

1996-2011: El periodo cumbre de la construcción especializada de túneles en España. Últimos avances en tuneladoras

1996 – 2011: the zenith of specialized tunnelling in Spain.
Latest progress in TBM technology

Felipe Mendaña Saavedra. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SPICC, S.L. Madrid (España). fms@spicc.e.telefonica.net

Resumen: Los túneles para Infraestructuras del Transporte (principalmente túneles ferroviarios), construidos con tuneladora en España en los 15 años transcurridos desde 1996 hasta comienzos de 2012, suman un total de 405 km, lo que supone una media de 27 km, por año construidos en cada uno de los 15 años transcurridos, y ello sin contar los realizados por métodos convencionales o los destinados a otros usos (conductos hidráulicos o servicios).

El autor pasa revista a las características principales de dichos proyectos, siguiendo el orden cronológico de las obras en que, cada uno de los Organismos siguientes, promovió la construcción con TBMs: la Comunidad de Madrid (MINTRA); el GIF (después ADIF) del Ministerio de Fomento; la Generalidad de Cataluña (GISA); La Dirección General de FFCC del Ministerio de Fomento; La Junta de Andalucía y el Ayuntamiento de Madrid. Se completa el artículo con las principales mejoras adoptadas en las tuneladoras, de las cuales algunas se probaron y adoptaron por primera vez en España.

Este artículo, encargado al autor por AETOS, como aportación de esta Asociación al "Simposio Internacional sobre Túneles y Pozos" celebrado en México en febrero de 2012, fue escrito en dicho mes para incluirlo como intervención magistral de la Ingeniería española de Túneles en los PROCEEDINGS del Simposio. Por otra parte, en las sesiones del mismo se hizo también la correspondiente presentación, cuya referencia se publicó en el nº 3.531 de abril de 2012 de la *Revista de Obras Públicas*.

Palabras Clave: Escudo de presión de tierras (o escudo EPB); Hidroescudo (escudo de lodos); TBM tipo doble escudo; TBM tipo escudo simple; Anillo; Segmento (o dovela); Anillo tipo universal; Pieza sobrepuesta de solera; TBM de diseño dual; Cinta transportadora; Herramientas de corte; Cortador de disco; Aditivos; Espumas; Polímeros; Lodo bentonítico

Abstract: The tunnels for the Transport Infrastructure Projects (mainly railway tunnels), built in Spain in the last 15 years, reach a total amount length of 405 km, which involves an average construction rate of 27 km a year, on each and every one of the years of that period. This amount does not include either the tunnels built by Conventional methods or the ones dedicated to other purposes (Hydraulic conduits, Service galleries, etc).

The author describes the projects, following the chronological order in which the TBM new technology was adopted by the owners: the Regional Government of Madrid (MINTRA Co.); the GIF (today ADIF) Organism of the Public Works Ministry; the Regional Government of Cataluña (GISA Co.); the Direction General of Railways (Spanish Public Works Ministry); the Regional Government of Andalucía and the Madrid Town Council.

The last part of the article shows the last advances on the TBM technology, some of which have been developed in the Spanish projects for the first time.

This article was the contribution of AETOS to the "International Symposium on Tunnels and Shafts held in Mexico city on February 2012. It was issued in PROCEEDINGS of the Symposium and its presentation was done by the author at the sessions (see *Revista de Obras Públicas*, Abril 2012).

Keywords: Earth Pressure Balance shield (or EPB shield); Hydroshield (or Mixshield); Double shield TBM; Single shield TBM; Ring; Segment; Universal type ring; Additional invert piece; Dual design TBM; Belt conveyor; Cutting tools; Disc cutter; Additives; Foams; Polymers; Bentonite slurry

1. Introducción

El desarrollo de la tecnología de la construcción de túneles con máquinas integrales, o tuneladoras, en los últimos 15 años ha sido extraordinario. Las aportaciones que esta tecnología ha ofrecido a la mejora de las condiciones de Seguridad e higiene en el trabajo, a la certeza de los plazos previstos y a la aproximación, cada vez más precisa, a los costes estimados de los túneles, han sido las causas que han potenciado este notable desarrollo.

Pues bien, en este periodo ha tenido lugar en España la cumbre de un excepcional desarrollo de la construcción con tuneladoras, en el que las obras de nuestro país han ido incorporando todas las mejoras de esa tecnología, en algunas de las cuales, además, han sido pioneras, como luego se comenta.

2. Principales proyectos de túneles construidos en España (1996-2011)

El espectacular desarrollo de la construcción de túneles en España se plasmó principalmente en los proyectos para las Infraestructuras ferroviarias urbanas ("Metros" y Líneas de "F.C. de Cercanías" de las grandes ciudades) y para las nuevas Líneas de Alta Velocidad Española (AVE), siendo de menor volumen las inversiones en túneles de carretera o para Proyectos hidráulicos.

A continuación se mencionan los túneles construidos por los Organismos que han tenido una mayor participación en este tipo de Proyectos de Infraestructuras.

2.1. Los túneles de las ampliaciones del Metro de Madrid (14)

En 1995 el Gobierno Autónomo de Madrid, a través de sus empresas públicas ARPEGIO, primero, y MINTRA posteriormente (hasta su disolución a finales de 2011), inició el primero de los 4 Planes cuatrienales para la Ampliación de la Red subterránea del METRO DE MADRID. Se construyeron hasta la fecha más de 130 km de nuevas líneas, hoy en explotación, de los que 108 km son túneles construidos con escudos EPB, 92 km de los cuales (Figs. 1) son de doble vía ($\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m y $\varnothing_{int} = 8.43$ m, $e = 320$ mm) y el resto túneles para simple vía ($\varnothing_{exc} \approx 7.35$ m, $\varnothing_{int} = 6.00$ m, $e = 250$

1. Introduction

The progress made in tunnelling technology with mechanized tunnelling machines, or tunnel boring machines, has been outstanding during the last 15 years. The contribution that such technology has made to the improvement of health and safety working conditions, the forecast of work schedules and the more accurate tunnel costs estimation, has led to this great development.

It was during that time that Spain experienced the peak of its exceptional development in tunnelling construction with TBMs and when Spanish projects started incorporating systematically all the improvements of this technology. Furthermore, some of them were pioneers in incorporating some of the new technologies, as will be explained later in this paper.

2. Major spanish rail tunnel projects (1996 - 2011)

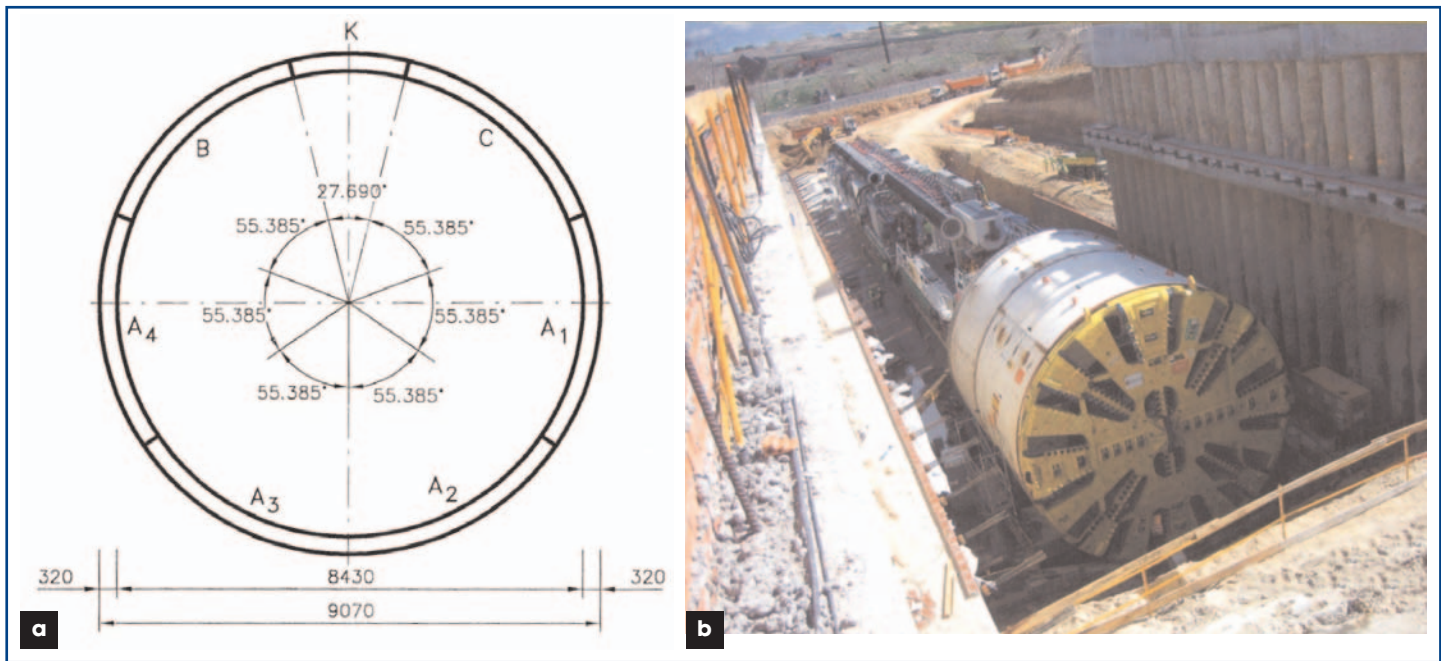
The great tunnelling development in Spain can be found mainly in tunnel projects for the urban rail tunnel network (Metro and local train service lines) and the new Spanish High Speed Rail lines (AVE). Only a lower volume of investments were made for road and sewerage tunnels.

A description of the tunnels built by the organizations with a higher degree of involvement in this type of infrastructure projects is shown below.

2.1. Madrid Metro extension tunnels (14)

In 1995, the Regional Government of Madrid and its owned companies, initially called ARPEGIO and now MINTRA (the last one dissolved in late 2011), began the first of the four "4-year" Plans for the Underground Metro Lines Extension of Madrid. Since then, over 130 km of new lines, which are already in use, have been completed, including 108 km of tunnels excavated with EPB shields: 92 km (Figs. 1) for double track line ($\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m ; $\varnothing_{in} = 8.43$ m, $e = 320$ mm) and 16 km for single track line ($\varnothing_{exc} \approx 7.35$ m; $\varnothing_{int} = 6.00$ m, $e = 250$ mm), where the ground conditions recommended a twin smaller tubes project.

Almost the entire "Metro" network extension has been designed using shallow tunnels (running 10 to 50 m deep from the surface) to achieve the optimal comfortable conditions (accessibility and ventilation), as



mm) en los tramos que, por la calidad de los terrenos, se proyectaron con diseños bitubo.

Los diseños de estas ampliaciones de la red subterránea son, en su práctica totalidad, túneles de línea de poco recubrimiento (entre 10 m y 50 m) con el fin de conseguir unas condiciones óptimas de comodidad (facilidad de accesos y ventilación) y de seguridad (fácil vigilancia) tanto en la línea, como en las más de 30 estaciones, cuyos recintos se construyeron con pantallas continuas de hormigón armado de hasta unos 40 m de profundidad.

En cuanto a los terrenos de Madrid afectados por estas obras, son suelos del Cuaternario y del Mioceno, de naturaleza arcilloso-arenosa, que van desde arenas de grano grueso, con tránsitos crecientes en su contenido arcilloso y ocasionales intercalaciones calcáreas o de roca silíceas, hasta rocas arcillosas (las llamadas "peñuelas" en la geología local). El sustrato inferior lo ocupan los yesos, que aparecen en formaciones masivas, a mayor profundidad, y que, en los trazados del "Metro" de las zonas del sureste y sur de la ciudad, se presentan más bien en alternancias con capas de margas o, simplemente, de terrenos con contenidos elevados de yesos. El "karst" existente en los macizos yesíferos mas profundos, que hemos pasado en colectores excavados con escudos de diámetros inferiores a los 5 m, no aparece en las formaciones afectadas por los túneles del "Metro" o de los enlaces de trenes de la ciudad. Por último, la presencia de aguas subterráneas se limitó a

well as safety conditions (easier monitoring), and over 30 stations built with reinforced concrete diaphragm walls of up-to-40m depth.

