

Las Tuneladoras de Doble Escudo en la construcción de los túneles de Guadarrama

Double Shield Tunnellers in the construction of the Guadarrama Tunnels

Nota de la Redacción

El Congreso Internacional sobre *Excavación Mecánica de Túneles*, organizado en noviembre del pasado año 2004 en Turín a instancias de la Asociación Internacional de Túneles (ITA/AITES) tenía como objetivo principal activar el grupo de trabajo sobre "Túneles profundos de gran longitud".

El citado Congreso solicitó del GIF (Gestor de Infraestructuras Ferroviarias), Organismo del Ministerio español de Fomento que tiene encomendada la construcción y administración de la Red española de Alta Velocidad (1), una comunicación especialmente dedicada a las obras del *Túnel de Guadarrama*, por considerar que esta obra es la realización más importante a nivel internacional de túneles profundos de gran longitud, excavados con tuneladoras.

La *Revista de Obras Públicas* tuvo conocimiento de la celebración del citado Congreso y de la importancia que se dió a la obra de *Guadarrama*, por lo que solicitó permiso del GIF para publicar la Comunicación citada, lo que tiene la satisfacción de hacer en el presente número de marzo de 2005.

Pero, además, en el momento de la redacción de la comunicación, que se publica por esta revista en el artículo que sigue, estaba todavía sin excavar el tramo afectado por el accidente más importante de este Proyecto, la Falla de la Umbra, sobre la cual el autor resume los estudios realizados hasta aquella fecha, a fin de decidir el método más adecuado para resolver el paso de las máquinas a través de la falla citada.

Pues bien, la Dirección de la *Revista de Obras Públicas* tiene la satisfacción de poder anunciar que el mencionado accidente se pasó con pleno éxito en el pasado mes de Enero, alcanzándose a finales de dicho mes el punto establecido para la actuación de las dos tuneladoras que han venido trabajando en la construcción de los tubos desde las Bocas del Norte del Proyecto. Dichas máquinas han terminado su trabajo y se están desmontando actualmente.

Por otra parte, podemos anunciar que a finales del presente mes de marzo quedarán por excavar y revestir, para una de las dos tuneladoras de la Boca Sur, menos de 500 metros hasta alcanzar el punto de "cale" del tubo Este del Proyecto, esperando que lo haga igualmente, un mes más tarde, la máquina que está construyendo el tubo Oeste.

Con ello se completará la excavación y revestimiento de los casi 29 kms de cada tubo y de las galerías de conexión entre ambos, con lo que la obra civil de infraestructura de los *Túneles de Guadarrama*, el ambicioso Proyecto ferroviario de Alta Velocidad, del Ministerio español de Fomento, se habrá realizado en un plazo medio por tuneladora de 30 meses (2).

La *Revista de Obras Públicas*, que es el portavoz más significado de la ingeniería civil española, quiere hacer llegar su felicitación más entusiasta a todos aquellos profesionales que, a lo largo de los últimos años, han vencido las innumerables dificultades aparecidas, y que han puesto su trabajo y su ilusión en el empeño que hoy se culmina. ¡Enhorabuena!

(1) El GIF ha sido recientemente reorganizado, tomando la denominación de Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF)

(2) La fecha media del comienzo de las dos máquinas del Norte fue octubre 2002 y la de las tuneladoras del sur enero 2003.

The International Congress on Mechanized Tunnelling, held in November 2004 in Turin, was organized by the International Tunnelling Association (ITA/AITES) with the main aim of initiating the working groups on "Long tunnels at great depth"

The Rail Infrastructure Development Company (GIF) pertaining to the Spanish Ministry of Development and entrusted with the construction and development of the Spanish High Speed network (1), were invited to submit a paper on the work to the Guadarrama Tunnel, as this was considered to be the most important international example of a long tunnel at great depth excavated by tunnelling machines.

In the light of this Congress and the importance of the Guadarrama Tunnel, the *Revista de Obras Públicas* requested authorization from the GIF to publish this papers and has the pleasure to do so in this issue of March 2005.

At the time of drafting the paper, which appears in the following article of this journal, a section still had to be excavated through the most important fault in the entire project and, namely, the Umbria Fault. The author of the paper had summarized the studies carried out up to that time in order to decide upon the most appropriate method of passing the tunnelling machines through the said fault.

The editorial management at the *Revista de Obras Públicas* is pleased to announce that the fault was successfully passed in January and that, in the same month, work had reached the point established for the operation of the two TBMs which had been working on the construction of the tubes from the North entrance. These machines have since finished their work and are currently being dismantled.

We may also indicate that by the end of March, one of the two TBMs from the South entrance will have to excavate and line just under 500 metres before reaching the connection point with the East tube and it is expected that the machine constructing the West tube will meet the connection point one month later.

This will then complete the excavation and lining of the high-on 29 km long tubes and the connection galleries between the same. The civil work of the Guadarrama Tunnels, this ambitious high-speed railway project conceived by the Spanish ministry of Development, will then have been completed in an average period of 30 months per TBM (2).

The *Revista de Obras Públicas* is the most significant mouthpiece of Spanish civil engineering. The journal wishes to extend its wholehearted appreciation to all those professionals who have overcome all manner of difficulties over the years and have worked and endeavoured to fulfil this commitment. Congratulations.

(1) The GIF has recently been reorganized and is now known as the Rail Infrastructure Administrator (ADIF)

(2) The average starting date of the 2 TBMs from the North was October 2002, while that of the TBMs to the South was January 2003.

Las Tuneladoras de Doble Escudo en la construcción de los túneles de Guadarrama

Double Shield Tunnellers in the construction of the Guadarrama Tunnels

Felipe Mendaña Saavedra, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Asesor de Túneles del GIF. fms@spicc.e.telefonica.net

Resumen: Se comentan, en primer lugar, las características del macizo de rocas ígneas y metamórficas, extraduras y abrasivas, de los *Túneles de Guadarrama*, un proyecto bitubo de 28,4 km de longitud sin ataques intermedios. Seguidamente se exponen con detalle los aspectos más relevantes del comportamiento de las 4 TBMs tipo doble escudo que han excavado ya el 83% de la longitud total de proyecto, y de cuya experiencia resultan recomendaciones diversas a tener en cuenta en los futuros diseños de TBMs que hayan de trabajar en rocas de características similares.

Palabras Clave: Gneis, TBM doble escudo, Cortadores de disco, Cortadores periféricos, Accionamiento de rueda

Abstract: The characteristics of the igneous and metamorphic bedrock, extra-hard and abrasive, of the *Guadarrama Tunnels*, a bi-tube project of length 28.4 km without any intermediate attack, are first commented upon. Next, a detailed discussion is given of the most relevant aspects of the performance of the four double shield type TBMs which have now excavated 83% of the total project length. The experience of this leads to various recommendations to be borne in mind in future designs of TBM having to work in rock of similar characteristics.

Keywords: Gneis, Double shield TBM, Disc cutters, Peripheral cutters, Cutting wheel drive

1. Introducción

Los *Túneles de Guadarrama* son la obra más importante de la nueva Red ferroviaria española de Alta Velocidad. Forman parte del Nuevo Acceso Ferroviario al Norte y Noroeste de España, uno de los 14 proyectos calificados de prioritarios por la Unión Europea, que se inscribe en el Eje Atlántico de los Ferrocarriles Europeos.

Esta obra pertenece al Ministerio de Fomento de España que ha encomendado su diseño y ejecución al GIF (Gestor de Infraestructuras Ferroviarias) organismo del citado Ministerio, al que corresponde la gestión de la nueva Red de las líneas ferroviarias españolas.

La obra es un túnel de base de 28,4 km de longitud, cuyo trazado cruza los macizos montañosos del Sistema Central español a la cota máxima de 1.200 m s.n.m. con un recubrimiento máximo de 992 m bajo el macizo de Peñalara. El diseño consiste en dos tubos principales para vía sencilla, de 9,51 m de diámetro de excavación, con separación de 30 m entre ejes y galerías de cone-

1. Introduction

The *Guadarrama Tunnels* are the most important work of the new Spanish High Speed Rail Network. They form part of the New Rail Access to the North and North-West of Spain, one of 14 projects classified as priority by the European Union, and which forms part of the Atlantic Axis of European Railways.

This work belongs to the Spanish Ministry of Public Constructions (Ministerio de Fomento) which has engaged GIF ("Gestor de Infraestructuras Ferroviarias") -an Institution of mentioned Ministry, responsible for the management of the new Spanish Railway Network-, for its design and construction.

The work consists of a base tunnel of length 28.4 km whose route crosses underneath the mountain range of the Sistema Central at a maximum elevation of 1,200 m above sea level, with a maximum overburden of 992 m underneath the massif of Peñalara. The design consists of two main tubes for single track, of excavation diameter 9.51 m, with separation between centrelines of 30 m and

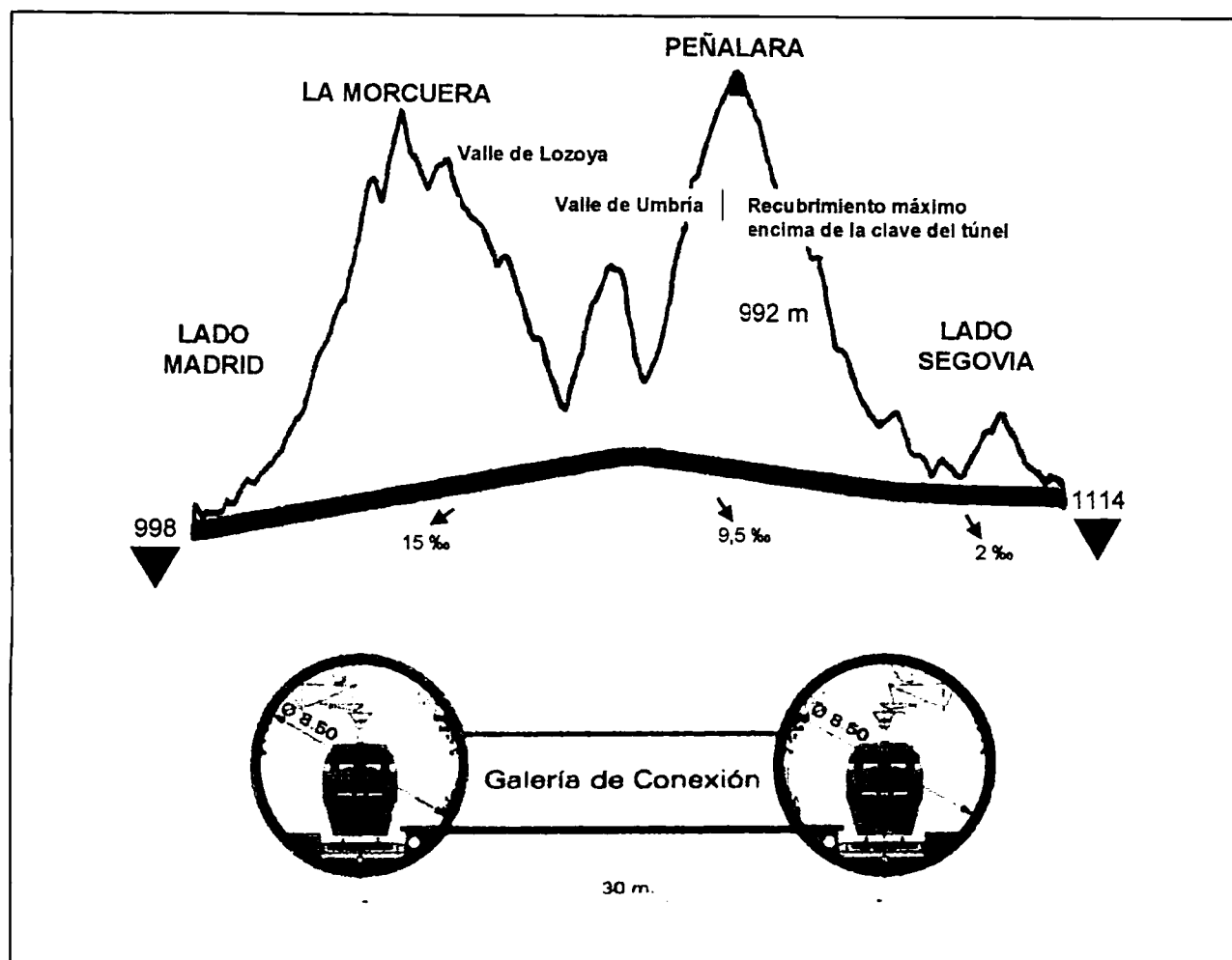


Fig. 1. Túneles de Guadarrama. Perfil longitudinal y Sección tipo/
T. Guadarrama
Longitudinal profile and Cross-section.

ción de 24 m² cada 250 m, cuya construcción se simultanea con la de los tubos principales, por motivos de seguridad (Figura 1). Finalmente, en la parte central del trazado las galerías se excavarán cada 50 m, añadiendo un túnel paralelo de unos 500 m, para formar un área de emergencia con capacidad para 1.200 pasajeros.

