos de diferente longitud con el fin de drenar el terreno del trasdós de la pantalla y evitar en lo posible el empuje del agua sobre ella. Este muro se ausculta topográficamente de forma periódica con el fin de comprobar su estabilidad.

Con el fin de conseguir un terreno con suficiente capacidad portante para poder usar los grippers lo antes posible, antes de comenzar la excavación con las tuneladoras, se construyeron dos túneles por el método tradicional. El diámetro de dichos túneles es prácticamente el de la máquina y sus longitudes, 28 m en la boca oeste y de 38 m en la boca este. Se inició su excavación al amparo de un paraguas de micropilotes de 30 m de longitud por boca y el sostenimiento consistió en una combinación de cerchas, chapas Bernold y hormigón proyectado. Se construyó la solera con la misma forma que el trasdós de la dovela base con el fin de poder deslizar la TBM sobre ella.

El montaje de las máquinas se hizo en la explanada de la boca sur en unas camas habilitadas para ello al inicio del emboquille respectivo y se introdujeron ya montadas dentro del mismo empujando con los cilindros auxiliares inferiores contra las dovelas-base. Una vez introducida la máquina se utilizó una estructura de reacción auxiliar situada en el exterior del emboquille para avanzar hasta el frente colocando anillos en modo de escudo simple (Foto 2).

El sostenimiento/revestimiento del túnel consiste en anillos formados por siete dovelas prefabricadas de hormigón

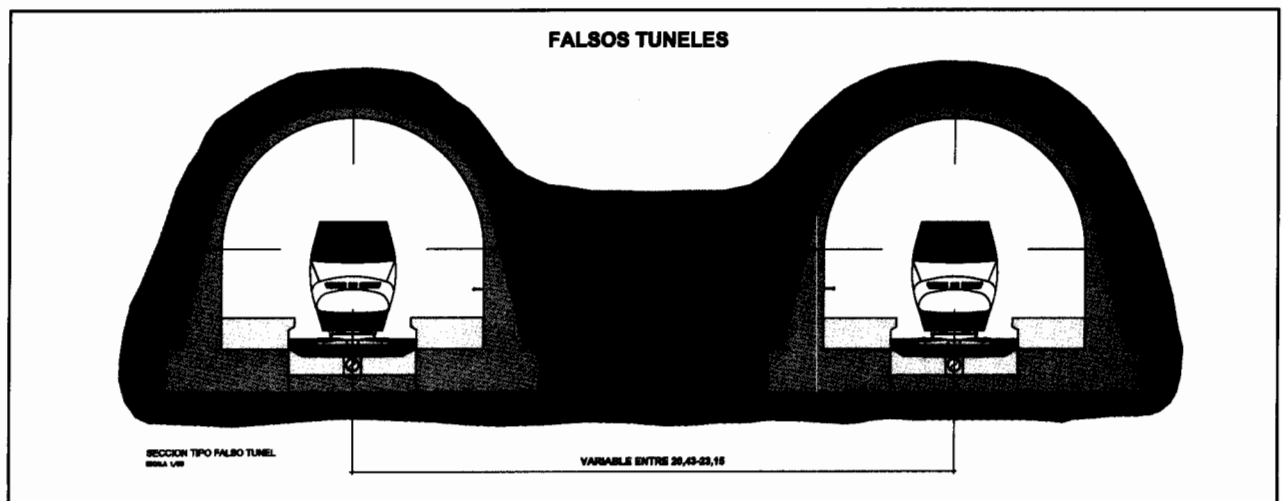
The design solution for the support of the South portal, consisting of anchorages, mesh and shotcrete, had to be modified due to the behaviour of the bedrock materials. Having studied these with vertical and horizontal boreholes, a screen of anchored piles was constructed (Photo 1) composing of 113 piles of diameter 800 mm and separation between axes of 1 m. The length of the piles is 20 m, with embedding of 5 m. Five rows of anchors were arranged with lengths greater than 20 m. A series of Californian drains of different lengths was also constructed with the aim of draining the ground behind the screen and preventing the thrust of water on it. This wall is topographically auscultated in order to check its stability.

In order to achieve a ground with sufficient bearing capacity for the grippers to be used as soon as possible, the two tunnels were constructed by the traditional method before starting excavation with the TBMs. The diameter of those tunnels was practically that of the machine. Its lengths were 28 m at the west entrance and 38 m at the east entrance. The excavation was started under a cover of a pile cap of 30 m in length (one at each entrance) and the support consisted of a combination of trusses, Bernold plates and shotcrete. The basement was constructed in the same way as the rear of the base segment in order to be able to slide the TBM over it.

The assembly of the machines was done at the south site over the basement fitted out for this at the beginning of each entrance, and were introduced into it, already assembled, by means of pushing with the lower auxiliary cylinders against the base segments. Once the machine had been introduced, an auxiliary reaction structure located outside the mouth was used to move the machine forward to the front face, with rings being positioned by way of a single shield (Photo 2).

The support/lining of the tunnel consists of rings formed from seven prefabricated segments of reinforced concrete of 45 cm thick with a width of 1.5 m. Different sections of lining have been designed, varying the quantity of reinforcement

Fig. 2.
Sección de los
falsos túneles
del Túnel de
Abdalajis.
Fig. 2.
Section of cut
and cover of
the Abdalajis
Tunnel.



armado de 45 cm de espesor y 1,5 m de ancho. Se han proyectado diferentes secciones de revestimiento variando la cantidad de armadura y resistencia del hormigón según las condiciones impuestas por el terreno atravesado a lo largo del trazado.

Durante la explotación, ambos túneles estarán unidos por galerías transversales de seguridad cada 350 m, lo que permitirá la evacuación de un túnel a otro en caso de emergencia o avería dentro de uno de ellos. En estas galerías se alojarán los tres centros de transformación que permitirán el abastecimiento de energía eléctrica durante la explotación de la línea. En fase de construcción y por motivos de seguridad para propiciar la evacuación de un túnel en caso de incidente durante los trabajos de excavación, se ejecutará una de cada tres de estas galerías, de modo que exista siempre una galería a menos de 1000 m del frente de excavación.

A la salida en ambos emboquilles, los túneles se prolongan en falso túnel con una ligera pendiente hacia el exterior. La sección es en herradura (Figura 2), compuesta por una circunferencia de 4,53 m de radio interior, desde la clave hasta los hastiales, continuando en línea recta tangente a la circunferencia descrita. El espesor del tramo curvo es constante e igual a 40 cm. Las dos paredes laterales rectas presentan un canto variable, de 40 cm hasta 150 cm. La altura de la sección desde las zapatas es de 8 metros. La estructura de los falsos túneles es de hormigón armado de resistencia característica igual a 35 MPa. Las longitudes de los falsos túneles son:

- Boca Norte: Este de 180,33 m y Oeste de 188,66 m.
- Boca Sur: Este de 69,78 m y Oeste de 70,83 m.

La construcción total de cada tubo se finaliza con la formación de los andenes, el drenaje y las instalaciones ferroviarias. Estos andenes de 1,5 m de ancho, formados por hormigón en masa, alojan en su interior las conducciones para la posterior instalación de las líneas de comunicación, control y telemando.

and strength of the concrete depending on the conditions imposed by the ground being traversed along the course of the route.

Once in operation, the two tunnels are going to be joined by transverse safety galleries every 350 m, which will permit evacuation from one tunnel to the other in case of an emergency or breakdown inside one of them. These galleries are going to house three transformer centres permitting the supply of electricity during the operation of the line. During the construction phase, and for safety reasons in order to facilitate the evacuation of one of the tunnels in case of an incident during the excavation work, one out of three of these galleries will be executed so that there is always one gallery at less than 1000 m from the excavation face.

False tunnels extend both tunnel exits with a slight slope towards the outside. The cross-section is in the form of a horseshoe (Figure 2), consisting of a circumference with an internal radius of 4.53 m from the keystone to the walls, and then continues in a straight line tangential to the described circumference. The thickness of the curved section is constant and equal to 40 cm. The two straight sidewalls have a variable edge, from 40 cm up to 150 cm. The height of the cross-section from the foundation is 8 meters. The false tunnels' structure consists of reinforced concrete of characteristic strength equal to 35 MPa. The lengths of the false tunnels are:

- North Exit: East length 180.33 m and West length 188.66 m.
- South Entrance: East length 69.78 m and West length 70.83 m.

The total construction of each tube ends with the creation of the platforms, drainage and rail facilities. These walkways are 1.5 m wide, made of concrete; house in their interior the ducts for later installation of communication, control and telecommand lines.