The geology of Madrid area consists of Quaternary and Miocene soils, ranging from coarse grain sands, with increasingly clay content, to clay rocks (locally called "peñuelas"), and some occasional bands of calcareous or siliceous rocks. The substratum is composed of gypsum rock, presented in massive formations at a greater depth. These gypsum rock formations are alternating with marl layers, or soils with high contents of gypsum at south and south-east areas of urban metro lines. The existing karst phenomena in the deepest gypsum rock mass, previously excavated by up-to-5m diameter shield TBMs, does not appear in the ground excavated at metro and local train tunnel alignments. In several sections underground water occurred, coming from local underground water-bearing deposits, sometimes of considerable volume capacity.

Focusing on the TBMs used, two NFM-MITSUBISHI and two HERRENKNECHT 9.40m-diameter shields were provided for the First Plan (1955-99). They were followed by three additional HERRENKNECHT shields, same size, one for the Second Plan (1999-2003) and the other two for the Third Plan (2003-07). For the single track tunnels ($\varnothing$ 6,70 m), a 7.35 m diameter shield from LOVAT was used. This machine had been already used in 1996 for the Project PASILLO VERDE, an internal rail connection of Madrid city.

Fig.1 a). Sección tipo de los túneles del Metro de Madrid (anillo universal para doble vía)/Madrid Metro tunnel Cross-section (universal-type segmental ring for double track)
b) Escudo EPB $\varnothing$ 9,40 m. Metro de Madrid (Plan 2003-2007). / $\varnothing$ 9,40 m EPB Shield for Madrid Metro (Plan 2003-2007).

bolsadas, a veces de volumen importante, cortadas en algunos tramos.

En cuanto a las tuneladoras empleadas, para el primer Plan (1995-99) se construyeron 2 escudos NFM-MITSUBISHI y otros 2 HERRENKNECHT, de $\varnothing 9.40$ m, a los que se añadieron 3 escudos más, HERRENKNECHT, de las mismas dimensiones, uno construido para el Segundo Plan (1999-2003), y los otros dos para el Plan Tercero 2003-07. Para los túneles de $\varnothing_{int} = 6.00$ m se utilizó un escudo LOVAT de $\varnothing_{exc} = 7.35$ m, construido en 1996 para otro proyecto anterior, el túnel del PASILLO VERDE, de los enlaces ferroviarios internos de la ciudad de Madrid.

La máquina LOVAT, con extracción por tornillo horizontal, era uno de los varios prototipos ensayados para el trabajo en presión de tierras hasta una presión del orden de los 1.5 bar, lo cual se hacía con un cierre accionado manualmente, de compuertas hidráulicas ("pressure gates") de control de la salida de tierras de la cámara, que se vertían en la cinta primaria de la TBM.

Las 4 máquinas grandes del Primer Plan fueron los escudos realmente de presión de tierras (en lo que sigue, escudos EPB) que trabajaron en España, y en cuyos diseños impusimos las correcciones que recomendaron los problemas sufridos en máquinas singulares anteriores, pioneras de esta tecnología, como fueron la LOVAT del túnel de St. Clair River (F.C. USA - Canadá) y la NFM-MITSUBISHI del Periférico Norte de Lyon, en Francia. En los diseños de los 3 escudos HERRENKNECHT posteriores se incluyeron todas las innovaciones aparecidas en el mercado, o ensayadas en las obras de Planes precedentes, relativas a los tratamientos con aditivos (para resolver, sobre todo, la pegajosidad de las arcillas) y con lodos bentoníticos para el funcionamiento óptimo de la máquina y reducción máxima de los asentamientos en superficie. Son de señalar, por otra parte, los diseños adoptados en los últimos escudos, que resolvieron los problemas planteados por los yesos, cuya hidratación, junto con el calor del corte mecánico, produce su fraguado, obturando las aberturas de la Rueda de corte y/o formando bloques duros en la cámara, cuyas dimensiones llegan a impedir su evacuación por el tornillo.

2.2. Los túneles de las nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad

En 1997 el Ministerio de Fomento de España, fundó el GIF, hoy ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias), Organismo autónomo encargado de la am-

With the addition of an horizontal screw conveying system, the LOVAT machine was one of the several prototypes tested for earth pressure balance works at maximum pressures of about 1.5 bar. Such condition was achieved by a manual closing system consisting of pressure gates that control the spoil discharge from the excavation chamber onto the shield main extracting belt.

The four great machines for the First Plan were the first 'properly called' Earth Pressured Balance machines used in Spain (or EPB machines). They were designed following the recommendations from preceding machines experiences, including the LOVAT machine for the St. Clair River tunnel (F.C. USA - Canada) and the NFM-MITSUBISHI machine for the Lyon North Peripheral Road, in France. The three subsequent shields designed by HERRENKNECHT included all the latest innovations in the market, some of them already tested in previous project Plans, with regard to the use of ground conditioning additives (specially to prevent the stickiness of clay) and bentonite slurry in order to achieve the optimal machine operation and minimize surface settlements. On the other hand, it should be noted here that the last shields proved their feasibility under the challenging conditions of gypsum ground. The chemical hydration of gypsum together with high temperatures caused by mechanical rock cutting, lead to gypsum rock hardening, prone to block the cutting wheel openings and/or forming hard great-sized boulders inside the excavation chamber, preventing the extraction of muck through the screw conveyor.

2.2. Tunnelling the new high speed railway lines

In 1997 a new company initially called GIF and now ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) was established by the Spanish Ministry of Public Works and Highways as the government autonomic agency in charge of managing the expansion of the Spanish High Speed Railway (AVE) to all regions. At the time, the Spanish high speed railway only had one line connecting Madrid - Córdoba - Sevilla, which had been developed between 1986 and 1990. GIF works began with the section Madrid-Zaragoza of the new linking Line Madrid - Barcelona - French border, currently on service until Barcelona, and included the excavation of double track tunnels, mostly by conventional methods. Only a section of about 3,500m. of the Paracuellos 4.8km-long tunnel, with an effective cross-

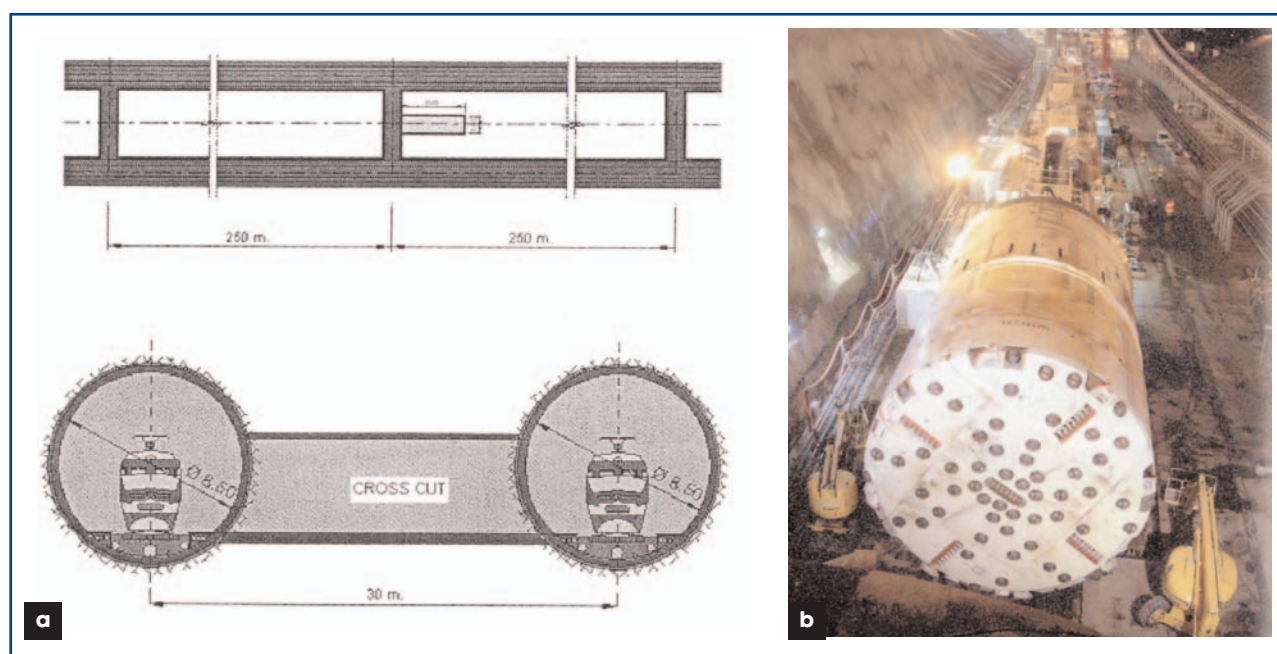


Fig. 2. a) Sección tipo del Túnel de Guadarrama y galerías de conexión /Cross-section for the Guadarrama twin tunnels and connection galleries. b) Doble escudo Ø 9,60 m del Túnel de Guadarrama/ Ø 9,60 m Double shield TBM (Guadarrama Tunnel).

pliación y extensión a todas las regiones del país, de la Red de Alta Velocidad Española (AVE) que entonces contaba sólo con la Línea Madrid-Córdoba-Sevilla, construida en 1986-90. Las actividades del nuevo Organismo comenzaron por el Tramo Madrid-Zaragoza, de la nueva Línea Madrid-Barcelona-Frontera francesa, actualmente en servicio hasta Barcelona, con túneles para doble vía construidos por métodos convencionales, si bien en el de Paracuellos, de 4.8 km y 62 m² de sección, se hicieron unos 3.500 m de un tramo interior con un equipo "duplex" para roca dura, de la casa alemana WIRTH, formado por una máquina piloto de $\varnothing_{int} = 4.50$ m. y un ensanchadora de $\varnothing_{int} = 11.80$ m

Continuó el GIF con la construcción de la Línea Madrid-Valladolid (troncal de las futuras líneas al Norte y Noroeste de España), actualmente en explotación, en la que hubo que proyectar, además de otros túneles a construir por métodos convencionales, el túnel bitubo de base de GUADARRAMA, de 28.5 km de longitud por tubo, $\varnothing_{exc} \approx 9.60$ m y $\varnothing_{int} = 8.50$ m, con un recubrimiento máximo de unos 1.500 m, para atravesar las cordillera del mismo nombre del Macizo Central de la Península ibérica (Figs. 2) (1).

Los terrenos son rocas ígneas, granitos y gneis en un 90% del trazado, con esquistos en el extremo Norte, litología principal de este macizo, surgido en el ciclo orogénico herciniano y afectado después por el alpino. La geología del macizo era conocida en su configuración general, pero sin tener datos de sus ca-

section area of 62m², was excavated by means of a "duplex" system for hard rock, built by the German company WIRTH. This system is a combination of a pilot tunnelling machine of $\varnothing_{in} = 4.50$ m and a gripper machine for tunnel enlargement of $\varnothing_{in} = 11.80$ m.

GIF continued the works with the construction of the Line Madrid -Valladolid (trunk route for the future lines to North and Northeast of Spain), currently on service stage, for which not only several conventional tunnels but the challenging GUADARRAMA base twin tunnels, 28.5km long per tube, $\varnothing_{exc} \approx 9.60$ m and $\varnothing_{in} = 8.50$ m, with an overburden up to as much as 1,500 m, had to be designed, passing under the Guadarrama mountain range at the Central Massif Mountains of the Iberian Peninsula (Figs. 2) (1).

The terrain in which 90% of the Guadarrama tunnels were built consist of igneous rocks, granite and gneiss, with schist rock in the northern area, which is predominant in this mountain range, originated in the Hercinian Orogenic Cycle and affected later by the Alpine Orogeny. Although a general geological configuration for the range was known, its specific characteristics were unknown, as there were no previous projects or ground surveys at such depth. Furthermore, the major part of the massif was specially protected by the authorities, so that only a 40 % of the total alignment was authorized to be explored by borehole drilling without further detailed

racterísticas concretas, al no existir obras anteriores o reconocimientos por sondeos a la profundidad requerida para este proyecto de túnel de base. Por otra parte, la mayoría de la superficie del macizo es zona especialmente protegida, lo que limitaba a un 40%, aproximadamente, la longitud del trazado en la que había zonas autorizadas para hacer sondeos sin necesidad de un minucioso estudio medioambiental previo. Por todo ello, el GIF convocó un Concurso de Proyecto y obra, con plazo de 13 meses, para presentar ofertas basadas en reconocimientos limitados a los de las zonas autorizadas para ello.

