

PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE GUADARRAMA

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE GUADARRAMA TUNNEL

JOSÉ ANTONIO COBREROS ARANGUREN. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de Área de Construcción NORTE-NOROESTE del GIF y Director del Proyecto.

FELIPE MENDAÑA SAAVEDRA. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Asesor del GIF para túneles.

MANUEL MORENO CERVERA. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Gerente del GIF para los tramos Soto del Real-Valladolid.

RESUMEN: Se describen los antecedentes de este Proyecto, hasta la solución adoptada de un túnel de base de 28,4 km, a través de la Sierra de Guadarrama. El diseño comprende dos tubos independientes, de un diámetro interior de 8,50 m, separados 30 m entre centros, con galerías de conexión. Las formaciones que atraviesa el trazado son rocas ígneas y metamórficas, en las que predominan los neises (62 %) seguidos de los granitos (23 %), con diversos problemas estructurales debidos al tectonismo de la zona. La construcción se hará con 4 máquinas tuneladoras tipo "doble escudo", cuyo montaje se acaba de iniciar, esperando que la excavación del túnel principal se termine en el 2005.

PALABRAS CLAVE: ALTA VELOCIDAD, ACCESO FERROVIARIO NORTE Y NOROESTE DE ESPAÑA, TÚNEL DE BASE, TUNELADORA DE DOBLE ESCUDO, ROCA DURA, SIERRA DE GUADARRAMA

ABSTRACT: The article describes the background of this tunnel right up to the adopted solution of a 28.4 km base tunnel under the Sierra de Guadarrama. The design consists of two independent tubes with an 8.50 m internal diameter, spaced 30 m between centrelines and with cross passages. The tunnels pass through igneous and metamorphic rock formations, predominantly formed by gneiss (62%) and granites (23%) and entail numerous structural problems due to the tectonics of the area. The tunnels will be bored by 4 "double shield" tunnelling machines and the assembly of the TBMs has recently been started and the main tunnel is now expected to be completed in 2005.

KEYWORDS: HIGH SPEED, RAILWAY LINK TO THE NORTH AND NORTHWEST OF SPAIN, BASE TUNNEL, DOUBLE SHIELD TBM, HARD ROCK, SIERRA DE GUADARRAMA

1. ANTECEDENTES

El túnel de Guadarrama constituye la pieza fundamental de la nueva línea ferroviaria de alta velocidad, denominada "NUEVO ACCESO FERROVIARIO AL NORTE Y NOROESTE DE ESPAÑA MADRID-SEGOVIA-VALLADOLID/MEDINA DEL CAMPO", una de las ramas principales de la Red básica de Alta Velocidad española, que viene construyendo el Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF), Organismo del Ministerio de Fomento español. (Figura 1.1).

El Nuevo Acceso Ferroviario al Norte y Noroeste de España se encuentra incluido en el Programa de Alta Velocidad del Plan de Infraestructuras 2000-2007, dentro de las

1. BACKGROUND

The Guadarrama tunnel serves as an essential part of the new high speed railway line referred to as the "NEW RAILWAY LINK FROM MADRID TO THE NORTH AND NORTHWEST OF SPAIN, VIA SEGOVIA-VALLADOLID/MEDINA DEL CAMPO". This link being one of the main branches on the Spanish high-speed railway network being constructed under the auspices of the Railway Infrastructure Board (GIF) pertaining to the Spanish Ministry of Public Works (Fig. 1.1.).

The new railway link to the North and Northwest of Spain is included within the rail works established in the

actuaciones estructurantes correspondientes al ferrocarril. Ya en 1994 por la entonces Dirección General de Infraestructuras del Transporte Ferroviario, fue remitida a la Dirección General de Política Ambiental una "Memoria Resumen de Impacto Ambiental", en la que se planteaban una serie de corredores para esta variante ferroviaria.

En 1997 el Ministerio de Fomento finalizó el Estudio Informativo del denominado PROYECTO DEL NUEVO ACCESO FERROVIARIO AL NORTE-NOROESTE DE ESPAÑA, cuyo objetivo era establecer una conexión ferroviaria con velocidad nominal de 200 km/h entre Madrid y Valladolid-Medina del Campo actuación prevista en el Plan de Infraestructuras.

En Diciembre de 1997 el Ministerio sometió a Información Pública el citado Estudio Informativo y, como consecuencia de las alegaciones presentadas, se vio la conveniencia de desarrollar nuevas soluciones que diesen satisfacción a aquellas. En concreto, para el tramo Madrid-Segovia se consideró necesario estudiar con detalle la alternativa, ya contemplada antes entre las variantes desechadas del Estudio Informativo, de una conexión directa Madrid-Segovia con un gran túnel de base, a través de la Sierra de Guadarrama.

A tal fin, se desarrollaron varios estudios de viabilidad del trazado citado, añadiendo la utilización del corredor de la línea férrea existente entre Segovia y Valladolid para la continuación del trazado.

Por acuerdo del Consejo de Ministros del 18 de Septiembre de 1998 se encomendó la construcción de esta nueva infraestructura al Ente Público Empresarial Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF), dependiente del Ministerio de Fomento y, en cumplimiento de dicho acuerdo, y con el fin de acortar al máximo los plazos de construcción, en Octubre de 1998, el GIF convocó un Concurso de Proyecto y Obra, con admisión previa, denominado "NUEVO ACCESO FERROVIARIO AL NORTE Y NOROESTE DE ESPAÑA. TRAMO SOTO DEL REAL-SEGOVIA. INFRAESTRUCTURA Y VIA", primera de las actuaciones de la futura Línea, cuyo trazado se iniciaba en las inmediaciones de Soto del Real (MADRID) y continuaba hasta Segovia, incluyendo desde Segovia un ramal hacia Medina-Valladolid, por el trazado de la línea férrea existente.

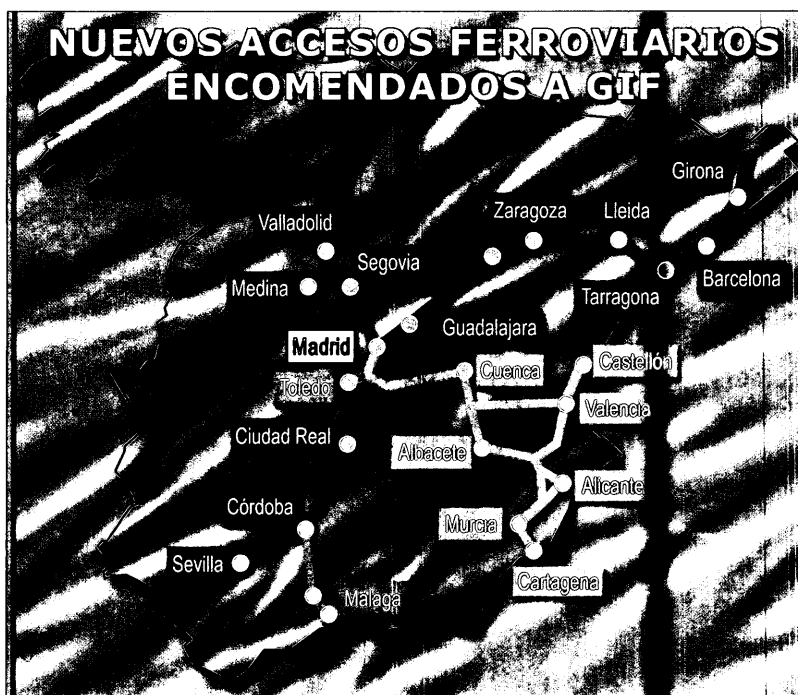


Figura 1.1.
Figure 1.1.

2000 - 2007 General Infrastructure Plan (P.D.I.). In 1994, Department of Railway Infrastructure issued a "Summary Draft Environmental Impact Report" to the Department for the Environment, in which they considered a number of prospective corridors for this railway link.

In 1997, the Ministry of Public Works completed their Informative Study on the "New Railway Link To The North And Northwest Of Spain", which aimed to establish a railway link with a nominal speed of 200 kph between Madrid and Valladolid/Medina del Campo in accordance

with the dictates of the 1993-2007 General Infrastructure Plan.

In December 1997 the ministry remitted the said Informative Study to the Public Information Office and as a result of subsequent opposition it was deemed necessary to seek new alternatives to satisfy these demands. With regards to the Madrid-Segovia section it was considered necessary to make a detailed study of an alternative route, from among those previously rejected in the Informative Study, for a direct line between Madrid and Segovia with a large tunnel cutting through the Sierra de Guadarrama.

Various feasibility studies were then carried out with regards to the said route, along with studies into the possibility of continuing the line through the existing railway corridor between Segovia and Valladolid.

On 18 September 1998 the Cabinet entrusted the construction of this new infrastructure to the Railway Infrastructure Board (GIF) pertaining to the Spanish Ministry of Public Works., and in compliance with which, and in order to reduce the construction period to a minimum, the Railway Infrastructure Board put the first section of the work out to selected tender. This first stage of the link, indicated as the "NEW RAILWAY LINK TO THE NORTH AND NORTHWEST OF SPAIN. SOTO DEL REAL-SEGOVIA SECTION. INFRASTRUCTURE AND TRACK", would run from Soto del Real (Madrid) to Segovia and include the branch from Segovia to Medina-Valladolid along the existing rail corridor.

El PLIEGO del Concurso, marcaba un amplio corredor de una anchura de 2 kms, a lo largo de una alineación de Soto del Real a Segovia, con ligera convexidad hacia el Este, para situar las alternativas de los proyectos a presentar al Concurso.

El Concurso obligaba a analizar, al menos, tres alternativas para el trazado del túnel, con el fin de poder darle tramitación independiente, y a proyectar una estructura bitubo (vía única en cada tubo), con galerías de conexión cada 500 m como máximo, para los túneles de más de 20 km. Estableció, además, unas Condiciones Técnicas detalladas, destacando, entre otras: a) los condicionantes geotécnicos del terreno; b) los relativos a las características resistentes de las estructuras del revestimiento y otras; c) los aerodinámicos y otros de explotación para una velocidad nominal de 350 Km/h; d) los correspondientes a las medidas de seguridad a adoptar, entre las cuales se incluyó el análisis de riesgo en el interior de los túneles, tanto en operación normal como en caso de emergencia, etc.

Finalmente, en el Pliego se incluían los criterios objetivos que se seguirían para valorar, por una parte, los aspectos usuales de la oferta de cada licitador (Solvencia económica y financiera, Solvencia técnica y Adecuación del Cronograma a las exigencias del Concurso) y, por otra, los aspectos concretos de su/s proyecto/s y oferta/s (Calidad y Adecuación; Medios materiales y humanos; Plazo; Memorias constructiva y Medioambiental; Programa de Obra y Aseguramiento de la Calidad).

2. EL PROYECTO DEL TÚNEL DE GUADARRAMA

2.1. Resolución del Concurso de Proyecto y Obra

El plazo concedido para el Concurso fue de 13 meses. A finales de Octubre de 1999 el GIF inició el análisis de las ofertas recibidas.

Todas ellas incluían soluciones bitubo, de más de 20 km de longitud, para la estructura principal, el Túnel de Guadarrama, propiamente dicho. La Obra se adjudicó dividiéndola en cinco lotes. Los Lotes 1 y 2 comprenden, respectivamente, la parte inicial de la plataforma del lado de Soto más los respectivos tramos de los dos tubos, desde la boca Sur hasta un punto intermedio. Los lotes 3 y 4 comprenden la parte final del Túnel de Guadarrama, es decir, el resto de dichos tubos, desde los puntos intermedios hasta las bocas Norte y el Lote 5, el resto del trazado desde las Bocas Norte, incluyendo el ramal inicial del tramo Segovia-Valladolid, que utiliza el trazado de la línea existente.

La adjudicación se hizo a las empresas siguientes: El Lote 1 a la UTE NECSO-DRAGADOS-TECSA; el Lote 2 a la UTE GUINOVAR-COMSA-SACYR-OBRASCON-HOCHTIEF; los Lotes 3 y 4 a la UTE FCC-ACS-FERROVIAL/AGROMAN y el Lote 5 a la UTE PLODER-DUMÉZ/GTM-AZVI.

In accordance with the specifications, the tender bids had to present alternatives for a broad 2 km wide corridor, with a slight easterly curve, for the entire Soto de Real to Segovia section.

The specifications required the analysis of at least three alternative tunnel alignments for a twin bore tunnel (with a single track in each) with connecting cross passages spaced no more than 500 m apart in tunnels over 20 km. Detailed technical conditions were established for: a) the geotechnical conditions of the ground; b) the strength conditions of the lining and other structures; c) the operational aerodynamics at a nominal speed of 350 kph and d) the safety measures to be adopted including the risk analysis inside the tunnel under both normal operating conditions and in the case of an emergency.

The specifications also included the objective criteria that would be employed to evaluate the tenders of each bidder. This ranging from standard aspects (such as the economic and financial solvency of the bidder, their technical capabilities and the suitability of the time schedule to the tender requirements) to other more specific aspects of their projects and tenders (Quality and suitability; material and human resources; time limits, construction and environmental reports; work schedule and quality assurance).

2. THE DESIGN OF THE GUADARRAMA TUNNEL

2.1. Awarding of contracts

The bidders were given 13 months in which to present their tenders and at the end of October 1999 the Railway Infrastructure board (GIF) started to analyze the bids received.

All of the tender bids included twin tube solutions of over 20 km long for the main Guadarrama tunnel structure. The work was awarded in five lots. Lots 1 and 2 corresponding to the initial section of the platform on the Soto side and the respective sections of the two tubes from the south mouth to an intermediate point. Lots 3 and 4 corresponded to the final section of the Guadarrama tunnel, this being the remaining sections from the mid-points to the north mouth, while Lot 5 referred to the remaining section from the north mouths and including the initial branch of the Segovia-Valladolid link using the alignment of the existing track.

The work was awarded to the following joint-ventures: Lot 1 to the NECSO- DRAGADOS-TECSA; Lot 2 to GUINOVAR- COMSA - SACYR - OBRASCON -HOCHTIEF; Lots 3 and 4 to FCC-ACS -FERROVIAL/AGROMAN and Lot 5 to PLODER-DUMÉZ/GTM-AZVI.

2.2. El Proyecto de construcción

El sistema de Concurso adoptado por el GIF propició la deseable diversidad de enfoques técnico-económicos y medioambientales que, dentro de la calidad técnica de todos los grupos admitidos al Concurso, permitió disponer de un amplio abanico de soluciones para la decisión final. Los estudios al respecto precisaron buena parte del año 2000.

La adjudicación tuvo en cuenta las mejores opciones del trazado, que dentro de condicionantes geotécnicos admisibles, respondían de la mejor manera a las exigencias medioambientales de una zona difícil, no sólo por la proximidad de núcleos urbanos importantes a los extremos de la obra, sino también, y fundamentalmente, por el carácter de zona protegida de la mayoría de la Sierra de Guadarrama, carácter que complicó muy sensiblemente los trabajos de reconocimiento efectuados para el estudio de las diversas opciones de trazado.

Por otra parte, ya se comprende que, siendo varios, aunque muy próximos, los trazados propuestos, hubo que definir con toda precisión el seleccionado para el Proyecto de Construcción que hubo que ajustar al trazado definido por la aprobación definitiva del Estudio Informativo y las prescripciones de la Declaración de Impacto Ambiental, instrumentos que se promulgan respectivamente con fechas 16 de mayo y 15 de marzo de 2001 (Figura 2.1).

Concluida la redacción de los correspondientes Proyectos Constructivos, con fecha 31 de octubre de 2001 se produce la aprobación de los mismos por la Secretaría de Estado de Infraestructuras del Ministerio de Fomento, dándose comienzo con fecha 12 de febrero de 2002 a las obras, cuyas características generales se resumen seguidamente.

2.2.1.- Los terrenos atravesados por el túnel.

Los terrenos de cualquiera de los trazados posibles, dentro del pasillo definido entre Soto del Real y Segovia, son rocas ígneas y metamórficas, predominando netamente los neis (60 % - 65 %), seguidos de los granitos (20 % - 25 %) y microgranitos (3 % - 4 %), con una presencia significativa de diques (7% - 9 %) y zonas de fuerte fracturación o fallas importantes (4 % - 6%).