La construcción de la obra civil de los tubos principales, cuya terminación se prevé para mediados de 2005, ha permitido resolver una serie de problemas, cuya exposición es el objeto de esta Comunicación, porque su difusión favorecerá el desarrollo de la tecnología de las TBMs para rocas extraduras y abrasivas.

2. Características del terreno

2.1. Geología del trazado

El macizo de Guadarrama está formado por rocas ígneas y metamórficas, con predominio de los gneises,

connection galleries of 24 m² every 250 m, the construction of which is being carried out simultaneously with that of the main tubes for safety reasons (Fig. 1). Finally, in the central part of the route the galleries will be excavated every 50 m, adding a parallel tunnel of about 500 m in order to form an emergency area with capacity for 1,200 passengers.

The construction of the civil work on the main tubes, which is expected to be completed by the middle of 2005, has permitted a series of problems to be solved. It is the purpose of this Paper to discuss these problems since a knowledge of these solutions will aid the development of the technology of TBMs for extra-hard and abrasive rock.

2. Characteristics of the ground

2.1. Geology of the route

The Guadarrama massif consists of igneous and metamorphic rock, with a predominance of gneisses followed by granites, and its general geology is familiar.

seguidos de los granitos y su geología general era conocida.

Elegido previamente un pasillo entre la población de Soto del Real (provincia de Madrid) y la ciudad de Segovia, el trazado del túnel fue definido por el GIF dentro de las propuestas de un Concurso de Proyecto y Obra, que incluyó trabajos de reconocimiento realizados a lo largo de un año.

Dichos trabajos hubieron de limitarse a la perforación de sondeos con testificación geofísica, ya que los condicionantes medio ambientales fueron muy estrictos, dado que la Sierra de Guadarrama es zona especialmente protegida. La calidad geotécnica del macizo se calificó de aceptable, si bien se definieron fallas que afectaban muy directamente al túnel en las zonas de menor recubrimiento de ambos extremos, así como fracturas e intercalaciones de diques intrusivos a lo largo del trazado.

Se distinguen cinco grandes sectores en el macizo de Guadarrama. De Sur a Norte: Granitos de La Pedriza; Ortogneisses de La Najarra; Sector de Peñalara; Granitos de La Granja y Complejo metamórfico de Hontoria. Corresponden al Sector de La Najarra las dos fallas principales del macizo: falla de La Angostura, con anchura estimada de 150 m y falla de la Umbría, con una anchura estimada de 600 m. En los reconocimientos iniciales se comprobó que la primera presentaba en profundidad una brecha de falla cohesiva, descartando un grado de permeabilidad sensible por lo que se calificó de dificultad menor. Por el contrario, los reconocimientos de La Umbría dieron resultados negativos, con posibilidad de presentar una fracturación elevada, caudales importantes y carga de agua de hasta 18 Bar.

Se estimó conveniente completar los reconocimientos de La Umbría con un pozo vertical y una galería desde la cual podría hacerse un tratamiento previo de consolidación. Las restricciones medio ambientales no lo permitieron y el estudio definitivo se demoró hasta los pasados meses de Febrero a Septiembre de 2004.

El tramo de estudio abarcó unos 900 m del trazado, realizándose los trabajos siguientes: a) Estudio de antecedentes y de una cartografía geológico estructural en una banda de 3 km de anchura (2 km al este y 1 km al oeste del trazado); b) Tomografía eléctrica de superficie; c) Perforación mecánica de 5 sondeos verticales, de entre 200 y 280 m de profundidad, y 1 sondeo inclinado a 45° paralelo en planta a la traza; d) Testificación geológico-geotécnica de los testigos y toma de muestras para ensayos; e) Testificación geofísica de los sondeos, y f) Tomografía eléctrica sondeo-sondeo y sondeo-superficie, complementada con tomografía sísmica. Con ello fue posible elaborar los perfiles longitudinales y transversales y la cartografía geológico estructural a escala 1/2000, que recomendaron realizar una ligera variante del tra-

Having previously chosen a corridor between the town of Soto del Real (Madrid province) and the city of Segovia, the final route of the tunnel was defined by GIF within the proposals of a Project and Work Tender Competition, which included survey works conducted over the course of a year.

Those works had to be limited to the drilling of boreholes with geophysical sampling since the environmental conditioning factors were very strict, due to the fact that the Sierra de Guadarrama is a specially protected zone. The geotechnical quality of the massif was assessed as acceptable, though faults were defined that had a very direct effect on the tunnel in the zones with less overburden at the two ends, plus the existence of fractures and interlaying of intrusive dikes along the route.

Five major sectors are distinguished in the Guadarrama massif. From south to north: La Pedriza granites; La Najarra orthogneisses; Peñalara Sector; La Granja granites and the metamorphic complex of Hontoria. The two main faults in the interior of the massif occur in the Sector of La Najarra: the La Angostura fault with an estimated width of 150 m and the La Umbría fault with an estimated width of 600 m. In the initial surveys it was confirmed that the first fault presented a cohesive fault gap deep down, though any appreciable degree of permeability was discarded, and so it was assessed as being a minor difficulty. On the other hand, the surveys of La Umbría gave negative results, with the possibility of presenting a high degree of fracturing, and important flows and a water load of up to 18 Bar.

It was considered advisable to complete the surveys of La Umbría with a vertical shaft and a gallery from which prior consolidation treatment could be carried out. The environmental restrictions did not permit this, and so the final study was delayed until February to September 2004.

The section of study included about 900 m of the route, with the following works being performed: a) Study of previous records and of the structural geological cartography in a band of width 3 km (2 km to the east and 1 km to the west of the route); b) Electrical tomography of the surface; c) Mechanical drilling of five vertical boreholes, of between 200 and 280 m in depth, and one borehole inclined at 45° and parallel to the route; d) Geological-geotechnical extraction of cores and taking of samples for tests; e) Geophysical sampling of the boreholes, and f) Borehole-borehole and borehole-surface electrical tomography, complemented with seismic tomography. With this it was possible to prepare the longitudinal and transverse profiles and the structural geological cartography at a scale 1/2000, which recommended making a slight variant to the route, with a

Cuadro n° 1/ Table n° 1

Roca/Rock	RCS/SCS (MPa)		RTS/STS (MPa)		I _s 50 Real
	Previsto/Forecast	Real	Previsto/Forecast	Real	
Gneiss	85-110	85-120	8,8	11,5	7,5-9,0
Adamellitas/Adamellites	95	80-100	7,2	8-10	6,5-8,0
Diques de pórfido/Porphyry dikes	110	150	12,8	14	9,5-10,0
Leucogranitos/Leucogranites	81-150	85-100	10,8	10,2	8,0-8,5
Pegmatitas/Pegmatites	95	-	6,6	9,7	-

zado, con desplazamiento de unos 230 m hacia el este, con lo cual:

- La variante asegura evitar terrenos pertenecientes al Cretácico, de baja calidad (facies Utrillas), que hubiera atravesado el trazado original.
- Aunque el terreno puede presentar una calidad geotécnica baja en casi 600 m, la longitud del tramo afectado por las fracturas principales se limita a unos 250 m. No es de esperar carga de agua, ni aportaciones significativas.

El paso de esta falla se realizará, previsiblemente, en los meses de Enero y Febrero de 2005, con ayuda de los medios propios de las TBMs. Está previsto, no obstante, construir una galería en "by-pass" si fuera necesario.

2.2. Caracterización geotécnica de los materiales

-Índice RMR.- Se han venido confirmando los resultados de los ensayos del proyecto sobre muestras de sondeos, con valores de RMR, en general, superiores a 45. La previsión de un RMR de al menos 20 para los tramos con fallas resultó, en general, pesimista, siendo por tanto la calidad geomecánica del macizo de nivel medio-bueno y bueno.

-Resistencia a compresión simple/Tracción indirecta e Índice I_s 50.- Las previsiones medias de los estudios iniciales resultaron muy inferiores a la realidad, como puede verse en el Cuadro 1.

-Abrasividad.- El Índice Cerchar se mantuvo en general, en valores siempre superiores a 3, alcanzando valores próximos al máximo de 6. En cuanto al Contenido en minerales abrasivos fueron muy frecuentes los altos valores reflejados en el Cuadro 2.

displacement of about 230 m to the east. With this variant, the following main points were regarded as confirmed:

- The variant ensured the avoidance of low quality ground (Utrillas facies) belonging to the Cretaceous, which the original route would have traversed.
- Although the ground could present a low geotechnical quality along almost 600 m, the length of the section affected by the main fractures was limited to about 250 m. No water load was expected, nor any significant inflows.

This fault was foreseeably going to be passed through in the months of January and February 2005, with the aid of means appropriate to the TBMs. Nevertheless, it was planned to construct a "by-pass" gallery if necessary.

2.2. Geotechnical Characterisation of the materials

-RMR Index.- The results of the tests on borehole samples have been confirmed, with RMR values in general higher than 45. The forecast of an RMR of at least 20 for the sections with faults turned out in general to be pessimistic, and the geomechanical quality of the bedrock had a level of average-good and good.

-Simple compression strenght/Indirect tension and I_s 50 Index.- The average forecasts from the initial studies turned out to be much lower than reality, as can be seen in the following Table 1.

-Abrersivity.- The Cerchar Index was in general maintained at values at all times greater than 3, reaching values close to the maximum of 6. In terms of the Content of abrasive minerals, the high values were very frequent (Table 2).

Cuadro n° 2. Contenido en minerales abrasivos
Table n° 2. Content in abrasive minerals

	Medios/Averages	
	Previstos/Forecast	Reales
Gneisses	29-33 %	48 %
Granitos/Granites	26 %	52 %
Adamellitas/Adamellites	32 %	54 %
	Máximos/Maxima	
	Previstos/Forecast	Reales
Diques pórfidos/Porphyry dikes	40 %	64 %
Diques cuarcíferos/Quartziferous dikes	60 %	98 %

3. Las tuneladoras de roca dura de Guadarrama

Los diseños de tuneladoras de gran diámetro, esto es, por encima de los 8 m, se desarrollan a partir de 1.995 y están íntimamente ligados a los proyectos de túneles de gran longitud, elementos básicos de los modernos Planes de las Infraestructuras del Transporte (ferrocarriles de alta velocidad, autopistas, ferrocarriles metropolitanos, etc.). Ahora bien, la tecnología de las propias tuneladoras no se pudo desarrollar con la rapidez suficiente para estudiar a fondo toda la nueva problemática que presentan las nuevas dimensiones de las máquinas, en cuyo diseño industrial se han extrapolado experiencias de máquinas anteriores que no tuvieron el éxito esperado.

Por todo ello, a la vez que puede decirse que la experiencia de estos últimos años permite dar por resueltos muchos de dichos inconvenientes, también hay que reconocer que ha puesto en evidencia las principales "asignaturas pendientes" que todavía persisten.