Para el Concurso citado, el GIF redactó un Proyecto básico, en el que se incluían las condiciones técnicas a cumplir, entre otras, las principales siguientes: radios mínimo de las curvas del trazado, de 11,000 m en alzado y de 7000 m en planta, así como un 17‰ para las pendientes máximas admisibles, además de obligar a la implantación del trazado dentro de un "pasillo" de unos 2 km de anchura, señalado en la cartografía. Pese a la calificación general de calidad geotécnica medio-alta y alta del macizo, dadas las dificultades para la caracterización concreta de los terrenos del trazado, el GIF impuso la condición adicional, a propuesta de SPICC, del empleo de máquinas de roca dura del tipo "doble escudo".

La propuesta era consecuencia de la amplia experiencia de empleo de máquinas de esta tipología en proyectos anteriores, como el del Trasvase Guadiaro-Majaceite, en España, un túnel de 12 km, de $\varnothing_{exc} \approx 4.90$ m, excavado desde una sola boca en rocas desde muy baja calidad a calidad media y medio-alta, así como un segundo túnel de 11 km para Trasvase Daule-Esperanza, en Ecuador, en areniscas de buena calidad geotécnica y de dureza y abrasividad medio-alta. La propuesta suponía una gran responsabilidad, por la diferencia de diámetros entre el de Guadarrama y los de experiencias previas, no solo las propias citadas, sino también otras de secciones algo mayores ($\varnothing = 7$ m) de C. Grandori, inventor e impulsor de esta nueva tecnología, que nos había animado a utilizarla en macizos competentes con secciones grandes, lo que avaló nuestra propuesta, aceptada por el GIF.

Puesto en marcha el Concurso, llegaron noticias de un grave incidente ocurrido en el Proyecto Pinglin, en Formosa, unos túneles gemelos para una autopista, en el que hubo un grave fracaso de dos máquinas de este tipo y diámetros ligeramente mayores. Intentamos tener noticias detalladas de lo ocurrido, sin éxito, al haberse

environmental impact assessments. That was the reason why GIF invited tenders for the tunnels design and construction, within 13 months time, to submit the bids with regard to pre-exploration prospecting works at those areas where they were allowed to.

For the tender, GIF wrote a draft project containing a specification of the technical requirements needed, which included a minimum radius of curvature for the alignments, 11,000m elevation and 7,000m plan, a maximum acceptable slope of 17‰ and also a compulsory location of the layout within a 2km wide corridor highlighted on the cartography, into which the tenders were commissioned to enclose the alignment designs. Although the general geotechnical classification for the ground was medium-high to high quality, given the difficulties in knowing the ground accurately, GIF also required, at the proposal of SPICC, the use of a "double shield" TBM for hard rock.

The proposal resulted from the extensive experience on previous projects with this type of TBM. For example, the Spanish Project for Transferring water from Guadiaro to Majaceite rivers, a 12km-long tunnel of $\varnothing_{exc} \approx 4.90$ m, excavated from one only launching portal in very low to medium and medium-high quality rock; and also the 11km - long tunnel for water transferring from Daule to Esperanza rivers, in Ecuador, excavated in sandstone of high geotechnical quality, medium to high abrasiveness and hardness. The Guadarrama case was specially challenging since the excavation diameter is significantly greater than those for the projects mentioned before, and other previous projects of slightly greater diameter ($\varnothing \approx 7$ m). C. Grandori, inventor and driving force of this technology, encouraged us to use it on hard massive rock and great diameter tunnels, giving support to our proposal, which was accepted by GIF.

Just after the tender had began, news about a serious incident with two machines of this type, were known. The machines, which had slightly larger diameter and were excavating two road twin tunnels for the Project Pinglin in Formosa, had seriously failed. Details of what happened were not revealed to us, as the case was declared legal secret, but we studied the failed project and found out that the rock was of significantly lower quality than Guadarrama rocks. That is the reason why the Project Pinglin included a third small gallery for services, to be built in advance of the main twin tunnels, as a pre-exploratory tunnel, that finally was not excavated. Yet, along with GIF, it

producido un litigio en el que se declaró secreto judicial. No obstante, estudiamos el proyecto, comprobando que no se trataba de un macizo similar a Guadarrama, sino de calidad obviamente muy inferior, lo que, en nuestra opinión, justificaba el que para el proceso de ejecución de los túneles principales, el proyecto había considerado necesario la construcción adelantada de un túnel auxiliar de pequeña sección, que había de servir de reconocimiento previo del terreno y cuya construcción no se había llevado a cabo. Con todo ello se decidió, de acuerdo con el GIF, mantener las condiciones del Concurso, por lo que, en consecuencia, para Guadarrama se construyeron 4 máquinas de tipo "doble escudo", dos fabricadas por HERRENKNECHT, y otras dos por WIRTH, ambos especialistas en TBMs de roca dura. La excavación del túnel se inició desde las Bocas del Norte, en Noviembre de 2002 y desde las Bocas Sur en Febrero de 2003, enfrentando en cada tubo máquinas de distinto fabricante, por si las prestaciones eran diferentes, lo que no ocurrió. Los resultados fueron altamente satisfactorios en ambos casos: el túnel se construyó en un plazo de 27 meses (el cale tuvo lugar a principios de Febrero de 2005), con unos rendimientos medios mantenidos de 545 m/mes en el Norte y 465 m/mes en el Sur, siendo la media global mantenida de 502 m/mes. En resumen, estas tuneladoras fueron, en su tiempo, las mayores del tipo "doble escudo" que completaron con éxito una obra de la importancia de Guadarrama, lo que despertó un gran interés a nivel internacional, demostrado por el gran número de expertos extranjeros asistentes a la Jornada técnica de Mayo de 2005 organizada por el ADIF en Madrid, para celebrar la terminación del túnel.

Consecuencia de esta experiencia fue la aprobación, en el año 2003, de las ofertas de TBMs del mismo tipo, "doble escudo", presentadas para el túnel siguiente, el de Abdalajís, en la Línea del AVE Córdoba - Málaga, actualmente en explotación, un diseño también bitubo de $\varnothing_{exc} \approx 10.00$ m ($\varnothing_{int} = 8.80$ m, $e = 450$ mm) y 7.30 km de longitud por tubo, para atravesar la cordillera Penibética del Sur de España.

La problemática esperable de este túnel era muy diferente de la de Guadarrama, tanto por la calidad muy variable de terrenos, con una proporción significativa de rocas arcillosas blandas, con presencia posible de metano, calizas cársticas y filtraciones importantes. La realidad superó con creces las hipótesis: basta decir que hubo que hacer los avances en mar-gas con gas metano a lo largo de casi 2 km, con me-

was decided to keep the initial conditions for the TBMs type. Subsequently, 4 "double shield" machines were manufactured for the Guadarrama tunnels. Two of them were designed by HERRENKNECHT and the other two by WIRTH, both companies specialized in hard rock TBMs. Tunnel excavation started from the Northern Portals in November 2002, and from the Southern Portals in February 2003, so that machines from different manufacturers were faced in the same tube. There was no significant difference between the performances of each machine. Both provided high performances: the tunnel was completed within 27 months (breaking through in February 2005). Maintained average advance rates of 545 m/month at North and 465 m/month at South were reached, resulting in an overall advance rate of 502 m/month. Summarizing, the TBMs for Guadarrama Project were the largest "double shields" of the time that completed such a challenging project, so it awoke great international interest, shown by the large number of foreign experts attending the Technical Conference in May 2005, organized by ADIF to celebrate the completion of the tunnel.

As a consequence, the offers of the two "double shield" TBMs for the new Abdalajís Project, for the AVE Córdoba - Málaga Line, nowadays on service stage, was approved in 2003. The project included the construction of two twin tunnels of $\varnothing_{exc} \approx 10.00$ m ($\varnothing_{in} = 8.80$ m, $e = 450$ mm) and 7.30 km long, to cross the Penibética Mountain Range in South Spain.

The conditions in this project were expected to be very different from the Guadarrama tunnels. In this case, it was foreseen a varying quality of the ground, with a significant proportion of soft clay rocks, possible presence of methane gas, chalky rock with karsts and considerable groundwater filtrations. Reality far exceeded expectations: the rate of advance during the excavation of almost 2 km in marl with methane gas contents had to be limited due to the safety requirements established, which caused moderate production downtimes to dilute gas in the air. Moreover, groundwater filtration occurred when cutting karsts and significant inflows into the excavation chamber were reached. Tunnelling work had to be interrupted, and the inflow reached 410 l/s. In order to leave the gross of filtration behind, it was hardly possible to advance 10m, after which filtration decreased up to 250 - 200 l/s, kept until the end of the excavation in the North Portal.

días diarias limitadas por las normas de seguridad establecidas, que obligaron a paradas de cierta duración para rebajar la concentración de gas en el aire, y que las filtraciones al cortar el "karst" alcanzaron en uno de los túneles un caudal muy importante en el frente, que obligó a paralizar el avance, alcanzándose un caudal total aforado de 410 l/s. Una vez avanzados con gran dificultad una decena de metros, para dejar atrás las filtraciones máximas, se reanudó el avance siempre afectado por las filtraciones, ya que los caudales se estabilizaron muy lentamente, hasta cifras del orden de los 250 a 200 l/s mantenidas hasta el final de la excavación, con salida de las máquinas por la Boca Norte.

Las TBMs tipo "doble escudo" fueron dos máquinas gemelas "MITSUBISHI", fabricadas en talleres españoles, y su comportamiento fue muy aceptable, dadas las difíciles condiciones de trabajo que se han comentado. El plazo de ejecución fue de 28 meses, con un rendimiento global medio de 207 m/mes. Posteriormente se llevó a cabo una prolongada campaña de inyecciones para la disminución de los caudales de las filtraciones y tratamiento simultáneo del "karst", habiendo logrado reducir los caudales para la explotación a unos 18 l/s en el túnel Este, el más afectado por el gran depósito subbalveo, y unos 7 l/s en el túnel Oeste.

Para terminar las referencias a las TBMs "doble escudo" añadiremos:

- a) En 2006, en el Tramo Figueras – Perpignan, de la Línea Madrid – Barcelona – Frontera Francesa, se terminó el túnel fronterizo de Perthus, un diseño bitubo $\varnothing_{exc} \approx 9.96$ m ($\varnothing_{int} = 8.50$ m) y 8.5 km de longitud por tubo, en rocas ígneas del macizo de los Pirineos (gneis en los 2/3 del lado Sur y esquistos en el resto hacía el Norte) para el que se fabricaron 2 TBMs "doble escudo" HERRENKNECHT. Se atravesaron varias fallas entre las que destacan la de Les Cluses, en gneis altamente fracturado, y la Montesquieu, en los esquistos del extremo Norte.
- b) También en 2006, y en la Línea del AVE a Levante (Valencia – Alicante), actualmente en explotación, se terminó el túnel bitubo de La Cabrera, de $\varnothing_{exc} \approx 9.74$ m ($\varnothing_{int} = 8.50$ m) y 7.5 km de longitud por tubo, en un macizo de rocas evaporíticas (yesos) con un "micro-karst" sin agua, que no causó mayores dificultades. Se construyó para este túnel otra nueva TBM "doble escudo" HERRENKNECHT.
- c) En el Corredor Mediterráneo de AVE (Murcia – Almería) el túnel bitubo de Sorbas, de $\varnothing_{exc} \approx 10.08$

The two "double shield" TBMs had been manufactured by MITSUBISHI in Spanish factories. Their performances were acceptable given the difficult conditions remarked above. The tunnel was completed within 28 months at an average advance rate of 207 m/month. After the excavation was completed, an extensive campaign of secondary grout injection had to be performed, in order to fill the karst and reduce ground-water filtration into the tunnel. In service stage, the filtration had been reduced to a value of 18 l/s in the East tunnel, with a higher presence of ground-water storage deposits, and 7 l/s in the West tunnel.