Es decir, por lo que se refiere a la competencia geotécnica de las formaciones, un amplio porcentaje del trazado (un 80 % - 85 %) se ejecutará en neis y granitos, materiales de buena calidad; un 8 % que corresponde a los diques, puede presentar problemas de filtraciones, y, por último, las fallas son, en principio, los tramos más difíciles, tanto por el posible empuje del terreno, como por los problemas de filtraciones importantes, especialmente si se combina su existencia con la de un elevado recubrimiento. Sin embargo, a partir de los reconocimientos efectuados, es de esperar que la mayor parte de los tramos fallados, además de su longi-

2.2. The construction project

In accordance with the bidding process adopted by the GIF, the joint ventures invited to tender, submitted wide-ranging technical-economical and environmental proposals within their technical capabilities and this, in turn, provided the board with a wide range of possibilities for the tender awards. These tender studies taking up a large part of the year 2000.

The contract awards had to consider the best possible track alignment in view of the prevailing geotechnical conditions and those which were best suited to the difficult environmental conditions of the area. These environmental conditions being very strict as a result of the proximity of large urban areas on both sides of the works and the fact that the majority of the Sierra de Guadarrama is protected land. These factors notably affected the survey work carried out for the study of the different prospective alignments.

As various, very close, locations had been proposed for the route, it was necessary to ensure that the selected alignment be defined with great precision and that it meet the criteria defined in the Informative Study and the stipulations of the statement of Environmental Impact which were passed on 16 May and 15 March 2001 respectively (fig 2.1).

The drafting of the corresponding Construction Contracts was concluded on 31 October 2001 and these were duly passed by the Secretary of State for the Ministry of Public Works. The works, which are described in general terms below, began on 12 February 2002.

2.2.1. The terrain around the tunnel

All of the possible routes within the defined corridor between Soto del Real and Segovia run through terrain formed by igneous and metamorphic rock, predominantly made up of gneiss (60 - 65%), granites (20 - 25%) and microgranites (3 - 4%), with a significant presence of dykes (7-9%) and highly fractured areas of large faults (4 - 6%).

As such, and with regards to the geotechnical nature of the ground, a large proportion of the alignment (between 80 and 85%) would cut through good quality materials such as gneiss and granite. There would be an 8% presence of dykes or intrusions of igneous rock across sedimentary strata, which might lead to problems of filtration. The tunnel would also cut through an area of faults which, at the outset, would be the most complicated sections due to possible thrust and the problems of large filtrations, particularly when these were combined with large overlays. However, from the surveys carried out it is expected that the majority of the fault sections would

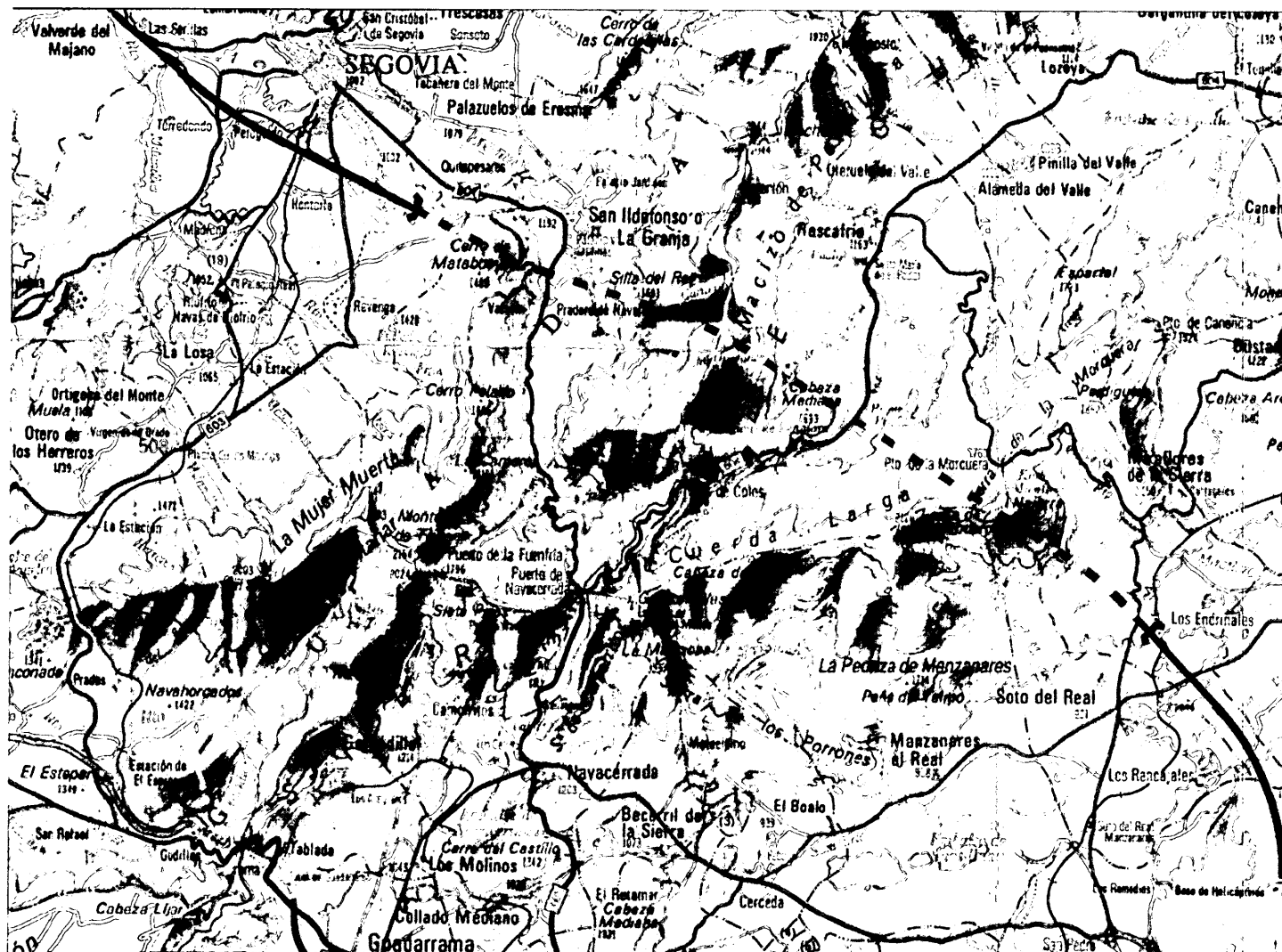


Figura 2.1.
Planta del
túnel de
Guadarrama/
Figure 2.1.
Plan of the
Guadarrama
Tunnel.

tud reducida, presenten un RMR de al menos 20, quedando un único tramo altamente dudoso, el paso del Valle de la Umbría, de unos 600 m de longitud y recubrimiento de 180 a 250 m, que corresponde a roca muy fracturada con previsible presencia de agua.

2.2.2.- Diseño de las obras subterráneas.

a) Túneles principales

La longitud total de cualquiera de los tubos de los túneles principales es de 28,7 km con una sección transversal circular, ya que la ejecución con tuneladoras de roca dura tipo "doble escudo", que fue una de las prescripciones del Concurso, condiciona dicha forma circular de la sección y su revestimiento con anillos prefabricados de hormigón armado que va colocando la máquina según avanza (Ver Figura 2.2).

present an rock mass rating (RMR) of under 20. There was only one highly doubtful section, that of the Umbría Valley pass, which is some 600 m long and with an overlay of 180 to 250 m, and where water-bearing and highly fractured rock would most probably be encountered

2.2.2.- Design of the underground works

a) Main tunnels

The total length of both main tunnel tubes is 28.7 km. These tunnels will have a circular cross-section as one of the main Tender Specifications was that hard rock "double shield" tunnel boring machines be employed and this then conditions the circular form of the section. The tunnels will be lined with prefabricated reinforced concrete segments which are placed as the TBM advances.

Dada la calidad de las rocas del macizo, el diseño de dicho anillo es, en general, convencional, salvo el caso de paso de fallas en las que los empujes sobre el revestimiento pueden precisar cuantías especiales.

De los estudios realizados resultó un diámetro interior del anillo de revestimiento de 8,50 m que equivale a una sección libre de unos 52 m² que cumple las condiciones exigidas por la explotación ferroviaria de Alta Velocidad.

Por lo que se refiere al perfil longitudinal del Túnel, se parte de las Bocas sur ascendiendo con un 1,5 % hasta alcanzar aproximadamente la cota 1204 en cuyo entorno se hace la transición para continuar descendiendo hacia las Bocas Norte con un 9,5 %.

En cuanto a la separación de los túneles principales, y siguiendo el ejemplo del túnel bajo el Canal de la Mancha, se ha adoptado una distancia entre ejes de 30 m. Esta misma separación se utiliza en el túnel de base Lyon-Turín, de 52 km de longitud, con recubrimiento máximo de 2.500 y 10 km de túnel con recubrimientos mayores de 2.000.

b) Otras obras subterráneas

El resto de las obras subterráneas consiste en galerías de pequeñas dimensiones (galerías de conexión, centros de transformación y sala de emergencia), o de medianas dimensiones (galería de banalización).

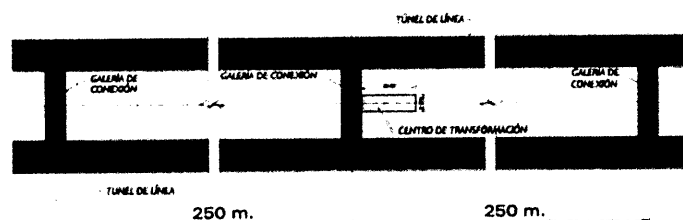
En función de estas dimensiones así como de las características geotécnicas de los terrenos existentes, se han asignado diferentes tipos de sostenimiento. La sección constructiva se completará con revestimientos funcionales de hormigón en masa HM-25.

2.2.3. Impermeabilización de las obras

El problema de la presencia de agua en la construcción del túnel tiene dos aspectos muy importantes: en primer lugar el condicionante que supone para el diseño del revestimiento y, en segundo lugar, las afecciones medioambientales que pueden producirse. De momento se trata el primer aspecto.

En los túneles principales, la impermeabilización se resuelve, mediante el relleno con mortero del espacio entre terreno y trasdós y la colocación en las juntas de bandas de

PLANTA



SECCIÓN TRANSVERSAL

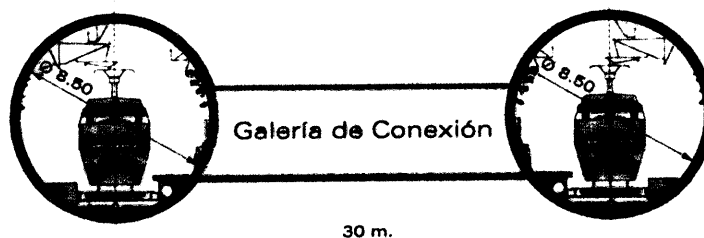


Figura 2.2. Sección tipo del Túnel de Guadarrama/
Figure 2.2. Standard section of the Guadarrama Tunnel.

As a result of the rock quality of the massif, the majority of the lining segments are conventional except where the tunnel passes through faults and where the pressure on the lining may require special segments.

From the studies carried out, the internal 8.50 m diameter with the lining will provide a clear section of some 52 m² which complies with high-speed rail operating conditions.

With regards to longitudinal profile, the tunnel rises some 15% from the south entrance until reaching a benchmark of approximately 1204 m and then descends by around 9.5% to the north exits.

The spacing between the main tunnels follows the example of the Channel Tunnel with a 30 m distance between centrelines. This same spacing was employed in the 52 km long Lyon-Turin with a maximum overlay of 2,500 m and 10 km of tunnel with overlays of over 2000 m.

b) Other underground works

The remaining underground works consist of small galleries (cross passages, control and emergency centres) or medium sized galleries such as those required for channelling.

Different types of supports were assigned in accordance with these dimensions and the geotechnical characteristics of the ground. The constructed sections will then be completed with functional plain HM-25 concrete linings

2.2.3. Waterproofing

The presence of water during the construction of the tunnel has two very important aspects, as it conditions the design of the lining and may have subsequent environmental effects.

When dealing with the first aspect, the waterproofing of main tunnels is solved by a mortar filling of the space between the ground and upper surface and by the placement of neoprene strips at the joints. It is also

neopreno. Está prevista la posibilidad de hacer inyecciones posteriores complementarias de lechada de cemento en las zonas donde sea preciso.

Para el resto de la obra subterránea (galerías, centros de transformación, etc), se colocarán láminas drenantes e impermeabilizantes en todo el perímetro de la excavación, en los puntos en los que el terreno así lo requiera.

Como quiera que el hormigonado de las secciones se llevará a cabo bastante después de la aplicación del sostenimiento, la observación de las manchas de humedad en el hormigón proyectado permitirá conocer los puntos de afluencia de agua, en los que será preciso colocar dicha lámina.

Se utilizará una lámina bicapa con una hoja de P.V.C. de 1,2 mm de espesor, colocada del lado excavación y una lámina de geotextil en contacto con el sostenimiento. La lámina bicapa se coloca a todo lo largo del perímetro de las galerías, inmediatamente sobre el sostenimiento; el agua que percola el sostenimiento es recogida por el geotextil, encaminándose hacia la base del hastial y evacuándose luego mediante mechinales perforados en el revestimiento, que conectan con canaletas que conducen los caudales así captados hacia el drenaje general.

2.3. Seguridad en la Explotación

La seguridad está basada esencialmente en que se trata de un doble tubo con galerías de conexión entre ellos para evacuación, cada 250 metros y cada 50 metros en la zona de la sala de emergencia. Por otra parte están previstas una serie de instalaciones de seguridad, que podemos evaluar entorno al 15% del coste del túnel y que esencialmente son las siguientes:

- Doble túnel de vía única con una distancia de separación entre ejes de 30 mts.
- Galerías de conexión entre ambos tubos, cada 250 m de túnel y con una superficie en planta de 100 m² aproximadamente. Dotadas con puertas de apertura asistida y presurizadas.
- Andén lateral de evacuación en toda la longitud de los túneles, de 1,70 m de ancho (que permite la circulación de 2 personas en paralelo) con alumbrados y pasamanos.
- Sala de emergencia, aproximadamente en la mitad del túnel, con una superficie aproximada de 2.500 m² dotados de medios para primeros auxilios y de accesos similares a las galerías de evacuación cada 50 m.
- Dos centros de control relacionados entre sí (uno principal y otro esclavo) desde los que se podrá actuar sobre las instalaciones, con funcio-

La seguridad está basada esencialmente en que se trata de un doble tubo con galerías de conexión entre ellos para evacuación, cada 250 metros y cada 50 metros en la zona de la sala de emergencia

Safety is essentially based on the fact that this is a twin bore tunnel with connecting cross passages for evacuation spaced every 250 metres throughout the body of the tunnel and every 50 m in the area of the emergency centre

possible to make subsequent supplementary cement grout injections in those areas where it is necessary.

The remainder of the underground work (cross passages, control centres, etc.) require the placing of draining and waterproof sheeting around the entire excavation perimeter at all necessary points.

As the sections are concreted some time after the placing of support, any damp stains observed in the shotcrete will reveal the entry of water and the points where waterproof sheeting is required.

The waterproofing consists of a two-layer laminate formed by one 1.2 mm thick PVC sheet placed on the side of the excavation and one geotextile sheet in contact with the support. The two-layer laminate is placed around the entire perimeter of the passages immediately above the support and any water seeping through the surface is collected by the geotextile and carried down to the base of the side walls before draining away through weep holes perforating the lining and connected to spillways leading to the main drainage.