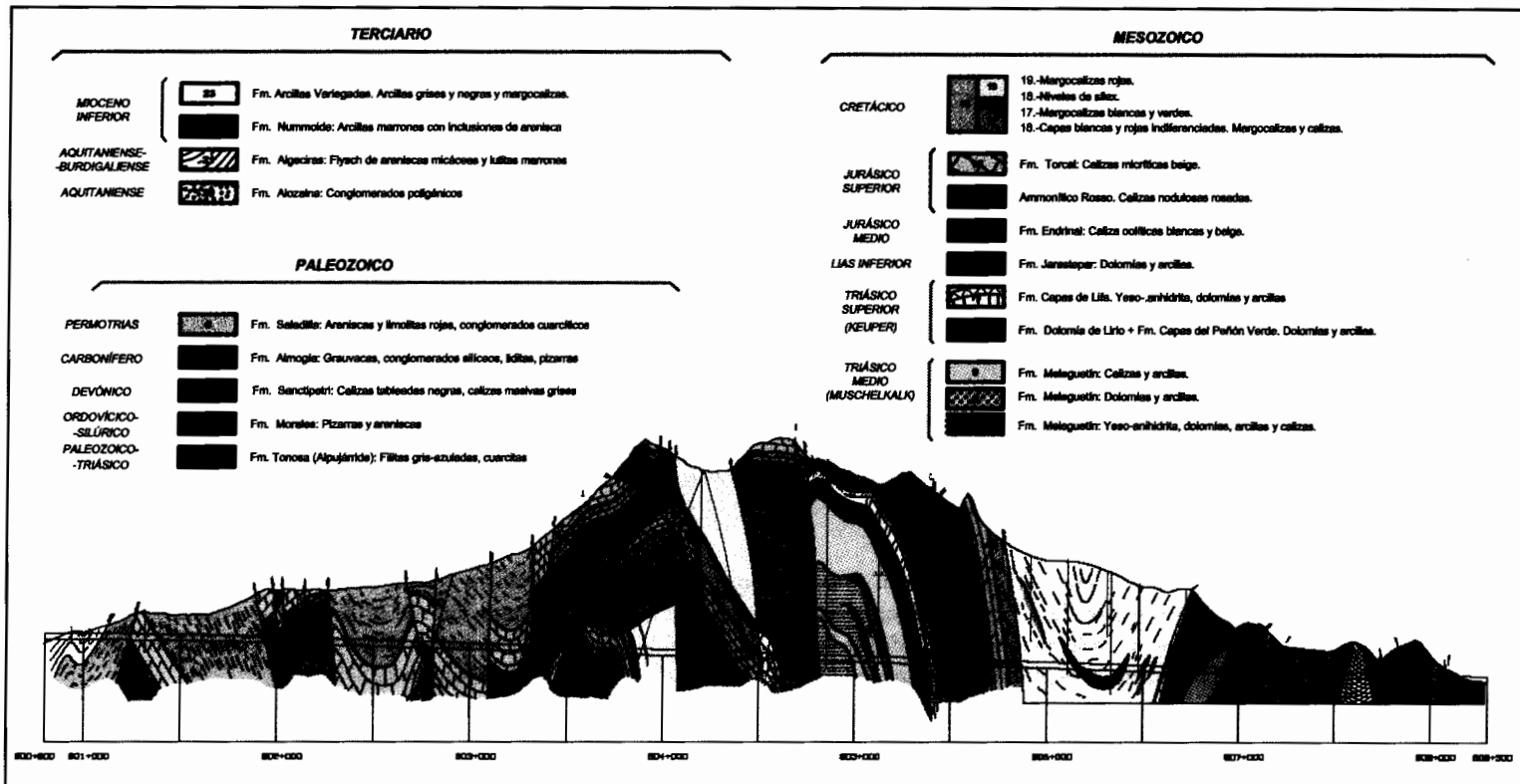


Fig. 3. Perfil geológico del tramo Gobantes-Salida del Túnel de Abdalajís
Fig. 3. Geological profile of the section Gobantes - Exit of the Abdalajís Tunnel.

Encuadre Geológico

El túnel de Abdalajís se sitúa en la Cordillera Bética, al Sur de la Península Ibérica, a aproximadamente 20 Km de Antequera, dentro de los Términos Municipales de Antequera y Álora (Málaga).

El trazado (Figura 3), que sigue aproximadamente una orientación Norte-Sur, discurre por los parajes de Sierra Llana, Sierra del Valle de Abdalajís, Sierra de Huma y Barrio de las Angosturas. Dada la complejidad del perfil geológico a atravesar, se decidió la realización de una campaña complementaria de los sondeos de proyecto compuesta por 9 nuevos sondeos de hasta 600 m de longitud, con el fin de completar la definición de algunos tramos y la localización de algunos contactos de falla. El objetivo fue tener al menos un sondeo de reconocimiento cada 500 m de trazado, aproximadamente.

Geológicamente, la Cordillera Bética se divide en Unidades Internas y Externas, que a su vez se subdividen en los Complejos Alpujárride y Maláguide (Unidades Internas) de edad paleozoica, y el Penibético (perteneciente a las Unidades Externas), del Mesozoico.

En esta región los materiales que componen los Complejos Alpujárride y Maláguide son de tipo metamórfico muy replegados y tectonizados, de litologías variadas, como filitas, pizarras, areniscas, liditas y conglomerados. Las Unidades Externas están formadas por materiales de

Geological Setting

The Abdalajís tunnel is located in the mountain range known as the Cordillera Bética in the south of the Iberian Peninsula, approximately 20 km from Antequera, within the municipal districts of Antequera and Álora (Málaga).

The route (Figure 3), which follows an approximately north-south orientation, runs through the regions of Sierra Llana, Sierra del Valle de Abdalajís, Sierra de Huma and Barrio de las Angosturas. Given the complexity of the geological profile to be traversed, the decision to conduct a complementary campaign of design borings consisting of nine new borings of up to 600 m in length, in order to complete the definition of some sections and the location of some fault contacts, was made. The objective was to have a boring at least every 500 m.

Geologically, the Cordillera Bética is divided into Internal and External Units, which are in turn subdivided into the Alpujárride and Maláguide Complexes (Internal Units) from the Paleozoic era and the Penibético (belonging to the External Units) from the Mesozoic.

In this region, the Alpujárride and Maláguide Complexes are composed of highly folded and tectonised metamorphic material, of varying lithologies, such as phyllites, slates, sandstones, lydites and conglomerates. The External Units are formed from materials of a calcareous nature: limestones, dolomites and marls, mixed with clay layers, gypsum and anhydrite.

Tabla 1

TRAMO	TIPO DOVELA	PK's*		GEOLOGÍA
		INICIO	FIN	
1	A	801+079	803+250	Areniscas y lutitas miocenas, y las calizas, dolomías y margas del Cretácico y Jurásico
2	C	803+250	804+530	Calizas, dolomías y margas del Cretácico y Jurásico, bastante fisuradas
3	H	804+530	805+460	Materiales del Triásico Medio y Superior, formados por calizas, dolomías y margas, con niveles de yeso y anhidrita intercalados
4	B	805+460	806+640	Materiales calcáreos, dolomíticos y margosos del Cretácico y Jurásico, y las arcillas con niveles de calcarenitas del Mioceno Inferior
5	A	806+640	808+130	Materiales de los complejos Paleozoicos

*PK's fijados tras la campaña complementaria realizada antes del inicio de los trabajos de excavación.

naturaleza calcárea: calizas, dolomías y margas, con niveles arcillosos, yesíferos y anhidríticos intercalados.

Tanto en el contacto entre las Unidades Internas y Externas como hacia el final del tramo, se presentan materiales miocenos, de naturaleza turbidítica, y de composición arcillo-margosa con niveles de areniscas intercalados.

La estructura de la zona es la de una sucesión de escamas cabalgantes, de directrices tectónicas Norte-Sur, y orientación subvertical de las capas. Estas escamas cabalgan unas sobre otras a favor de planos de debilidad reconocidos tanto en superficie como en profundidad.

En la región se han definido varias unidades de acuíferos, de las cuales el de la Sierra de Huma y el de la Sierra del Valle de Abdalajís, son los que pueden tener mayor afección por la excavación del túnel.

Se trata de acuíferos de naturaleza calcárea estructurados en diferentes escamas, cuya permeabilidad se debe a la fisu-

In both the contact between the Internal and External Units and towards the end of the section, Miocene materials of a turbid nature and clayey-marly composition put in with sandstones layers are to be found.

The structure of the zone is that of a succession of overlapping nappes, of north-south tectonic directrices, and subvertical orientation of the layers. These nappes overlap others in favour of planes of weakness that can be identified both on the surface and at depth.

Various aquifer units have been defined in the region, those of which the Sierra de Huma and of the Sierra del Valle de Abdalajís could be most affected by the excavation of the tunnel.

These aquifers are of a calcareous nature structured into different nappes, whose permeability is due to fissuring and to the high degree of karstification of the material. The connection between the different nappes is not assumed to be effective, owing to lithological and structural aspects, a fact which is verified

Table 1

SECTION	SEGMENT	KP's*		GEOLOGY
		START	END	
1	A	801+079	803+250	Sandstones and Miocene shales, and limestones, dolomites and marls from the Cretaceous and Jurassic
2	C	803+250	804+530	Limestones, dolomites and marls from the Cretaceous and Jurassic, fairly fissured
3	H	804+530	805+460	Materials from the Middle and Upper Triassic, formed from limestones, dolomites and marls, with layers of gypsum and anhydrite
4	B	805+460	806+640	Limestone, dolomite and marly materials from the Cretaceous and Jurassic, and clays with layers of calcarenites from the Lower Miocene
5	A	806+640	808+130	Materials from Palaeozoic complexes

*KP's determined following the complementary campaign conducted prior to start of excavation works.