Por lo que se refiere a las tuneladoras de roca dura, a riesgo de caer en alguna omisión, y limitándonos a las máquinas de nueva construcción de los fabricantes más conocidos, seguidamente se recogen en los cuadros nº 3 y 4 las tuneladoras de roca dura de grandes dimensiones construidas en los últimos años. Como puede observarse, una buena parte de estas máquinas corresponden a proyectos españoles. De entre todos ellos destacan las máquinas de los *Túneles de Guadarrama* a las que se refiere lo que sigue.

3.1. Elección del tipo de TBM

Conocidas las características del macizo, se decidió que las TBMs de *Guadarrama* fuesen máquinas con rueda de corte para roca extradura y muy abrasiva.

Por otra parte, se fijaron como objetivos del máximo interés el cumplimiento de un plazo mínimo de ejecución de los tubos principales, evitando, no obstante, la construcción de ataques intermedios para respetar al máximo las exigencias medioambientales, por lo que se decidió hacer la construcción con 4 máquinas, atacando dos de ellas cada tubo desde sus bocas extremas.

Como resultado de todo ello, se consideraron como más convenientes TBMs de roca dura del tipo doble escudo, fijando las cifras de los parámetros básicos (Empuje y Par de giro) que figuran en el Cuadro nº 3. Como equipos complementarios se adoptaron los siguientes:

- Cinta transportadora a lo largo de cada tubo para la extracción de escombros desde la TBM hasta el exterior. Se utilizan cintas transportadoras (3 de ellas colgadas y una apoyada en una estructura ligera), de

3. Tunnellers for hard Guadarrama rock

The designs of large diameter tunnellers, in other words, those above 8 m, were first developed in 1995 and are intimately connected to tunnel projects of great length, which are basic elements in modern Transport Infrastructure Plans (high speed rail, motorways, metropolitan railways, etc.). However, the technology of the tunnellers themselves has not developed sufficiently fast for being able to make an in-depth study of the new problem presented by the large dimensions of the machines, the industrial design of which has involved the extrapolation of the experiences of earlier machines which did not have the success that was expected.

Because of this, although it can be said that the experience of these last few years has meant that certain drawbacks could be regarded as overcome, it nevertheless has to be admitted that this experience has also highlighted the major stumbling blocks that still persist.

As far as hard-rock tunnellers are concerned, at the risk of certain omissions and confining ourselves to newly built machines from the most well-known manufacturers, tables Nº 3 and 4 contain large-dimension hard-rock tunnellers built in recent years. As can be seen, a large part of these machines correspond to Spanish projects. Standing out among them are the machines of the Guadarrama Tunnels to which the following refers.

3.1. Choice of type of TBM

Knowing the characteristics of the bedrock, it was decided that the Guadarrama TBMs would be machines with a cutting wheel for extra-hard and very abrasive rock.

Moreover, compliance with a minimum execution period for the main tubes was set as a target of the utmost interest, though nevertheless avoiding the construction of intermediate attacks in order to respect environmental requirements as much as possible. So, it was decided to carry out the construction with four machines, with two of them attacking each tube from its two mouths.

As a result of all this, hard-rock TBMs of the double shield type were considered to be most suitable, setting the figures of the basic parameters (Thrust and Turning torque) as they appear in Table Nº 3. As complementary equipment, the following were adopted:

- *Conveyor belt along each tube for the extraction of rubble from the TBM to the outside. Conveyor belts (three of them hanging and one supported on a light*

Cuadro n° 3. TBMs de roca de gran diámetro/ Table n° 3. TBMs of large diameter rock

Proyecto/Project Año fabricación Year of manufacture	Tipo de terreno Type of ground	Tuneladora/Tunneller	Giro cabeza/Head rotation	Empuje max°/Max thrust
		Marca-Tipo * Make-Type *	Potencia / r.p.m. Power / r.p.m.	Principal: Principal:
		Uds / Ø _{exc} / Peso Units / Ø _{exc} / Weight	Par nominal Rated torque	Auxiliar: Auxiliary:
Pinglin Taiwan 1996	Areniscas, Pizarras Sandstones, Slates (>200 MPa)	Wirth / (2)	4.000 Kw (0-4)	50.500 kN
		2 ud / 11,75 m /	7.200 kNm	78.700 kN
Tschermer Suiza /Switzerland 1999	Caliza, Marga Limestone, Marl	Herrenknecht/(1)	2.100 kW	
		1 ud / 9,53 m /		
Guadarrama España/Spain 2001	Gneiss, granitos Gneiss, granites (>200 MPa)	Wirth-NFM (2)	4000 kW/ 0-5	10450 kN
		2 ud / 9,465 m/1.000 t	20.750 kNm (1,8 rpm)	108000 kN
Lötschberg Suiza /Switzerland 2000/2001	Gneiss, Granito, Granodiorita Gneiss, Granite, Granodiorite (> 200 MPa)	Herrenknecht/ (1)	3.500 kW (0-6)	
		2 ud / 9,43 m	8.825 kNm (3,76 rpm)	22.800 kN
Guadarrama España/Spain 2001	Gneiss, granitos Gneiss, granites (>200 MPa)	Herrenknecht/ (2)	4.200 kW/0-5	82.000 kN
		2 ud / 9,56 m	20.447 kNm(1,85 rpm)	101.200 kN
Gotthard (Bodio/Falido) Suiza/Switzerland 2002	Gneiss, Granito, Esquistos Gneiss, Granite, Schists (>200 MPa)	Herrenknecht/ (1)	4.000 kW	
		2 ud / 9,33 m		
Abdalaia España/Spain 2003	Calizas, Margas Limestone, Marls	Mitsubishi-Robbins/ (2)	4.900 kW (0-6)	82.500 kN
		2 ud / 10,2 m /	18.700 kNm (2,5 rpm)	117.000 kN
San Pedro España/Spain 2004	Gneiss, Granito, Esquistos Gneiss, Granite, Schists (>150 MPa)	Herrenknecht/ (1)	~ 3.500 kW	
		2 ud / ~ 9,55 m /	Máquinas de Lötschberg adaptadas Adopted Lötschberg machines	
Pajares L2 España/Spain 2004	Calizas, Margas Areniscas Limestone, Marls Sandstone	Herrenknecht/ (2)	5.600 kW/0-6 rpm	67.900 kN
		1 ud /10,12 m/1.550 t	30.051 kNm	135.800 kN
Perthus España/Francia Spain/France 2004	Granodioritas Areniscas Pizarras Granodiorites Sandstone Slates	Herrenknecht/ (2)	4.900 kW/0-5,5 rpm	64.150 kN
		2 ud / 9,96 m / 1.500 t	29.150 kNm	89.000 kN

*Tipos: (1) Convencional abierta (2) Doble escudo

Rocas extraduras y abrasivas/Extra-hard and abrasive rocks

*Types: (1) Conventional open (2) Double shield

Cuadro n° 4. Escudos de gran diámetro para roca/ Table n° 4. Large diameter shields for rock

Proyecto/Project Año fabricación Year of manufacture	Tipo de terreno Type of ground	Tuneladora/Tunneller	Giro cabeza/Head rotation	Empuje max*/Max thrust
		Marca-Tipo * Make-Type *	Potencia / r.p.m. Power / r.p.m.	Principal: Principal:
		Uds / Ø _{exc} / Peso Units / Ø _{exc} / Weight	Par nominal Rated torque	Auxiliar: Auxiliary:
Mürgental Suiza/Switzerland 1997	Marga y arenisca. Molasa Marl and sandstone. Molasse	Herrenknecht/ (3)	3.200 kW	
		1 ud / 11,98 m /		
Flüelen 2000	Arenisca, cuarzo, esquistos Sandstone, quartz, schists	Herrenknecht/(3)	3.200 kW	
		1 ud / 11,98 m /		
CRC 320 Hong Kong 2000	Gravas, arenas, granito duro Gravels, sands, hard granite (>200 MPa)	NFM /(4)	2.250 kW (0-3)	166.000kN
Metro Porto Portugal 2000/2002	Granitos, jabre esquistos Granites, jabre schists (>200 MPa)	Herrenknecht/ (4)	2.400 kW (0-4,5)	
		2 ud / 8,90 m /	12.900 kNm (2 rpm)	70.600 kN
L-9 Metro Barcelona España/Spain 2002	Granodioritas. Cornubianitas. Esquistos. Granodiorites. Cornubianites. Schists. (>150 MPa)	Wirth/NFM/ (4) dual	4.750 kW (0-3,7)	90.000 kN
		1 ud / 11,95 m / 1.472 t	57.000 kNm	110.000 kN
Pajares Norte L.1 España /Spain 2004	Caliza, Marga, Arenisca Limestone, Marl, Sandstone	Herrenknecht/ (3)	4.900 kW (0-6)	
		1 ud / 9,90 m /	30.000 kNm	115.000 kN
Pajares Norte L.1 España /Spain 2004	Caliza, Marga, Arenisca Limestone, Marl, Sandstone	Wirth/NFM (3)	5.600 kW (0-6)	
		1 ud / 10,12 m / 1.550 t	23.051 kNm (2,25 rpm)	135.773 kN
Pajares Sur L.3 España /Spain 2004	Caliza, Marga, Arenisca Limestone, Marl, Sandstone	Wirth/NFM/ (3)	4.900 kW (0-5)	
		1 ud / 9,60 m /	25.000 kNm	150.000 kN
Pajares Sur L.4 España /Spain 2004	Caliza, Marga, Arenisca Limestone, Marl, Sandstone	Mitsubishi/Robbins/(3)	5.180 kW (0-5)	
		1 ud / 9,60 m /	26.000 kNm (1,9 rpm)	139.500 kN

*Tipos: (3) Convencional abierto (4) EPB

Rocas extraduras y abrasivos/Extra-hard and abrasive rocks.

*Types: (3) Conventional open (4) EPB

una capacidad de 1.500 t/h (anchuras de 900 ó 1.000 mm) que pueden llegar a dominar longitudes de hasta 15 km de túnel.

• 2 Sonatas de perforación por TBM, con equipo auxiliar de análisis de parámetros para el reconocimiento del terreno desde el frente, y la posible colocación de paraguas de micropilotes de tubo de fibra de vidrio.

structure) were used of capacity 1,500 t/h (widths of 900 or 1,000 mm) which could deal with lengths of up to 15 km of tunnel.

• Two drilling probes per TBM, with auxiliary equipment for analysis of parameters for surveying the ground from the face and the possible location of micropile umbrellas of fibreglass tube.

El anillo tipo de revestimiento, de 320 mm de espesor y 8,50 m de diámetro interior tiene una longitud de 1,60 m y está formado por seis dovelas: una dovela base (66°) y otra contigua (73,5°), más 4 dovelas iguales (49°) y la pieza llave (24,5°). Dada la magnitud de los radios de traza-do ($R_{min} = 8.400$ m) el anillo no tiene conicidad.

Las 4 TBMs que están construyendo los *Túneles de Guadarrama* son gemelas dos a dos, de las marcas Herrenknecht y Wirth respectivamente. Para la excavación de cada uno de los tubos trabaja una TBM de cada marca citada desde las bocas respectivas (Figuras 2 y 3). En lo que sigue, se exponen los aspectos más destacados del estudio y comportamiento de diversos elementos de estas máquinas.

3.2. Herramientas de corte

Las herramientas de corte para roca extradura son, hoy día, exclusivamente los cortadores de disco. Sus elementos básicos son el anillo de corte de metal duro, calado en caliente sobre un disco de acero que gira libremente sobre su eje, apoyado en la carcasa por medio de cojinetes de rodamientos de rodillos.

La investigación de materiales duros llegó a definir modelos de cortadores que responden a dimensiones y capacidades comerciales desde diámetros de 15 1/2" (250 kN) a 17" (270 kN) y 19" (300 kN), abandonándose otros prototipos mayores ensayados con éxito en los laboratorios, porque su peso excesivo dificulta el mantenimiento.