2.3. Operational safety

Safety is essentially based on the fact that this is a twin bore tunnel with connecting cross passages for evacuation spaced every 250 metres throughout the body of the tunnel and every 50 m in the area of the emergency centre. The tunnel is also provided with a series of safety aspects and installations that make up around 15% of the tunnel cost and which generally consist of the following:

- Twin bore tunnels with single track in each, spaced 30 m between centrelines.
- Cross passages between both tubes every 250 m and with a surface area of around 100 m². The passages are equipped with controlled and pressurized escape doors.
- Evacuation platform running along the entire side of the tunnel, 1.70m wide (allowing two people to walk side by side) and fitted with lighting and handrails.
- Emergency centre set approximately in the centre of the tunnel, with a surface area of around 2,500 m² and equipped with first-aid posts and with accesses to the cross passages set every 50 m.
- Two interconnected control centres (one main centre and one subsidiary centre) which can automatically control the

namiento redundante y sistema autónomo durante un mínimo de 4 días.

Las dotaciones son las siguientes:

- Ventilación/Aireación (Aspiración, Impulsión y Presurización)
- Energía (normal y de emergencia con grupos electrógenos autónomos)
- Iluminación permanente y de emergencia.
- Detección de gases nocivos
- Detección de terremotos a pesar de la baja sismicidad.
- Comunicaciones internas y externas.
- Señalización de los caminos de escape
- Control de intrusismo
- Detección de cajas calientes
- Detección de carga por eje
- Tomas de agua y extintores de polvo seco y CO₂ cada 50 m
- Rociadores de agua a presión
- Megafonía con altavoces cada 40 m
- Postes S.O.S. cada 50 m
- Cable radiante con fibrolaser
- Circuito cerrado de T.V. a todo lo largo del túnel

3. ESTUDIOS DE DETALLE PARA EL PROYECTO Y LA CONSTRUCCIÓN

3.1. Geología del macizo

Como ya se ha dicho en el Capítulo I, el PLIEGO del Concurso señalaba un pasillo para el emplazamiento de los posibles trazados de la alineación Soto del Real-Segovia a través del macizo de la Sierra de Guadarrama y por ello se puso a disposición de los concursantes los Anteproyectos y estudios existentes sobre el tema. A lo anterior se añadió en la fase final un Informe del Instituto Tecnológico Geominero de España relativo a las actuaciones recomendables para una correcta caracterización geológica de dicho trazado.

Como consecuencia de todo ello, en las propuestas de Proyecto y Obra presentadas, puede decirse que los estudios de caracterización geológica detallada del macizo se agruparon en dos partes bien definidas.

a) 1ª Parte: Problemas litológicos y estructurales que podían tener incidencia en las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas del túnel. Fueron detectados a partir de los datos de las hojas de Torrelaguna, Cerdilla y Segovia del Mapa Geológico Nacional escala 1:50.000, y complementados en algunas zonas con cartografía de mayor detalle realizada por los expertos de los concursantes. Se tuvieron en cuenta las características litológicas principales de los materiales aflorantes, las estructuras dúctiles más importantes y los sistemas filonianos y estructuras frá-

installations, with automatic and independent back-up over a minimum of 4 days.

The installations include the following equipment:

- *Ventilation/Air-conditioning (suction, impulsion, pressurization)*
- *Power supply (normal and emergency supply with independent generators)*
- *Permanent and emergency lighting*
- *Detection of noxious gases*
- *Seismic detection (in spite of low seismicity)*
- *Internal and external communications*
- *Escape route signals*
- *Trespass control*
- *Detection of hot spots*
- *Detection of axle loading*
- *Water hydrants, dry chemical and CO₂ fire extinguishers every 50 m.*
- *High pressure water sprinklers*
- *Loudspeakers every 40 m*
- *SOS posts every 50 m*
- *Fibrolaser heat sensor cable*
- *Closed-circuit TV throughout the tunnel*

3. DETAILED DESIGN AND CONSTRUCTION STUDIES

3.1. Geology of the massif

As already indicated in Chapter 1, the tender specifications indicated that the possible track alignments for the Soto del Real-Segovia section had to run through a corridor cutting through the Sierra de Guadarrama massif, and the bidders were, subsequently, provided with all existing and preliminary studies on the same. During the final stage this also included a report drafted by the Instituto Tecnológico Geominero regarding the recommended actions for the correct geological characterization of the branch section.

The geological characterization studies of the massif included in the tender bids, were then divided into two clearly define parts.

a) 1st part: Lithological and structural problems which could have an effect on the geotechnical and hydrogeological conditions of the tunnel. These were detected on the basis of the Torrelaguna, Cerdilla and Segovia sections of the National Geological Map, on a scale of 1:50,000 and supplemented in certain areas by more detailed surveys carried out by experts from the bidding joint ventures.

giles (fracturas) de mayor trascendencia y que, con un alto grado de probabilidad, serían interceptados en el trazado del túnel.

b) 2ª Parte: Estudios, obras de reconocimiento y ensayos para la caracterización geológico-geotécnica de los terrenos de la obra.

3.1.1. Posibles problemas litológicos y estructurales con incidencia en las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas del túnel.

El conocimiento existente al comienzo de los estudios sobre las características litológicas de las rocas que conforman el macizo montañoso de la Sierra de Guadarrama, así como sobre las estructuras tectónicas que las afectan, permitieron identificar al menos dos tipos de problemas generales litológico-estructurales que tienen incidencia en las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas de la zona.

El macizo rocoso está constituido prácticamente en su totalidad por rocas metamórficas e ígneas diversas: granitos, adamellitas, granodioritas, neises glandulares, neises pelíticos y micaesquistos, rocas todas ellas que, a priori, son excavables mecánicamente con tuneladoras de roca dura y presentan, en general, buenas condiciones geotécnicas para el autosostenimiento.

No obstante, la evolución estructural que han sufrido estas rocas a lo largo de los dos ciclos orogénicos que las han afectado (Hercínico y Alpino) ha producido anisotropías importantes que tienen incidencia en las características geotécnicas y en la posible circulación o embolsamiento de aguas que constituyen verdaderos sistemas hidrogeológicos que, aunque locales, pueden tener importancia, dada la magnitud del macizo.

En este sentido están identificadas dos clases de estructuras causantes de este tipo de anisotropías:

- Bandas de cizalla subhorizontales.
- Fracturas frágiles subverticales.

Por supuesto que, además, existen otras estructuras de carácter local (diaclasas, fallas tensionales, etc) típicas de estos macizos que producen también anomalías, con incidencia más importante en las zonas de emboquille o de cobertura escasa.

a) Bandas de cizalla subhorizontales

La presencia de "bandas" de neises félicos, intercalados en los extensos afloramientos de neises glandulares, es muy frecuente en este macizo y fácilmente observable en los mapas geológicos de

El macizo rocoso está constituido prácticamente en su totalidad por rocas metamórficas e ígneas diversas, rocas todas ellas que, a priori, son excavables mecánicamente con tuneladoras de roca dura y presentan, en general, buenas condiciones geotécnicas para el autosostenimiento

The rock massif is almost entirely formed of diverse igneous and metamorphic rock, which, at the outset, are all rocks which may be mechanically excavated by a hard rock boring machine and which, generally, provide good geotechnical self-bearing conditions

This analysis considered the main lithological characteristics of the outcrops, the most important ductile structures, veining and fragile areas (fractures) which would most probably be crossed by the tunnel.

b) 2nd Part: Studies, surveys and tests for the geological-geotechnical characterization of the site area.

3.1.1. Possible lithological and structural problems which could have an effect on the geotechnical and hydrogeological conditions of the tunnel

The surveys and information available at the beginning of the studies into the lithological characteristics of the Sierra de Guadarrama massif and on the tectonic structures affecting the same, pointed towards at least two types of general lithological-structural problems affecting the geotechnical and hydrogeological conditions of the area.

The rock massif is almost entirely formed of diverse igneous and metamorphic rock: granites, ademellites, granodiorites, augen gneiss, pelite gneiss and mica-schist, which, at the outset, are all rocks which may be mechanically excavated by a hard rock boring machine and which, generally, provide good geotechnical self-bearing conditions.

However, the structural evolution of these rocks throughout the two orogenetic cycles forming the same (the Hercynian and Alpine periods) has led to important anisotropies which have an effect on the geotechnical characteristics and the possible circulation and catchment of water. These latter forming authentic hydrogeological systems which, while local, may be of some importance given the scale of the massif.

In this regard two forms of structures have been identified as the cause of this anisotropy:

- Sub-horizontal shear veins
- Sub-vertical brittle fractures

a) Subhorizontal shear veins

The presence of "veins" of femic gneiss interbedded within extensive outcrops of augen gneiss is very common in the massif and may easily be observed on the geological charts of the Sierra de Guadarrama and where gneissic rocks are seen to predominate along with Hercynian granite.

la sierra de Guadarrama en la que predominan las rocas neísicas entre las que afloran los granitos hercínicos.

Una posible interpretación de la generación de este tipo de "facies" es que al estar las rocas sometidas a una intensa deformación dúctil (bandas de cizalla o zonas de milonito) el orto o paraneis, de estructura glandular, se deforma pasando a ser un neis con foliación regular muy marcada, aunque conserve, a veces, zonas con "glándulas" deformadas.

Estas bandas subhorizontales de intensa deformación aparecen sobre todo en la parte central del macizo atravesado por el túnel (entre los intrusivos graníticos de La Pedriza y de La Granja) y con caracteres menos marcados entre La Granja y Hontoria (Segovia).

b) Fracturas frágiles subverticales alpinas

El basamento hercínico de la Sierra de Guadarrama está elevado notablemente sobre el substrato de las Cuencas de Tajo y Duero, debido a la acción de las fallas alpinas. Estas con su disposición subvertical (buzan entre 70° y 90°), provocaron un comportamiento frágil del macizo rocoso afectado.

La actual disposición morfológica de la Sierra de Guadarrama, como un bloque levantado, puede dar lugar a dos hipótesis: a) que las fallas del borde cartográfico de los afloramientos del basamento sean las más importantes en cuanto a salto y actividad deformativa; b) que la existencia de alineaciones montañosas individualizadas (Sierra de Hoyo, Cuerda Larga, Macizo de Peñalara...) con depresiones de sedimentos cretácicos (Valle del Lozoya, depresión de Manzanares-Soto del Real, ...), permiten asegurar que la Sierra de Guadarrama está fragmentada en diversos bloques delimitados por fracturas importantes que representan bandas de deformación frágil con disposición subvertical (1).

La posibilidad de existencia de acuíferos locales está ligada al hecho de que estas fracturas, de una inclinación subvertical (siempre buzando más de 60°) pueden haber producido una amplia banda de deformación frágil, con presencia de salbandas o "harinas de falla", lo que puede presentar un problema potencial en la ejecución del túnel al interceptarlas a 1.000 o 1.200 m de profundidad.

c) Otros problemas locales

Como ya se ha comentado, era de esperar la aparición de fallas secundarias y diaclasas asociadas a las fallas principales y debidas al levantamiento general del macizo, con

A possible interpretation of the formation of this type of facies is that when the rock was subject to intense ductile deformation (shear veins or mylonitic zones) the occurrence or paragenesis, of glandular structure, deformed the rock into gneiss with very marked and regular foliation, though there are intermittent areas with deformed foliation.

These highly deformed subhorizontal bands are particularly prevalent in the central part of the massif crossed by the tunnel (between the granite intrusions at La Pedriza and La Granja) and less notably so between La Granja and Hontoria (Segovia).

b) Subvertical alpine brittle fractures

The Hercynian basement rock of the Sierra de Guadarrama rises substantially above the substrata of the Tajo and Duero river basins, as a result of alpine faults. This has led to its subvertical arrangement (dipping between 70° and 90°) and the brittle condition of the affected rock mass.

The current form of the Sierra de Guadarrama as a raised block may give rise to two hypotheses: a) that the mapped edge faults of the basement outcrops are the most important in terms of rise and deformation; b) that the presence of individual mountain ranges (Sierra de Hoyo, Cuerda Larga, Peñalara Massif...) with cretaceous deposits in the valleys and depressions (Valle de Lozoya, the Manzanares-Soto del Real depression,...) shows that the Sierra de Guadarrama is fragmented in several blocks bound by serious faults in the form of subvertical bands of brittle fracture (1).

The possibility of local water bearing systems is associated with the fact that these subvertical fractures (always sloping over 60°) may have produced a broad band of brittle strain, with the presence of salbands or "rock meal" which could cause potential problems during the cutting of the tunnel as the alignment crosses these areas at depths of 1,000 to 1,200 m.

c) Other regional problems

It was to be expected that secondary faults and joints would appear as a result of the main faults and due to the general raising of the massif and the large surface fragmentation. This led to a detailed survey of the areas around the tunnel entrance and, particularly, along the

(1) El análisis de la cartografía geológica existente, especialmente las hojas del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, 2ª serie (MAGNA) denominadas Segovia, Cercedilla y Torrelaguna, permiten identificar claramente alguno de estos accidentes. Muchos de ellos se cartografiaron de nuevo a escalas 1/5.000 y 1/10.000 con lo que se ha mejorado mucho la localización de los diques de pórfido.

(1) An analysis of the existing geological charts and, particularly, that of the 1:50,000 scale maps from the Spanish Geological Map, 2nd series (MAGNA) for Segovia, Cercedilla and Torrelaguna, allow the clear identification of some of these irregularities. Many of these were charted again at a scale of 1/5,000 and 1/10,000 and this has greatly improved the location of these porphyry dikes.

fragmentación importante de este en superficie. Ello motivó el reconocimiento detallado de las zonas de emboquille y, sobre todo, del tramo Segovia-La Granja, cuyo recubrimiento es inferior a los 200 m.

Se han considerado además, en los estudios de detalle dos posibles tipos de problemas adicionales: el debido a la sismicidad de la zona y los fenómenos de "rock bursting" o autoestallido de la roca.

Por lo que respecta al primero, está generalmente aceptado que ha existido sismicidad posiblemente relacionada con las fallas más importantes, como la de la Angostura y, sobre todo, la llamada de La Umbría (o del corredor El Escorial-Lozoya). Pero a efectos del proyecto del Túnel no se ha considerado que la sismicidad llegue a afectarle estructuralmente.

En cuanto a los fenómenos de "rock bursting", que se han contemplado en los últimos proyectos alpinos, se estima que en el caso de Guadarrama es probable que no se presenten o lo hagan con muy baja intensidad, como sucedió en la construcción del Túnel 2 de la Autopista A-6. En todo caso, la orientación subvertical de la generalidad de las fracturas, en el trazado elegido, situado más al Oeste de los varios posibles, supone un seguro de dicha baja intensidad.

3.2. Descripción litológica de los diferentes tramos del trazado

En principio, pueden distinguirse cinco grandes tramos en función de la naturaleza de las principales unidades geológicas que atraviesa el trazado. Estos tramos de SE A NW son:

- Sector Soto del Real y Macizo Granítico de La Pedriza.
- Sector Ortoneísico de la Najarra con las fallas principales del trazado.
- Sector de Peñalara.
- Macizo Granítico de La Granja.
- Complejo Metamórfico situado entre el Cerro de Matabueyes y Hontoria.

• Sector Soto del Real y Macizo Granítico de La Pedriza

Es un Sector que ha sido posible reconocer en detalle. Corresponde fundamentalmente a granitos sin estructuraciones dúctiles importantes (Sierra del Francés; falla de La Carrascosa, etc.). El trazado del túnel interceptará diversos diques de pórfidos graníticos y microdioritas de escasa potencia y de buzamientos subverticales, que, en principio, no tienen que presentar mayores problemas.

Los fenómenos de "rock bursting", que se han contemplado en los últimos proyectos alpinos, se estima que en el caso de Guadarrama es probable que no se presenten o lo hagan con muy baja intensidad, como sucedió en la construcción del Túnel 2 de la Autopista A-6

The phenomenon of rock bursting which has been observed in recent Alpine projects, it is considered that in the case of the Guadarrama this is unlikely to occur or will only occur at low intensity, as was the case during the construction of Tunnel 2 on the A-6

Segovia-La Granja section which has a cover of less than 200 m.

The detailed studies also considered the possibility of two additional problems: those due to the seismicity of the area and problems related to rock bursting.

With regards to this first aspect, it is generally accepted that there has been a degree of seismicity which is possibly related to the most important faults, the Angostura fault and, particularly, the Umbria fault (or the El Escorial - Lozoya corridor). However, for design purposes it has been taken that the tunnel would not be structurally affected by any possible seismicity.