Foto 3: Tuneladora del túnel Oeste en la factoría.
Photo 3. TBM for the West tunnel in the factory.

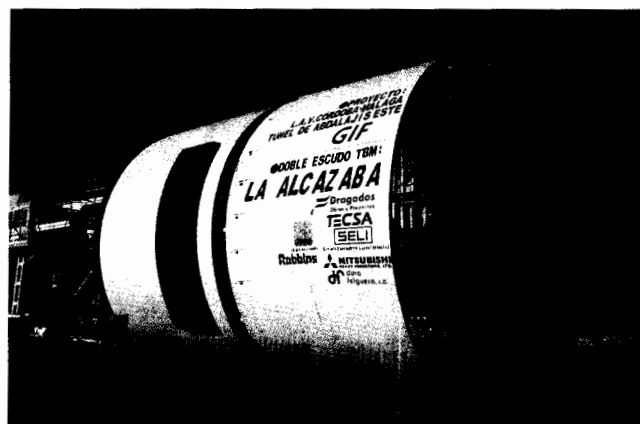


Foto 3 bis. Tuneladora del túnel Este una vez finalizado su montaje en obra/Photo 3bis. TBM for the East tunnel assembled on site.

ración y a la gran carstificación del material. La conexión entre las diferentes escamas no se supone efectiva, debido a aspectos litológicos y estructurales, verificado este hecho por los ensayos y mediciones de los distintos sondeos realizados a lo largo del trazado. Aún así, se han medido importantes columnas de agua en los sondeos hacia la mitad del túnel.

Como ya se ha dicho, el sostenimiento/revestimiento consiste en anillos de 45 cm de espesor prefabricados con una mezcla de hormigón armado con redondo estructural, de acuerdo con la Instrucción española vigente, más una adición de fibras de acero para mejorar la resistencia a tracción en las esquinas y bordes, en los tramos en que se han de soportar los empujes máximos. Para adaptarse tanto a la complejidad estructural como a la variedad litológica, se ha dividido el túnel en cinco tramos correspondientes a diferentes secciones tipo, en las que se emplearán los diferentes tipos de dovela. En la tabla 1 se muestra la distribución prevista para estas secciones tipo y la descripción de los distintos tramos en el perfil Geológico-Geotécnico:

Cabe destacar la necesidad de emplear cemento sulfo-resistente en los anillos de las secciones tipo C y H.

3. Descripción de la tuneladora

Para la ejecución del Túnel de Abdalajís se están utilizando dos máquinas tuneladoras de roca idénticas, del tipo doble escudo, una por tubo, diseño de MHI-ROBBINS (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.-The ROBBINS Company), y fabricadas en las instalaciones de la empresa asturiana Duro Felguera, S.A. Estas máquinas están especialmente indicadas para construir túneles de gran longitud en los que se prevé que la excavación atraviese terrenos de muy distinta naturaleza, como es el caso del túnel de Abdalajís. Realizan tanto la perforación como el sostenimiento de la excavación y el revestimiento definitivo del túnel, simultaneando ambas la-

by the tests and measurements made by the different boreholes over the course of the route. Even so, important columns of water have been measured in the boreholes towards the middle of the tunnel.

As already stated, the support/lining consists of rings of thickness of 45 cm prefabricated with a mixture of reinforced concrete with structural steel, in accordance with the Spanish Instruction, plus an addition of steel fibres in order to improve the tensile strength in the corners and edges, in sections where the maximum thrusts have to be borne. In order to be adapted to both the structural complexity and to the lithological variety, the tunnel has been divided into five sections corresponding to different standard cross-sections, in which the different types of segments are going to be used. The following table 1 shows the expected distribution for these standard cross-sections and the description of the different sections in the Geological-Geotechnical profile.

It is possible to emphasize the use of sulpho-resistant cement in rings of sections type C and H.

3. Description of the Tunnel Boring Machine

For the execution of the Abdalajís Tunnel, two identical rock Tunnel Boring Machines are being used, double shield type, one for each tube, MHI-ROBBINS design (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.-The ROBBINS Company), and manufactured in the installations of a company in Asturias, Duro Felguera, S.A. These machines are especially suitable for constructing long tunnels in which the excavation is expected to traverse ground of very different nature, as in the case of the Abdalajís tunnel. They perform both the drilling and support of the excavation and the final lining of the tunnel, combining both tasks simultaneously when operating in the double shield mode, which is based on two shields working together joined by means of hydraulic jacks permitting telescopic movement between them.



Foto 4. Cabeza de corte de la TBM del túnel Este desde el interior del emboquille.
Photo 4. Cutting head of the TBM for the East tunnel from inside the entrance.

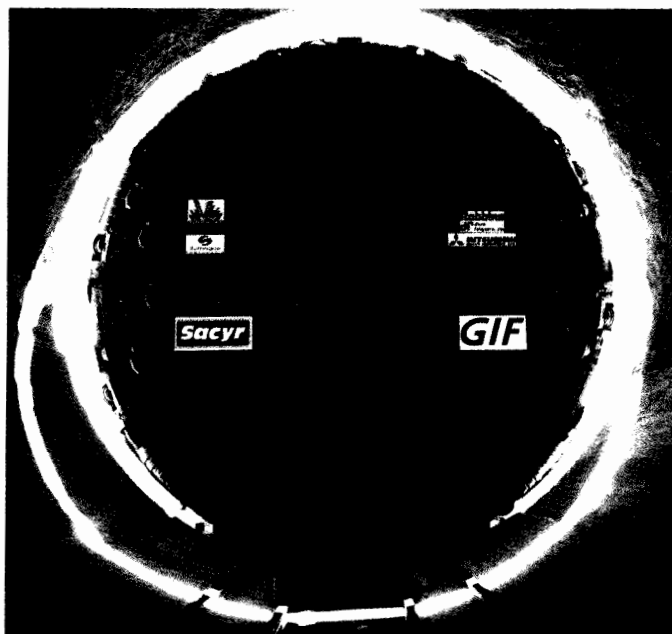


Foto 4 bis. Cabeza de corte de la TBM del túnel Oeste/Photo 4 bis. Cutting head of the TBM for the West tunnel before being assembled on site.

bores cuando operan en el modo doble escudo, que se basa en el trabajo de dos escudos unidos mediante gatos hidráulicos que permiten el movimiento telescópico entre ellos.

Las tuneladoras de los túneles de Abdalajís se componen de las siguientes partes principales:

- La cabeza de corte de 10 m de diámetro, accionada mediante 14 motores eléctricos con una potencia total instalada de 5 MW que mediante variadores de frecuencia permiten el control de los parámetros de giro y par. En la rueda de corte están ubicados 69 cortadores de disco de 17" recambiables desde el interior (Foto 5), 64 en la parte frontal de la cabeza siguiendo la forma de una espiral y 5 ubicados en el perímetro de la misma que permiten la sobre-excavación de la sección de avance. Cada cortador puede soportar un empuje máximo de 27 t.
- El escudo principal o delantero, de 9.930 mm de diámetro, en cuya parte superior se alojan los grippers auxiliares o estabilizadores, escudo que soporta la cabeza de corte y su accionamiento, siendo este conjunto la parte móvil de la máquina durante su funcionamiento como doble escudo.
- El escudo telescópico, de 9.830 mm de diámetro, que permite el movimiento relativo entre los escudos, posibilitando el trabajo como doble escudo.
- El escudo de grippers o trasero, de 9.830 mm de diámetro, donde se alojan las zapatas, que sirven para fijar

The TBMs of the Abdalajís tunnels consist of the following main parts:

- The cutting head with a diameter of 10 m, driven by means of 14 electric motors with a total installed power of 5 MW which, by means of frequency variations, permit control of the rotation and torque parameters. The cutting wheel contains 69 disc cutters of 17" replaceable from inside (Photo 5), 64 in the front part of the head arranged in a spiral and five located around the perimeter, permitting over-excavation of the advance section. Each cutter can withstand a maximum thrust of 27 t.
- The main or front shield, with a diameter of 9,930 mm, the upper part of which houses the auxiliary grippers or stabilisers, shield which supports the cutting head and its drive, this unit being the mobile part of the machine while it is working as a double shield.
- The telescopic shield, with a diameter of 9,830 mm, permitting relative movement between the shields, making it possible for the machine to work as a double shield.
- The grippers or rear shield, of diameter 9,830 mm, where the grippers are housed, which anchore the TBM against the ground, and the auxiliary cylinders, along with the segment erector which is provided with a vacuum system to pick up the segments.
- The main thrust consisting of 16 cylinders, which join the two shields, providing a maximum thrust of 17,088 KN with a maximum advance of 120 mm/m.

la TBM contra el terreno, y los cilindros auxiliares, así como el erector de dovelas que dispone un sistema de agarre de dovelas de ventosas de vacío.