Entre las opciones de Ø 17" y Ø 19", en *Guadarrama* se optó por la primera, ya que, con la tecnología actual y para rocas extraduras y abrasivas ni está claro que haya ventaja en el "ratio" de avance, ni que, con ruedas de estos tamaños, la deformación que su estructura debe admitir sea compatible con las dimensiones de los huecos que precisan las carcasas de cortadores de más de 17" de diámetro, que plantean problemas en la soldadura a dicha estructura.

El cortador de 17", de peso razonable para su reposición (unos 160-170 kg), y con separación de huellas de 80 mm (1), ha resuelto satisfactoriamente el corte de la roca de *Guadarrama*. Otras cuestiones importantes derivadas de la experiencia de esta obra, que deben señalarse son:

a) **Control de la Presión de contacto.** Dos de las TBM de *Guadarrama* dispusieron de un sistema para este

The ring type lining, of thickness 320 mm and interior diameter 8.50 m, has a length of 1.60 m and consists of six voussoirs: one base voussoir (66°) another contiguous one (73.5°), plus four equal voussoirs (49°) and the keystone (24.5°). Given the magnitude of the radii of the route ($R_{min} = 8,400$ m) the ring has no conicity.

The four TBMs that are constructing the Guadarrama Tunnels consist of two pairs of twins, from the makes Herrenknecht and Wirth respectively. For the excavation of each of the tubes, one TBM from each of those makes is working from the respective mouths (Figures 2 and 3 below). The most notable aspects of the study and performance of various elements of the machines are now going to be discussed.

3.2. Cutting tools

The cutting tools for extra-hard rock are nowadays exclusively disc cutters. Their basic elements are the hard-metal cutting ring, fastened hot to a steel disc freely rotating on its axis, supported on the housing by means of sets of roller bearings.

The investigation into hard materials led to defining cutting models that accorded with commercial dimensions and capacities from diameters of 15 1/2" (250 kN) to 17" (270 kN) and 19" (300 kN), with other larger prototypes that were successfully tested in laboratories being abandoned because their excessive weight made their maintenance difficult.

Among the options of Ø 17" and Ø 19", in Guadarrama the former was chosen since, with current technology and for extra-hard and abrasive rocks, it is not clear if there is any advantage in the "ratio" of advance, nor, with wheels of that size, whether the deformation which its structure had to admit would be compatible with the dimensions of the gaps required by housings of cutters of more than 17" in diameter, which creates problems in welding to that structure.

The 17" cutter, of reasonable weight for its replacement (around 160-170 kg), and with a tread separation of 80 mm (1), has satisfactorily solved the cutting of Guadarrama rock. Other important questions deriving from the experience of this work which must be pointed out are:

a) Control of the contact pressure. Two of the Guadarrama TBMs had a system for this control, which is of great importance, because, although the pressure is not measured in each cutter (which would

(1) En una TBM de Øexc = 10 m el pasar a una huella de 70 mm supone un aumento de un 12% - 14% del número de cortadores, lo que puede ser difícil de resolver para máquinas de menos de 12 m de diámetro, por excesivo debilitamiento de la estructura metálica de la rueda.

(1) In a TBM of Øexc = 10 m passing to a tread of 70 mm implies an increase of 12% - 14% in the number of cutters, which can be difficult to solve for machines of less than 12 m in diameter, due to excessive weakening of the metallic structure of the wheel.

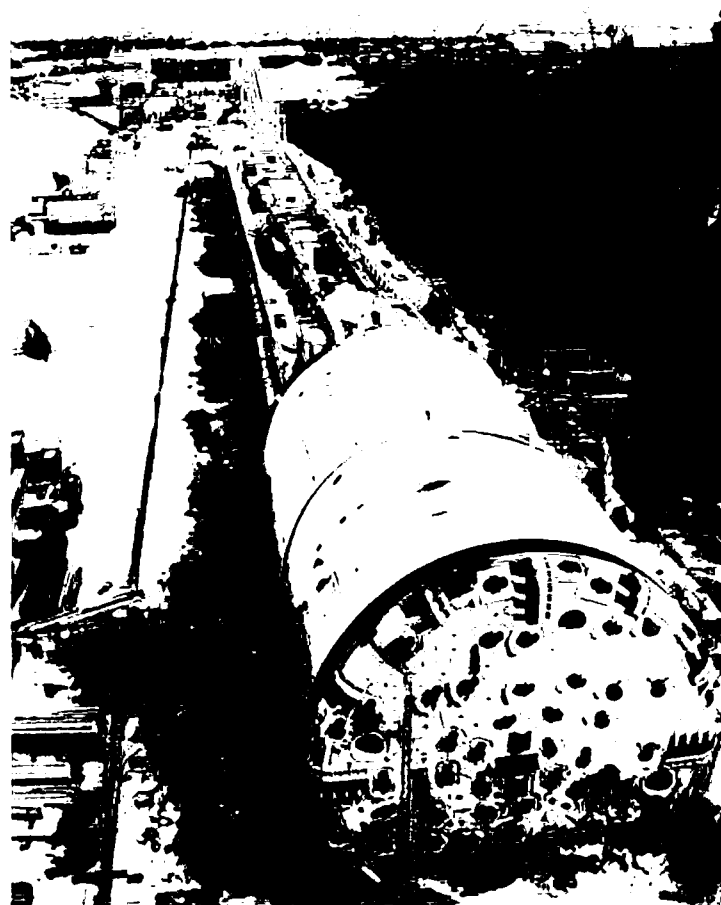
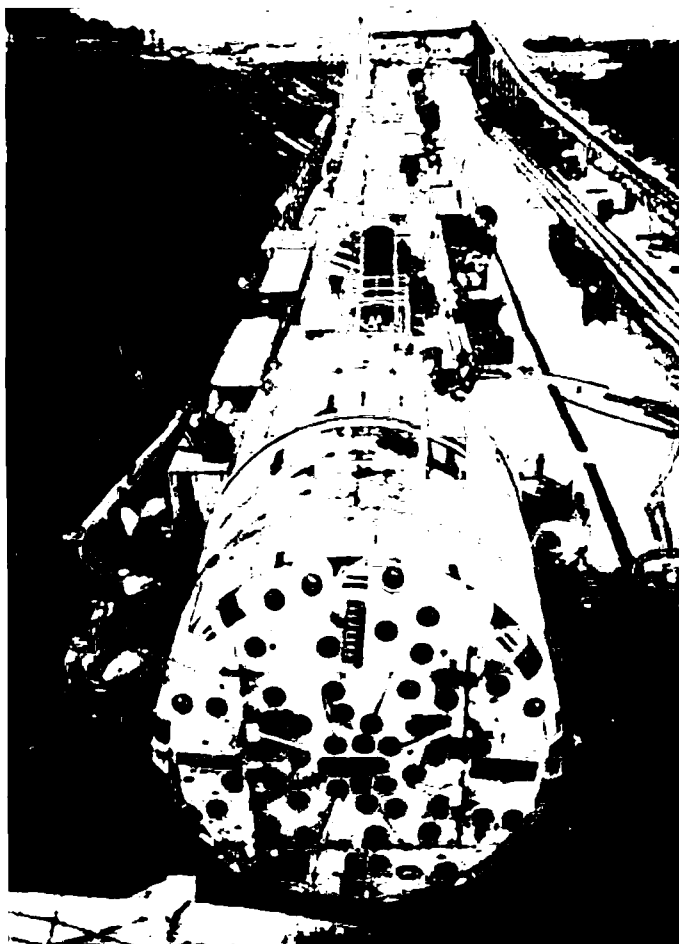


Fig. 2. T. Guadarrama. Doble escudo Wirth/Guadarrama. Double shield Wirth. A la decha., Fig. 3.- T. Guadarrama. Doble escudo Herrenknecht/T. Guadarrama. Double shield Herrenknecht.

control, que tiene la mayor importancia, porque, aunque no se mide la presión en cada cortador (lo que complicaría notablemente los diseños comercializados) facilita un control del total empuje real de contacto ya que se mide la presión en los cilindros hidráulicos que sirven de soporte a la transmisión de dicho empuje a la cabeza de giro (2).

b) Cuestiones pendientes de solución. Se han planteado también dificultades que están por resolver. Las principales, que vienen del doble carácter de dureza y abrasividad de la roca, y que debieran ser un nuevo desafío para la tecnología de metales duros, son las siguientes: Desgaste rápido del filo de corte de ángulo amplio y roturas quebradizas en los filos de corte de ángulo agudo. La afección de la capacidad del rodamiento, por las causas anteriores es inmediata, ya que produce el bloqueo del cortador, con el consi-

appreciably complicate the designs on the market), it facilitates total control over the real contact thrust since it measures the pressure in the hydraulic cylinders acting as support for the transmission of that thrust to the rotating head (2).

b) Questions pending solution. Some difficulties also appeared which are yet to be solved. The main ones, which are due to the dual nature of hardness and abrasivity of the rock, and which have to be a new challenge for the technology of hard metals, are the following: Rapid wear of the broad angle cutting row and brittle breakages in the narrow angle cutting rows. The effect on the bearing capacity due to the above causes is immediate, since it causes the cutter to be blocked with the consequent increase in pressure on the other cutters, with which their

(2) Hay también un sistema del control de desgaste del disco duro, aplicado sólo en algunos cortadores, lo que puede interesar en rocas de dureza media como máximo. La problemática de las rocas duras y abrasivas, como se verá, es otra.

(2) There is also a system of wear control of the hard disc, applied just in some cutters, which can be interesting in rocks of no more than average hardness. The problem of hard and abrasive rocks is, as shall be seen, a different matter.



Fig. 4. Desgaste y rotura del filo del cortador/
cccccc ccccc
cccccc ccccc
cccccc.

guiente aumento de la presión sobre el resto de cortadores, lo que rebasa su capacidad máxima, con riesgo de avería grave generalizada (Figura 4).

Ya se comprende que estos fenómenos se agudizan si el frente presenta rocas de características muy diferentes: el empuje de la máquina se concentra en un número limitado de cortadores, rebasando su capacidad máxima y acelerando el desgaste o más bien la rotura del filo. En Guadarrama se comprobó, además, la influencia de la orientación de los planos de las fracturas o fallas del macizo. Con planos "transversales" al avance, las averías de los cortadores fueron menos del 40% de las sufridas cuando dichos planos se orientaban "en dirección", respecto del sentido del avance.

c) Fallos de los cortadores. En Guadarrama se ha verificado que gran parte de las averías de las herramientas de corte corresponden a fallos del puro diseño mecánico de las mismas. En concreto, se han comprobado reiteradamente, en rocas por encima de los 180 - 200 MPa, los siguientes fallos: Aumento notable de la temperatura en el aceite de los rodamientos, llegando a su descomposición y, en todo caso, con avería del cierre o sello de estanqueidad; pérdida subsiguiente del engrase requerido, con fallo de los cojinetes de apoyo, y mejora de la situación al refrigerar los cortadores.

La refrigeración de los cortadores se ensayó, en primer lugar y de forma elemental, con el agua del sistema de captación de polvo.- La mejora observada llevó a perfeccionar el método, pasando a inyectar espumas especiales en el frontal de la rueda de corte, utilizando los conductos de la junta gi-

maximum capacity becomes exceeded and there is risk of serious generalised breakdown (Figure 4).

It is now understood that these phenomena become heightened if the face contains rock of very different characteristics: the thrust of the machines becomes concentrated on a limited number of cutters, exceeding their maximum capacity and accelerating the wear or, more likely, breakage of the row. In Guadarrama the influence of the orientation of the fracture or fault planes of the massif was also confirmed. With planes "transverse" to the advance, the breakdowns in cutters were less than 40% of those suffered when those planes were orientated in the same direction with respect to the advance.

c) Faults in the cutters. In Guadarrama it has been verified that a large part of the breakdowns of the cutting tools correspond to faults in the pure mechanical design of them. In particular, the following faults have been repeatedly confirmed in rocks of above 180 - 200 Mpa: Appreciable increase in temperature in the oil of the bearings, which can reach the point of its decomposition and, in any case, with breakdown of the airtight seal; subsequent loss of the required grease with failure of the support bearings, and improvement of the situation when the cutters are cooled.