With regards to the phenomenon of rock bursting which has been observed in recent Alpine projects, it is considered that in the case of the Guadarrama this is unlikely to occur or will only occur at low intensity, as was the case during the construction of Tunnel 2 on the A-6 Motorway. In all events, the subvertical arrangement of the majority of the fractures over the selected tunnel alignment (set further to the west of the other variations) provides an additional guarantee of this low intensity rock bursting.

3.2. Lithological description of the different sections of the route

At the outset, five main sections on the route may be distinguished in accordance with their geological characteristics. These sections running SE to NW, being:

- The Soto del Real section and La Pedriza Granitic massif
- The Najarra orthogneiss sector containing the main faults on the alignment
 - The Peñalara Section
 - The La Granja Granitic massif.
 - The metamorphic area between Cerro de Matabueyes and Hontoria

• The Soto del Real Section and La Pedriza Granitic massif

This section has been surveyed in detail and is essentially formed of granites without important ductile structuring (Sierra del Francés, la Carrascosa fault, etc.). The tunnel alignment cuts through various small, subvertical granitic and micro-diorite intrusions which do not pose serious problems at the outset.

Con respecto a las estructuras, los sistemas de fracturación N-150° E, E-O y N-170° E determinan una densidad de fracturación moderada. Algunas de estas fracturas están asociadas a cauces de arroyos con rellenos sedimentarios, lo que puede incidir en problemas de circulación de agua.

Finalmente, el inicio del macizo granítico de La Pedriza en las inmediaciones de Soto del Real está afectado por un importante sistema de fracturación alpina ~ N-50° E (falla Prado Montero y otras), que no ha ofrecido mayores dificultades para los trabajos de emboquille.

• Sector de La Najarra

Los materiales están representados por ortoneises glandulares, cuyas foliaciones tiene en general bajos buzamientos (< 35°). Estos materiales no tienen por que presentar grandes problemas mecánicos, y únicamente pueden encontrarse en profundidad bandas de cizalla dúctil hercínicas, que se traducirían en una foliación más apretada, con bajos buzamientos.

Por lo que se refiere a las estructuras, hay una falla relativamente importante con dirección N-45° E y buzamiento subvertical que se localiza en la zona del cauce del arroyo Valhondillo, y es posible que el cauce del río Lozoya y el valle del arroyo Guarramillas estén condicionados por fracturas asociadas al sistema alpino que compartimenta los bloques de la Sierra del Guadarrama. Esta falla, denominada de La Angostura, tiene una anchura de unos 150 m y presenta en profundidad una brecha de falla cohesiva. Los últimos reconocimientos con sondeos inclinados permiten descartar una permeabilidad alta, que pudiera crear problemas.

La otra falla de este Sector, llamada de La Umbría o Corredor de El Escorial-Lozoya es, por el contrario, el accidente geológico de mayor influencia posible en la construcción del túnel. Como mínimo alcanza una anchura de 600 m pero es posible que afecte, con mayor o menor intensidad, a unos 1.000 m del trazado.

• Sector de Peñalara

Es una zona fundamentalmente néisica, con foliación subhorizontal en la que no son de esperar fallas importantes, si bien es una de las zonas en las que no fue posible hacer obras de reconocimiento en profundidad.

• Macizo Granítico de La Granja

Los materiales son granitos postcinemáticos cuyas características primarias son bastante homogéneas y que no presentan ningún tipo de estructuración dúctil.

El contacto oriental del macizo pudiera ser intrusivo o de carácter mecánico (falla). También hay una fractura impor-

With regards to structuring, the fractures run N-150° E, E-W and N-170° E and reveal a moderate fracture density. Some of these fractures are associated with sediment filled stream beds which may impede the passage of water.

The outlying area of the La Pedriza granitic massif, in the vicinity of Soto del Real, is affected by a large system of Alpine fracture N-50° E (Prado Montero fault and others) though this has not posed any serious problems in the works on the tunnel entrance.

• La Najarra section

The area is formed by aegon orthogneiss with generally low dipping foliation (< 35°). These materials should not present major mechanical problems and the only factor may lie in the deep lying bands of Hercynian ductile shear leading to low dipping and tighter lamination.

With regards to the structures, there is a relatively important fault running N-45° E and set in a subvertical direction, located around the bed of the Valhondillo stream and it is possible that the Lozoya river bed and the Guarramillas valley are affected by fractures within the Alpine system dividing the Sierra de Guadarrama system. This fault, known as the Angostura fault, is 150 m wide and contains a deep lying brecciated zone. The latest surveys carried out with slant hole bores revealed that there was not a high degree of permeability which could lead to problems.

However, the other fault in this sector, known as the Umbría fault or the El Escorial - Lozoya Corridor, has the largest possible effect on the tunnel construction. This geological fault reaches a width of 600m but it is possible that some 1000m of the alignment will be affected by the same to a greater or lesser degree.

• Peñalara Section

This area is essentially formed of gneissic rock with subhorizontal foliation and while it is not expected that there will be important faults, this was one of the areas where it was impossible to carry out in-depth surveys.

• La Granja Granitic massif

The massif is formed by post-kinematic granites which are fairly homogeneous and where no ductile structuring is observed.

The eastern joint of the massif may be irruptive or mechanical (fault) and there is also an important

tante (Falla de La Granja) de unos 50 m de ancho, que en parte está rellena por cuarzo filoniano y que se asocia a un sistema N-30° E que localmente produce cataclasis importante. Esta fractura pasa por las inmediaciones de La Granja y de Valsain, al O de ambas poblaciones.

Otros problemas a tener en cuenta son los de la interceptación de algunos diques de pórfido granítico y sus fracturas asociadas.

• Complejo metamórfico Cerro de Matabueyes-Hontoria

Es en el que se presenta una mayor complejidad bajo el punto de vista litológico, ya que aquí se encuentra una notable variedad de materiales metamórficos con una disposición estructural compleja debido al plegamiento hercínico (ortoneises glandulares, leuconeises, neises félicos, esquistos, rocas calcosilicatadas y mármoles), cuya potencia y estructuración es muy variable en función de los pliegues, bandas de cizalla hercínicas y fracturas hercínicas y posthercínicas.

Por último el haz filoniano de porfidos graníticos con directriz aproximada E-O que se extiende entre el S de Segovia y La Granja puede plantear otro problema adicional de este tramo.

3.3. Caracterización Hidrogeológica

Los objetivos de un estudio para una caracterización hidrogeológica completa del macizo ígneo-metamórfico atravesado por el trazado, podrían enumerarse así:

- Determinación de los límites hidrogeológicos del macizo y flujos regionales del entorno que afecten al mismo.
- Morfología del área (áreas elevadas de recarga, ejes de drenaje superficial, nivel saturado, localización de manantiales, etc.)
- Delimitación de los posibles dominios acuíferos:
 - Permeabilidad por porosidad intergranular (depósitos cuaternarios, lehm graníticos, granito alterado)
 - Permeabilidad por fracturación y fisuración.
- Establecimiento del modelo conceptual.
- Relación entre el funcionamiento hidrogeológico del macizo rocoso y las lagunas de montaña.
- Identificación y cuantificación del esquema de recarga, flujo subterráneo y descarga del macizo rocoso.
- Obtención del gradiente hidráulico.
- Distribución espacial de las características hidrodinámicas del área de estudio.
- Valoración de la posible conexión entre fracturas.

Ahora bien, para los estudios de la influencia de la construcción del túnel según un trazado concreto en la hi-

fracture (La Granja Fault) some 50 m wide which is partly filled by quartz lode and is associated with the N-30° E system, which produces important local cataclasis. This fracture passes immediately to the west of La Granja and Valsain.

A further problem to be taken into account is the interception of certain porphyry granite dykes and their associated fractures.

• The metamorphic area between Cerro de Matabueyes and Hontoria

This area is of greater complexity from a lithological point of view as it contains a wide variety of metamorphic materials of complex structural arrangement as a result of Hercynian folding (argon orthogneiss, leucogneiss, fémic gneiss, schists, lime silicate rocks and marble), and with variable development and structure according to the folds, bands of Hercynian shear and both Hercynian and post-Hercynian fractures.

The group of porphyritic granite veins running approximately east to west from the south of Segovia and La Granja may also pose additional problems in this area.

3.3. Hydrogeological characteristics

A complete hydrogeological study of the igneous-metamorphic massif crossed by the tunnel was carried out for the following purposes:

- To establish the hydrogeological boundaries of the massif and the surrounding regional flows affecting the same.
- Morphology of the area (high replenishment areas, axes of surface drainage, saturated level, location of springs, etc.)
- Marking of possible water bearing systems:
 - Permeability through intergranular porosity (quaternary deposits, granitic loam, altered granite).
 - Permeability through fractures and joints.
- Establishment of conceptual model
- Relationship between the hydrogeological activity of the rock massif and the mountain catchments.
- Identification and quantification of the water replenishment system, subterranean flow and run off from the rock massif.
- Hydraulic gradient
- Spatial distribution of the hydrodynamic characteristics of the study area
- Evaluation of possible connection between fractures

Two different scenarios were established for the purposes of the studies into the effect of a specific tunnel

drogeología del macizo que, en definitiva, es lo que interesaba en este Proyecto, se establecieron en escenarios diferentes, uno de tipo más general y otro de carácter más concreto.

3.3.1. Estudios hidrogeológicos generales

Consistieron en los siguientes:

a) *Cartografía hidrogeológica*: Realizada a escala 1/10.000.

b) *Climatología*: Estudio de los valores standard de precipitación, infiltración, escorrenría superficial y subterránea.

c) *Inventario de captaciones y surgencias*: Se abrió una ficha de inventario individual para cada punto acuífero localizado. Las fichas de inventario incluyen los datos de la localización (coordenadas, cotas, croquis de situación, plano detallado, etc), tipo de construcción y equipamiento, litología geológica y caracterización hidrodinámica y físico-química, (temperatura, pH, conductividad eléctrica, etc), datos que deberán seguir bajo control durante la construcción del túnel. Pueden distinguirse dos grandes grupos:

c.1) *Manantiales*: Se realizó el inventario de todos los puntos de descarga natural aflorantes en el macizo y su relación con las discontinuidades, distinguiendo los tres tipos siguientes:

- “Manantiales de vaguada”. Localizados en las inmediaciones de los ejes de drenaje, como puntos de descarga de caudales procedentes de zonas altas, son generalmente de carácter difuso y difícil localización por situarse bajo cauces de aguas superficiales. Su descarga está menos afectada por los cambios estacionales.
- “Manantiales de ladera”. Responden a un funcionamiento por rebosamiento, en general en zonas de conjunción de discontinuidades conductivas.
- “Manantiales estacionales”. Íntimamente ligados al régimen de precipitaciones. En general, desaparecen en estiajes no muy acusados para resurgir después de lluvias de suficiente intensidad y duración. Se localizan en emplazamientos similares a los manantiales de ladera pero responden a localizaciones variables según la topografía y la zona de precipitación.

c.2) *Pozos y sondeos*: Se hizo un inventario de todas las captaciones ya existentes y de los sondeos hechos para los proyectos, incluyendo los datos de localización y nivelación, junto con medidas del nivel piezométrico y su variación estacional.

alignment on the hydrogeology of the massif, one being more general and the other more specific.

3.3.1. General hydrogeological studies.

These studies consisted of the following aspects:

a) *Hydrogeological mapping*: at a scale of 1/10,000

b) *Climatology*: Study of the standard rainfalls, infiltration, surface and underground runoff.

c) *Inventory of catchment and springs*: An individual file was prepared for each water bearing point located. The data base included details of location (coordinates, benchmarks, location diagrams, detailed plans, etc.), type of structure and arrangement, geological lithology, hydrodynamic and physical-chemical characteristics (temperature, pH, electrical conductivity, etc.). This information having to be controlled during the construction of the tunnel.

This particular aspect may be divided into two general groups:

c.1) *Springs*: An inventory was made of all the natural points of discharge throughout the massif and their relationship with the breaks. Three main types of spring may be established:

- “Valley springs”. Located in the vicinity of the drainage axes and serving as outlets for the flows coming down from higher ground. These are generally widespread and difficult to locate as they tend to be below surface water beds. The water discharge is less affected by seasonal changes.
- “Slope springs”. These springs occur as a result of overspill which generally arise in conjunction with breaks in the water system.
- “Seasonal springs”. These springs are intimately related to the rainfall in the area. They generally disappear at low water stages and then reappear after sufficient rainfall. The springs are located in similar positions to the slope springs but tend to be sited according to the topography and area of rainfall.

c.2) *Wells and bores*: An inventory was made of all the existing catchments and the bores made for the project, providing information on their location and levels, together with their piezometry and seasonal variation.

3.3.2. Estudios de los factores hidrogeológicos que afectan a la construcción del túnel

La zona profunda del macizo rocoso, no afectada por la meteorización superficial, se puede considerar un dominio acuífero básicamente influenciado por la existencia de una red de fracturas interconectadas. Del esquema real dependen la capacidad de almacenamiento de agua subterránea (liberable mediante bombeo o drenaje) y su permeabilidad (facilidad de establecer el flujo de agua)

Desde el punto de vista hidrodinámico, en cada grupo de discontinuidades importantes cruzadas por el trazado, la aportación del sistema de fracturas al almacenamiento y al flujo de agua subterránea depende de la densidad y características de las discontinuidades, si bien algunas fracturas con alta conductividad individual, pueden dar lugar a un drenaje rápido y relativamente importante.

La magnitud hidrodinámica a determinar es la "transmisividad" o facilidad que el acuífero ofrece a la circulación del agua subterránea, y su determinación se hace con ensayos hidrogeológicos en secciones delimitadas mediante obturadores que aislen la discontinuidad a caracterizar.

Pues bien, los estudios realizados se basan en datos obtenidos en más de 120 actuaciones en los sondeos y en más de 300 puntos de agua. Se abordaba el comportamiento hidrogeológico de las diversas litologías, los flujos subterráneos, niveles piezométricos, calidad química y determinaciones de PH, alcalinidad y temperatura.

Todos los estudios señalan que a los 300 m de profundidad, la permeabilidad es prácticamente nula, excepto, claro está, en los cinturones de falla. En cuanto a valores cuantitativos puede señalarse lo siguiente:

- Puede haber cargas de agua de 50-10 m en las zonas falladas, lo que se ha tenido en cuenta para la impermeabilización de los anillos.
- Se indican valores de permeabilidad de 10^{-7} m/s y 10^{-8} m/s que, en las zonas de falla aumentan hasta 10^{-6} m/s.
- Los estudios arrojan cifras muy diferentes de caudales esperables por m de túnel, con previsiones de hasta 0,01 l/s por metro de túnel, lo que en 3 kms daría 30 l/s que es cifra importante.
- Por supuesto, en las zonas de falla las cifras son bastante mayores y las dispersiones de los estudios también ya que van desde los 70 l/s a los 180 l/s, que es un caudal extraordinario.

En resumen, los estudios hidrogeológicos realizados presentan grandes dispersiones. En todo ca-

Todos los estudios señalan que a los 300 m de profundidad, la permeabilidad es prácticamente nula, excepto, claro está, en los cinturones de falla

All the studies showed that the permeability was practically null at a depth of 300 m, with the obvious exception of the fault belts

3.3.2.- Studies of hydrogeological factors affecting tunnel construction

The underlying area of the rock massif, unaffected by surface weathering, can be considered as water bearing stratum which is basically affected by the presence of a network of interconnected fractures. The system controls the storage capacity of ground water (tapped by pumping or drainage) and its permeability (ease of establishing the water flow).

From a hydrodynamic point of view, in each group of serious breaks crossed by the alignment, the contribution of the fracture system to the catchment and flow of ground water depends on the density and characteristics of the breaks. However, some fractures with high individual channelling, may give rise to rapid and a relatively high degree of draining.

The hydrodynamic scale to be established is the "transmissivity" or the degree of ground water flow provided by the aquifer and this can be ascertained by hydrogeological tests in delimited sections by means of traps sealing off the break in question.