- El empuje principal compuesto por 16 cilindros, que unen ambos escudos, proporcionando un empuje máximo de 17.088 kN con un avance máximo de 120 mm/m.
- El empuje auxiliar compuesto por 27 cilindros, situados en el escudo trasero, capaz de dar un empuje auxiliar ordinario de 117.000 kN y un empuje auxiliar excepcional de 152.500 kN, con un avance máximo de 100 mm/m.

Además de estos componentes, las tuneladoras están provistas de una serie de elementos e instalaciones auxiliares como:

- Sondeas de perforación de sondeos de reconocimientos inclinados y horizontales.
- Sistema para la ejecución de paraguas de micropilotes en avance en caso de que la calidad del terreno a excavar así lo requiera. Los paraguas pueden ejecutarse a través del escudo trasero con una inclinación de 18° y a través del delantero con una inclinación de 7°.
- Elementos de inyección de agua y espumas en el frente de excavación.
- Sistema de detección de gases compuesto por varios detectores distribuidos entre la TBM y el back-up. El sistema permite la parada automática de la máquina cuando se alcanzan los límites de concentración de gases previamente establecidos.

Unido a la tuneladora se encuentra el back-up, compuesto por una serie de plataformas ensambladas entre sí, que se desplazan arrastradas por la máquina sobre la dovela base. El back-up alberga todas las instalaciones auxiliares necesarias para el funcionamiento de la tuneladora que son:

- La cabina de mandos.
- Los transformadores eléctricos, los armarios de conexión y bobinas de cables.
- Los sistemas de ventilación, impulsión y extracción de aire.
- Los sistemas de relleno del trasdós de los anillos con gravilla y mortero de cemento; que incluyen depósitos y equipos de impulsión hidráulica de grava e inyección de mortero, lechada, bentonita y polímeros, etc.
- Las instalaciones de transporte del material excavado desde el frente de trabajo al exterior mediante cinta transportadora de 1,2 m de ancho, capaz de transportar 1500 t/h, a una velocidad máxima de 3,2 m/s.
- Las instalaciones de enfermería, comedor y WC.

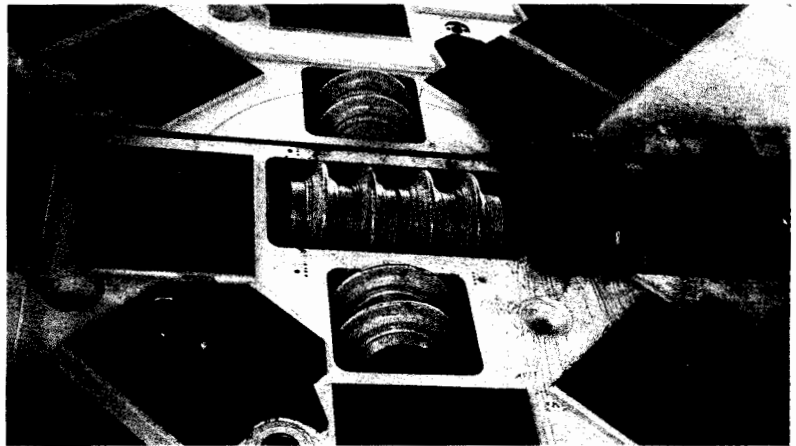


Foto 5. Detalle de un cortador de disco de la cabeza de corte.
Photo 5. Detail of a disc cutter of the cutting head.

- The auxiliary thrust consisting of 27 cylinders, located in the rear shield, capable of providing an ordinary auxiliary thrust of 117,000 kN and an exceptional auxiliary thrust of 152,500 kN, with a maximum advance of 100 mm/m.

In addition to these components, the TBMs are also provided with several auxiliary elements and installations such as:

- Angled and horizontal advance probes.
- System to build a pile cap in advance in case the ground quality requires it. There are two possibilities to make it: one via the rear shield with an inclination of 18° and another via the front one with an inclination of 7°.
- Elements water and foam injection at the excavation face.
- Gas detection system consisting of various sensors distributed along the TBM and the back-up. The system permits automatic stoppage of the machine when the previously established limits of gas concentration are reached.

Joined to the TBM is the back-up, consisting in several platforms assembled together, which are displaced, dragged along by the machine on the base segment. The back-up houses all the auxiliary facilities for the TBM, these being:

- The control cabin.
- The electrical transformers, connection boxes and cable reels.
- The ventilation and air impulse and extraction systems.
- The systems for filling the gap of the rings with fine gravel and cement mortar; including storage tanks and hydraulic impulse equipment for gravel and injection of mortar, grout, bentonite and polymers, etc.
- Facilities for transporting the excavated material from the work face to the outside by means of a conveyor belt of width 1.2 m, capable of transporting 1500 t/h, at a maximum speed of 3.2 m/s.
- Sick-bay, canteen and WC facilities.

La longitud total del conjunto escudo-back-up supera los 110 m.

El resumen de las principales características de las tuneladoras utilizadas en la construcción de los túneles de Abdalajís se recoge en la tabla 2.

The total length of the shield/back-up unit exceeds 110 m.

The summary of the main characteristics of the tunnellers used in the construction of the Abdalajís tunnels is contained in the following table 2.

Tabla 2

Datos generales	
Marca y Modelo	MHI-Robbins Serie 320 tipo doble escudo para roca dura
Potencia total instalada (Kw)	6.400
Diámetro (m)	10,00
Longitud de la TBM (m)	11,89
Peso del escudo (t)	1.300
Accionamiento	
Accionamiento de la cabeza corte y Nº de motores	Eléctrico mediante 14 motores de frecuencia variable
Empuje máximo soportado por el rodamiento (KN)	197.200 (Carga estática axial)
Vida útil del rodamiento (h)	15.000
Velocidad máxima de los motores (rpm)	2.065
Par motor a la máxima velocidad (KNm)	1.620 kNm
Rueda de Corte	
Herramientas de corte	64 Cortadores de disco + 5 cortadores adicionales para sobre-corte, todos de 17" de diámetro
Velocidad de rotación (rpm)	0-6
Par máximo	28.000 kNm
Potencia Instalada en la cabeza de corte	4.900 kw (14x350)
Escudos	
Numero de escudos	3
Diámetro escudo delantero (mm)	9.930
Diámetro escudo telescópico (mm)	9.830
Diámetro escudo de cola (mm)	9.830
Empuje principal	
Empuje máximo recomendado en la cabeza de corte funcionando (kN)	17.088 (64x267)
Nº de cilindros	16
Velocidad de extensión de propulsión máxima (mm/min.)	120
Empuje Auxiliar	
Nº de cilindros	27
Empuje Auxiliar Total (kN)	117.000
Empuje Auxiliar excepcional (kN)	152.500
Velocidad máxima de extensión con todos los cilindros (m/min.)	100
Grippers	
Presión de anclaje (Mpa)	3,3
Cinta transportadora de escombros	
Anchura (m)	1,2
Capacidad (t/h)	1.500
Velocidad máxima (m/s)	3,2

3. El Funcionamiento de la tuneladora

El funcionamiento de una tuneladora doble escudo permite realizar la excavación y el sostenimiento del túnel al abrigo de un escudo o coraza de acero de forma cilíndrica.

3. TBM operation

The operation of a double shield TBM enables the excavation and support of the tunnel to be carried out protected by a cylindrical shaped steel shield or covering.

Table 2

General data	
Brand and Model	MHI-Robbins Series 320 double shield type for hard rock
Total installed power (kW)	6,400
Diameter (m)	10.00
Length of the TBM (m)	11.89
Weight of the shield (t)	1,300
Drive	
Drive of the cutting head and N° of motors	Electric by means of 14 variable frequency motors
Maximum thrust borne by the bearing (kN)	197,200 (axial static load)
Useful life of the bearing (h)	15,000
Maximum speed of the motors (rpm)	2,065
Motor torque at max. speed (kNm)	1,620 kNm
Cutting Wheel	
Cutting tools	64 disc cutters + 5 additional cutters for over-cut, all of diameter 17"
Speed of rotation (rpm)	0-6
Maximum torque	28,000 kNm
Installed power in the cutting head	4,900 kW (14x350)
Shields	
Number of shields	3
Diameter of front shield (mm)	9,930
Diameter of telescopic shield (mm)	9,830
Diameter of tail shield (mm)	9,830
Main thrust	
Max. Recommended operating cutter head thrust (kN)	17,088 (64x267)
N° of cylinders	16
Maximum speed extension (mm/min.)	120
Auxiliary Thrust	
N° of cylinders	27
Total Auxiliary Thrust (kN)	117,000
Exceptional Auxiliary Thrust (kN)	152,500
Maximum speed extension with all cylinders (m/min.)	100
Grippers	
Anchoring pressure (Mpa)	3.3
Conveyor belt for rubble	
Width (m)	1.2
Capacity (t/h)	1,500
Maximum speed (m/s)	3.2

Esta coraza sirve de sostenimiento provisional del terreno hasta la colocación del revestimiento definitivo a base de anillos de dovelas de hormigón prefabricadas. Este sistema proporciona un elevado grado de seguridad para el personal que ha de trabajar en el frente de excavación ante posibles desprendimientos del terreno.