To complete the references to "double shield" TBMs in this paper, the following should be added:

- a) Perthus tunnel, in the border between Spain and France and within the Section Figueras – Perpignan of Madrid – Barcelona – French Border Line was completed in 2006. It was designed as a twin tunnel of $\varnothing_{exc} \approx 9.96$ m ($\varnothing_{in} = 8.50$ m) and 8.5 km long and pass through the massive igneous rocks of Pirineus mountain range (2/3 south part composed by gneiss rock and schist on the north part). For the excavation, two HERRENKNECHT double shield TBMs were provided, tunnelling through several fault zones such as Les Cluses fault consisting of loosening gneiss, and the Montesquieu fault in the northern end schist rock.*
- b) La Cabrera tunnel, for the AVE Line to the East (Valencia – Alicante), was also finished in 2006. This is a $\varnothing_{exc} \approx 9.74$ m ($\varnothing_{in} = 8.50$ m) and 7.5 km long twin tunnel excavated in evaporite rocks (gypsum) with a dry "microkarst" phenomena that caused no major difficulties. Another "double shield" TBM was made by HERRENKNECHT for this tunnel.*
- c) The Sorbas tunnel, for the AVE Mediterranean Corridor (Murcia – Almería), it is still under construction. This is a twin tunnel of $\varnothing_{exc} \approx 10.08$ m ($\varnothing_{in} = 8.75$ m. $e = 500$ mm) and 8 km long per tube, being excavated with the same HERRENKNECHT double shield used for La Cabrera tunnel. For this second tunnel, the TBM was equipped with a new cutting wheel and a new vacuum segment erector as well new steel shields adapted to the new size of the cross-section. It also was required to use precast concrete segment rings of 0.5 m thick, in order to assure water sealing and stability of the ring, specially for a section of 0.5 km long where the*

m ($\varnothing_{\text{int}} = 8.75$ m, $e = 500$ mm) y 8 km de longitud por cada tubo, que se construye actualmente con la máquina HERRENKNECHT de La Cabrera, a la que se ha dotó de Rueda de Corte, Erector de dovelas y escudos nuevos, para adaptarla al nuevo diámetro de excavación y espesor del anillo exigidos por las condiciones de impermeabilidad y de esfuerzos excepcionales debidos a la posible expansividad de las anhidritas existentes en un tramo de unos 0.5 km del trazado. El túnel nº 1 se terminó en Marzo de 2011 y el túnel nº 2 se espera completarlo en el próximo mes de Marzo de 2012. En esta obra se están batiendo todos los "records" anteriores con máquinas "doble escudo" (avances entre 1200 y 1400 m/mes desde Agosto a Noviembre de 2011).

- d) Finalmente, en el Proyecto de Pajares, del que se trata más adelante, y para la Galería de 6 km de longitud, para el ataque a los tubos del Lote 2 de dicho proyecto, se adquirió un "doble escudo" HERRENKNECHT. $\varnothing_{\text{exc}} \approx 10.10$ m ($\varnothing_{\text{int}} = 8.50$ m). Cabe destacar el agua surgente al perforar las cuarcitas de Barrios con caudales del orden de los 20 l/s y presiones importantes y el diseño de la galería con un 6% de pendiente descendente (cifra máxima aceptable para el trabajo de una TBM, y siempre que se tomen medidas de seguridad relativas a las cargas a mover sobre vía).

Respecto de otros tipos de TBMs para roca, utilizadas en las obras del ADIF, debe citarse, en primer lugar, en la Línea del AVE León - Asturias, el proyecto estrella del túnel de base de Pajares, un diseño bitubo de $\varnothing_{\text{exc}} \approx 10.10$ m ($\varnothing_{\text{int}} = 8.50$ m) y 25 km de longitud tubo, para pasar el macizo de la cordillera Cantábrica (que discurre próxima a la costa Norte de España) a través de formaciones de roca caliza (con algunos tramos cársticos), cuarcitas y pizarras del Carbonífero, de calidad geotécnica muy variable. Para este túnel, y debido al alto riesgo de atrapamiento de las TBMs a causa del "squeezing" de las capas de pizarras de peor calidad, se eligieron 4 TBMs del tipo "escudo simple", fabricadas por HERRENKNECHT. (1 Ud., Lote 1) MITSUBISHI (1 Ud., Lote 4, fabricada en España) y NFM (2 Uds., Lotes 1 y 2). (2) (Figs. 3).

En esta obra hubo que trabajar en condiciones muy adversas, debidas a diversas condiciones del macizo, principalmente por: atrapamientos del escudo; alta abrasividad y dureza de algunas capas y, por

potentially expansive anhydrite was foreseen. The first tunnel was completed in March 2011 and the second is expected to be finished by March 2012. This project has broken all previous records made by the other double shield machines (during the last months from August to November 2011, it reached a performance of 1,200 m and 1,400 m respectively).

- d) Finally, for the 6 km long access gallery for the tunnels of Set 2 from Pajares Project (this large project is later mentioned in this paper), a double shield TBM was purchased from HERRENKNECHT, of $\varnothing_{\text{exc}} \approx 10.10$ m ($\varnothing_{\text{in}} = 8.50$ m). It is remarkable here the occurrence of sourcing water when cutting the Barrios quartzite formation, reaching flows of 20 l/s, as well as the high pressure condition, and a downward slope of 6% of the alignment (maximum admissible value for TBM operation, provided security measures considering the loads to move on track).

Other types of hard rock TBMs have been used in other projects promoted by ADIF. For example, the major base tunnel Pajares for AVE León-Asturias Line, a twin tunnel of $\varnothing_{\text{exc}} \approx 10.10$ m ($\varnothing_{\text{in}} = 8.50$ m) and 25km long per tube, running under the Cantábrica Mountain Range (near the northern coast of Spain). This tunnel passes through chalky rock (including some karstic sections), quartzite and shale formations from the Carboniferous, of varying geotechnical quality. In this case, given the high risk of TBM immobilization due to the squeezing behaviour of the poorest shale, 4 "single shield" TBMs were provided by HERRENKNECHT (1 Unit, Set 1), MITSUBISHI (1 Unit, Set 4, Spanish factory) and NFM (2 Units, Sets 1 and 2). (2) (Figs. 3).

The extremely difficult operation of the TBMs due to the adverse geological conditions included: several TBM immobilizations; very high abrasiveness and stiffness of some layers and considerable groundwater inflows (500 l/s pointed 250 l/s constantly all along the Set 1 tunnelling) when driving uphill North to South (general slope of 17‰). Nevertheless, tunnelling works finished in 2007, and the extension section of Pajares - Sotillo, also a twin tunnel of 6 km long per tube, was completed in 2009.

To complete the references to hard rock TBMs used in projects promoted by ADIF, the San Pedro tunnel (AVE Madrid - Valladolid Line) must be mentioned. This is a twin tunnel of $\varnothing_{\text{exc}} \approx 9.50$ m

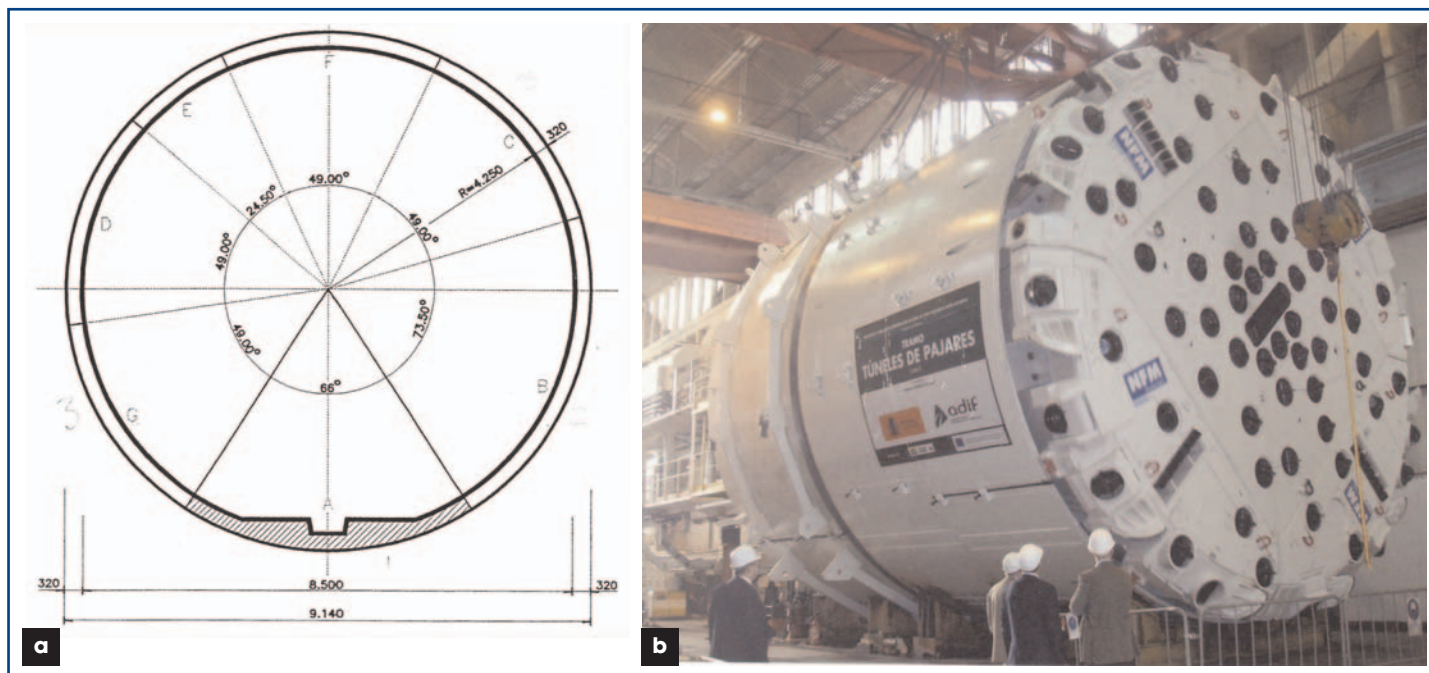


Fig. 3. a) Túneles de Pajares. Anillo tipo de los escudos simples/Pajares tunnels. Segmental ring lining for Single shields. b) Vista del Simple Escudo Ø 10,10 m del Tramo 4 de Pajares/ Ø 10,10 m Single shield TBM (Section 4, PAJARES TUNNEL).

los avances en sentido de Sur a Norte en contra de la pendiente general del proyecto (17 milésimas) con caudales de filtración muy importantes (500 l/s en punta y unos 250 l/s en total, una vez estabilizados hasta el final en el Lote 1). Pese a todo, la obra se terminó en 2007, y el tramo añadido de Pajares – Sotillo, también bitubo, de unos 6 km de longitud por tubo, finalizó en 2009.

Para terminar, respecto de TBMs de roca utilizadas en proyectos de túneles del ADIF, ha de mencionarse el túnel de San Pedro (Línea del AVE Madrid – Valladolid) proyecto bitubo de $\varnothing_{exc} \approx 9.50$ m, a construir con una “TBM no escudada” (o “topo”), es decir, del tipo clásico para excavar en roca dura, con sostenimiento del terreno (o revestimiento primario) de hormigón proyectado y/o cerchas de perfiles de acero. Se acondicionaron para esta obra, fabricando nuevas Ruedas de corte, las máquinas HERRENKNECHT, utilizadas en los túneles suizos de Lötschberg. Por razones medioambientales, se proscribió trabajar desde las Bocas Norte, por lo que las TBMs se montaron en la explanada de las Bocas Sur.

El macizo de San Pedro, una formación de gneis granítico, sigue un alineamiento al Sur del de Guadarrama y sensiblemente paralelo a aquél. El trazado del túnel tiene un recubrimiento superior a los 100 m en su mitad Norte, bajo el cerro principal del macizo, del que toma el nombre, pero en la mitad Sur el recu-

excavated with an “Open” hard rock TBM, the classic method for mechanised tunnelling in hard rock, using shotcrete and/or steel arch support. For this project, two HERRENKNECHT machines previously used in the tunnels of Lötschberg, were set up and provided with new cutting wheels. Due to environmental reasons, tunnelling was banned from the northern portals, so the TBMs were set up to start tunnelling from the southern portals.