Cooling of the cutters was tested, first of all and in a simple way, with water from the dust collection system. The improvement observed led to the method being perfected, with special foams being injected in the front of the cutting wheel, using the ducts from the rotary gasket of the TBMs, for which the available section had to be expanded in some cases. The result

ratoria de las TBMs, para lo que hubo de ampliarse la sección disponible en algún caso. El resultado de la refrigeración con espuma ha sido pues satisfactorio y puede ser un elemento más a tener en cuenta en el diseño futuro de las ruedas y cortadores de las TBMs.

d) Penetración máxima y consumo de cortadores. La tecnología actual de las herramientas de corte permite una velocidad circunferencial para cortadores de Ø 17" de unos 145-150 m/min como límites máximos. En consecuencia, la velocidad de giro de la rueda de corte, queda definida así:

$$\omega_{max} = \frac{1}{K} \times \frac{145}{\pi \phi_{exc} \text{ (en metros)}}$$

siendo K un coeficiente de seguridad que para rocas duras y abrasivas es del orden de 2,2 a 2,75. Pues bien, de acuerdo con la dureza y abrasividad de la roca se deben regular, tanto el empuje máximo, como la velocidad de giro, para lograr el avance máximo posible en condiciones de seguridad. De la experiencia de *Guadarrama*, se deduce:

- En rocas muy duras y abrasivas (por encima de los 200 MPa de RCS y de los 5,5 puntos del índice IAC (3)) la velocidad de avance suele tener que limitarse a cifras de entre 20 y 30 mm / minuto.
- Hacemos esta advertencia porque de una u otra manera, se viene estableciendo en publicaciones técnicas sobre rocas duras y abrasivas que el límite técnico y económico del corte mecánico es del orden de los 50 mm/minuto, lo que es falso. Las experiencias de *Guadarrama* y *Lötschberg* desmienten esto técnicamente, ya que, con cifras del orden de los 25mm/minuto se han hecho avances mantenidos de entre 18 y 22 m/día.
- Desde un punto de vista general, el resultado de las experiencias de *Guadarrama* en formaciones similares de gneis y granitos duros con tramos de alta dureza (RCS>200 MPa) y abrasividad (IAC > 5,5) se resumen en los gráficos siguientes (Figuras 5 y 6).

e) Cortadores periféricos. Especial mención merecen los cortadores de pregálbo y gálbo. Puede decirse que, en general, los diseños y posicionamiento de los cortadores centrales y de las franjas intermedias se vienen resolviendo satisfactoriamente por los fabricantes, de acuerdo con sus experiencias ante-

of cooling with foam has therefore been satisfactory and can be another element to bear in mind in the future design of the wheels and cutters of TBMs.

d) Maximum penetration and consumption of cutters. The current technology of cutting tools permits a circumferential speed for cutters of Ø 17" of around 145-150 m/min as maximum limits. As a consequence, the speed of rotation of the cutting wheel is defined as:

$$\omega_{max} = \frac{1}{K} \times \frac{145}{\pi \phi_{exc} \text{ (en metros)}}$$

where K is a safety coefficient for hard and abrasive rocks and is of the order of 2.2 to 2.75.

So, in accordance with the hardness and abrasivity of the rock, both the maximum thrust and the speed of rotation have to be regulated in order to achieve the maximum possible advance under conditions of safety. From the experience of *Guadarrama*, it can be deduced:

- In very hard and abrasive rocks (above 200 MPa of SCS and 5.5 points in the CAI (3) index) the speed of advance usually has to be limited to figures of between 20 and 30 mm / minute.
- We give this warning because, one way or the other, it has been stated in technical publications on hard and abrasive rocks that the technical and economic limit of mechanical cutting is of the order of 50 mm/minute, which is not true. The experiences of *Guadarrama* and *Lötschberg* contradict this technically since, with figures of the order of 25 mm/minute, advances have been maintained of between 18 and 22 m/day.
- From the general point of view, the result of the *Guadarrama* experiences in similar formations of gneiss and hard granites with some sections of great hardness (SCS > 200 MPa) and abrasivity (CAI > 5.5) is summarised in the following graphs (Figures 5 and 6).

e) Peripheral cutters. Special mention deserves to be made of the pre-clearance and clearance cutters. It can be said in general that the designs and positioning of the central cutters and of the intermedlate strips have been satisfactorily solved by the manufacturers in accordance with their earlier experiences. This is not the case with the peripheral cutters, which is where the greatest number of failures have been concentrated, and it

(3) Índice de Abrasividad Cerchar. (Valor máximo homologado: 6)

(3) Cerchar Abrasivity Index. (Maximum approved value: 6)

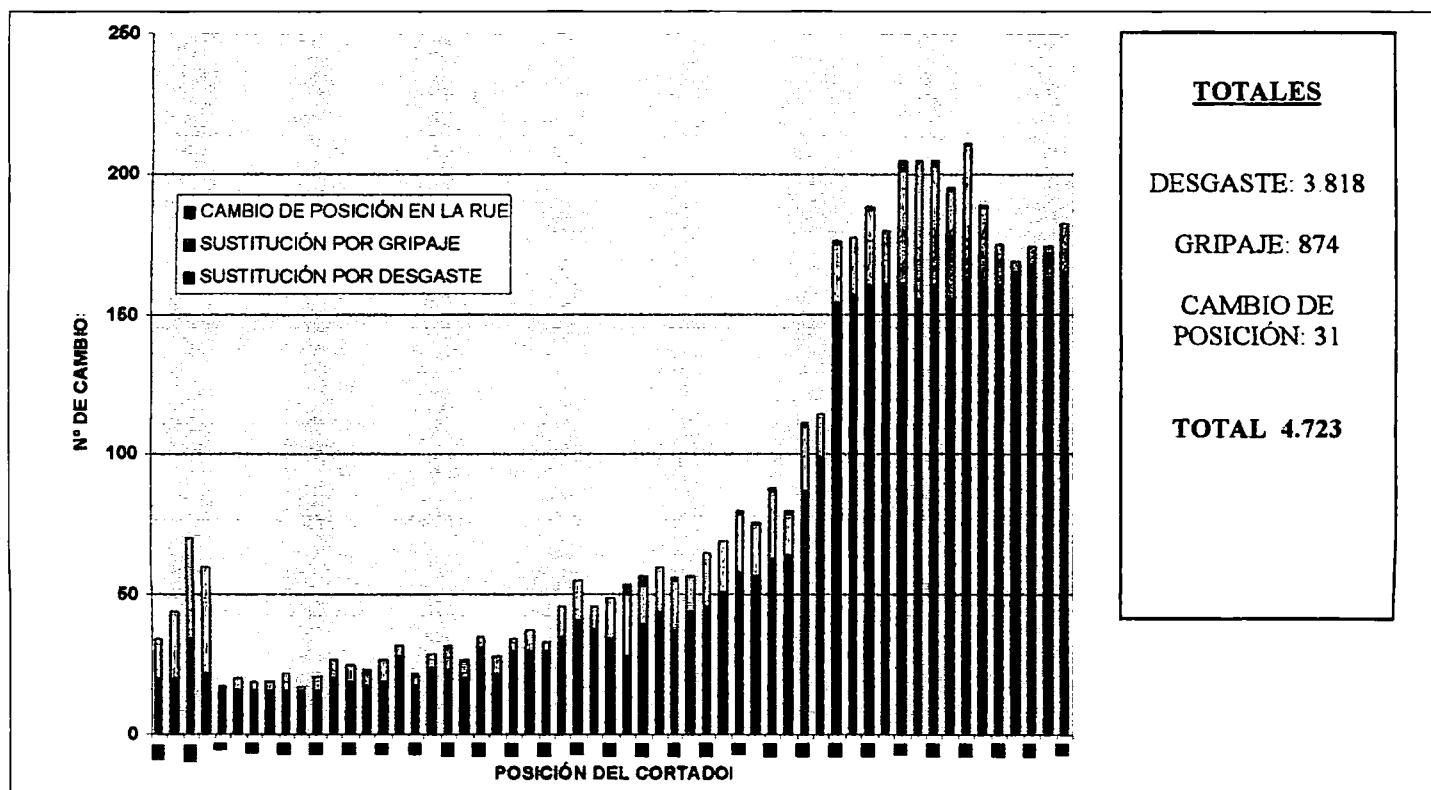


Fig. 5. T. Guadarrama. Consumo de cortadores según posición en la rueda de corte/T. Guadarrama. Consumption of cutters according to position in the cutting wheel.

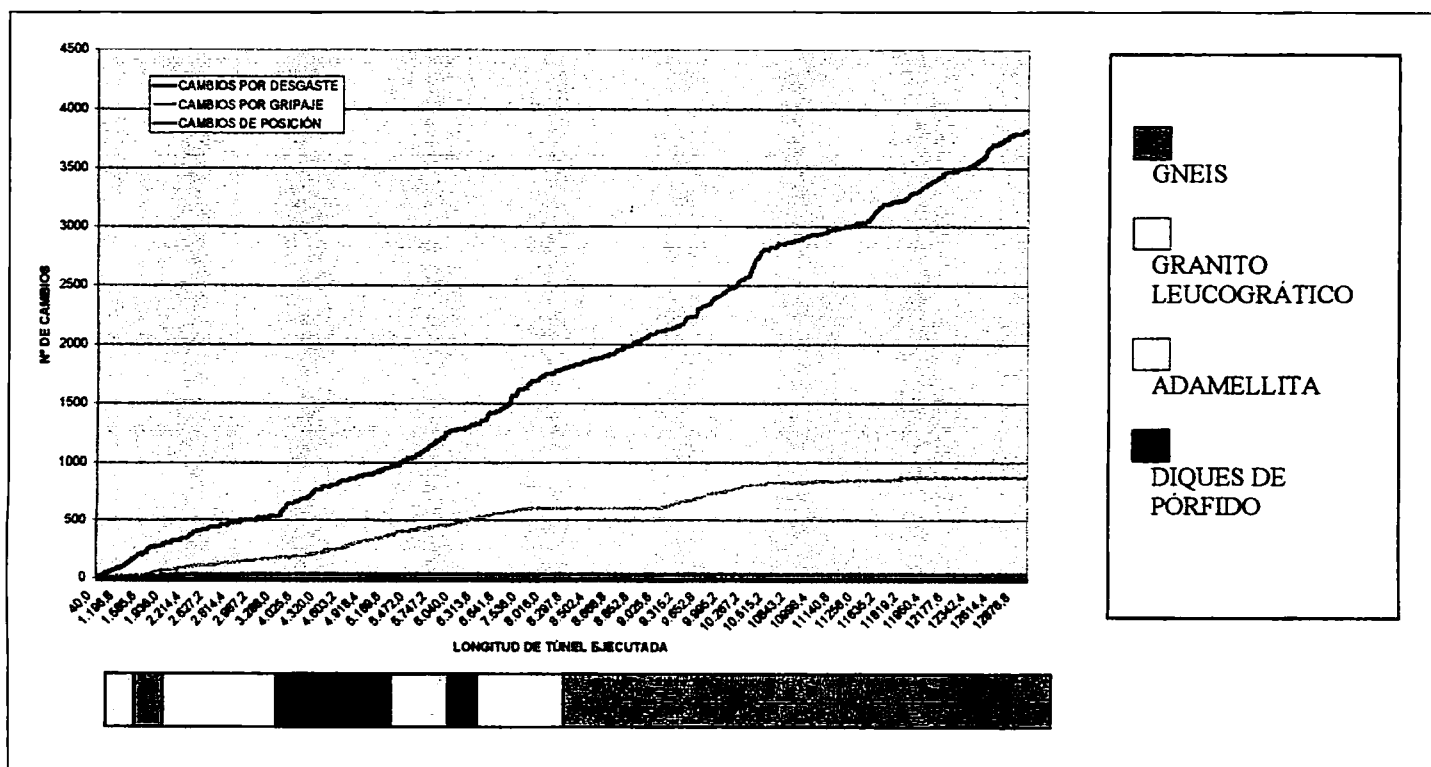


Fig. 6. T. Guadarrama. Evolución del consumo de cortadores (Lote 4)/T. Guadarrama. Evolution of cutter consumption (Batch 4).

riores. No así los cortadores periféricos, donde realmente se han concentrado los fallos más numerosos, pudiendo señalar que estos se repiten una y otra vez, a veces en uno o dos cortadores en particular, y sobre todo en los de gálibo.