The studies carried out were based on the data obtained from over 120 bores and at over 300 water points. This covered the hydrogeological behaviour of the different rock compositions, the ground water flows, piezometric levels, chemical quality, pH, alkalinity and temperature.

All the studies showed that the permeability was practically null at a depth of 300 m, with the obvious exception of the fault belts. With regards to the quantitative values obtained, these may be summarized as follows:

- There may be water heads of 50-10 m in the fault areas and this has been taken into account in the waterproofing of the tunnel rings.
- Permeability values of 10^{-7} m/s and 10^{-8} m/s where recorded, though these increased in the fault zones up to 10^{-6} m/s.
- The studies revealed very different expected flows per m of tunnel, with forecasts ranging up to 0.011 l/s per metre of tunnel which would give the sizeable figure of 30 l/s over 3 km.
- The figures in the fault zones are obviously much greater and the varying study results range from 70 l/s to an extraordinary flow of 180 l/s.

While these hydrogeological studies reveal wide-ranging results, it is necessary to expect fairly sizeable flows and to provide the boring

so, han de preverse caudales de cierta importancia, que recomiendan disponer en las tuneladoras de medios para detectarlos (sondas de reconocimiento) y para tratar, eventualmente, el terreno con inyecciones.

No obstante, la Falla de La Umbria merece un comentario especial ya que de su reconocimiento no se pudo llegar a conclusiones claras sobre caudales esperables, pero es claro que los últimos 200 m aparecen extremadamente fracturados.

Dada la enorme trascendencia que este accidente puede suponer para el plazo y el coste de la obra, se estudió una galería de reconocimiento previo, con acceso por pozo vertical (Ver Figura 3.1). Su construcción está muy afectada por condicionantes medioambientales de la zona, por lo que, de momento, no se incluyó en el Proyecto. Por una parte, se espera mejorar los reconocimientos del accidente y, por otra, se dotó a las tuneladoras de equipos para tratar estos problemas desde el frente, si bien ello puede resultar muy lento y costoso en casos singulares, por lo cual no se ha desistido de tener que realizar esta obra.

3.4. Trabajos de reconocimiento

a) Sondeos mecánicos de reconocimiento

Puede decirse que los trabajos de reconocimiento del macizo en profundidad a lo largo de los trazados estudiados se basaron en la ejecución de sondeos mecánicos con extracción continua de testigo al menos en los 100 m anteriores a la cota del túnel.

A la ejecución de dichos sondeos se añadió en mayoría de casos la testificación geofísica, con diagrfías obtenidas en el interior de la perforación para definir (o confirmar) la litología, la fracturación e, incluso, estimar los parámetros elásticos de la roca y el régimen hidrogeológico. No procede extendernos aquí sobre los diferentes tipos de "logs" recomendados y utilizados, establecimiento de campos de sondas y otros aspectos que corresponden a la pura especialidad de estas técnicas. En general se utilizaron diámetros superiores siempre a 50 mm (en algunos casos 75 mm para el ensayo sónico de onda completa).

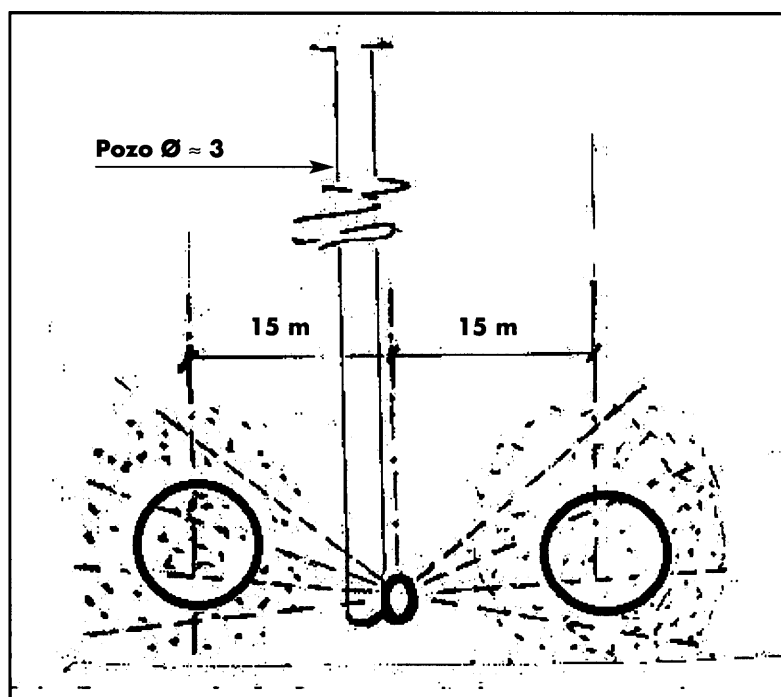


Figura 3.1. Pozo y galería de reconocimiento y tratamiento previo del terreno en la falla de La Umbria/ Figure 3.1. Shaft and exploration gallery and preliminary soil treatment at the Umbria Fault.

machines with the necessary equipment to detect the same (lead probes) and to, subsequently, treat the ground with injections.

The Umbria Fault is worthy of particular comment as it was not possible to come to clear conclusions regarding the expected flows during the surveys, though the final 200m are clearly very fractured indeed.

Given the importance of this fault on the scheduling and cost of the work, a study was made for a preliminary exploration gallery reached by a vertical shaft (See Fig. 3.1). The construction work was seen to be very affected by

the environmental conditions in the area and it has not, to date, been included in the project. However, it was considered that improved surveys would be made of the fault and that the tunnel boring machines would be provided with equipment to tackle these problems at the advance face. This may lead to very slow and expensive advance in particular cases and, as such, the carrying out of this work has not yet been totally discarded.

3.4.- Survey work

a) Mechanical exploratory borings.

The survey work on the underground areas of the massif throughout the tunnel alignment have been based on mechanical bores with continuous core drilling particularly within the last 100 m down to level of the tunnel.

In the majority of cases these bores were supplemented by geophysical core tests, with logging obtained from the centre of the perforation in order to define (or confirm) the lithology and fracturing and to enable estimates of the elastic parameters of the rock and the hydrogeological system. This article will not dwell on the different types of logs recommended and employed, nor on the establishment of probe fields and other aspects related to this technical speciality. In general terms diameters of over 50 mm were employed (though in some case 75 mm diameters were used in the probe tests of the complete wave).

CUADRO 4.1. Túnel de Guadarrama. Tramificación aproximada del trazado
TABLE 4.1 Guadarrama Tunnel. Approximate composition of alignment

GRUPO GEOTÉCNICO GEOTECHNICAL GROUP	Subgrupo Subgroup	PPKK PK	Longitud Length Km	Neis Gneiss %	Granito Granite %	Diques Dykes %	Brechas Breccia %
NEISES (M) GNEISS (M)	1. Cielo abierto 1. Open cut	15+500/ 20+100	4,60	94,42	-	4,84	0,74
GRANITOS (H) GRANITES (H)	2. Túnel Adamellitas 2. Adamellite Tunnel	20+100/ 20+780	0,68	-	87,30	12,7	-
NEISES (M) GNEISS (M)	3.a) Túnel Neis 3.a) Gneiss tunnel	20+780/ 23+090	2,31	89,29	-	9,11	1,60
		23+090/ 32+600	9,51				
	3.b) Túnel. Falla de la Umbría 3.b) Umbria Fault tunnel	32+600/ 33+700	1,10	72,03	-	12,78	15,20
	3.c) Túnel Neis 3.c) Gneiss tunnel	33+700/ 41+790	8,09	89,29	-	9,11	1,60
GRANITOS (H) GRANITES (H)	4. Túnel: Granito "La Granja" 4. "La Granja" Granite Tunnel	41+790/ 45+775	3,985	-	93,48	1,17	5,35
NEISES (M) GNEISS (M)	5. Túnel y cielo abierto Segovia 5. Tunnel and open cut - Segovia	45+775/ 53+860	8,085	94,34	-	1,90	3,76
Longitud en kms: Length in kilometres			38,36	30,54	4,31	2,45	1,05

Debe decirse que los condicionantes medio ambientales de esta zona protegida, impidieron extender los reconocimientos a una buena parte del trazado (2), si bien no se excluyeron las zonas de discontinuidades más potencialmente conflictivas. Disponemos, en suma, de unos 10.000 metros lineales de sondeo sobre el trazado del túnel, bien que con la falta de homogeneidad arriba comentada.

b) Geofísica de superficie

En un medio predominantemente granítico y néisico donde el rango de profundidad a investigar puede superar los 1.000 metros, y con un relieve topográfico muy acusado, las posibilidades de aplicar técnicas geofísicas a los estudios en profundidad es muy limitada. En consecuencia estas tecnologías se utilizaron en las fases iniciales o en las complementarias de los estudios con sondeos mecánicos, para aclarar cuestiones de detalle como espesores de los depósitos superficiales, caracterización geomecánica de las zonas de las boquillas de los túneles y localización de discontinuidades locales subverticales (fracturas, contactos, diques intrusivos) siempre con recubrimientos inferiores a los 100 m.

(2) Puede decirse que no fue posible realizar sondeos mecánicos en Peñalara, Cuerda Larga y gran parte de La Najarra.

It should be indicated that the environmental conditions of this protected area prevented the extension of surveys over a large part of the alignment (2), though this did not exclude the more potentially conflictive break zones. In total some 10,000 lineal metres of bores were carried out along the tunnel alignment, though these were not uniformly carried out as we have already indicated.

b) Surface geophysics

The possibility of applying geophysical techniques to the depth studies of the area is very limited by virtue of the predominance of granitic and gneissic rock in the area and the need to investigate to depths of over 1,000 m in areas of very uneven terrain. As such, these techniques were employed in the preliminary stages or served to supplement the studies made with mechanical bores, in order to clarify details such as the thickness of surface deposits, the geomechanical nature of the areas around the tunnel mouths and the location of local, subvertical breaks (fractures, joints, irruptive dykes) set no more than 100 m below ground level.

(2) It was not possible to carry out mechanical bores in Peñalara, Cuerda Larga and over a large part of La Najarra.

En resumen, puede decirse que se hicieron 5.270 m de perfiles de s mica de reflexión y 6.950 m de perfiles de s mica de refracción y calicatas eléctricas, básicamente en el Valle de La Umbría.

4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS MATERIALES DEL TRAZADO

En el Cuadro 4.1 que sigue se recoge la tramificación aproximada del trazado del Túnel de Guadarrama. Como se ve en él, predominan los neises, que ocupan más del 60 % del trazado del túnel.

Dado el carácter de estas formaciones, la caracterización geotécnica necesaria para el diseño adecuado de las tuneladoras ha de referirse a los parámetros geotécnicos de los que depende la posibilidad del corte mecánico en condiciones razonables de coste y plazo, que son:

- Resistencia a la compresión simple.
- % de minerales abrasivos.
-  ndices de abrasividad.

Además de esto, hay que contemplar las dificultades que pueden plantear los tramos fracturados o de falla.

4.1. Parámetros principales del corte mecánico de rocas duras y abrasivas

En el Cuadro 4.2 siguiente hemos resumido las referencias más significativas correspondientes a máquinas de tama 

5,270 m of reflective seismic profiles and 6,950 m of refractive seismic profiles and electric probes were carried out, primarily in the Umbria Valley.

4. GEOTECHNICAL CHARACTER OF THE MATERIALS ALONG THE ALIGNMENT

Table 4.1 gives the rock characteristics throughout the alignment of the Guadarrama Tunnel. From this table it is possible to see that gneissic rock forms over 60% of the alignment.

Due to the nature of the surrounding rock, certain geotechnical parameters had to be considered in the design of the TBMs in order to provide the required boring advance at a suitable cost. These factors being:

- Unconfined compressive strength
- % abrasive minerals
- Abrasivity indices

In addition to the above it is also necessary to consider the difficulties that may arise throughout the fractured or fault areas.

4.1. Main parameters for the boring of hard and abrasive rocks

Table 4.2 shows the main references with regards to TBM's of similar size which have operated in very hard and abrasive rock formations similar to those in the Guadarrama massif.

Cuadro N  4.2. Datos de Granitos y neises de alta dureza y abrasividad
Table 4.2. Data for very hard and abrasive granite and gneiss

Rocas/Rock	RCS/UCS � Mpa	RCS/UCS-máx Mpa	RTS/UTS � Mpa	RTS/UTS -máx Mpa	Minerales abrasivos Abrasive minerals %	I. Cerchar Cerchar Index 1/10 mm
Granito/Granite	149	207	12.1	14.4	55	4.85
"	168	240	12.5	15.0	55	4.50
Granodiorita/Granite-diorite	190	210	17.4	18.3	40	4.70
Neis granítico/Granitic gneiss	166	222	13.2	13.9	57	4.30
"	224	272	20.0	21.0	55	4.65
Neis/Gneiss	112	-	17.0	17.5	45	4.50
"	146	-	12.0	14.6	45	4.10
"	174	-	13.6	15.2	45	4.50
"	188	-	10.7	-	55	5.20
"	201	-	16.3	-	50	4.70
"	228	-	12.7	-	45/50	4.60
"	238	-	14.5	-	45/50	4.70
Neis anfib./Amphib. gneiss	238	279	17.1	24.5	45	4.40
Neis biot�tico/Biotite gneiss	77	78	15.7	17.3	35	2.90

Cuadro Nº 4.3. T. Guadarrama. Resistencias a Compresión Simple/Tracción.
Table 4.3. Guadarrama Tunnel. Unconfined Compressive/Tensile Strength

ROCAS/ROCK	R.C.S. (Mpa)/UCS (Mpa)		R.T.S. (Mpa)/UTS (Mpa)	
	Media/Mean	Máximo/Maximum (diques)/(dykes)	Media/Mean	
Neises/Gneiss	85	108	8,8	9,7
Granitos/Granites	81	150	10,8	-
Adamellitas/Adamellites	95	-	7,2	-
Diques/Dykes:				
- Porfido/Porphry	109	-	12,8	-
- Microgranito/Microgranite	117	-	10,2	-
- Pegmatita/Pegmatite	93	-	6,6	-

ño parecido que han trabajado en formaciones de alta dureza y abrasividad, de naturaleza similar.

Los resultados de los reconocimientos efectuados sobre muestras de sondeos del macizo de Guadarrama, pueden resumirse así:

a) Resistencias a Compresión Simple/Tracción indirecta

Presentan valores muy dispersos, de los que resumimos (Cuadro 4.3), cifras que son bastante inferiores a las del Cuadro nº 4.2 anterior.

b) Abrasividad

b.1) Contenido en minerales abrasivos

Los contenidos medidos en varias muestras dan valores también inferiores, en general, a los del Cuadro citado, si bien los diques presentan máximos bastante mayores. El Gráfico de la Figura 4.1 recoge los valores obtenidos que pueden resumirse así:

Figura 4.1. Túnel de Guadarrama. Estudios de abrasividad sobre testigos/
Figure 4.1. Guadarrama Tunnel. Core abrasivity studies.