San Pedro massif consists of a granite gneiss formation that runs south of Guadarrama massif and considerably parallel to it. The overburden height in the half northern part of the tunnel alignment raise up to 100m when running under the highest mountain of San Pedro, but it drops to values from 40 to 60m in the half southern part, when the alignment runs through the beginning of a large “plateau” structure slightly downward that extends to Madrid. During the excavation of this half southern part, several fault zones already forecast were found. However, far more difficult was tunnelling through very weathered gneiss, affected by the orogenic processes of Guadarrama mountain range, turned into an apparently rock mass of friable blocks, barely cohesive indeed. Tunnel face stability was critical. ADIF, at SPICC’s proposal, called two major experts in hard rock tunnelling, Ozdemir (from Denver School of Mines) and D. E. Brüchi (from I.T.Zurich), whose pessimistic reports after visiting the

brimiento baja rápidamente hasta cifras del orden de los 40 a 60 m, por ser el comienzo de un "plateau" muy ligeramente descendente que continua hasta la ciudad de Madrid. En dicha mitad Sur, el proyecto señaló algunas fallas que, efectivamente, se encontraron al excavar el túnel, pero la verdadera dificultad fue que la formación de gneis estaba totalmente alterada por la orogénesis de la Cordillera central de Guadarrama, y convertida en una masa de apariencia rocosa, pero de cohesión mínima, cuyos bloques se podían partir con la mano. La estabilidad del frente fue totalmente precaria y los informes de los dos expertos en rocas duras, Ozdemir (de la *Denver School of Mines*) y el Dr. E. Brüchi (del *I.T. Zürich*) que visitaron la obra a instancias del fabricante, y con aprobación del ADIF a propuesta de SPICC, fueron muy pesimistas, como se demostró al avanzar penosamente hasta la mitad del trazado en el tubo Este.

Las dificultades comprobadas en los 600 m iniciales del tubo Sur (imposibilidad total del bulonado y de la colocación de mallazo de protección para aplicar hormigón proyectado, así como la enorme dificultad de la colocación de cerchas metálicas a 0,50 m de separación) obligaron abrir frentes para trabajar con métodos convencionales, desde la mitad del trazado, así como, desde las Bocas Norte y la Sur del tubo 2 (desmontando la TBM) con el fin de no retrasar la puesta en servicio de la Línea Madrid - Valladolid. La obra se terminó en 2007.

Para terminar las referencias de obras del ADIF, siguen las relativas a los escudos de frente en presión, concretamente del tipo EPB. Se han utilizado 4 máquinas nuevas, fabricadas por HERRENKNECHT para las obras de doble vía siguientes de la Línea de Madrid - Barcelona - Frontera Francesa.

a) 2007: Escudo EPB DE $\varnothing_{exc} \approx 11.70$ m ($\varnothing_{int} = 10.40$ m) y anillos de 0.45 m de espesor para el túnel Trinidad - Montcada, de 3 km de longitud, en terrenos del Paleozoico (pizarras con intercalaciones de rocas extra duras y abrasivas) y gravas del río Besós en ambos extremos del túnel. Se inició la obra en Junio de 2009 y para limitar los asentamientos en superficie, hubo que trabajar a veces con la cámara llena de material, con lo que el escudo sufrió desgastes muy importantes, no sólo de las herramientas, sino también de las estructuras de la rueda y del mamparo de la cámara de presión y elementos de protección del cojinet principal. Las paradas para reparaciones, junto

jobsite proved later the extremely high difficulties during the poor advance through half of the eastern tunnel.

The difficulties found on the first 600m of the southern tunnel (operations of rockbolting and wire mesh installation for shotcrete were unfeasible, and the installation of steel arch support was highly difficult, even within a separation distance of only 0.50 m) lead to the excavation of several tunnel faces by means of conventional methods, from the middle of the alignment, or even from the North Portal (as well as from South Portal in case of tunnel 2, where the TBM newly assembled had to be dismantled), in order to avoid long delays in opening of the new Line Madrid - Valladolid. Tunnelling works finished in 2007.

The list of projects by the ADIF continues with those projects in which Earth Pressure Balance machines (EPB) were used. For the new double track AVE Line Madrid - Barcelona - French Border, 4 new machines of this type were provided by HERRENKNECHT.

a) 2007: EPB shield of $\varnothing_{exc} \approx 11.70$ m ($\varnothing_{in} = 10.40$ m) and segmental rings of 0.45m thick for the 3 km-long tunnel of Trinidad - Montcada, driving through Paleozoic ground (heterogeneous shale containing extremely hard and abrasive layers) and gravels from Besos river at the endings of the tunnel. Tunnelling began in June 2009. In order to avoid undesired surface settlements it was sometimes necessary to fill almost entirely the excavation chamber with excavated ground, which resulted in extremely high wear of the shield, not only of the cutting tools but also of the cutting wheel support, pressure bulkhead and some main protection components of the bearing. The standstills caused by reparation works of the shield wear and other public services affected (e.g. gas conduct and local railway track) delayed the completion date of the tunnelling works to September 2011.

b) 2008: EPB shield of $\varnothing_{exc} \approx 11.52$ m ($\varnothing_{in} = 10.40$ m) and segmental rings of 0.38m thick for the 5 km-long tunnel of Sants - La Sagrera that links the existing SANTS station in the south of Barcelona to the future station of LA SAGRERA in the north, and connects the Line LAV Madrid - Barcelona with the section LAV Barcelona - Gerona. This tunnel drives through the cohesive granular soils of the "Eixample", the central area of the modern city, to

con las obligadas para corregir las afecciones a los servicios públicos muy próximos (gas y vías de F.C.) retrasaron la fecha de terminación de la obra a Septiembre de 2011.

- b) 2008: Escudo $\varnothing_{exc} \approx 11.52$ m ($\varnothing_{int} = 10.40$ m), y anillos de 0.38 m de espesor para el túnel Sants - La Sagrera, de 5.2 km de longitud, para el enlace de las estaciones de SANTS (actualmente existente al Sur de la ciudad de Barcelona) y la futura de LA SAGRERA, al Norte de la misma, dando continuidad a la LAV Madrid - Barcelona con el Tramo Barcelona - Gerona.

El túnel discurre por los suelos granulares cohesivos del "Eixample", zona central de la ciudad moderna, en un trazado a la profundidad media de 50 m. La obra creó una alarma importante por la posible afección a obras de interés histórico como La Pedrera (también llamada Casa Milá) obra de A. Gaudi, lo mismo que la basílica de La Sagrada Familia (patrimonio de la Humanidad) por cuya razón la construcción del túnel fue sometida a la vigilancia extraordinaria de una comisión de expertos internacionales, dirigida por miembros de la UNESCO y de la Universidad Politécnica de Cataluña, comisión a la que pertenecemos. El escudo trabajó siempre en "modo EPB", con cámara de tierras llena e inyecciones de bentonita en el "gap" escudo/terreno, así como en la cámara para mantener la presión calculada, consiguiendo que los asentamientos en superficie, limitados a un "máximo objetivo" de 5 mm., no superaron jamás los 3 mm. En resumen, la obra fue un éxito total, reconocido por expertos de todo el mundo.

- c) 2009: Escudo EPB $\varnothing_{exc} \approx 12.11$ m ($\varnothing_{int} = 10.95$ m), y anillos de 0.40 m de espesor para los túneles denominados 1 y 2, de 1.3 km y 1.6 km, respectivamente, que pasan bajo la ciudad de Gerona, emplazados en uno y otro extremo de la nueva estación, también subterránea (un gran recinto entre pantallas). Forman parte del trazado del Subtramo Barcelona - Gerona del Tramo del AVE Barcelona - Frontera Francesa. Los túneles discurren por suelos cohesivos del valle bajo del río Ter y pasan por debajo de su cauce en un tramo final en margas blandas. La obra se terminó en Mayo de 2011, con asentamientos máximos de unos 3 mm con algún máximo puntual de 5mm.
- d) 2008: Escudo $\varnothing_{exc} \approx 11.50$ m ($\varnothing_{int} = 10.40$ m), y anillos de 0.36 m de espesor para el túnel Chamartín-

an average depth of 50m. This project was especially controversial as it was possible to induce undesired damages on historical heritage buildings like La Pedrera (also called Casa Milá) or the basilica La Sagrada Familia (declared World Heritage), both buildings by A. Gaudi. For this reason it underwent an extraordinary surveillance committee of international experts, managed by members from the UNESCO and the Polytechnic University of Catalonia, to which we belonged. The shield was operated in "EPB-mode" all along the alignment, i.e., the excavation chamber was full of conditioned ground, and bentonite injections to the ground-shield gap and to the excavation chamber were performed in order to control the surface settlement, which was limited to a maximum of 5 mm. although it never exceeded 3mm. After all, the project was a great success and so it was recognized by experts from all around the world.

- c) 2009: EPB shield of $\varnothing_{exc} \approx 12.11$ m ($\varnothing_{in} = 10.95$ m) and segmental rings of 0.40m thick for the tunnels Gerona 1&2, of 1.3km and 1.6km long respectively, running under Gerona city, located at both sides of the new underground station (a large enclosure within diaphragm wall boundaries). Both tunnels belong to the subsection of Barcelona-Gerona for the AVE Barcelona - French Frontier Line, and drive through the cohesive soils of the Ter river lower valley, under the river bed at the ending section where soft marl was found. Tunnelling works finished in May 2011, with surface settlements registered generally up to 3mm and a maximum of 5mm locally.*
- d) 2008: EPB shield of $\varnothing_{exc} \approx 12.1$ m ($\varnothing_{int} = 10.45$ m) and segmental rings of 0.36m thick for the 7 km-long tunnel rail link of Chamartín - Atocha, between the stations of Madrid for the high speed railway line AVE Madrid - Barcelona - French Frontier and the other AVE Lines departing from the capital. This tunnel drives at a maximum depth of 40m through the sandy and/or slightly clayey soils of Madrid, described above on the Madrid Metro extension paragraph. It was excavated without incidents, at an excellent regular pace and completed in February 2011.*
- e) To finish describing the tunnel projects promoted by ADIF, we would like to mention Quejigares*

Atocha, de 7 km de longitud que enlaza las estaciones de Madrid de la Línea del AVE a Barcelona y Frontera Francesa con las restantes Líneas del AVE que parten de la capital. El túnel discurre a una profundidad máxima de unos 40 m por los suelos arenosos y/o ligeramente arcillosos de Madrid, que se han descrito al tratar de las ampliaciones del "Metro". El túnel se excavó sin incidencias, a un ritmo mantenido excelente y se terminó en Febrero de 2011.

- e) Para terminar las obras del ADIF, citaremos el túnel de Quejigares, en la Línea de Antequera a Granada (con estación en la Línea Córdoba - Málaga), un proyecto bitubo de $\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m ($\varnothing_{int} = 8.50$ m) y 3.4 km de longitud por cada tubo en suelos arcillosos de plasticidad medio alta. La obra se construyó con una de las máquinas HERRENKNECHT, utilizadas en el Primer Plan de Ampliación del "Metro" de Madrid.