Las tuneladoras de Abdalajís montan 64 cortadores de disco de 17" ubicados sobre la rueda de corte y dispuestos sobre la misma en forma de espiral y 5 cortadores de sobre-corte ubicados en el perímetro. El empuje máximo por cortador es de unas 27 toneladas. Las huellas o surcos de excavación circulares están espaciados 8 cm entre sí.

La retirada del escombros producido se realiza a través de los cangilones situados en la periferia de la rueda de corte, que recogen el material y, por gravedad, lo descargan sobre la cinta de transporte cuyo inicio se sitúa en el eje de la rueda de corte.

Para facilitar la evacuación del material excavado y evitar la colmatación de los orificios de entrada de material de la cabeza de corte, se puede inyectar a través de los orificios de la cabeza especialmente dispuestos para ello, agua o espumas, dependiendo del tipo de material de que se trate.

Cuando los terrenos atravesados son capaces de resistir la presión que transmiten los grippers, la máquina trabaja como *doble escudo* y puede *simultanear la excavación, con el montaje de los anillos de dovelas en el escudo trasero*.

Al mismo tiempo que los cilindros de empuje principal impulsan hacia adelante el escudo de cabeza y la rueda de corte realiza la excavación, en el escudo trasero se procede al montaje de un nuevo anillo de sostenimiento al abrigo del mismo. Al poder simultanear las tareas de excavación y sostenimiento, se consiguen elevados rendimientos de avance, pues sólo se detiene momentáneamente cuando se ha excavado 1,5 m para realizar el avance el escudo trasero (regripping).

En la operación del regripping los grippers son retraídos al interior del escudo de cola y el escudo principal se ancla al terreno mediante los grippers auxiliares, mientras que con los cilindros auxiliares de empuje apoyándose en el último anillo colocado se impulsa el escudo trasero hacia delante, arrastrando con él al back-up. Finalizado este desplazamiento, los grippers son extraídos nuevamente del escudo trasero para anclar la máquina contra el terreno e iniciar un nuevo ciclo de excavación y colocación de dovelas. La operación de regripping es especialmente delicada ya que se ha de combinar perfectamente la retracción de los cilindros principales con la extensión de los cilindros auxiliares con el fin de no dañar ni mover el anillo recién colocado.

Para que la operación de regripping no se vea entorpecida por la acumulación de material suelto entre escudos, en el diseño de estas máquinas se adoptó para el escudo delantero un diámetro 100 mm superior al del teles-

This covering acts as a provisional support for the ground until the final lining (segment rings) is positioned. This system provides a high degree of safety for the personnel who have to work at the excavation face with regard to possible overbreaks of the ground.

The Abdalajís TBMS are fitted with 64 disc cutters of 17" in size located on the cutting wheel and arranged spirally around it, plus five over-cut cutters located around the perimeter. The maximum thrust per cutter is around 27 tons. The distance between two circular tracks is 8 cm.

The withdrawal of the spoil is done by means of the buckets located around the periphery of the cutting wheel, which gather the material and offload it by means of gravity onto the conveyor belt, which starts at the axis of the cutting wheel.

In order to facilitate the evacuation of the excavated material and prevent the blocking of holes for the entrance of material from the cutting head, water or foam, depending on the type of material under consideration, can be injected through the openings of the head specially provided for this.

When the ground being traversed is able to withstand the pressure transmitted by the grippers, the machine works as a double shield and it can carry out excavation simultaneously with the assembly of the segment rings in the rear shield.

As the main thrust cylinders push the front shield forward, and the cutting wheel carries out the excavation, in the rear shield a new support ring is being fitted under the protection of that shield at the same time. Since the excavation and support tasks can be performed simultaneously, high advance outputs can be achieved since the machine only stops momentarily when it has excavated 1.5 m in order to carry out the advance of the rear shield (regripping).

During the regripping operation the grippers are withdrawn inside the tail shield and the main shield is anchored to the ground by means of auxiliary grippers, while, with the auxiliary thrust cylinders being supported on the last ring that was positioned, the rear shield is driven forward, pulling the back-up along with it. Once this displacement is complete, the grippers are extracted from the rear shield again in order to anchor the machine to the ground and start a new cycle of excavation and positioning of segments. The regripping operation is especially delicate since the retraction of the main cylinders has to be combined perfectly with the extension of the auxiliary cylinders so not to damage or move the newly placed ring.

In order to avoid the accumulation of material between the shields during regripping operation, a diameter was adopted for the front shield of 100 mm greater than that of the telescopic and rear shield, in the design of these

cópico y del trasero. De esta forma, durante el regripping el escudo telescópico penetra en el delantero, haciendo éste último un barrido del material acumulado entre escudos, que es desplazando hacia atrás de la TBM sin interferir en la operación.

Si el terreno es más débil y no es capaz de resistir la presión ejercida por los grippers, la máquina debe funcionar entonces en modo de *escudo simple* y no es posible *simultaneizar la excavación con el montaje del anillo de dovelas*.

Entonces la reacción necesaria para que el empuje pueda transmitirse a la cabeza de corte se consigue mediante el apoyo de los cilindros auxiliares sobre el último anillo colocado. La reacción se transmite así de unos anillos a otros y de éstos, por rozamiento y bastante atenuada, al terreno.

El empuje auxiliar alcanza 12.000 toneladas gracias a los 27 cilindros auxiliares ubicados en la parte posterior del escudo de cola, pudiendo llegar, en casos excepcionales, hasta 15.000 toneladas. La velocidad máxima de avance es de 100 mm/min.

Estas máquinas permiten que, en modo de escudo simple, se realice el empuje con los hidráulicos principales o con los auxiliares, manteniendo fijos los que no se usan.

Para alcanzar los rendimientos deseados y aprovechar la máquina al máximo de sus capacidades, es necesario trabajar el mayor tiempo posible en modo de doble escudo.

Las máquinas son abastecidas mediante trenes que circulan por la vía simple provisional que se va montando desde el propio back-up según avanza. Dichos trenes se utilizan para el abastecimiento de dovelas, materiales de relleno del trasdós de los anillos y demás materiales, y para el transporte del personal. Como el túnel no tiene una longitud excesiva, sólo se monta vía simple, colocando apartaderos en varios puntos del interior para permitir el cruce de trenes, una vez rebasada una longitud mínima.

El escombros proveniente de la excavación es evacuado mediante una cinta transportadora de 1,2 m de ancho, capaz de transportar 1500 t/h a una velocidad máxima de 3,2 m/s. Cada túnel dispone de su propia cinta transportadora que extrae el material hasta la boca del túnel donde es vertido sobre una cinta transversal, común para ambos túneles, que lo conduce a un vertedero único.

En caso de avería de la cinta transversal, con el fin de no tener que detener la excavación de los túneles, existe para cada túnel la posibilidad de usar una cinta-bypass que deposita el material en una zona de vertido de la explanada, de donde se carga en camiones y se transporta al vertedero.

Revestimiento

Una vez excavada la sección del túnel, se coloca el revestimiento de anillos prefabricados formados por 7 dovelas

machines. This way, during regripping the telescopic shield penetrates into the front one, so that the latter sweeps the material accumulated between the shields, and is then displaced towards the rear of the TBM without interfering in the operation.

If the ground is weaker and not able to take the pressure exerted by the grippers, the machine then has to work as a single shield and it is not possible to carry out excavation simultaneously with the fitting of the segment ring.

In that case, for the thrust to be transmitted to the cutting head, the necessary reaction is achieved by means of the support of the auxiliary cylinders on the last ring placed. The reaction is thereby transmitted from one ring to another and, by means of friction and fairly attenuation, from that ring to the ground.

The auxiliary thrust reaches 12,000 tons due to the 27 auxiliary cylinders located in the rear part of the tail shield, and in exceptional cases it can reach as much as 15,000 tons. The maximum advance speed is 100 mm/min.

In single shield mode, these machines allow the thrust to be produced with the main hydraulic or with the auxiliaries, with those not being used sustaining permanence.

In order to achieve the desired outputs and to take advantage of the machine's capacities, it is necessary to work for as long as possible in the double shield mode.

The machines are supplied by means of trains circulating on the temporary single track, which is laid from the actual back up as it advances. These trains are used for supply segments, filling material for the gaps and other materials, and for the transportation of personnel. Since the tunnel is not excessive in length, only a single track is laid, with passing places being provided at various points of the interior in order to permit the crossing of trains once a minimum length has been exceeded.

The spoil coming from the excavation is evacuated by means of a conveyor belt 1.2 m width, capable to transport 1500 t/h at a maximum speed of 3.2 m/s. Each tunnel has its own conveyor belt which extracts materials as far as the entrance of the tunnel where it is emptied onto a transverse belt, shared by both tunnels, which takes it to a single dump.