Uno de los caminos abiertos para la mejora de las herramientas de corte y para la operación lo más científica posible de las TBMs es la investigación del proceso de corte mecánico de la roca. Los estudios más recientes proponen modelos matemáticos que buscan relacionar parámetros geotécnicos con la geometría del disco de corte. Aunque creemos que la mayoría de los fallos actuales provienen del diseño mecánico del cortador, como hemos expuesto con cierto detalle, no obstante estos otros trabajos de investigación podrían dar luz sobre el problema del emplazamiento y orientación de los cortadores periféricos (4).

3.3. Vigilancia y control de la rueda de corte

Además de los problemas de las herramientas de corte, la cabeza de una TBM de roca extradura sufre una serie de desgastes que deben vigilarse para evitar llegar a una situación que afecte al acero estructural de la rueda, lo que precisaría una seria reparación general, siempre muy difícil y delicada porque ha de llevarse a cabo dentro del túnel (5).

Por ello, merece la pena destacar los nuevos diseños de algunos fabricantes que permiten avanzar (y, por tanto, retroceder) la rueda de corte en unos 500 a 700 mm, lo que facilita la inspección de la cabeza y sus herramientas con una cierta frecuencia.

Se recomienda la inspección semanal de la rueda de corte tanto en rocas no abrasivas y homogéneas, incluso de dureza medio-alta, como en los escudos para terrenos blandos. Pues bien, en Guadarrama lo habitual tuvo que ser la inspección diaria, habiendo llegado a hacer inspecciones en todos los avances, al excavar rocas extraduras y abrasivas. En cuanto a otros aspectos a resaltar se señalan:

a) **Protecciones de la estructura.** Una rueda de corte moderna de gran diámetro presenta, en general, un

can be stated that these failures have been repeated time and time again, sometimes in one or two cutters in particular, and above all in the clearance cutters.

One of the ways open for improving the cutting tools and for the most scientific possible operation of the TBMs is to investigate the process of mechanical cutting of the rock. The most recent studies propose mathematical models which seek to relate geotechnical parameters to the geometry of the cutting disc. Although we believe that the majority of current failures derive from the mechanical design of the cutter, as we have discussed in some detail, nevertheless, other investigation work along these lines could cast some light on the problem of the location and orientation of the peripheral cutters (4).

3.3. Monitoring and control of the cutting wheel

As well as the problems of the cutting tools, the head of a TBM for extra-hard rock suffers continual wear which has to be monitored in order prevent a situation being reached in which the structural steel of the wheel becomes affected, which would require a serious general repair, always very difficult and delicate because it has to be done inside the tunnel (5).

For this, it is worth while highlighting the new designs of some manufacturers which permit the cutting wheel to be advanced (and therefore retracted) by around 500 to 700 mm, which facilitates inspection of the head and its tools with a certain frequency.

It is recommended to conduct a weekly inspection of the cutting wheel in both non-abrasive and homogenous rocks and even in those of medium-high hardness, and in the shields for soft ground. However, in Guadarrama the usual thing was to make inspections in all the advances when excavating extra-hard and abrasive rock. As far other aspects to emphasise are concerned, the following can be pointed out:

a) **Protection of the structure.** A modern large-diameter cutting wheel in general has an almost plane profile, which is what experience has been recommending in order to have the least possible

(4) Aparte de las fórmulas empíricas de Wang y Ozdemir, o las propuestas por Robbins, pueden verse los estudios modernos de Innaurato & alt que se recogen en la Bibliografía.

(5) En GUADARRAMA, la experiencia en rocas extraduras y abrasivas demostró la necesidad de hacer una revisión y reparación general de la cabeza cada 4 km de avance, aproximadamente, para lo que se eligieron tramos de roca competente. Además, en dos ocasiones hubo que proceder a desmontar la rueda, fijándola con bulones al frente de roca, para reponer elementos del sistema de sellado del cojinete principal. La operación de desmontaje, fijación de la rueda y nuevo montaje, que se hizo con éxito en ambas ocasiones, es extremadamente delicada.

(4) Apart from the empirical formulas of Wang and Ozdemir, or those proposed by Robbins, see also the modern studies of Innaurato et al. cited in the Bibliography.

(5) In GUADARRAMA, experience with extra-hard and abrasive rocks showed the need to conduct a general check and repair of the head roughly every 4 km of advance, for which sections of competent rock were chosen. Also, on two occasions the wheel had to be removed, securing it to the face of the rock by means of bolts in order to replace elements of the sealing systems for the main bearing. The operation of removal, securing of the wheel and assembly again, which was carried out successfully on both occasions, is extremely delicate.

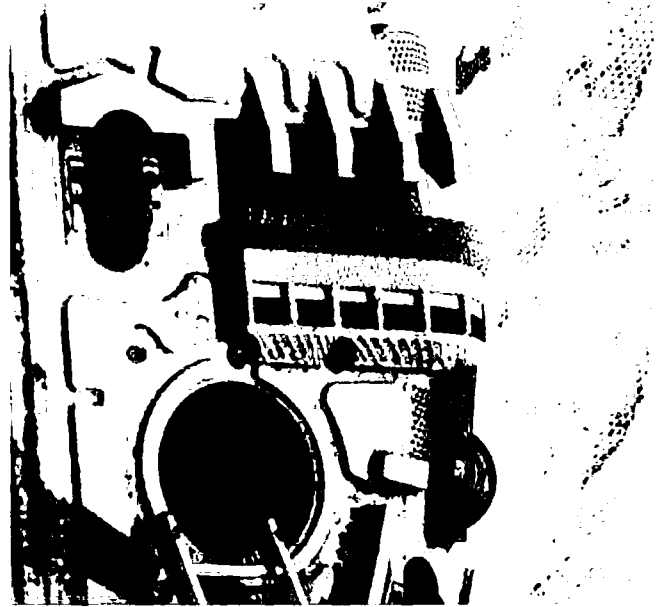
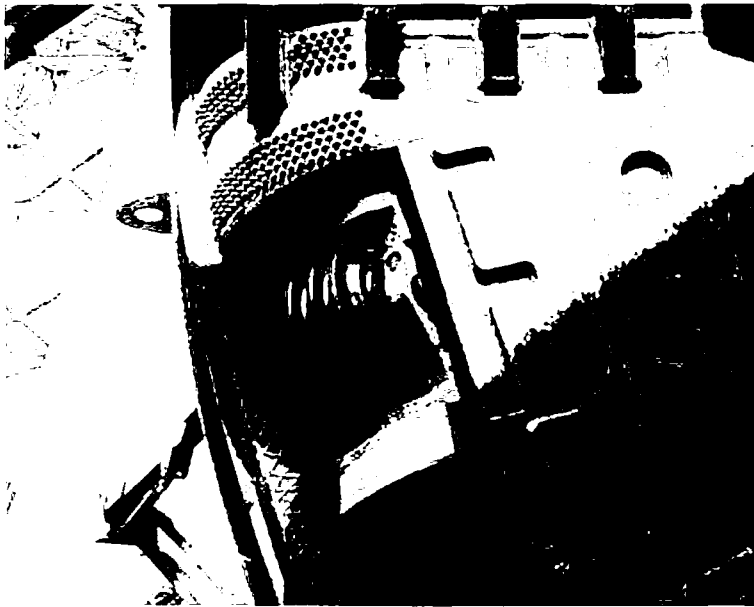


Fig. 7.
T. Guadarrama.
Protecciones
perimetrales/
T. Guadarrama.
Perimetric protection.
A la decha., Fig. 8.
T. Guadarrama.
Protecciones de los
cangilones/
T. Guadarrama.
Protection for the
buckets.

perfil casi plano, que es lo que ha venido recomendando la experiencia para afectar lo menos posible la estabilidad del corte, incluso en rocas extraduras.

Ahora bien, dicha estructura metálica básica debe poder resistir tanto los esfuerzos del avance por corte de la roca, como el efecto abrasivo de la misma. Por ello, la chapa de acero de gran espesor (son frecuentes, espesores de hasta 10 cms), que constituye esta estructura básica, se protege, según la diversa tecnología de los fabricantes, con elementos de tres tipos:

- Protecciones perimetrales. Pueden ser, desde recarques con cordones de metal duro, hasta piezas atornilladas, a modo de "rastrillos" (Figura nº 7).
- Protecciones de los cangilones de carga de material excavado. Son refuerzos de placas y cordones antidesgaste, además de unas barras para producir la rotura de bloques o bolos de tamaño inapropiado (Figura nº 8).
- Protección de los cortadores y de la chapa estructural en general. Actualmente se usan 3 tipos de protecciones (Figura 9): Placas antidesgaste soldadas a la estructura, protegiendo básicamente los cortadores; cordones de metal duro y chapa de desgaste de protección general sobrepuestas por soldadura a la estructura básica.

En cualquiera de estas soluciones el filo del disco debe sobresalir lo suficiente (del orden de 7 a 10 cm) para permitir la caída libre del material a la parte in-

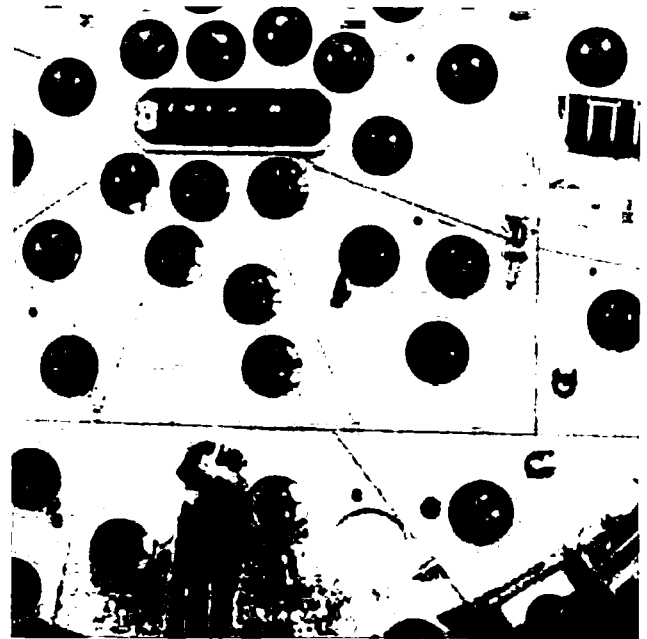
terior a la línea de corte, incluso en rocas extra-duras y abrasivas.

However, this basic metallic structure has to be able to resist both the stresses of the advance due to cutting of the rock, and the abrasive effect thereof. For this reason, the thick steel sheet (thicknesses of up to 10 cm are frequent), constituting this basic structure, is, depending on the various technologies of the manufacturers, protected with three types of elements:

- Perimetric protection. This can consist of superimposed reinforcements with hard-metal beads up to screwed pieces by way of "rakes" (Figure Nº 7).
- Protection of the buckets for loading the excavated material. These consist of plate reinforcements and anti-wear beads, as well as bars for producing the break-up of blocks or lumps of the wrong size (Figure Nº 8).
- Protection of the cutters and of the structural sheet in general. Three types of protection are currently used (Figure 9): anti-wear plates welded to the structure and basically protecting the cutters; hard-metal beads and wear sheets for general protection superimposed on top of the basic structure by means of welding.