The core logs taken during the surveys of the Guadarrama massif may be summarized as follows:

a) Unconfined Compressive Strength/Indirect Tensile strength

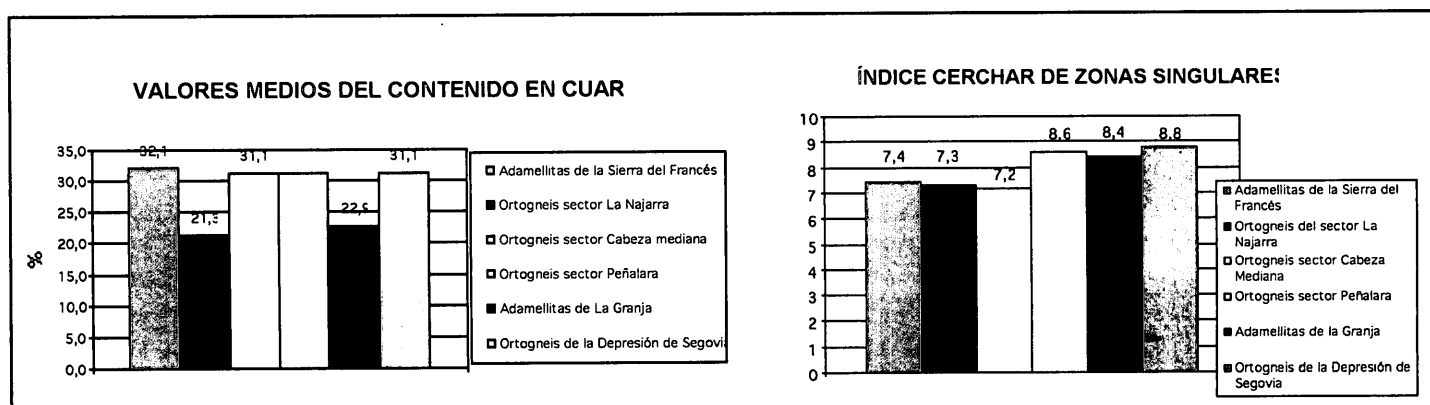
These reveal wide-ranging results which are summarized below:

These figures being substantially lower than those given in the preceding table 4.2.

b) Abrasivity

b.1) Abrasive mineral content

The contents measured in various specimens generally gave values lower than those indicated in table 4.2, though the maximum abrasive content in the dykes was seen to be quite a lot higher. The bar chart in Figure 4.1 shows the results obtained, and may be summarized as follows:



	Medias	Máximas (diques)
Neises	29-33%	60%
Granitos	26%	38%
Adamellitas	32%	-

	Mean	Maximum (dykes)
Gneiss	29-33%	60%
Granites	26%	38%
Adamellites	32%	-

b.2) Otros ensayos

El contenido en granos de minerales duros (en este caso, el cuarzo) es el criterio básico para estimar la abrasividad esperable de las formaciones de un túnel.

De acuerdo con ello, en Guadarrama debe esperarse una abrasividad media, como resulta de la comparación de los valores medios de la Figura 4.1 con los del Cuadro Índice nº 4.2, que resume la experiencia internacional de los casos más desfavorables conocidos en formaciones similares (neises y granitoides). Por otra parte, las cifras de Guadarrama relativas a la RCS guardan una proporción con las del citado Cuadro, similar a la que presentan los porcentajes de contenido de cuarzo, lo cual es otro hecho que avala la comparación.

Ahora bien, la presencia en algunos tramos de Guadarrama de diques y zonas puntuales con estructura de grano fino próximas a ellos, recomendó hacer ensayos sobre muestras de dichas zonas, que dieron Índices Cerchar mayores de los del Cuadro Índice. Y aunque los datos estadísticos representativos deben ser los que resulten de ensayos hechos sobre muestras tomadas de la roca del frente de avance y no sobre trozos seleccionados de algunos sondeos, lo anterior debe ser tenido en cuenta al atravesar dichas zonas singulares, en las que el contenido en cuarzo puede aumentar bastante y alcanzar cifras del orden del 50 % - 60 %, lo que, en definitiva, fue lo considerado para el diseño de las tuneladoras.

Como consecuencia de todo ello, a los fabricantes se les exigió un tratamiento especial de la estructura de la rueda de corte para resistir los efectos de la abrasión y un sistema adecuado de desplazamiento de la rueda para poder recuperar partes dañadas, con una relativa facilidad. De ello se hablará en el Capítulo 5 siguiente relativo a las máquinas.

4.2. Evaluación y caracterización de los tramos de falla

El trazado presenta un número importante de zonas de fracturación sensible, que afectan al posible rendimiento de las tuneladoras, ya que, si no en todas ellas, es muy posible que en algunas no se puedan utilizar los "grippers" de apoyo para lograr un buen ritmo de avance.

Por ello, se hizo un estudio muy detallado del RQD obtenido de los testigos de los sondeos perforados y el resultado se presenta resumido en el Cuadro nº 4.4 siguiente en el

b.2) Other tests

The content of hard mineral grains (in this case, quartz) is an essential criteria for the evaluation of the expected abrasivity of rock formations for tunnel boring.

In accordance with the tests carried out, the Guadarrama tunnel bore will encounter medium abrasivity, as may be seen by comparing the mean values in Fig. 4.1 with those indicated in Index Table 4.2. This latter table provides a summary of international experience under more unfavourable conditions encountered in similar formations (gneiss and granite). Furthermore, the Guadarrama UCS and quartz content figures bear a similar proportion to those given in the Index Table and this further guarantees this comparison.

However, the presence of dikes and finely grained adjacent areas throughout certain sections of the Guadarrama tunnel alignment, required the testing of specimens from these areas. The ensuing test results revealed higher Cerchar abrasivity Indices than those given in the Index Table. While the representative statistical data should generally be that resulting from tests made on specimens from the advance face and not on isolated core samples, this factor should be taken into account when cutting through areas where the quartz content may increase substantially and reach percentages of around 50-60% and, indeed, this factor was duly considered in the design of the TBM's.

As a result of this the manufacturers were asked to provide the cutting wheel of the TBM with special treatment in order to resist the abrasive effects and to provide a suitable system for moving the wheel in order to allow the replacement of damaged parts with relative ease. These factors are described in more detail in Chapter 5 which deals with the TBM's.

4.2. Evaluation and characterization of the fault sections

The tunnel alignment runs through a large number of sensitive fracture zones which may affect the performance of the TBM's as it is possible that in some of these areas the boring machines will not be able to employ the grippers used to ensure a good rate of advance.

A very detailed Rock Quality Designation (RQD) study was subsequently carried out on core pieces and the results are given in Table 4.4 below. From this table it may be seen

Cuadro N° 4.4. Túnel de Guadarrama. Zonas de fracturación o falla.

Table 4.4. Guadarrama Tunnel. Fracture or fault zones

GRUPO GEOTÉCNICO GEOTECHNICAL GROUP	SUBGRUPO SUBGROUP	Longitud/ Length Kms	RQD medio/ Mean RQD	RQD < 10	
				%	Kms
NEISES/GNEISS	Cielo abierto/Open Cut	4,600	-	10,5%	0,483
	Túnel/Tunnel	19,910	~ 70	9,62%	1,911
	Falla de La Umbría/Umbria Fault	1,100	-	50,58%	0,556
	Segovia	8,085	~ 60	8,32%	0,673
GRANITOS (H)/GRANITES	H ₂ /H ₅ Adamellitas/Adamellites	0,680	-	13,37%	0,091
	H ₄ Granito/Granite	3,985	~ 60	4,39%	0,175
	"La Granja"	38,360			3,889

que puede verse que los tramos en que el RQD es inferior a 10 suman 3,9 kms y, deduciendo los de cielo abierto, resulta que en el túnel la longitud total de zonas fracturadas, pasos de falla, etc, pueden llegar a un total de unos 3 kms.

that the RQD only falls below 10 over a total of 3.9 km and when deducting the areas of open cut, this shows that the tunnel will have to pass a 3 km section of fractured zones and faults, etc.

5. EL MÉTODO CONSTRUCTIVO

Los condicionantes de plazo de ejecución y mínima agresión medioambiental, al ser el macizo de Guadarrama zona protegida, excluían el uso de explosivos y, por supuesto, la construcción de varios ataques intermedios. La consecuencia de todo ello fue la recomendación de que la construcción de la obra se hiciera con 4 máquinas tuneladoras y, por tanto, que la sección tipo tuviera la forma circular de la Figura 2.2, añadiendo galerías de comunicación entre ambos tubos, de la longitud correspondiente al macizo de roca entre ambos, separados entre sí 30 m entre sus centros.

El Pliego del Concurso recogió dicha recomendación e impuso la ejecución del túnel de base con máquinas tuneladoras de roca extradura, preferiblemente del tipo "doble escudo", y estableció unos valores a tener en cuenta para los parámetros básicos de las mismas (empuje total y Par de arranque máximos) tanto en las hipótesis de operación normal, como de salida de situaciones de bloqueo.

Todas las ofertas cumplieron estas condiciones y, una vez adjudicada la obra, los constructores, tras una serie de reuniones de coordinación con el personal técnico del GIF, adjudicaron dos máquinas a cada una de las empresas HERRENKNECHT y WIRTH-NFM especialistas de primera fila en esta modalidad.

5.1. Principios básicos de la tipología elegida

Las características del macizo de Guadarrama eran suficientemente conocidas al nivel de los estudios y anteproyec-

5. THE CONSTRUCTION METHOD

The time conditions and environmental constraints of the protected Guadarrama massif, meant that no explosives could be employed and this totally ruled out the possibility of intermediate tunnelling. As such, it was recommended that the tunnel be bored by 4 TBM's and, subsequently, that the standard section take the circular form shown in fig. 2.2. The tunnel would then be a twin bore tunnel with regular cross passages between the two tubes spaced 30 m apart from centre to centre.

The tender specifications included this recommendation and referred to the boring of a tunnel with very hard rock TBM's, preferably with "double shield" and established the basic parameters required for the same (total thrust and maximum starting torque) under both normal operation as well as in blocked situations.

All the tender offers complied with these conditions and once the work had been awarded, and after a series of meetings between the contractors and the GIF, an order was placed with the leading specialists HERRENKNECHT and WIRTH-NFM for two TBM's each.

5.1. Basic characteristics of the selected TBM's

From the feasibility and preliminary studies carried out on the Guadarrama massif it was known that the TBM's employed would have to be suitable for boring hard and abrasive rock.

tos, como para partir de la base de que las tuneladoras deberían responder a la tipología de máquinas para rocas duras y abrasivas.

Ahora bien, la construcción de la obra con tuneladoras de roca dura podía hacerse con dos metodologías diferentes. La primera consiste en la excavación con tuneladoras modernas, dotadas de sistemas auxiliares para el sostenimiento, pero de tipo convencional, y seguidamente, el revestimiento del túnel con hormigón colocado "in situ". Estas máquinas de última generación son las empleadas últimamente en varios túneles alpinos (Ver Figura 5.1).

La alternativa a la solución anterior es la excavación con una tuneladora tipo "doble escudo", denominación que se aplica a máquinas de roca dura albergadas dentro de una coraza metálica, lo que permite la simultaneidad de la excavación con la colocación de un revestimiento prefabricado que sirve a la vez de sostenimiento del terreno.

Pues bien, las máquinas convencionales de última generación han progresado notablemente en cuanto a equipos de sostenimiento por bulonado y/o colocación de cerchas, pero no así en cuanto a la aplicación de hormigón proyectado en las proximidades de la cabeza de corte, una verdadera asignatura pendiente de esta tecnología, en cuyo estudio y desarrollo de prototipos se viene haciendo un gran esfuerzo técnico y económico, de momento sin el éxito deseable.

Debe añadirse que la incorporación de equipos de perforación para el reconocimiento previo del terreno dentro de la concepción global de la tuneladora es ya una realidad que permite obtener información de los 50-70 m siguientes utilizando los tiempos muertos de mantenimiento de la máquina. Hay incluso soluciones razonables para el tratamiento previo del terreno con inyecciones con estos equipos integrados en la TBM, si ello fuese necesario.

En resumen, la limitación de las máquinas de tipo convencional reside en:

- a) La utilización del hormigón proyectado como elemento que completa la gama de las técnicas de sostenimiento, a una cierta distancia de la cabeza de corte.
- b) La imposibilidad, con el actual estado del arte, de simultaneizar el revestimiento final del túnel, tanto si es prefabricado como "in situ".

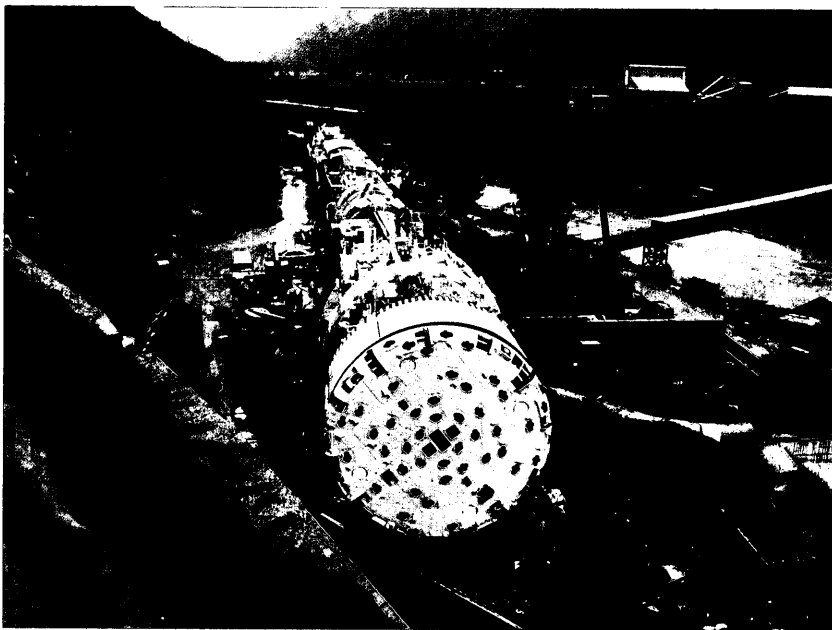


Figura 5.1. TBM moderna convencional. Túnel de Lötschberg (Suiza)/Figure 5.1. Conventional modern TBM. Lötschberg Tunnel (Switzerland).

However, tunnelling with hard rock boring machines can be carried out by different methods. The first consists of boring with modern boring machines equipped with auxiliary, though conventional, bearing systems and which then line the tunnel with in-situ concrete. These latest generation boring machines have recently been employed in various Alpine tunnels (See fig. 5.1).

The alternative to this solution is by excavation with a "double shield" tunnelling machine, this being a hard rock cutter face set within a steel shield which allows the simultaneous excavation of the tunnel and the placing of prefabricated segment lining which serves to support the ground.

While the latest tunnelling machines have made notable progress in terms of bolting and/or rock support, this is not the case with regards to the shotcreting from around the cutter face, and this still remains an outstanding matter for this type of technology as all manner of studies and prototypes have been carried out at considerable technical and economical cost without obtaining the desired results.

It should be added that the incorporation of cutting equipment for the preliminary exploration of the ground already forms part of the global concept of a TBM and information may be obtained 50-70 m in advance during the maintenance breaks made on the machine. There are also reasonable solutions for the pre-treatment of the ground in the form of ground injections by integrated equipment within the TBM, whenever this be required.

The limitations of the conventional machines may then be summarized as follows:

- a) The use of shotcrete as their entire support technique, set at a certain distance from the cutting face.
- b) The impossibility of simultaneously cutting and providing the final tunnel lining, regardless of whether this is prefabricated or formed in-situ.