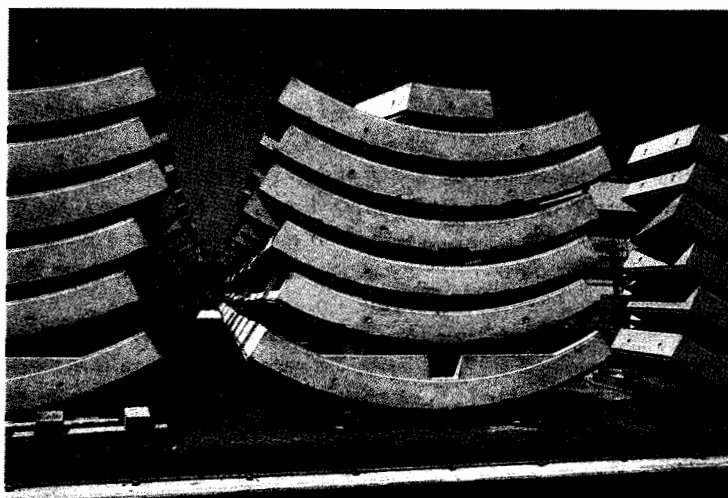
In case the transverse belt breaks down, and in order not to have to halt the excavation of the tunnels, the possibility of using a bypass belt, which deposits the material in a dumping zone of the yard, where it is loaded onto lorries and transported to the dump is available for each of the tunnels.

Lining

Once the section of tunnel has been excavated, the lining, consisting of prefabricated rings formed of 7

de hormigón armado de 45 cm de espesor y 1,5 m de ancho (Foto 6).

Por su complejidad estructural y la variedad litológica de la Sierra del Valle de Abdalajís, se han proyectado diferentes secciones de revestimiento según las condiciones impuestas por el terreno atravesado a lo largo del trazado. Así, se dispone de cuatro tipos de dovelas con las características diferenciales que se recogen en la tabla 3.



reinforced concrete segments, 45 cm thick and 1.5 m wide is placed (Photo 6).

According to the structural complexity and the lithological variety of the Sierra del Valle de Abdalajís, different cross-sections of lining have been designed depending on the conditions imposed by the ground during the course of the route. Therefore, there are four types of segments with the different characteristics contained in the table 3.

Tabla 3

DOVELAS	HORMIGÓN	ACERO
Dovela tipo A	HA-40	60 kg/m ³
Dovela tipo B	HA-40	85 kg/m ³
Dovela tipo C	HA-60-SR	120 kg/m ³
Dovela tipo H	HA-80-SR	190 kg/m ³ + 30 kg/m ³ de fibra de acero

Foto 6. Anillo compuesto por 7 dovelas en la zona de acopio de la explanada sur. Photo 6. Ring composed of 7 segments in the stockpiling area of the south site.

Table 3

SEGMENTS	CONCRETE	STEEL
type A	HA-40	60 kg/m ³
type B	HA-40	85 kg/m ³
type C	HA-60-SR	120 kg/m ³
type H	HA-80-SR	190 kg/m ³ + 30 kg/m ³ of steel fibre

Para permitir adaptar la forma de los anillos a la excavación y planta del túnel, las dovelas son de conicidad alternativa "a derecha" y "a izquierda". Las dovelas llevan a lo largo del borde una junta de goma para proporcionar estanqueidad entre dovelas y entre anillos.

El montaje del anillo se realiza con la ayuda del erector de dovelas situado en el escudo de cola. El erector sujeta las dovelas mediante el vacío creado por una ventosa sobre la cara interior de las mismas (Foto 7). Una vez en la posi-

In order to permit the shape of the rings to be adapted to the excavation and to the lot plan of the tunnel, the segments have a "right" and "left" alternating conicity. The segments have a rubber joint running around their rim in order to provide a watertight seal between the segments and between the rings.

The assembly of the ring is done with the aid of the erector located in the tail shield. The erector secures the segments by means of a vacuum created by a suctioning on the interior face of them (Photo 7). Once in the correct

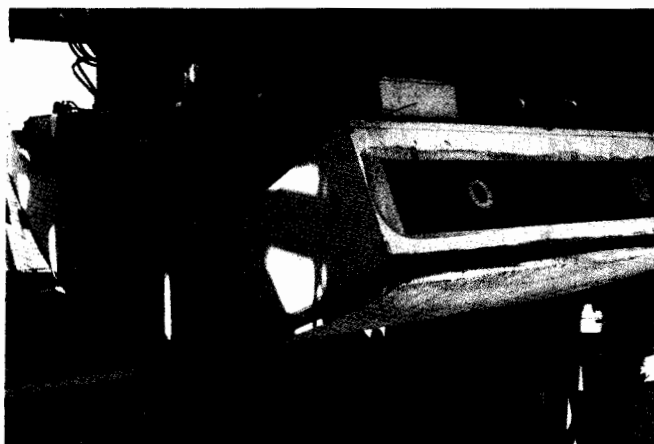


Foto 7. Erector sujetando una dovela. Photo 7. Erector placing a segment.

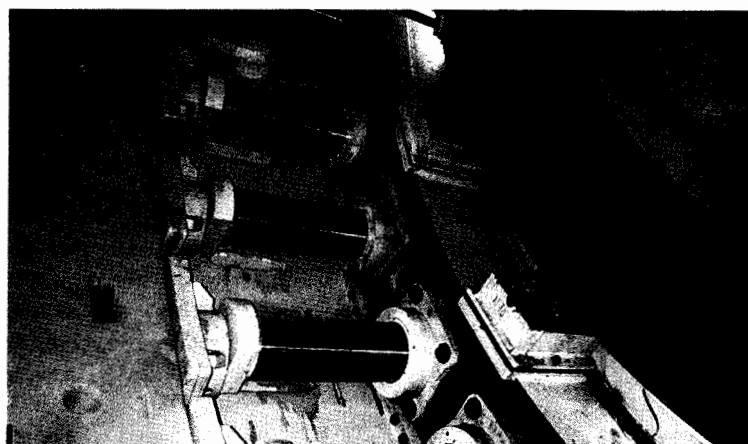


Foto 8. Gatos auxiliares sujetando una dovela colocada contra el anillo anterior hasta que se coloque el resto de dovelas y se complete el anillo/Photo 8. Auxiliary jacks securing a segment located against the previous ring until the rest of the segment are placed and the ring is completed.

ción correcta, la dovela se mantiene en su posición con la ayuda del empuje de los cilindros auxiliares contra el anillo anterior hasta que se conforma el anillo completo (Foto 8). Las dovelas se unen entre sí mediante tornillos. Los anillos a su vez se fijan entre sí con conectores que ayudan al centrado de las dovelas y facilitan considerablemente su correcta colocación.

La primera dovela colocada por el erector de la tuneladora es la dovela-base, diferenciada del resto porque cuenta con una plataforma provisional para facilitar el desplazamiento del back-up de la máquina y con una cuneta central de desagüe. A continuación, y a cada lado de la dovela base, se colocan tres dovelas tipo. Por último, se colocan dos dovelas-contraclave, adyacentes a la clave, y la propia dovela-clave, que es la última dovela en ser colocada y cuya misión es conseguir el ensamblaje correcto del anillo.

Al avanzar la tuneladora, los anillos van saliendo de la misma dejando un hueco anular entre el trasdós del anillo y el terreno excavado que ha de ser rellenado mediante inyección de gravilla o de mortero. El hueco anular entre el terreno y el anillo correspondiente a los 90° inferiores se inyecta de inmediato con mortero seco para apoyar el anillo al salir del escudo. Posteriormente, el resto se rellena en dos fases, una primera con gravilla y una segunda con inyección de lechada de cemento para rellenar los huecos de la gravilla.

4. Galerías transversales de conexión

Como se ha dicho, ambos tubos estarán conectados mediante 19 galerías transversales que permitirán la evacuación de un túnel a otro en caso de emergencia o avería dentro de uno de ellos. Se ha fijado una distancia entre galerías consecutivas de 350 ± 50 m, tratando de aprovechar las mejores condiciones geológicas para su ejecución. Su construcción se acomete desde ambos túneles, correspondiendo a cada uno la mitad de cada galería de conexión. La suma total de las galerías trasversales supone una longitud de excavación superior a 500 m.