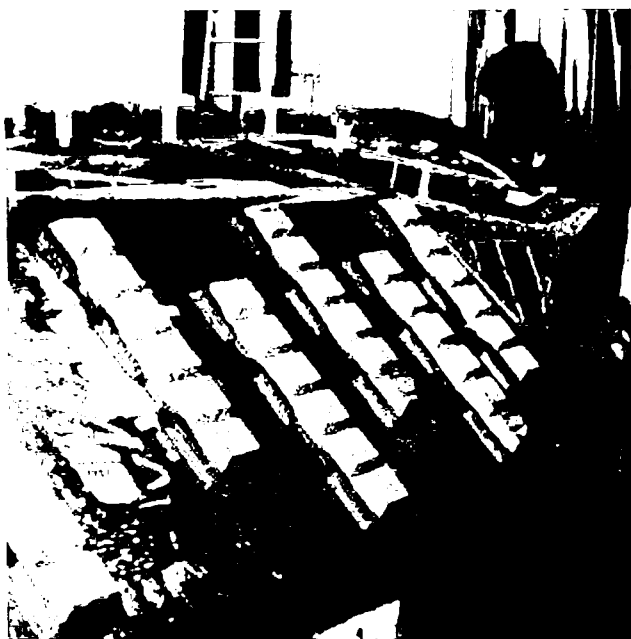
In any of these solutions, the row of the disc has to project far enough (around 7 to 10 cm) for permitting the free fall of material to the lower part of the face, where the buckets are to be found, which is how these machines work.

Fig. 9 Tipos de protecciones de la chapa estructural y cortadores/
Types of protection of the structural sheet and cutters.



ferior del frente, donde lo recogen los cangilones, que es como trabajan estas máquinas. Por ello, los espesores de las placas, si esta es la solución, deben respetar ese mínimo. Hemos comprobado en dos máquinas de Guadarrama que, en caso contrario, parte del escombro queda retenido contra la cabeza, provocando una disminución de la penetración, al producir un innecesario desgaste por abrasividad de las placas, hasta que se hace posible la citada caída libre. Por esta misma razón la protección del tipo segundo (simples cordones de metal du-

So, the thickness of the plates, if this is the solution, has to respect that minimum. We have confirmed in two Guadarrama machines that otherwise part of the rubble remains caught against the head, causing a reduction in the penetration due to producing unnecessary wear on account of the abrasivity of the plates until free fall becomes possible. For that same reason, the second type of protection (simple hard-metal beads) has functioned well from the very beginning in the other two Guadarrama machines.



ro) ha funcionado bien desde el primer momento en las otras dos máquinas de Guadarrama.

b) Revisión y reparación de las protecciones. La experiencia, como ya se ha dicho, recomienda en rocas duras y abrasivas y, sobre todo, en máquinas de gran diámetro, hacer una revisión y la reparación general que proceda, cada 3 a 4 kms de avance. Así se ha venido haciendo, en general, en las obras de los túneles de Guadarrama.

Para la reparación de las protecciones estructurales se han empleado: Reposición de rastrillos y nuevos recargues de metal duro en las periféricas; reposición de barras de rotura de bloques u otros elementos, y, finalmente, aplicación de botones de acero duro soldados, de tipo cilíndrico o prismático, que pueden verse en la Figura 10.

3.4. Accionamiento de la rueda de corte

En general, en las máquinas de grandes dimensiones para roca dura todos los fabricantes vienen adoptando un mismo tipo de accionamiento, basado, salvo detalles, en los criterios siguientes: Motores eléctricos FV, hasta con 8 variadores de frecuencia; cojinete principal con rodamiento de tres filas y reductoras en cada motor con los piñones de ataque a una corona de dientes interiores.

Así se hizo al diseñar las TBMs de Guadarrama, cuyo funcionamiento, en general, ha venido siendo satisfactorio y solo cabe señalar algunos problemas como los siguientes:

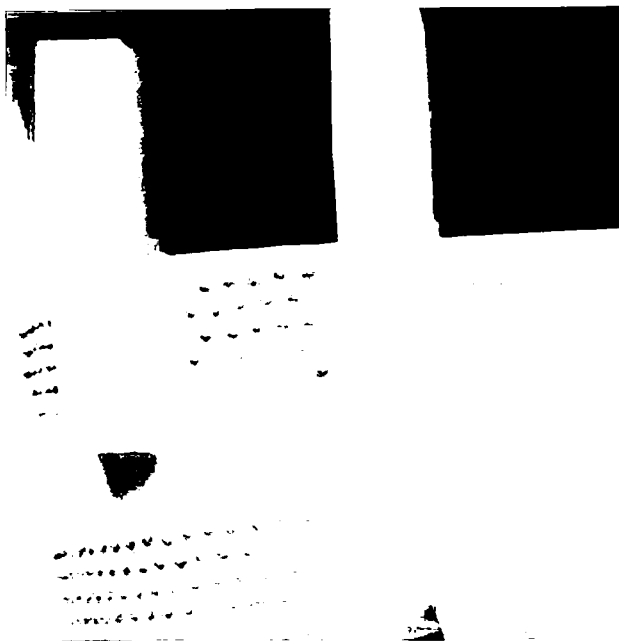


Fig. 10. Tipos de botones de acero duro/
Types of hard-steel buttons

b) Check and repair of the protection. The experience of these recent years has recommended that, in hard and abrasive rock, and above all in large diameter machines, a check and a general repair as necessary should be made every 3 to 4 km of advance. This is what has been done in the works on the Guadarrama tunnels.

For the repair of structural protection the following have been used: Replacement of rakes and new hard-metal reinforcement pieces in the peripheries; replacement of the bars for breaking up blocks and other elements, and finally application of welded hard-steel buttons, of the cylindrical or prismatic types, which can be seen in Figure 10.

3.4. Cutting wheel drive

In general, in large dimension machines for hard rock all manufacturers have been adopting the same type of drive, based, apart from in details, on the following criteria: FV electric motors, up to eight frequency variators; main bearing with three rows of rollers and reducers in each motor with attack pinions to a crown with internal cogs.

This was what was done when designing the Guadarrama TBMs, whose functioning in general has been satisfactory, with just a few problems to be pointed out:

a) Excessive vibration. It is not easy to evaluate "a priori" the excessive vibration of a hard-rock machine

a) Exceso de vibraciones. No es fácil evaluar "a priori" el exceso de vibraciones de una máquina de roca dura, hasta que se sufren las primeras consecuencias, que son: averías en los piñones de ataque a la rueda y fallos de los "sellos" del cojinete principal.

La experiencia de casi 2 años en el funcionamiento de las TBMs de *Guadarrama* permiten identificar las causas de tales averías en la excavación de rocas extraduras:

- Trabajo continuo sin la totalidad de los motores. Es fundamental tener las unidades de repuesto necesarias (del orden del 80% al 100%) para evitar esta situación (6).
- Desajuste por falta de rigidez en el soporte del accionamiento que monta los grupos moto-reductores.

Las averías sufridas a lo largo del primer año de trabajo no se repitieron desde que se corrigieron totalmente estas causas.

b) Sistema anti-rotación. Una máquina de roca dura solo gira en el sentido en que los cangilones recogen el material excavado y, por tanto, el giro en sentido contrario se realiza con la rueda vacía, o sea, con una inercia mínima, solamente como ayuda al caso del desbloqueo.

De ahí que cobren especial relevancia los Sistemas anti-rotación, de importancia esencial en las TBMs del tipo "doble escudo", ya que al final del ciclo de avance, la máquina debe quedar perfectamente nivelada para colocar los anillos de revestimiento. Esta nivelación, que en los escudos convencionales se logra alternando el sentido de giro a lo largo del ciclo de excavación (pues la entrada de material se produce en cualquier sentido de rotación de la cabeza) no es posible hacerla en un "doble escudo" mas que con un diseño adecuado del sistema anti-rotación.

Dicho sistema puede decirse que tiene dos posibilidades según sea el "modo de operación". Trabajando como "doble escudo", los "grippers" constituyen el sistema de antirotación. Ahora bien, trabajando como "escudo simple" los cilindros del equipo de empuje auxiliar deben poder variar su inclinación, para contrarrestar la tendencia a la rodadura de la TBM.

Dicho sistema se aplicó a las máquinas de *Guadarrama*, con lo que fue posible hacer pequeñas correcciones durante el ciclo de avance, haciendo funcio-

until the first consequences are suffered, namely: breakdowns in the attack pinion to the wheel and failures in the "seals" of the main bearing.

The experience of almost two years of functioning of the Guadarrama TBMs enables the causes of those failures in the excavation of extra-hard rock to be identified:

- *Continual working without all the motors running. It is fundamental to have the necessary replacement units (around 80% to 100%) in order to prevent this situation (6).*
- *Maladjustment due to lack of rigidity in the drive support on which the reducer motors are mounted.*

The breakdowns suffered over the course of the first year of work have not been repeated since these causes were fully corrected.

b) Anti-rotation systems. A hard-rock machine only rotates in the direction in which the buckets collect the excavated material and, therefore, the opposite direction of rotation is done with the wheel empty, or with minimum inertia, solely as an aid in cases of unblocking.

Hence the particular importance of anti-rotation systems, which are essential in TBMs of the "double shield" type, since at the end of the advance cycle, the machine has to remain perfectly level in order to position the lining rings. This levelling, which in conventional shields is achieved by alternating the direction of rotation along the excavation cycle (since the entrance of material takes place in either direction of rotation of the head), cannot be done like this in a "double shield" other than with an adequate design of the anti-rotation system.

This system can be said to have two possibilities depending on the "mode of operation". Working as a "double shield", the "grippers" constitute the anti-rotation system. However, working as "single shield" the cylinders of the auxiliary thrust equipment have to be able to vary their inclination, in order to counteract the tendency of the TBM to roll.

This system was applied to the Guadarrama machines, which made it possible to carry out small corrections during the advance cycle, getting the "anti-rotation" system to function automatically when a limit previously established in the computer program governing the machine was approached.

(6) En rocas extraduras no es admisible la recomendación práctica usual de que se puede trabajar hasta con el 70% solamente de los motores, siempre que se distribuyan de forma simétrica en el ataque a la corona y se reduzca, además, la penetración de la TBM.

(6) The usual practical recommendation that one can work with up to 70% of the motors only, providing that they are distributed symmetrically in the attack to the crown and that the penetration of the TBM is also reduced, is not admissible in extra-hard rock.

nar el sistema "anti-rotación" de manera automática al acercarse a un límite previamente establecido en el programa informático de gobierno de la máquina. Los resultados fueron muy aceptables, si bien es imprescindible una experiencia medio-alta del operador, por lo que deben esperarse mejoras sustanciales en los futuros diseños de estas TBMs.

c) Excavación con extracorte y gestión de curvas.

Las TBMs modernas de roca deben tener la posibilidad de realizar un corte adicional o extracorte, sea para aumentar el diámetro de excavación de las máquinas convencionales, sea para la excavación en curva en toda clase de máquinas y, principalmente en las de tipo doble escudo.

Este extracorte se inicia con 2 ó más cortadores periféricos que pueden sobresalir por empuje hidráulico y que hacen lentamente una ampliación inicial de la excavación. Conseguido esto, para continuar la sobreexcavación en un tramo hay que hacer dos operaciones: Desplazar verticalmente el eje de la máquina y fijar mecánicamente a la estructura de la cabeza los cortadores que se van a emplear.

Los fabricantes resuelven esto de diversas maneras, pero lo que interesa señalar aquí es que, por el momento, no se ha conseguido claramente rebasar extracortes del orden de los 100 mm medidos en radio (200 mm en diámetro) para excavar un tramo de túnel, aunque no sea de gran longitud. En todo caso, los rendimientos de la excavación bajan notablemente.

Finalmente debe señalarse también que algunos fabricantes han desarrollado prototipos con giro de la rueda de corte para gestionar curvas. Pues bien, así como el desplazamiento de la cabeza según el eje de la máquina se ha conseguido plenamente (y ha sido ya comentado al tratar las inspecciones y reparaciones), el giro hacía los laterales no ha tenido éxito, por el momento, aún en rocas de dureza media.