2.3. Los túneles ferroviarios de la Dirección General de ferrocarriles del Ministerio de Fomento

La Dirección General de Ferrocarriles construyó en este período los túneles siguientes:

- a) Túnel Atocha - Nuevos Ministerios - Chamartín, para doble vía ($\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m y $\varnothing_{int} = 8.43$ m, $e = 320$ mm), de 7.0 km de longitud total, que enlaza las 2 estaciones ferroviarias de Madrid y, a su vez, pasa por las de varias líneas del "Metro" de la ciudad, con el fin de vertebrar las líneas ferroviarias de la capital. Para esta obra se utilizaron 2 tuneladoras, una NFM que trabajó en el Primer Plan de Ampliación del "Metro" y otra HERRENKNECHT de nueva construcción. Los terrenos son los ya descritos al tratar las líneas del "Metro" y la obra se hizo sin incidencias dignas de mención.
- b) Túnel de conexión de las Terminales del Aeropuerto de Madrid, para doble vía ($\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m y $\varnothing_{int} = 8.43$ m, $e = 320$ mm), de 2.8 km de longitud total. Discurre por terrenos similares a los de las Líneas 5 y 8 del "Metro" comentados en el punto 2.1 anterior. La máquina utilizada ha sido una de las empleadas en las obras de las Ampliaciones de la red del "Metro".
- c) Túnel de Acceso a Vigo. Proyecto bitubo de $\varnothing_{exc} \approx 9.60$ m ($\varnothing_{int} = 8.50$ m, $e = 320$ mm), de 8.3 km de longitud por cada tubo. Se construye para el lla-

tunnel, part of the Antequera - Granada Line (a station for the Line Córdoba - Málaga), a twin tunnel of $\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m ($\varnothing_{int} = 8.50$ m) and 3.4km long per tube, driven in clayey soils of medium high plasticity. The excavation was performed with two TBMs from HERRENKNECHT factory that had already been used for the First Madrid Metro Extension Plan.

2.3. Railway tunnels completed by the General Directorate for Railways of the Spanish Ministry of Public Works

The General Directorate for Railways completed several tunnels during this period, which are described below:

- a) Atocha - Nuevos Ministerios - Chamartín Tunnel. This is a double track tunnel ($\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m and $\varnothing_{int} = 8.43$ m, $e = 320$ mm) of 7.0km long, reaching the two train stations of Madrid as well as several Metro stations of the same city, in order to make the rail city network more cohesive. For this project two TBMs were provided, a machine from NFM that had already been used for the First Madrid Metro Extension Plan and a new machine from HERRENKNECHT. Ground conditions are described above on the Madrid Metro extension paragraph and tunnelling works finished without noteworthy incidents.
- b) Connection Tunnel between Madrid Airport Terminals. This is a double track tunnel ($\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m and $\varnothing_{int} = 8.43$ m, $e = 320$ mm) of 2.8km long, excavating soils of similar characteristics than those for the Extension of Metro Lines 5 and 8, described above at section 2.1. Also, the TBMs used were the same as those used in that previous project.
- c) Access to Vigo city Tunnel. This is a 8.3km-long twin tunnel of $\varnothing_{exc} \approx 9.60$ m ($\varnothing_{int} = 8.50$ m, $e = 320$ mm), included in the larger project "Eje Atlántico", although it is designed in terms of high speed railway design criteria, as it will be the ending part of the AVE Line Madrid -Galicia in the future. Geology in this area consists in gneissic granite formations from the range Galicia-Portugal, igneous rocks of highly hardness and abrasiveness, often including significant geological features, as a great part of the alignment runs shallow under

mado "Eje Atlántico", si bien los criterios de diseño son los de la Red de AVE ya que en su día será parte del tramo final del Eje Noroeste de AVE Madrid - Galicia. Los terrenos son formaciones de granitos gneísicos del escudo galaico-portugués, rocas ígneas de alta dureza y abrasividad, pero con accidentes geológicos de importancia, al tratarse en una buena parte, de un trazado no profundo en zona urbana. La construcción se está haciendo con dos máquinas tipo "doble escudo", ya utilizadas en el Túnel de Guadarrama, y se espera que finalice en el próximo mes de Marzo de 2012.

- d) Otros túneles de doble vía. Esta Dirección ha construido también en el periodo un total de 10 km adicionales de túneles de doble vía para ferrocarril, en los que se ha empleado un escudo EPB HERRENKNECHT de $\varnothing_{exc} \approx 10.50$ y $\varnothing_{int} = 9.60$ m.

2.4. Túneles del Gobierno Autónomo de Cataluña

En 1997, el Gobierno Autónomo de Cataluña, por medio de la empresa pública GISA, inició los proyectos de las obras de las nuevas líneas subterráneas de ferrocarriles urbanos para la Ampliación del METRO DE BARCELONA, por una parte, y de los Ferrocarriles catalanes de Terrassa y Sabadell, ciudades periféricas de Barcelona, por otra.

- a) La nueva Línea 9 del "Metro". Es un proyecto que tiene como objetivo vertebrar los transportes ferroviarios subterráneos de la ciudad, enlazando la nueva línea con los existentes y las de cercanías, por medio de conexiones diversas en estaciones comunes o conectadas. De los 43.7 km de túnel del Proyecto (con 11 km ya en servicio) están pendientes de terminación unos 9 km del túnel principal de línea (4). El Proyecto se compone de los 4 tramos siguientes:

Tramo 1: De Aeropuerto a Parc Logistic. Túnel de la misma sección de doble vía que el Metro de Madrid, es decir, $\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m ($\varnothing_{int} = 8.60$ m). De 9.8 km de longitud, pasa bajo el río Llobregat hasta llegar al polígono industrial de Parc Logistic. Tramo 2a: De Parc Logistic a Pozo de bifurcación Sur, de la misma sección anterior y unos 4 km de longitud, es la continuación del anterior hasta la unión con el túnel principal de la Línea en el Pozo citado. Tramos 2b, 3 y 4: De una sección de $\varnothing_{exc} \approx 12.0$ m ($\varnothing_{int} = 10.90$ m) y una longitud total de 30 km, for-

urban areas. The excavation is now very advanced and it is expected to finish in March 2012.

- d) Other double track tunnels. An additional 10km of double track tunnel were built by the General Directorate for Railways using a $\varnothing_{exc} \approx 10.50$ / $\varnothing_{int} = 9.60$ m HERRENKNECHT EBB shield.

2.4. Tunnels by the Autonomous Government of Catalonia

In 1997 the new underground lines for both the extension of BARCELNA METRO network and the extension of the local railway network (Ferrocarrils Catalans) of Terrassa and Sabadell (cities settled in the boundary area of Barcelona capital) begun, sponsored by the Autonomous government of Catalonia, through the public sector company GISA.

- a) The new "Metro" Line 9. This Project is aimed to consistently structure all urban underground transports, connecting the new line with all the existing Metro lines and the suburban railway by means of several shared or connected stations. About 11km of the total of 43.7km of the project are already in service stage and 9km of the main tunnel of the Line are expected to finish soon (4). The Project is divided in the following 4 sections:

Section 1: Airport to Logistics Park. A tunnel with then same cross-section as Metro tunnels in Madrid, i.e., $\varnothing_{exc} \approx 9.40$ m ($\varnothing_{in} = 8.60$ m), of 9.8km long, runs under Llobregat river to the industrial area Logistics Park. Section 2a: a 4km long tunnel from Logistics Park to South junction Shaft with the same cross-section, is the continuation of the preceding tunnel to the junction with the main tunnel of the Line at the Shaft mentioned. Sections 2b, 3 and 4: with a total length of 30km and $\varnothing_{exc} \approx 12.0$ m ($\varnothing_{int} = 10.90$ m), these sections complete the main Line 9 Tunnel, finishing at two branch lines of a junction in the Northern area of the city, arriving to Badalona and St. Coloma de Gramanet towns. The two cross-section types are shown in Figures 4.

The excavated ground is very variable, ranging from sandy to silty deltaic deposit soils of the river Llobregat in sections 1 and 2, to Paleozoic rocks of the Catalan coast line (cornubianite, gneiss, granite, schist and shale), of very variable

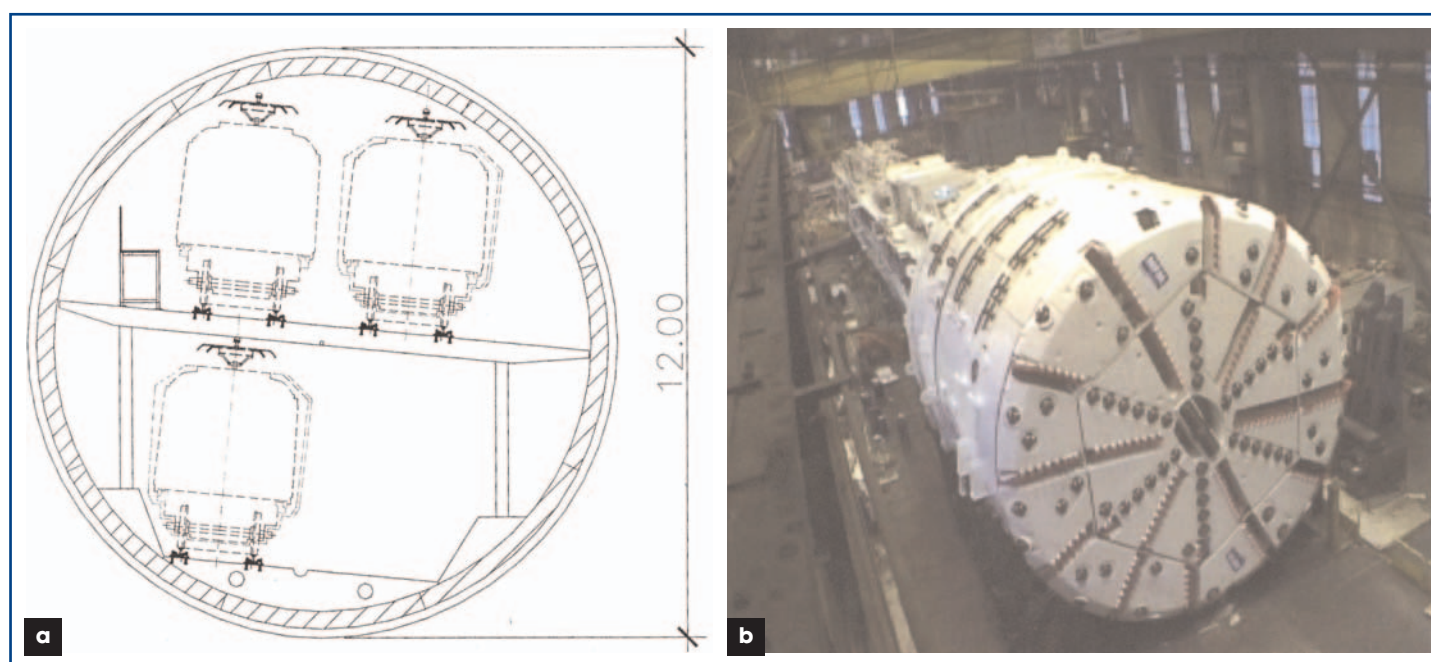


Fig. 4. a) Secciones en curva de la nueva LÍNEA 9 del "Metro" de Barcelona/Cross-section in curved alignment for the new LINE 9 of Barcelona "Metro". b) Escudo EPB Ø 12 m (LÍNEA 9 Metro de Barcelona)/ Ø 12 m EPB Shield (L-9. Metro Barcelona).

man el Túnel principal de la nueva Línea 9, terminando en dos ramales de una bifurcación al Norte de la ciudad, para llegar a las ciudades de Badalona y St. Coloma de Gramanet. Las secciones tipo se indican en la Figuras 4.

Los terrenos atravesados son muy variables: desde los suelos arenoso limosos del delta del Llobregat en los tramos 1 y 2 hasta las rocas del Paleozoico del litoral catalán (cornubianitas, gneis, granitos, esquistos y pizarras) de muy diversas características en los tramos restantes, todas ellas descritas ya en los túneles del AVE comentados antes.

Para construir el túnel principal se fabricaron en 2002 dos escudos EPB de 12 m de diámetro, uno HERRENKNECHT y otro NFM, que fueron, en la época, los escudos mayores de su tipo. A ellos se añadió en 2009 una tercera máquina HERRENKNECHT del mismo tipo, si bien con las innovaciones experimentadas desde entonces, así como dos nuevas Ruedas, una diseñada especialmente para suelos y otra para roca, destinadas a sustituir la primitiva de la máquina básica NFM. El funcionamiento de todas ellas hasta ahora fue satisfactorio.

- b) Los túneles de ampliación de los F.C. a Terrassa y Sabadell. GISA diseñó sendos proyectos bitubo de $\varnothing_{exc} \approx 6.84$ m ($\varnothing_{int} = 6.00$ m, $e = 300$ mm) con longitudes de 3,2 km por tubo en Terrasa y 3,0 km por tubo en Sabadell. Pese a que los terrenos son suelos cohesivos del Mioceno, con frecuentes ni-

behaviour in the remaining sections, already described above for the AVE tunnels.