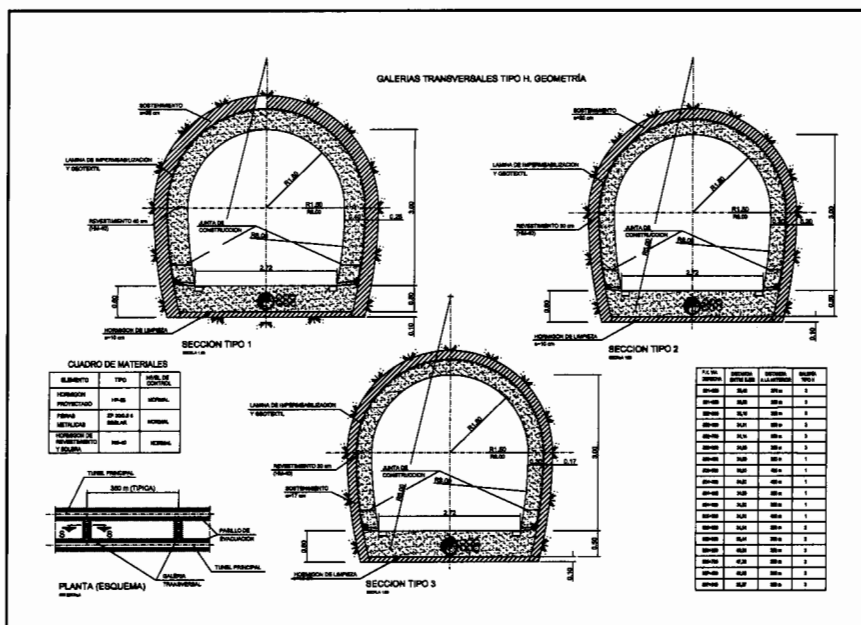


Fig. 4. Secciones tipo de las galerías de conexión dependiendo del tipo de terreno en que se ejecutan.
Fig. 4. Standard sections of the crossing passages depending on the type of ground.

position, the segment is maintained in its position with the aid of the thrust from the auxiliary cylinders against the previous ring until the complete ring is shaped (Photo 8). The segments are joined together with screws. The rings are in turn fixed together with connectors, which help in the centering of the segments and facilitate their correct location considerably.

The first segment placed by the erector of the TBM is the base segment, which is differentiated from the others because it has a temporary platform in order to facilitate the displacement of the back-up and because it has a central drainage channel. Next, three standard segments are placed on each side of the base segment. Finally, two segments are placed adjacent to the keystone, and then the keystone itself, which is the last segment to be placed with the purpose to achieve the correct assemblage of the ring.

As the TBM advances, the ring leaves the rear shield leaving an annular gap between the back of the ring and the excavated ground which has to be filled by means of injecting fine gravel or mortar. The annular gap between the ground and the ring corresponding to the lowest 90° is immediately injected with dry mortar in order to support the ring as it exits from the shield. Later on, the rest is filled in two phases, a first fill with fine gravel and a second with injection of cement grout in order to fill the gaps inside the gravel.

4. Crossing passages

As it has been said, the two tubes are connected by means of 19 transverse galleries, which would permit the evacuation of one tunnel to the other in the event of emergency or breakdown in one of them. A distance between consecutive galleries of 350 ± 50 m has been set, aiming to assure the best geological conditions for their execution. The construction starts from both tunnels, with half of each connection gallery corresponding to each tunnel. The total length of transverse galleries implies an excavation length of over 500 m.

Estas galerías transversales serán de sección en herradura, con una altura de 3 m y 2,7 m de ancho. En función de los empujes del terreno, se distinguen tres tipos de galerías con diferentes sostenimientos. La zona más delicada es el entronque con los túneles principales, donde es necesario colocar un anillo de refuerzo. Antes de la ejecución de cada galería, se coloca una estructura que asegure los anillos a perforar y evite la desestabilización de la sección.

Las galerías se ejecutarán mediante métodos convencionales por lo que es relativamente sencillo modificar el sostenimiento o el espesor del revestimiento definitivo, si el material atravesado fuera diferente al reflejado en proyecto. La excavación se realizará mediante martillo neumático manual o montado sobre brazo excavador.

El sostenimiento se realizará mediante bulones, cerchas y hormigón proyectado. Los bulones serán de unos 3 m de longitud, con barras de 25 mm, con 5 unidades por sección y separaciones entre 1,5 y 2 m. Las cerchas serán TH-21 con separaciones entre 1 y 1,5 m. El hormigón proyectado se coloca en dos capas, la primera de 5 cm de espesor y la segunda de 7 ó 10 cm, según sea el material donde se sitúa la galería.

El revestimiento se hará con anillos de hormigón en masa HM-25 con un espesor de 30 cm.

5. Instalaciones auxiliares

Explanada

Para la implantación de las instalaciones y los equipos auxiliares en la boca sur del túnel se ha realizado una explanada horizontal de servicios de 81.018 m², donde además se sitúa el parque del acopio de dovelas para el revestimiento del túnel, con una capacidad total de acopio aproximada para ambos túneles de 1.000 anillos. (foto 9).

Energía eléctrica

Para el abastecimiento de energía eléctrica al túnel se ha construido una subestación con una potencia de 22 MW que se abastece mediante una nueva línea de 66 KV de 1.400 m de longitud. Para la alimentación a las máquinas la energía se transforma a 22 KV, realizando el transporte a esta tensión entre subestación y back-up de la máquina donde se realiza una segunda transformación al voltaje requerido por cada equipo.

Se dispone, como medida adicional de seguridad, de un sistema de grupos electrógenos en el exterior de cada túnel con autonomía suficiente para mantener la corriente de los sistemas de emergencia en caso de corte del suministro eléctrico. Se consideran sistemas de emergencia: la iluminación a lo largo del túnel y en la máquina y su back-up, los

These transverse galleries are going to have a horseshoe-shaped section, 3m high and 2,7 wide. According to the different loads of the ground along the tunnel, there are three different types of passages where the support is different. The most delicate zone is the junction with the main tunnels, where a reinforcement ring needs to be placed. Before executing each gallery, a structure is placed securing the rings to be drilled and preventing any destabilisation of the section.

The galleries will be executed by conventional methods. Therefore, it is relatively simple to modify the support or the thickness of the final lining if the material being traversed turns out to be different from that shown in the designs. The excavation will be done by means of pneumatic hammer either manually or mounted on an excavator arm.

The support will be done by means of anchorages, trusses and shotcrete. The pins will be 3 m long, bars of 25 mm, 5 units per section with a distance between 1.5 and 2 m. The trusses will be TH-21 with separations of between 1 and 1.5 m. The shotcrete will be laid in two layers, the first with a thickness of 5 cm and the second of 7 or 10 cm, depending on the material where the gallery is located.

The lining will be done with rings of HM-25 mass concrete with a thickness of 30 cm.

5. Auxiliary installations

South entrance

In order to establish the facilities and auxiliary equipment in the south site of the tunnel, an area of 81,018 m² has been prepared where the segments stock for the tunnel lining is also located; the approximate total stockpiling capacity for both tunnels is 1,000 rings (photo 9).

Electricity

For the supply of electricity to the tunnel a substation has been constructed with a power of 22 MW, which is fed by means of a new 66 kV line 1,400 m long. In order to give energy to the TBMs, the electricity is transformed to 22 kV, with the transportation being carried out at this voltage between the substation and back-up for the machine, where a second transformation is carried out to the voltage required by each piece of equipment.

As an additional safety measure, a system of electrical generators is provided outside each tunnel with sufficient autonomy for keeping the emergency systems running in the event of a power cut. The emergency systems are considered to be: lighting along the length of the tunnel and in the machine and its back-up, the fans installed in



Foto 9. Vista general de la explanada sur de instalaciones del Túnel de Abdalajís.
Photo 9: General view of south installations of Abdalajís Tunnel.

ventiladores instalados en el frente y la comunicación telefónica con el exterior.

Sistema de ventilación del túnel

Durante la excavación se mantiene constantemente ventilado el frente mediante la impulsión de aire que aporta un ventilador por cada túnel situado en la boca del mismo. El transporte del aire al frente se realiza mediante una tubería flexible de 2.500 mm de diámetro. Una vez en el back-up, el aire se reimpulsa y se distribuye llegando hasta el frente de excavación.

También se dispone de un sistema de aspiración de aire desde el frente hasta el final del back-up, punto donde este aire es arrastrado por la corriente de retorno hacia el exterior del túnel. La corriente de retorno en los túneles se mantiene siempre con una velocidad superior a 0,5 m/s. Se realiza un control periódico de esta velocidad para regular la potencia de los ventiladores exteriores según se vaya necesitando mayor potencia a medida que avanza la excavación del túnel.

Abastecimiento de agua

Para el abastecimiento de agua a las instalaciones del túnel se ha construido una impulsión de agua de 250 mm de diámetro y 2.800 m de longitud desde el río Guadalhorce, hasta un depósito situado en la boca de los túneles desde donde se abastece cada túnel mediante la correspondiente red de tuberías. La capacidad de dicho depósito es de 1.700 m³.

Vertedero

Para el vertido del material excavado del túnel se ha previsto un volumen total de vertedero de unos 2.000.000 m³ de tierras en una superficie ocupada de 108.713,33 m² y una altura máxima de proyecto de 40 m.

the back-up and telephonic communication with the outside.

Ventilation system for the tunnel

During the excavation, the face is constantly kept ventilated by means of a fan located at the entrance, which gives fresh air for each tunnel, located at the entrance of it. The transport of the air to the TBM is done with a flexible pipe of a 2,500 mm diameter. Once in the back-up, the air is forced through again and distributed so that reaches the excavation face.