As there are no other reasons, such as the deformability of the Alpine massifs, which would make

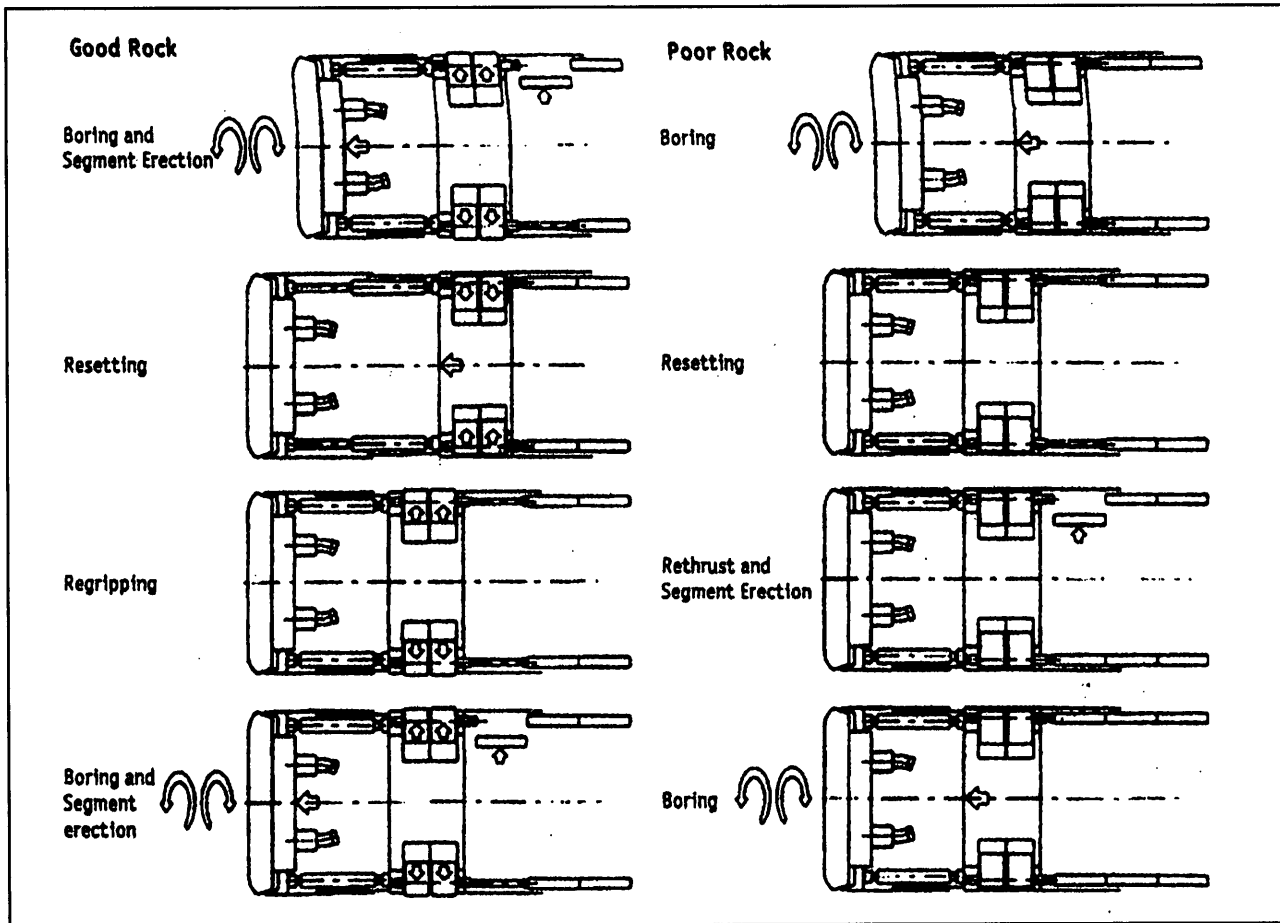


Figura 5.2. Trabajo de un "doble escudo" en distintos tipos de terreno/ Figure 5.2. "Double shield" TBM in different types of rock.

Por ello, de no existir otras razones, como la deformabilidad de los macizos alpinos, que pueden recomendar objetivos muy distintos para el sistema de excavación y revestimiento, las máquinas convencionales modernas no ofrecían la posibilidad de lograr en Guadarrama el objetivo de plazo mínimo de construcción.

Por el contrario, si se analizan las posibilidades de un "doble escudo" para excavar un túnel ferroviario de A.V. como el del macizo de Guadarrama, las conclusiones son las siguientes:

- La TBM coloca anillos prefabricados, generalmente de hormigón armado, como sistema básico de sostenimiento y esta metodología está totalmente integrada en la general de la máquina.
- Las máquinas modernas llevan equipos de reconocimiento y tratamiento del terreno, de prestaciones similares a los antes descritos para las TBMs convencionales de última generación.
- La única limitación de un "doble escudo" reside en la imposibilidad de excavar trazados en curva con radios menores de 50 diámetros, aproximadamente, pero no es este el caso de un túnel ferroviario de A.V.

the conventional boring machine more recommendable for excavation and lining, this has subsequently been rejected in the Guadarrama tunnel as these machines could not meet the minimum time requirements.

In comparison, the following conclusions may be reached when studying the possibilities of a "double shield" TBM for the high speed railway tunnel under the Guadarrama massif:

- The TBM places prefabricated, and generally reinforced concrete, segments as the main support system and one which is totally integrated within the tunnel advance.
- The modern machines are equipped with exploration and soil treatment equipment similar to those described for the latest conventional TBM's.
- The only limitation of a "double shield" TBM is that it cannot cut curved sections with a radius of less than 50 m. However, this is not the case of this particular high speed railway tunnel.
- The double shield TBM provides minimum operational periods as the segments are erected as the tunnel is bored. Figure 5.2 below shows the

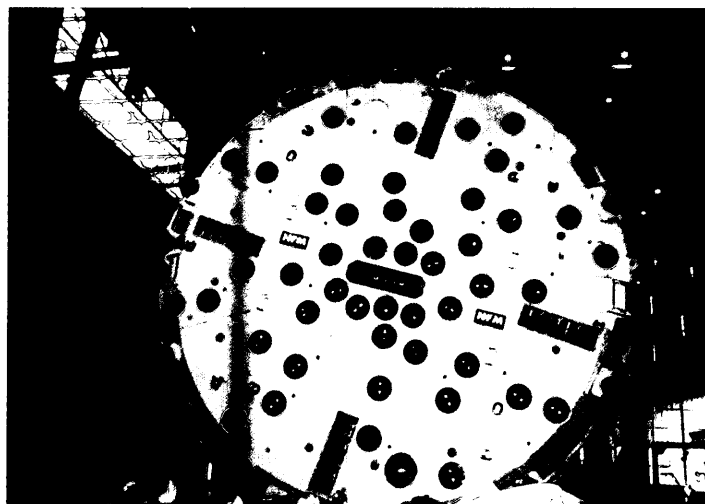
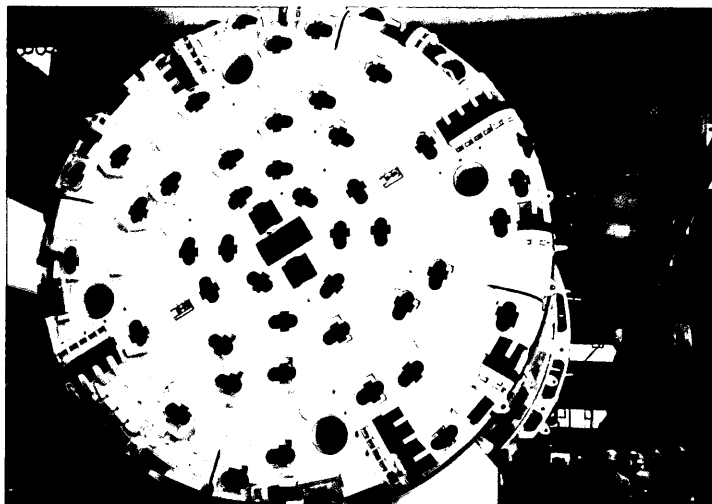


Figura 5.3.
Tuneladora
HERRENKNECHT de
Guadarrama/
Figure 5.3.
HERRENKNECHT TBM
Guadarrama.
Figura 5.4.
Tuneladora
WIRTH-NFM de
Guadarrama/
Figure 5.4 WIRTH
TBM Guadarrama.

• Y, por último, ofrece la ventaja del plazo mínimo de ejecución ya que la máquina puede colocar el revestimiento al tiempo que excava, como ilustra la siguiente Figura 5.2, una representación del proceso de avance, facilitada por los fabricantes.

• En roca de competencia media, e incluso medio-baja, el avance se hace con el escudo delantero a favor del empuje creado por la reacción de los "grippers" contra las paredes de roca, lo que permite excavar y, al mismo tiempo, colocar el revestimiento con el escudo trasero. Hecho esto, se recogen los "grippers" y el equipo de escudo desplaza la máquina a la posición inicial de un nuevo ciclo. Con ello se logran los ritmos máximos posibles de avance.

Es de esperar que la calidad media de la roca de Guadarrama permita avanzar de este modo en más del 90 % del trazado.

• En roca de baja competencia, el empuje no puede hacerse por reacción de los "grippers" contra las paredes, y por ello se mantienen recogidos. La máquina trabaja como un escudo, es decir, generando el empuje por presión de los cilindros perimetrales contra el revestimiento ya colocado.

El ciclo de avance tiene 2 tiempos: excavación y posterior colocación del anillo de revestimiento y, en tales casos, el rendimiento puede reducirse a algo más de la mitad del caso anterior.

• Finalmente, la protección metálica que constituye la coraza o escudo, permite el paso, sin excesiva dificultad, de la práctica totalidad de las fallas, excepto casos como el descrito de La Umbria, que pueden requerir tratamiento previo del terreno.

5.2. Características principales de las tuneladoras de Guadarrama

Las Figuras 5.3 y 5.4 representan cada una de las máquinas gemelas construidas por los dos fabricantes.

advance of the TBM through different rock types as provided by the manufacturers.

• In average quality rock and even in average-poor rock, the advance is made with the forward shield in accordance with the thrust created by the grippers against the rock wall, and this then allows boring and simultaneous segment lining from the rear shield. On the completion of the operation the grippers are withdrawn and the shield equipment moves the machinery on to the following position. This then enables maximum possible advance performance.

It is expected that the average rock quality throughout the Guadarrama tunnel will allow this type of advance through over 90% of the alignment.

• In poor quality rock the forward thrust cannot be made in accordance with the reaction of the grippers on the rock walls and these have to remain withdrawn. The boring machine then works as a shield by generating thrust through the pressure of the external cylinders against the previously erected segments.

The advance cycle is then divided into two periods: the boring and the subsequent segment erections and, in this case, the performance is reduced to just over half of that in good rock.

• The steel protection serving as the shield allows a relatively easy passage throughout all the faults, with the sole exception of the Umbria fault which will require prior soil treatment.

5.2. Main characteristics of the Guadarrama TBM's

Figures 5.3 and 5.4 show the twin boring machines built by both manufacturers.

En general, puede decirse que las características básicas son muy similares, porque responden a lo exigido en el Pliego del Concurso. No obstante, las dos tecnologías presentan soluciones diferentes en algunos aspectos importantes. Todo ello se comenta seguidamente.

5.2.1. Características generales comunes.

a) Cabeza de corte.

- El diámetro de excavación es de 9.500 mm y la longitud de los escudos de 15 a 16 metros.
- La estructura de cabeza responde al tipo de formas planas con aberturas periféricas de entrada de material a los correspondientes cangilones que alimentan la cinta extractora de la máquina.
- El accionamiento se hace con motores eléctricos con variación de frecuencia. El Par de giro nominal oscilará entre las 600 t x m y las 2.100 t x m, para las condiciones normales de trabajo, pudiendo alcanzar un Par máximo de desbloqueo del orden de 2600 t x m.
- Las herramientas son cortadores de simple disco de 17" (432 mm) de diámetro, para un empuje de 26.7 t/ud. y recambiables desde el interior de la máquina. La penetración máxima prevista es de 100 mm/min.
- El diseño de las máquinas incorpora el nuevo sistema de desplazamiento axial de la cabeza, del orden de los 200 mm, para hacer los sobrecortes que fueran necesarios en caso de convergencias en terrenos de fallas.

b) Cuerpos del escudo y Erector de dovelas.

- El cuerpo o escudo delantero lleva los cilindros de empuje normal para el avance, así como los estabilizadores del escudo y los sistemas de contrarrotación de la cabeza.
- El cuerpo o escudo telescópico va dotado de los cilindros necesarios para una carrera de apertura del orden de los 1500 mm.
- El cuerpo o escudo de "grippers" y empuje auxiliar lleva los elementos correspondientes al hidráulico de fijación de la máquina, con presión de los grippers sobre el terreno del orden de los 40 Kp/cm² más los gatos de empuje del equipo auxiliar para el eventual desbloqueo de la tuneladora con un empuje máximo que puede alcanzar las 10.000 t.
- El escudo de cola tiene un sistema de juntas de cierre para limitar el relleno del trasdós de los anillos. El erector de las dovelas de los anillos prefabricados de hormigón armado, de 320 mm de espesor, lleva un sistema de agarre por ventosas de vacío.

The basic characteristics of each TBM are very similar as they both correspond to the contract specifications. However, the two companies present different solutions in some very important aspects as is indicated below.

5.2.1. Common characteristics

a) Cutter head

- *The boring diameter is 9.500 mm and the shield length 15 to 16 m.*
- *The cutting face is flat with outer openings for the entry of excavated material through the corresponding scoops onto the machine's extractor conveyor belt.*
- *The machine is powered by variable frequency electric motors and the rated turning torque ranges from 600 t per m and 2,100 t per m under normal working conditions, and may reach a maximum pull out torque of around 2600 t per m.*
- *The cutters are 17" (432 mm) diameter discs, providing a 26.7 t/unit thrust and may be replaced from within the machine. The maximum estimated bore penetration is 100 mm per minute.*
- *The TBM design incorporates the new system of axial cutterhead displacement of around 200 mm which allows any additional cuts that be required in the phasing of fault areas.*

b) Shields and segment erector

- *The forward shield has normal thrust cylinders for the advance and stabilization of the shield as well as counter-rotating systems for the cutterhead.*
- *The telescopic shield is fitted with the necessary cylinders for opening runs of around 1500 mm.*
- *The gripper shield and auxiliary thrust employs hydraulic fixing equipment and the pressure of the grippers on the soil reaches around 40 Kp/cm². This together with the drive jacks of the auxiliary equipment for the resetting of the machine can provide a maximum thrust of 10,000 t.*
- *The rear shield has a system of closing joints to fix the positioning of the lining segments. The segment erector of the 320 mm thick prefabricated reinforced concrete segments is provided with a sucker pad gripping system.*

e) Additional aspects of the TBMs and auxiliary installations

- *Angled advance probes. These probes are set at a maximum of 7° to the machine axis in 100 mm*



Figura 5.5.- Cabeza de la TBM "HERRENKNECHT"/Figure 5.5. Cutter face of HERRENKNECHT TBM.

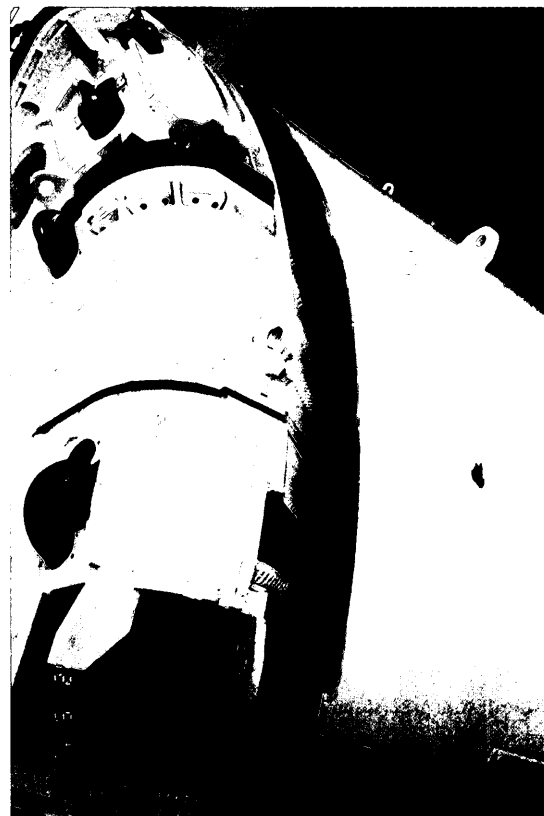


Figura 5.6.- Posible desplazamiento de la rueda de corte respecto del escudo delantero (HNK)/Figure 5.6. Possible sliding of cutter wheel away from the forward shield (HNK).

c) Otros elementos de las máquinas e instalaciones auxiliares.

- *Sondeos inclinados de reconocimiento.* Se harán con un ángulo máximo de unos 7° respecto del eje de la máquina, a través de orificios practicados en el escudo, de un diámetro de 100 mm. y repartidos en el perímetro del mismo, pudiendo formar abanicos troncocónicos para el reconocimiento y tratamiento del terreno. Las tuneladoras van dotadas de sondas con capacidad de perforar taladros de hasta 50 – 70 m.

- *Sondeos horizontales de reconocimiento.* Se harán paralelos al eje de la máquina, a través de los orificios de las herramientas de cabeza y con la máquina parada. Está previsto hacer uso de este dispositivo en caso necesario, con sondas de rotación para obtención de testigos, dotadas de varillaje de duraluminio, para evitar daños en la cabeza en caso de que se produjeran pérdidas de varillaje.

- *Sistemas de relleno del trasdós de anillos.* La dovela de solera se asentará sobre un "mortero seco" y el relleno restante se hará, bien por inyección de áridos con adición posterior de lechada de cemento, bien por bombeo de mortero.