For the construction of the main tunnel, two 12m. diameter EPB shields were provided in 2002, by HERRENKNECHT and NFM factories, being the largest diameter EPB machines at the time. A third EPB shield by HERRENKNECHT was added in 2009, including the newest innovations by then proved. Also two new cutting wheels were provided to replace the original NFM, one of which was specially designed for soil-type ground and the other was prepared for rock excavation. All of them have performed satisfactorily until today.

- b) F.C. extension tunnels to Terrassa and Sabadell. GISA designed each twin tunnel project with $\varnothing_{exc} \approx 6.84$ m ($\varnothing_{in} = 6.00$ m, $e = 300$ mm) and length of 3.2km per tube for Terrassa and 3.0km per tube for Sabadell. Even the cohesiveness of the Miocenic ground often with hard conglomerate layers over the crown, the condition of shallow tunnel with overburden slightly higher than 1.5 x diameter did make the choice for EPB shields, two twin shields for Terrassa provided by LOVAT factory (Canada) and one provided by HERRENCKNECHT for Sabadell.

Terrassa tunnels were completed in June 2010 and Sabadell's will be completed by October 2012. The performances of both types of machines have been satisfactorily until today.

veles superiores de conglomerados duros, al ser diseños superficiales con recubrimientos muy poco mayores de 1.5 diámetros, se eligieron para las dos obras escudos tipo EPB, de los fabricantes LOVAT (Canadá) con dos unidades para Terrasa y HERRENKNECHT, con un escudo para Sabadell. Los túneles de Terrasa se terminaron en Junio de 2010 y los de Sabadell se terminarán el próximo mes de Octubre de 2012. El comportamiento de ambos tipos de máquinas ha sido hasta ahora satisfactorio.

2.5. Túneles de la línea 1 del Metro de Sevilla

Para terminar, respecto de las Infraestructuras Ferroviarias, debe mencionarse el proyecto bitubo de 2.5 km por tubo, del túnel de la Línea 1 del "Metro de Sevilla", construido para pasar bajo el río Guadalquivir. Se utilizó un escudo EPB LOVAT de $\varnothing_{exc} \approx 6.04$ m ($\varnothing_{int} = 5.30$ m, $e = 250$ mm) que trabajó sin problemas en los terrenos granulares cohesivos de la ciudad, si bien, en el tramo bajo el río, el terreno era un aluvial no cohesivo que, en algunas partes llegaba a las capas superiores de las margas azules de Sevilla, lo que permitió un avance normal, usando espumas. La adición de espumas y polímeros reductores de agua permitió resolver la dificultad mayor de algunas zonas en las que dicho aluvial tenía una proporción muy baja de finos del orden de un 6% como máximo.

2.6. Los túneles de la "Calle 30" de MADRID (10)

El vial urbano periférico más importante de la ciudad de Madrid recibe la denominación de "Calle 30" y circunda la ciudad con un desarrollo total de unos 50 km. La modernización de los tramos Sur de dicho vial requirió la construcción de más de 10 km de túneles de 3 carriles por cada sentido de tráfico que, en su mayoría, pudieron diseñarse para construir por el sistema "cut and cover" al amparo de pantallas de hormigón armado.

No obstante, hubo de proyectarse en túnel bitubo de $\varnothing_{exc} \approx 15.10$ m ($\varnothing_{int} = 13.45$ m) un tramo de 3.5 km de longitud por tubo (cada uno para un sentido de tráfico), con una calzada superior de 3 carriles, proyectada como losa apoyada en sus extremos en el anillo del revestimiento, de "tipo universal", de hormigón armado prefabricado de 0.60 m de espesor, y

2.5. Tunnels for Sevilla city Metro Line 1

To finish talking about Spanish Rail Infrastructure, it has to be described here the twin tunnel project for Sevilla Metro Line 1 of 2.5km long per tube, designed to pass under Guadalquivir River. An EPB from LOVAT of $\varnothing_{exc} \approx 6.04$ m ($\varnothing_{in} = 5.30$ m, $e = 250$ mm) completed the tunnel without difficulties during the excavation in granular cohesive soils at the urban area. However, the excavation under the river section was driven through deposits of alluvial (granular) non-cohesive soils, in some parts cutting the upper layer of blue marl of Sevilla which allowed, with the addition of soil conditioning agents, acceptable advance rates. The addition of foam agents and polymer water reducers made possible come out with some difficult sections where the fines content was approximately 6% at most.

2.6. Tunnels for Madrid "Calle 30" Project (10)

The ring road of Madrid city called "Calle 30" encircles the town within a total length of 50km. To upgrade the sections of the south road the construction of 10km of tunnels for 3 lanes in each direction was required. Most of the tunnels could be excavated by means of "cut and cover" method, under the protection of reinforced concrete diaphragm walls.

However, a twin tunnel of $\varnothing_{exc} \approx 15.10$ m ($\varnothing_{in} = 13.45$ m) and 3.5km long per tube/traffic direction had to be designed. Each tunnel includes an upper roadway to contain 3 traffic lanes, designed as a slab supported at its ends on the ring lining (universal-type precast reinforced concrete segments of 0.60 thick) and a lower roadway of width enough for 2 vehicles, for emergency services (fire, ambulance, and others). A cross-section type is shown in Figure 5.

Two EPB shields were provided for the excavation of the two tubes (in separate contracts). One of the machines was conventionally designed by MITSUBISHI in Spanish factories. The other one was a HERRENKNECHT, developed in Germany and a unique cutting wheel concept specially for this Project, consisting of a 7m-diameter central cutting wheel and an outer cutting wheel, located on the same level, with a maximum excavation diameter of 15,20 m. Both cutting wheels can be rotated independently in anti-clockwise direction. See Figure 6.

una calzada inferior con anchura para 2 vehículos, destinada a los servicios de emergencia (bomberos, ambulancias y otros). La sección tipo se representa en la Figura 5.

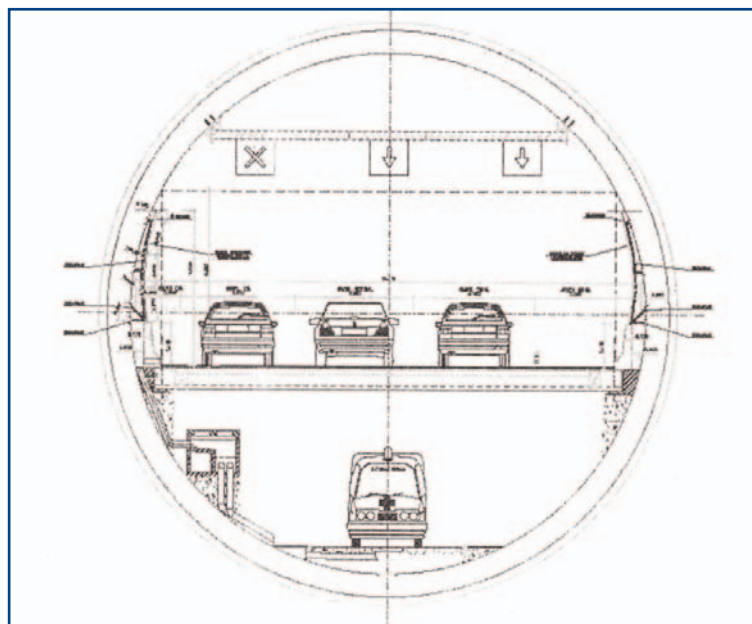
Para la construcción de los tubos, se fabricaron dos escudos (que trabajarían cada uno en un contrato diferente).

Una de las máquinas, de diseño convencional, la fabricó MITSUBISHI en talleres españoles. La otra tuneladora fue fabricada por HERRENKNECHT, en Alemania, con un diseño de Rueda de corte con un núcleo central, que giraba en sentido contrario al de la parte perimetral. (Fig. 6)

Ambas máquinas trabajaron con buenos rendimientos (máximos de unos 790 m/mes y medios del orden de los 550 m/mes, terminándose las obras en Noviembre 2006.

2.7. Conclusiones

En los 15 años transcurridos desde 1976 hasta la fecha, en que tuvo lugar en España un etapa de actividad sin precedentes en la construcción de túneles con tuneladoras, se han construido más de 400 km de túneles para infraestructuras del transporte con máquinas de última generación, hasta el punto de que las utilizadas en algunos proyectos (Metros de Madrid y de Barcelona; Túneles de AVE de Guadarrama, Abdalajis, Pajares, Sants-Sagrera, etc) marcaron nuevas



Both machines offered good output rates (up to 790 m/month and an average over 550 m/month), and finished tunnelling in November 2006.

Fig. 5. Sección tipo del túnel de la "Calle 30" de Madrid/Tunnel Cross-section for Madrid "Calle 30" Project.

2.7. Conclusions

Since 1976 and for the past 15 years Spain has been experiencing a period of unprecedented activity in TBMs tunnelling. More than 400 km were tunnelled for transport networks, using state of the art machines.



EPB MITSUBISHI



EPB HERRENKNECHT

Fig. 6. Máquinas Ø 15,20 m de los túneles de "Calle 30" Madrid/Ø 15,20 m TBMs for the twin tunnel of "calle 30" Madrid Project.

Cuadro nº 1. Proyecto, tamaño y tipo de las TBMs y kms de túnel construidos (1996-2011)
Table nº 1. Project, size and type of TBM, total length tunnelled in km (1996-2011)

Ø excavación/excavation	Ø < 7 m	7 m < Ø < 10 m				Ø: 10- 12 m	Ø > 12 m
Tipo de TBM/TBM-type	EPB	EPB	D.E./D.S.	S.E./S.S.	Grip	EPB	EPB
OBRAS FERROCARRIL/ RAILWAY PROJECTS:							
Metro Madrid	16,0 km	92,0 km	—	—	—	—	—
AVE Guadarrama	—	—	57,0 km	—	—	—	—
AVE Abdalajis	—	—	14,6 km	—	—	—	—
AVE Perthus	—	—	17,0 km	—	—	—	—
AVE Cabrera	—	—	15,0 km	—	—	—	—
AVE Sorbas	—	—	12,0 km	—	—	—	—
AVE Pajares	—	—	6,0 km	50,0 km	—	—	—
AVE Pajares V	—	—	—	12,0 km	—	—	—
AVE San Pedro	—	—	—	—	4,0 km	—	—
AVE Quejigares	—	6,8 km	—	—	—	—	—
Unión Est. Madrid	—	7,0 km	—	—	—	—	—
Aeropuerto Madrid	—	2,8 km	—	—	—	—	—
AVE acceso Vigo	—	—	16,6 km	—	—	—	—
Metro Barcelona	—	13,7 km	—	—	—	19,0 km	—
Terrasa + Sabadell	9,4 km	—	—	—	—	—	—
Metro Sevilla	5,0 km	—	—	—	—	—	—
AVE Montcada	—	—	—	—	—	3,0 km	—
AVE Sants-Sagrera	—	—	—	—	—	5,0 km	—
AVE Gerona	—	—	—	—	—	3,0 km	—
M. Gijón y otros	—	—	—	—	—	12,0 km	—
OBRAS CARRETERA/ ROAD PROJECTS:							
M-30 Madrid	—	—	—	—	—	—	7,0 km
SUMA: 405,9 km	30.4 km	122.3 km	138.2 km	62 km	4 km	42 km	7 km

Tipología de TBMs: D.E. "doble escudo" / S.E. "escudo simple" / Grip. "Roca dura con grippers" /
TBM-types: D.S. "double shield" / S.S. "single shield" / Grip. "Hard rock TBM with grippers"

orientaciones en su momento, sea por su tamaño o por diversas innovaciones presentadas en su diseño, o en la forma de operar, que han logrado pleno éxito.

La distribución de la longitud total de los túneles construidos, atendiendo al tipo de proyecto, dimensiones de la sección y tecnología aplicada a su construcción con TBMs, se resume en el Cuadro nº 1.