There is also an air suction system from the face to the end of the back-up, at which point the air is dragged along by the return current as far as the outside of the tunnel. The return current in the tunnels is kept at all times at a speed greater 0.5 m/s. This speed is periodically checked in order to adjust the power of the fans due to the need for greater power as the excavation of the tunnel progresses.

Water supply

For the tunnel installations water supply, a water pumping system of 250 mm diameter and length 2,800 m has been provided, running from the river Guadalhorce to a storage tank located at the site, by means of the corresponding system of pipes. The capacity of the tank is 1,700 m³.

Dump

In order to dump the material excavated from the tunnel, a total dumping volume of approximately 2,000,000 m³ of soil has been planned on an occupied surface area of 108,713.33 m² with a maximum design height of 40 m.

Para el acondicionamiento de la superficie de apoyo se ha preparado el terreno realizando el desbroce y la retirada de tierra vegetal. Así mismo, se han realizado zanjas drenantes en las barranqueras existente para el drenaje de los contactos.

Durante la fase de explotación del vertedero se ha previsto la captación de las aguas superficiales de escorrentía mediante la ejecución de cunetas perimetrales que no permitan la escorrentía superficial sobre las zonas desbrozadas. Como medida excepcional se ha realizado una barrera permeable de escollera al pie del vertedero que evite el acarreo de material por debajo de la cota de ocupación.

Cinta de transporte del material excavado al vertedero

Para el transporte de material a vertedero se estudió, inicialmente, la posibilidad del empleo de camiones, pero debido a la cercanía del vertedero y al elevado número de tránsitos necesarios, se decidió la instalación de una cinta transportadora común para ambos tubos, que discurre transversalmente al eje del túnel, desde la explanada sur hasta el vertedero, tras salvar un pequeño cerro. Esta cinta recoge el material excavado procedente del vertido de las cintas de cada máquina, de capacidad de 1.500 t/h por cinta, y lo transporta a vertedero con velocidades de entre 0 y 3 m/s. Su diseño es de tipo convencional sobre rodillos, con una longitud de 503 m y una capacidad de 2.800 t/h. Sus características principales son:

- Anchura de la banda: 1.219 mm, Velocidad: 183 m/min.
- Accionamiento: 2 x 366 kW.
- Cinta extra para tensionado: 8 m. Rodillos de avance: 127 mm de diámetro, con 35° para formación de caja, espaciados 1,5 m. Rodillos de retorno: 127 mm de diámetro, espaciados 3 m.

La descarga de la cinta se realiza mediante una cinta re-partidora con 90° de giro e inclinación de 15°, que permite una altura de vertido de 15 m, permitiendo así una capacidad de vertido de 20.400 m³ que corresponden a un avance estimado de 189 metros de túnel (volumen de tierras desde el nivel del terreno a la cota de la cinta).

Plantas de prefabricación de anillos

Las plantas de prefabricado de las dovelas de los anillos de revestimiento son de diseño de CBE, con un túnel de curado de 3 líneas y 6 juegos de moldes que permiten una producción óptima estimada de 20 anillos/día. Para adaptar la construcción de anillos a la excavación del túnel, los moldes se han dividido en 3 con conicidad a derechas y 3

In order to condition the support surface, the ground has been prepared by clearing away vegetation and removing the topsoil. Drainage ditches running into the existing ravines have also been created for drainage of the contacts.

During the operating phase of the dump, capturing surface runoff waters has been planned, by means of creating perimeter ditches so that the surface runoff does not flow over the areas that have been cleared. As an exceptional measure, a permeable barrier of rockfill has been created at the foot of the dump to prevent the transport of material beneath the occupancy level.

Conveyor belt for transport of excavated material to dump

For the transport of material to be dumped, the possibility of using lorries was initially studied, but due to the closeness of the dump and the large number of trips that would be needed, the decision was to install a common conveyor belt for both tubes, which would run transversely to the axis of the tunnel, from the south site to the dump, after crossing a small hill. This belt gathers the excavated material tipped onto it from the belts for each machine, with a capacity of 1,500 t/h per belt, and transports it to dump at a speed between 0 and 3 m/s. It's a conventional type design on rollers, with a length of 503 m and a capacity of 2,800 t/h. Its main characteristics are:

- Width of the band: 1,219 mm, Speed: 183 m/min.
- Drive: 2 x 366 kW.
- Extra belt for tensioning: 8 m. Advance rollers: 127 mm in diameter, with 35° for formation of box, spacing 1.5 m. Return rollers: 127 mm in diameter, spacing 3 m.

The belt discharge is achieved by means of a distributor belt with 90° turn and inclination of 15°, which permits a tipping height of 15 m, thereby giving a tipping capacity of 20,400 m³ which correspond to an estimate advance of 189 meters of tunnel (soil volume from ground level to the level of the belt).

Segments factory

The factories for prefabrication of lining rings are a CBE design, with a cured tunnel of 3 lines and 6 sets of moulds permitting an estimated optimum production of 20 rings/day. In order to adapt the construction of the rigs to the excavation of the tunnel, the moulds have been divided into three with right conicity and three with left conicity, permitting change of one of these latter to the right.

a izquierdas, permitiendo el cambio de uno de estos últimos a derechas.

Los conjuntos de armadura correspondientes a cada dovela se construyen empleando mallas electrosoldadas lo que permite una mayor producción y las separaciones adecuadas entre barras. Para asegurar el recubrimiento de la armadura se ha recurrido al empleo de separadores de hormigón en vez de los de plástico convencionales, ya que éstos se deforman perdiendo el recubrimiento mínimo durante el enérgico vibrado a que se somete el molde.

El hormigón de los anillos se ha diseñado con conos de 2, aunque su margen se establece entre 1 y 5. Una vez hormigonada cada dovela y fratasado su trasdós, se mantienen durante 5 horas en el túnel de curado a 50 °C y humedad relativa superior al 70%. Transcurrido dicho tiempo, el hormigón ha adquirido la resistencia mínima necesaria de 100 kg/cm² pudiendo proceder al desencofrado.

La resistencia característica se alcanza a los 7 días de fabricación, pese a lo cual no se transportan a obra hasta los 28 días, para evitar en lo posible daños debidos a la manipulación y/o el transporte. Debido al peso de los anillos (50 toneladas), el transporte de cada anillo se realiza en dos bateas. Finalmente, se almacenan en la campa de acopio de la explanada sur hasta el momento de su colocación.

Las fábricas de dovelas se han instalado en puntos distantes del emboquille sur. El túnel Este ha instalado la fábrica en Algeciras (Cádiz) a 210 km del túnel y el túnel Oeste en Pizarra (Málaga) a 20 km de la boca.

7. Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren expresar su agradecimiento a D. Felipe Mendaña por su colaboración en la realización de los trabajos que aquí se describen, así como al personal técnico de las empresas que realizan las obras. ♦



Foto 10. Molde de fabricación de una de las dovelas.
Photo 10. Manufacturing moulds for one of the segments.

The reinforcements for each segment are constructed using electrowelded mesh, which permits greater production and the proper separations between bars. In order to ensure the coverage of the reinforcement, the use of concrete separators are used instead of the conventional plastic ones, since the latter become deformed and lose the minimum coverage during the process of vibration that the mould is subjected to.

The concrete for the rings has been

designed with cones of 2, though the margin established is 1 to 5. Once each segment has been concreted and its back has been finished, it is kept in the curing tunnel for 5 hours at 50 °C with a relative humidity greater than 70%. After that time, the concrete has acquired the minimum strength of 100 kg/cm², which needs to be stripped.

The characteristic strength is reached seven days after manufacturing. Despite this, it is not transported to the site for 28 days, to prevent any possible damage that could occur due to handling and/or the transport. Due to the weight of the rings (50 tons), each ring is transported on two flatcars. Finally, they are stored in the stockpiling area of the south site until the moment of their positioning.

The factories for the segments have been set up lengthy distances from the south tunnel. The East tunnel has set up its factory in Algeciras (Cádiz), 210 km from the tunnel, and the West tunnel is in Pizarra (Málaga), 20 km from the mouth. ♦

Referencias:

- de la Fuente, J.M. y Gil, J. (2003): "Túnel de Abdalajís en la LAV Córdoba-Málaga". INGEOPRES, Nº 121. Noviembre 2003.
- "Nuevo acceso ferroviario Córdoba-Málaga". INGEOPRES, Nº 115. Mayo 2003.
- Ministerio de Fomento (2001): "Proyecto de construcción de plataforma. Línea Ferroviaria de Alta Velocidad entre Córdoba y Málaga. Tramo Gobantes-Túnel de Abdalajís Este (TT.MM.: Antequera y Álora)".
- Ministerio de Fomento (2001): "Proyecto de construcción de plataforma. Línea Ferroviaria de Alta Velocidad entre Córdoba y Málaga. Tramo Gabantes-Túnel de Abdalajís Oeste (TT.MM.: Antequera y Álora)".