3.5. Modos de trabajo y rendimientos globales

Como ya se ha dicho, para las TBMs de Guadarrama se decidió elegir el tipo "doble escudo" con el fin de lograr el plazo de ejecución menor posible. El objeto del diseño en "doble escudo" es poder hacer el avance activando solo el escudo delantero a partir de los "grippers", mientras que en el escudo trasero se va haciendo la colocación del anillo de revestimiento. Dicho de otro modo, es posible simultanear avance y revestimiento para conseguir la velocidad máxima posible de construcción del tubo.

The results were very acceptable, though it is essential for the operator to have a medium-high level of experience, therefore substantial improvements are to be expected in the future designs of these TBMs.

c) Excavation with extra-cut and curve management.

Modern TBMs for rock have to have the possibility of making an additional cut or extra-cut, whether it be for increasing the excavation diameter of conventional machines, or for excavation in a curve for all kinds of machines, mainly those of the double shield type.

This extra-cut starts with two or more peripheral cutters which can be projected by hydraulic thrust and which slowly carry out an initial enlargement of the excavation. Having achieved this, in order to continue the over-excavation along a section there are two operations that have to be performed: displace the axis of the machine vertically and mechanically attach the cutters that are going to be used to the structure of the head.

Manufacturers solve this in various ways, but what is interesting to state here is that, for the time being, it has not been possible to clearly exceed extra-cuts of the order of 100 mm measured in terms of radius (200 mm in diameter) for excavating a section of tunnel, even if its length is not great. In any case, the yields of the excavation drop appreciably.

Finally, it must also be pointed out that some manufacturers have developed prototypes with rotation of the cutting wheel in order to manage curves. However, although the displacement of the head according to the axis of the machine has been fully achieved (and has been commented upon when dealing with inspections and repairs), rotation towards the sides has not so far been successful, even in rocks of medium hardness.

3.5. Works modes and overall yields

As has already been said, for the Guadarrama TBMs it was decided to choose the "double shield" type with the aim of achieving the shortest possible execution period. The purpose of the "double shield" design is to be able to carry out the advance activating just the front shield on the basis of the "grippers", while the rear shield is carrying out the positioning of the lining rings. Putting this another way, it is possible to advance and carry out the lining simultaneously in order to achieve the maximum possible speed of construction of the tube.

All this requires that the greater part of the massif should consist of rock of sufficient competence for supporting the "grippers". But, when passing through faults,

Cuadro nº 5. T. Guadarrama. Avances según "modo" de trabajo a 27/10/2004
Table nº 5. T. Guadarrama. Advances according to work "mode" at 27/10/2004

Frentes de ataque Attack Faces	Tuneladora/Tunneller	Avances a 30.10.2004/Advances at 30.10.2004		
		Doble escudo Double shield	Simple escudo Single shield	Total Total
Boca Sur (T.1)/South Mouth (T.1) Tubo oeste/West Tube	Herrenknecht	6.268 m (59,58 %)	4.253 m (40,42 %)	1.0521 m (100 %)
Boca Sur (T.2)/South Mouth (T.2) Tubo este/East Tube	Wirth	9.016 m (81,61 %)	2.032 m (18,39 %)	11.048 m (100 %)
Boca Norte (T.3)/North Mouth (T.3) Tubo oeste//West Tube	Wirth	10.422 m (84,36 %)	1.933 m (15,64 %)	12.355 m (100 %)
Boca Norte (T.4)/North Mouth (T.4) Tubo este/East Tube	Herrenknecht	9.795 m (74,49 %)	3.355 m (25,51 %)	13.150 m (100 %)

Todo ello requiere que la mayor parte del macizo sea de roca de competencia suficiente para el apoyo de los "grippers". Pero, al pasar fallas, puede ser imprescindible tener que trabajar como escudo simple, para lo que se usa el equipo auxiliar de empuje situado en el escudo trasero, en cuyo caso el ciclo de trabajo tiene las dos etapas típicas de un escudo convencional (avance y colocación del anillo) no simultaneables.

Los datos relativos a las TBMs de Guadarrama, desde el comienzo de la obra hasta el 27 de Octubre de 2004 se recogen en el Cuadro nº 5 y Figura 11.

Las TBMs tipo "doble escudo" requieren amplia experiencia de los operadores. Vienen utilizándose desde hace más de 20 años en diámetros menores de 7 m. A partir de 1.996 se construyeron las primeras máquinas de gran diámetro (más de 9 m) con algunos fracasos importantes. Como siempre, a partir de fallos o errores, sean de diseño o de operación, la tecnología ha mejorado notablemente y buena prueba es el éxito que vienen teniendo las 4 máquinas del Túnel de Guadarrama de la LAV al Norte y Noroeste de España, como refleja la figura anterior.

4. Agradecimientos

Para la redacción de esta Comunicación, el autor ha recibido toda clase de apoyos y facilidades para el acceso a la documentación técnica de esta obra del Ministerio de Fomento de España, por parte de los di-

it can be indispensable to have to work as a single shield, for which the auxiliary thrust equipment is used located in the rear shield. In this case, the work cycle has the two stages typical of a single shield (advance and positioning of the ring) rather than these processes being simultaneous.

Some data relating to the Guadarrama TBMs since the start of the work up to 31 October 2004 is contained in Table Nº 5 and Figure 11 below.

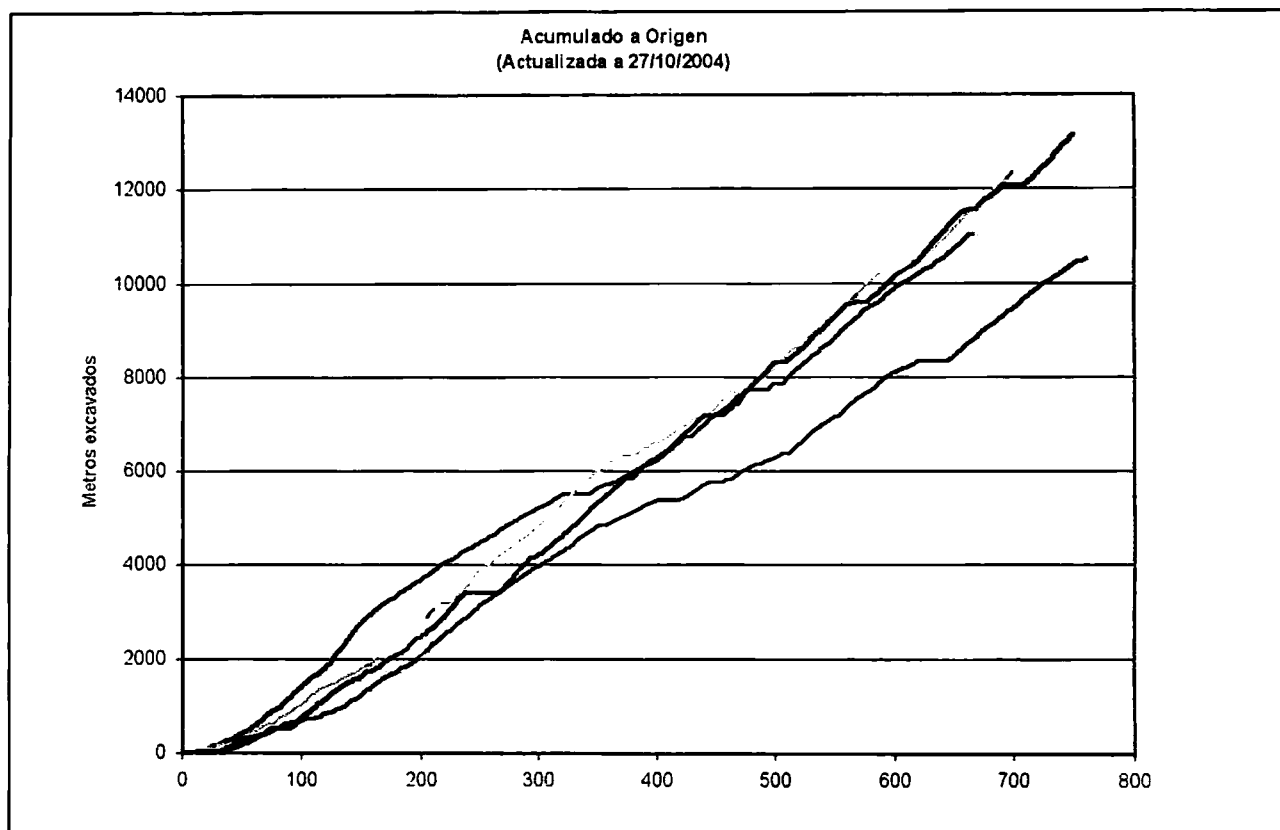
"Double shield" type TBMs require wide experience from the operators. They have been in use for more than 20 years in diameters of less than 7 m. In 1996 the first large diameter machines were built (more than 9 m) with some major failures. As always, on the basis of faults or errors, whether of design or operation, the technology has improved appreciably and good proof of this is the success which the four machines have had for the Guadarrama Tunnel of the High Speed Line to North and North-West Spain, as shown in the above Figure.

4. Acknowledgements

The executives of the GIF who are managing this work have provided the author with the support and the necessary access to the technical documentation of this work of the Spanish Ministry of Public Constructions (Ministerio de Fomento). The author wishes to thank all of them for their help and collaboration.

The author wishes to mention as well, the help received from the Job Directorate of the GIF and the

Fig. 11.
T. Guadarrama.
Avances
acumulados a
origen de las
TBMs/
T. Guadarrama.
Avances
accumulated to
origin of the
TBMs.



rectivos del GIF que llevan la gestión de la misma, a quienes agradece dicha colaboración.

Ha de poner de manifiesto, también, las ayudas recibidas de la Dirección de Obra del GIF y de las empresas encargadas de la Asistencia Técnica, así como de todas y cada una de las empresas constructoras españolas, que integran las UTEs "Guadarrama Norte" y "Guadarrama Sur", que vienen ejecutando esta obra singular.

Merece, finalmente, mención especial la colaboración personal prestada al autor para la redacción del presente documento, por los Ingenieros José M. Fernández de Castro, de la Organización de la Dirección de Obra del GIF, y Ramón Fernández, de SPICCC, S.L. ♦

companies responsible for the Technical Assistance, as well as from each and all the Spanish Construction companies that are integrated in the temporary joint ventures "Guadarrama Norte" and "Guadarrama Sur" which are performing this unique work.

Specific mention is made to the personal collaboration in the preparation of this document of Engineers Mr. José M. Fernández de Castro, of the organisation for the Job Directorate of the GIF, and Mr. Ramón Fernández, of SPICCC, S.L. de Fome necessary access to the technical documentation of this work of the Spanish Ministry of Publir hel ♦

Referencias/References

-Charles Merguerian, Levent Ozdemir, *Rock mass properties and hard rock TBM penetration rate investigations, queens tunnel complex, nyc water tunnel 3, Stage 2*. Proceedings RETC June 2003 New Orleans.
-Felipe Mendaña, *Novedades en el diseño de TBMs: Túneles de gran diámetro y adecuación a terrenos de gran resistencia, abrasivos o de baja*

capacidad portante. Tunnelling 2003, Simposio Octubre 2003, Madrid.

-J. A. Cobreros, F. Mendaña, M. Moreno Cervera, *Design and construction of the Guadarrama tunnel*. Revista de Obras Públicas nº 3426, Octubre 2002, Madrid.

-M. Herrenknecht & U. Rehm, *Developments of mixshields and hard-Rock TBM*. Proceedings ITA April 2003 Amsterdam.

-N. Innaurato, C. Oggevi, P.P. Oreste & R. Virai, *Problems concerning cutting tool performance during TBM work: modellisation and testing of the rock under the action of the tool*. Proceedings ITA April 2003 Amsterdam.

-Wolfgang Gütter & Paolo Romualdi, *New design for a 10 m universal double shield TBM for long railway tunnels in critical and varying rock conditions*. Proceedings RETC June 2003 New Orleans.