- *Transporte de escombros desde el frente de trabajo al exterior.* Se hará por una cinta transportadora con una capacidad de 1250 t/h. Esta solución ofrece las máximas garantías de cumplimiento de los plazos, al evitar las incidencias de un transporte sobre vía que, en túneles de longitud mayor de los 5 Km, suelen afectar de forma importante a los rendimientos.

5.2.2.- Principales diferencias de las tuneladoras.

Las características que se acaban de describir son sensiblemente iguales en las máquinas de uno y otro fabri-

diameter housings in the shield set around the perimeter, forming tapered fans for soil survey and treatment. The TBM's can be fitted with probes capable of drilling up to 50 - 70 m bores.

- *Horizontal advance probes.* These probes are set parallel to the machine axis in the openings to the cutters and with the machine switched off. This equipment will be used, when necessary, with rotating bores to obtain core samples, and is fitted with a duralumin line to prevent damage to the cutterface in the case that the line be lost.

- *Segment lining system.* The base segment is set on "dry mortar" and the remaining fill will be made by aggregate injection and subsequent cement grouting or by shotcreting.

- *Removal of spoil and muck from the work face to the exterior.* The spoil will be removed by a 1250 t/hr conveyor belt. This solution provides a maximum guarantee of meeting work schedules and avoiding transport problems, which in tunnels of over 5 km can have an important effect on performance.

5.2.2. The main differences between the TBM's

The characteristics described above are very similar in both the manufacturers' TBMs but through different designs

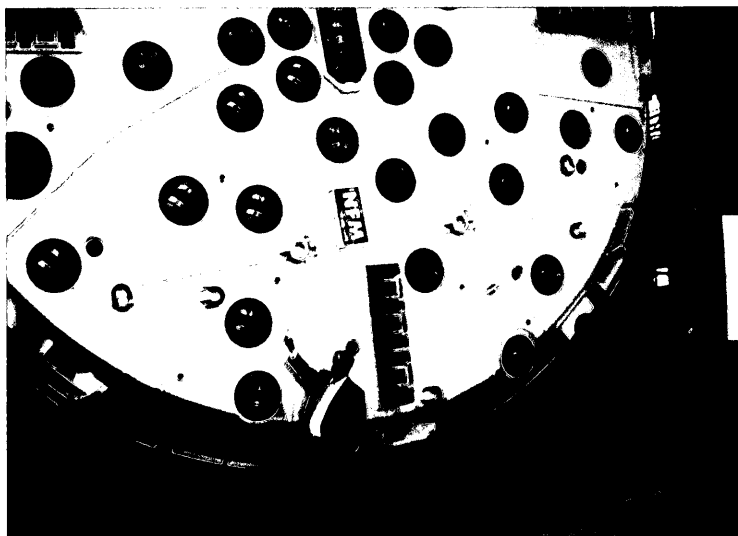


Figura 5.7. Detalle de la cabeza de la TBM "WIRTH"/Figure 5.7. Detail of the cutterface of the WIRTH TBM. Figura 5.8. "Grippers" de la TBM "WIRTH" en la semisección superior/Figure 5.8. Grippers on the WIRTH TBM set on the upper semi-section.



cante, aunque se consiguen con diseños diferentes, propios de la particular tecnología de aquellos. De hecho, esto sucede así en todo diseño de este tipo de máquinas, porque cada una de ellas es un prototipo que ha de responder a planteamientos diferentes para trabajar en terrenos y en condiciones diferentes.

No obstante, en este caso de Guadarrama hay algunas diferencias que procede comentar porque responden a enfoques distintos para solucionar el mismo problema, dando pautas a futuras concepciones de estas máquinas, según los resultados que se obtengan. Seguidamente se describen las dos principales.

a) Defensa de la cabeza contra la abrasión.

Junto con la calidad del cortador de disco que se emplee, la defensa de la estructura de la cabeza contra la abrasividad es un tema de importancia esencial. El desgaste debe poder ser controlado y reparado con la máxima facilidad, para evitar sorpresas graves.

En las máquinas HERRENKNECHT (Figura 5.5) hay una serie de elementos suplementarios de palastros de acero que se sueldan a la estructura principal de la cabeza: su misión es sufrir el desgaste de la abrasión, protegiendo directamente la estructura principal y los orificios que albergan los discos de corte.

La revisión de su estado y el posible refuerzo se hace desde el frente ya que,

Figura 5.9. "Grippers" de la TBM HERRENKNECHT en los laterales del escudo/Figure 5.9. Grippers on the HERRENKNECHT TBM set on the sides of the shield.



in accordance with the particular technology of each company. This does, in fact, occur in the design of all types of TBM as each one is a prototype and has to correspond to the different prevailing work conditions and stipulations.

In the case of the Guadarrama tunnel the differences between the TBM's are worthy of mention as they correspond to different forms of solving the same problem. These TBM's will establish the guidelines for subsequent models in accordance with the results obtained during this work. The two main differences between the TBM's are as follows:

a) Protection of the cutterface against abrasion

The protection of the cutterface against abrasion and the quality of the disc cutter employed is of great importance and any wear should be controlled and repaired with maximum ease in order to prevent serious disruption to the work.

In the HERRENKNECHT machines (fig. 5.5.) there are a series of supplementary steel blades which are welded to the main part of the cutterface. These additional blades serve to offset the wear caused by abrasion and directly protect the main structure and the housings to the cutting discs.

The monitoring of the blades and their possible reinforcement can be made from the face as in good quality rock the double shield allows for regripping after

en un tramo de roca de buena calidad, el doble escudo permite hacer el "regripping" al terminar el módulo de avance, dejando espacio para el personal de mantenimiento.

No obstante, el GIF aprobó una propuesta del fabricante para tener una opción complementaria con el posible desplazamiento de unos 0,60 m de la rueda de corte respecto del escudo delantero, lo que en muchos casos puede bastar para la inspección de la estructura frontal. (Figura 5.6).

El otro fabricante, WIRTH, resuelve la protección antiabrasión simplemente con una serie de cordones de electrodo duro con disposición sensiblemente radial, completada con los bordes de zonas concretas, disposiciones que define por experiencia. Son estos cordones los que se reconstruyen con soldaduras de recargue.

Los cordones citados se aprecian claramente en la Figura 5.4 y en la 5.7 más detallada. Para el control y el mantenimiento está previsto hacer uso del "regripping" del escudo, exclusivamente.

b) Disposición de los "grippers"

En las Figuras 5.8 y 5.9 se ven claramente las diferentes disposiciones adoptadas por los fabricantes. En las máquinas WIRTH los "grippers" se disponen en la semisección superior de la TBM. Al rotar alrededor de un eje, situado en esa parte alta, se abren, apretándose contra la semisección superior y teniendo la reacción necesaria en el apoyo inferior del escudo contra el terreno.

En la tuneladora HERRENKNECHT se adopta la disposición habitual de "grippers" apretando los laterales de la sección excavada.

Puede haber alguna mayor sensibilidad ante fenómenos de "rockbursting" en la primera solución, pero ambas disposiciones están avaladas por una amplia experiencia.

c) Entrada del material y eliminación de bloques

Un doble escudo, como máquina de roca dura, tiene las entradas de material excavado dispuestas en la periferia, pero, por otra parte, la superficie de entrada conviene que sea mayor para el paso de fallas o, simplemente, de rocas más blandas, si bien, en ese supuesto, la entra-



Figura 5.10.
Entradas
perimetrales
grandes y piezas
para rotura de
bloques en la TBM
HERRENKNECHT/
Figure 5.10. Large
perimeter
openings and
rakes for the
breaking up of
large rocks on the
HERRENKNECHT
TBM.

completing the advance and this then leaves space for maintenance staff.

However, the GIF accepted a proposal by the manufacturer for the supplementary option of the possible sliding of the cutting wheel some 0.60 m from the front shield in order to allow the inspection of the front structure. (Fig. 5.6).

The anti-abrasion protection provided by the other manufacturer, WIRTH, consists of a series of hard electrode drillrods set radially to the face together with other additional elements to the edges. This rods are subsequently repaired by reinforcing welds.

The said drillrods are clearly visible in figs 5.4 and in closer detail in fig. 5.7. The control and maintenance will entirely rely on the regripping of the shield.

b) Gripper arrangement

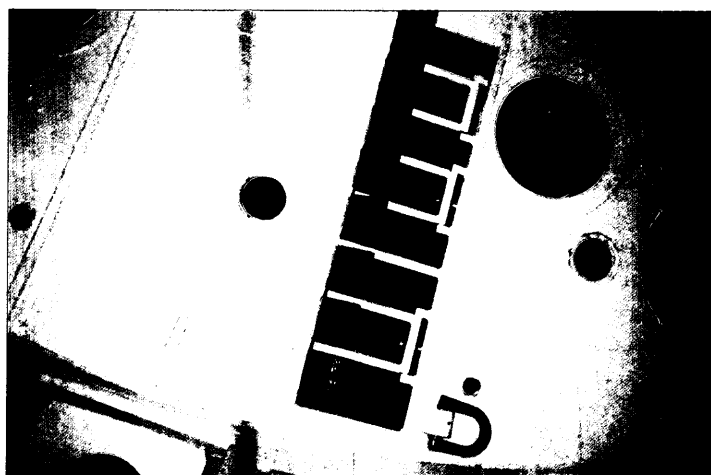
Figures 5.8 and 5.9 show the different gripper arrangements adopted by the two manufacturers. In the WIRTH TBM's the grippers are set on the upper semi-section of the machine. On rotating around an axis, set in this upper part, the grippers open and press against the upper semi-section and obtain the necessary reaction from the lower part of the shield against the ground.

In the HERRENKNECHT TBM the grippers are set in their more common position and press against the sides of the excavated section.

While the first solution may be somewhat more sensitive to rockbursting, both gripper arrangements are guaranteed by wide-ranging experience.

c) Entry and removal of excavated material and rocks

In a double shield, as in a hard rock machine, the excavated material enters through scoops set in the rim, though in the former the entry surface should be as large as possible to allow the cutting through faults or simply softer rock though, in this case, the entry of large rocks



Figuras 5.11.
Entradas
perimetrales y
centrales de las
TBM "WIRTH"/
Figure 5.11.
Perimeter and
central scoops on
the WIRTH TBM.

da de bloques debe restringirse para evitar atascos en el circuito de escombro.

Pues bien, en las TBM HERRENKNECHT las entradas son exclusivamente perimetrales y de gran tamaño. No obstante, la luz de las mismas se limita con unos fuertes "dedos" o piezas de acero que, además, facilitan la rotura de bloques al impedir su entrada directa.

should be restricted in order to prevent possible blockages in the spoil removal system.

In the HERRENKNECHT TBM the openings are large and purely peripheral. However these opening are reduced by steel "rakes" which aid the breaking up of larger rocks and preventing them from directly entering the unit.

BOCA SUR

	2001		2002				2003				2004				2005				2006				2007			
Trimestres	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º
Fabricación, transporte y montaje de las TBMs																										
Implantación instalaciones exteriores																										
Excavación de los túneles y revestimiento																										
Desmontaje de TBMs																										
Desmontaje de instalaciones exteriores																										
Hormigonado de solera y drenaje central																										
Galerías de conexión																										
Superestructura																										

BOCA NORTE

	2001		2002				2003				2004				2005				2006				2007			
Trimestres	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º
Fabricación, transporte y montaje de las TBMs																										
Implantación instalaciones exteriores																										
Excavación de los túneles y revestimiento																										
Desmontaje de TBMs																										
Desmontaje de instalaciones exteriores																										
Hormigonado de solera y drenaje central																										
Galerías de conexión																										
Superestructura																										

Figura 6.1. Programación del Túnel de Guadarrama. Infraestructura/Figure 6.1. Work schedule of Guadarrama Tunnel. Infrastructure.

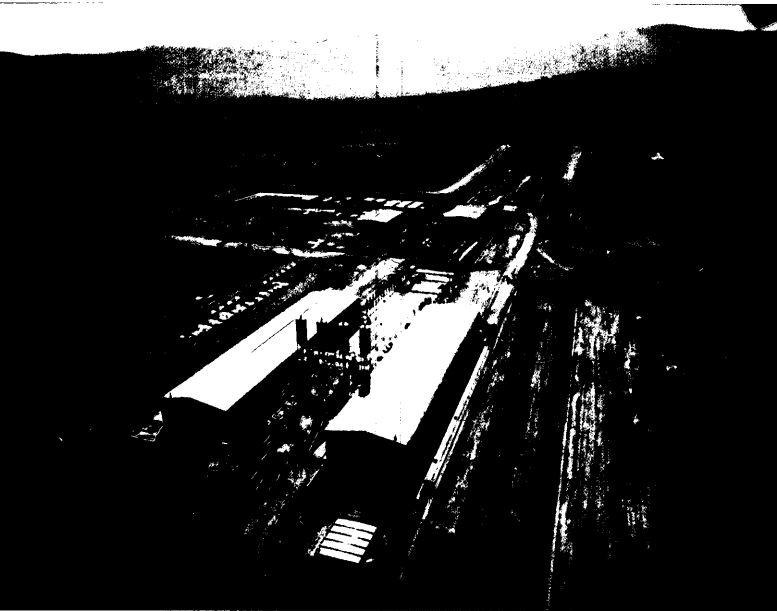


Figura 6.2. Instalaciones de obra de las Bocas Norte/ Figure 6.2. Site installations at the North Mouth. Figura 6.3. Instalaciones de obra de las Bocas Sur/ Figure 6.3. Site installations at the South Mouth.



Por el contrario, WIRTH mantiene sus diseños de entradas perimetrales reducidas y añade 4 entradas radiales con separadores que limiten el tamaño de entrada, todas ellas visibles perfectamente en la Figura 5.10 y en las más detalladas Figuras 5.11.

The WIRTH TBM, on the other hand, employs smaller peripheral scoops and adds 4 radial openings with separators to restrict the spoil size. These are perfectly visible in Fig. 5.10 and in more detail in Fig. 5.11.

6. PROGRAMACIÓN DE LA OBRA

En el gráfico de la figura 6.1 se ha reproducido, de forma muy resumida, la Programación de la Obra de Infraestructura de este Túnel de Guadarrama.

Como puede verse, la terminación de la excavación de los Túneles principales se estima en el 2005.

Las instalaciones de obra están prácticamente terminadas, como puede apreciarse en la Figura 6.2.

Las tuneladoras HERRENKNECHT se recibieron en fábrica en el mes de Julio 2002 e inmediatamente se trasladaron a obra, donde comenzó su montaje (una en cada Boca) a principio de Agosto 2002, estando previsto que comience la perforación en pruebas a principios de Octubre.

En cuanto a las tuneladoras WIRTH-NFM su programación seguirá inmediatamente a la de las anteriores esperándose iniciar la excavación a principios de Noviembre.

Por último cabe destacar que las unidades de obra más significativas son la ejecución del orden de 900.000,- de m³ de hormigón armado, con casi 50.000.000,- de kg. de acero, un volumen de excavación en túnel de 4.000.000,- de m³, excavación a cielo abierto de 2.500.000,- de m³, y la fabricación de 35.500 anillos de hormigón armado, formados por 248.500 dovelas. ■

6.- WORK SCHEDULE

The chart in fig. 6.1 gives a very brief overview of the work schedule for the Guadarrama Tunnel.

From the schedule it may be seen that excavation on the main tunnels is expected to be completed by 2005.

The site installations are now practically complete in accordance with the schedule shown above.

The HERRENKNECHT TBMs were received from the factory in July 2002 and immediately transported to site. Work began on the assembly of the TBM's (one at each mouth) at the beginning of August and it is expected that they will start test drilling at the beginning of October.

The WIRTH TBMs are scheduled to follow the preceding machines and it is expected that they will start boring in early November.

These tunnels will require the laying of 900,000 m³ of reinforced concrete, with almost 50,000,000 kg of steel, a tunnel excavation of 4,000,000 m³, an open cut excavation of 2,500,000 m³ and the manufacture of 35,500 reinforced concrete lining rings formed by 248,500 segments. ■