Por lo que se refiere a los tipos de tuneladoras empleadas, las 40 máquinas fabricadas (de las que 3 son adaptaciones de otras existentes) se resume en el Cuadro nº 2., agrupándolas por la tecnología que les corresponde (TBM de roca extradura; Escudo simple;

Some of them (Madrid and Barcelona Metro Lines and tunnels for high speed railway lines as Guadarrama, Abdalajis, Pajares, Sants-Sagrera, etc) became a guidance for later approaches in TBM designs, regarding diameter size, other technological innovations included in their design, or even the machine operation methods used, which performed successfully.

How the total length tunnelled is arranged in the different types of project, cross-section area and technology used, are shown in the following Table nº 1.

With regard to the type of machine used, the 40 machines made (3 of which are an adaptation of older

“Doble escudo” y Escudo de frente en presión de tierras o tipo EPB).

En el Cuadro se han indicado los Proyectos y diámetro para los que fueron diseñadas las máquinas, en los que, por tanto, éstas se emplearon por primera vez. A la vista de los datos de estos Cuadros se deduce lo siguiente:

- a) En general, la geología muy cambiante de los trazados, consecuencia de la importante longitud media de los túneles, unida al tiempo limitado de que se dispuso para los reconocimientos del terreno, recomendó utilizar máquinas del tipo “escudo”, aún en los casos en que no era necesario presurizar el frente.
- b) De acuerdo con lo anterior, 14 máquinas (un 35% del total) han sido escudos no presurizados, predominando el tipo de “doble escudo” (un 25% del total), por ofrecer la posibilidad de un mayor rendimiento, frente al tipo “simple escudo” (un 10% del total) que se reservó a los casos de recubrimiento importante y terrenos muy deformables (“squeezing ground”).
- c) En cuanto a las máquinas de frente en presión, la escasez de suelos no cohesivos de los trazados en materiales blandos, junto con la proporción significativa de terrenos de tipo mixto (suelos y rocas), con tramos de dureza media, e incluso alta, llevó a decidir que los 24 escudos presurizados (un 60% de las TBMs fabricadas) fuesen todos del tipo Escudo EPB.
- d) Como carácter general de los escudos EPB debe señalarse que las Ruedas de corte han sido siempre de tipo “plano”, es decir, relativamente cerradas, con un “ratio” del orden del 30% de aberturas que, sólo en un par de casos de suelos arcilloso-limosos, se acercaron al 40%.
- e) Por último, debe señalarse que en las ofertas de fabricación participaron empresas europeas, norteamericanas y japonesas, cuyos nombres figuran en el Cuadro. La participación mayor fue, sin duda, la de la empresa alemana HERRENKNECHT AG, de Schwanau-Allmannweier, con filiales en América y Asia, que ha fabricado 25 de las 40 máquinas empleadas (un 65.6% del total), cifra que supone 5 veces la del siguiente fabricante. Además de que ello es un claro índice de la capacidad de HERRENKNECHT, es de justicia señalar, aparte del estricto cumplimiento de los plazos

machines) are summarized in Table nº2 according to the technology on which are based (TBM for extremely hard rock; single shield; double shield and Earth Pressure Balanced shield or EPB).

The table shows the Projects and diameter size for which the machines were designed and used for the first time. From the data displayed on those tables, the following statements can be deduced:

- a) In general, the very variable geology of the alignments, which is a consequence of a substantial length of túnel together with the limited time available for ground exploration, required shield-type machines, even in those cases where support pressure at the tunnel face was not necessary.*
- b) According to the above mentioned, 14 machines (35% of total) had non-pressurized shields, with dominance of double shield types (25% of total), as this type offers the possibility of higher performances than the single shield type (10% of total) which was limited to the conditions of great overburden and squeezing ground.*
- c) As for pressurized face support machines, the lack of non cohesive soils in soft ground alignments, and the considerable proportion of mixed face conditions (soil and rock), with sections in medium to high hardness, the 24 pressurized shields (60% of the TBMs made) were made of EPB type. As for pressurized face support machines, the lack of non cohesive soils in soft ground alignments, and the considerable proportion of mixed face conditions (soil and rock), with sections in medium to high hardness, the 24 pressurized shields (60% of the TBMs made) were made of EPB type.*
- d) In general, for the EPB shields the cutting wheel was “flat-shaped” with an opening ratio of 30%. Only in two cases an opening ratio close to 40% was used due to the presence of clayey-silty soils.*
- e) Finally, it has to be pointed out that the different bids for the machines manufacturing came from European, North American and Japanese companies, which names are shown in the Table. The German company HERRENKNECHT AG, located in Schwanau-Allmannwier, with subsidiaries in America and Asia, has been by far the most highly involved, producing 25 of the 40 machines used (65,5% of the total). This means five times more than then next manufacturer on the list.*

Cuadro nº 2. Tuneladoras fabricadas y Proyecto base para su diseño
 Table nº 2. Tunnel boring machines made and base Project for their designs

TIPO TBM Y 1 ^{ER} PROYECTO TBM TYPE & 1 st PROJECT ↓	FABRICANTE MANUFACTURER → Ø _{ex} (m) / Ø _i (m)	LOVAT Inc	HERRENKNECHTAG (HIMS)	MITSUBISHI Ltd.	NFM Technologies	WIRTH Group	TOTAL por tipo per type
TOPO (Roca extradura)/ HARD ROCK TBM							
San Pedro	9.5 / 8.5	—	2*	—	—	—	
	SUMAS	—	2*				2
ESCUDO SIMPLE (Roca)/ SINGLE SHIELD (Rock)							
Pajares	9.5 / 8.5	—	1	1	2	—	
	SUMAS	—	1	1	2	—	4
DOBLE ESCUDO (Roca)/ DOUBLE SHIELD (Rock)							
AVE Guadarrama	9.6 / 8.5	—	2	—	—	2	
AVE Abdalajis	10.1 / 8.8	—	—	2	—	—	
AVE Perthus	9.9 / 8.5	—	2	—	—	—	
AVE Cabrera	9.7 / 8.5	—	1	—	—	—	
Galería Pajares	10.1 / 8.5	—	1	—	—	—	
	SUMAS	—	6	2	-	2	10
ESCUDO EPB (Terrenos mixtos)/ EPB SHIELD (Mixed ground)							
Metro Sevilla	6.04 / 5.3	1	—	—	—	—	
F.C. Terrasa	6.84 / 6.0	2	—	—	—	—	
F.C. Sabadell	6.84 / 6.0	—	1	—	—	—	
Metro de Madrid	7.3 / 6.7	1*	—	—	—	—	
Metro de Madrid	9.4 / 8.43	—	5	—	2	—	
Union Est. Madrid	9.4 / 8.43	—	1	—	—	—	
Metro de Madrid	10.6 / 9.6	—	1	—	—	—	
Metro de Gijón	10.6 / 9.6	—	1	—	—	—	
AVE Montcada	11.7 / 10.4	—	1	—	—	—	
AVE Sants-Sagrera	11.5 / 10.4	—	1	—	—	—	
AVE Atocha-Chamartin	11.5 / 10.4	—	1	—	—	—	
Metro Barcelona	12.06 / 10.9	—	2	—	1	—	
AVE Gerona	15.20 / 13.45	—	1	—	—	—	
M-30 Madrid		—	1	1	—	—	
	SUMAS	4 (1*)	16	1	3	—	24
TOTAL	UDS./UTS. (%)	4 (10%)	25 (62.5%)	4 (10%)	5 (12.5%)	2 (5%)	40 (100%)

*Máquina existente readaptada/ *Adaptation of a previous machine

ofrecidos, el alto nivel de los diseños y la asistencia técnica constante que este fabricante mantuvo con las obras para resolver cualquier tipo de dificultades que se presentaron en proyectos tan distintos y circunstancias tan variables, lo que podemos acreditar como supervisores de la práctica totalidad de los Proyectos mencionados.

As supervisors of the majority of the above mentioned projects, we can give proof that HERRENKNECHT is a highly skilled manufacturer, who met all the deadlines, offered very high level designs and provided constant technical assistance to solve any difficulties that may occur in such different projects and varied circumstances.

3. 1996-2011: Principales innovaciones en tuneladoras. Parámetros y tamaños de las mayores tuneladoras actuales

- a) Los valores nominales máximos de los parámetros de los mayores Escudos EPB actuales, Par de giro M y Esfuerzo F, son los siguientes:

$$M = \alpha \cdot D^3_{exc} \dots M(kNm)/D(m); \alpha_{act} \approx 20 \dots \alpha_{fut} \rightarrow 25-27$$

$$F = 100 \cdot K \cdot S_{exc} \quad F(kN)/S(m^2); K_{act} \approx 12 \dots K_{fut} \rightarrow 15-17$$

Para los hidroescudos puede tomarse el 80% de estos valores.

- b) Los tamaños máximos actuales (Diámetros de excavación) de los diversos tipos de tuneladoras figuran a continuación (3)(8), estando en fase de fabricación un Escudo EPB de $\varnothing = 17.60$ m para el Alaska Way Túnel, de Seattle (5).

Hidroescudos: $\varnothing = 15.45$ m (Shanghai) $\rightarrow$

En proyecto: $\varnothing = 19.20$ m (St. Petersburg)

Escudos EPB: $\varnothing = 15.20$ m (Madrid)

Doble escudo (roca): $\varnothing = 12.34$ m (Brisbane)

Topos (roca dura): $\varnothing = 12.40$ m (Jinping - China)

3.1. Diseños duales

- a) Diseños más frecuentes. En los últimos 10 años han reaparecido los diseños duales de los escudos, tanto el "Escudo EPB / Escudo abierto", como el "Hidroescudo" / "Escudo abierto". La diferencia con la etapa anterior está en la mejora de los reconocimientos, de forma que previamente se pueden elegir los tramos del túnel que se excavan de uno u otro modo. En definitiva, la tendencia actual puede resumirse así: la transformación necesaria en el caso primero es menos gravosa, ya que la cinta continua a lo largo del

3. 1996-2011: Technological innovations in tunnelling with TBM. Parameters and sizes of the largest current tunnel boring machines

- a) The maximum nominal values of the parameters of the largest current EPB shields are as follows:

$$M = \alpha \cdot D^3_{exc} \dots M(kNm)/D(m); \alpha_{act} \approx 20 \dots \alpha_{fut} \rightarrow 25-27$$

$$F = 100 \cdot K \cdot S_{exc} \quad F(kN)/S(m^2); K_{act} \approx 12 \dots K_{fut} \rightarrow 15-17$$

For Slurry-type Shields, 80 % of these figures may be considered.

- b) The maximum current sizes (excavation diameters) of each of the TBM types are listed below (3)(8), an EPB of $\varnothing = 17.60$ m is currently being manufactured for the Alaskan Way Tunnel, Seattle (5).

Slurry shield: $\varnothing = 15.45$ m (Shanghai) $\rightarrow$

Project : $\varnothing 19.60$ m (St. Petersburg)

EPB shield : $\varnothing = 15.20$ m (Madrid)

Double Open shield

TBM (rock): $\varnothing = 12.34$ m (Brisbane)

Single Open Shield TBM

(hard rock): $\varnothing = 12.40$ m (Jinping - China)

3.1. Dual tunnel boring machine designs

- a) Most common dual designs. Over the last 10 years, dual shield designs have reappeared as "EPB shield / Open shield" and "Slurry shield / Open shield". The difference from the previous period is that the section(s) of tunnel to be excavated in one way or another can be chosen in advance, thanks to the latest improvements in ground investigation. In short, current trends can be summed up this way: the transformation required in "EPB shield/Open shield" is less burdensome, since the same tunnel belt installation is used in both cases; on

túnel sirve de instalación común; por el contrario, en el caso segundo, hay una duplicación del sistema de transporte (circuito de lodos y cinta continua o trenes), pero cada vez se tiende más a considerar convencionales estos medios auxiliares y, por tanto, de existencia debida en cualquier empresa especializada. Otra razón a favor es que se puede utilizar la "configuración en abierto" para el reconocimiento y/o tratamiento del terreno desde el frente.

- b) Diseños menos frecuentes. En los casos de obligado trabajo con frente en presión a lo largo de todo el trazado del túnel, son las características de los terrenos las que plantean la posible conveniencia de un diseño dual "Hidroescudo" / "Escudo EPB". Un proyecto de referencia fue el del Túnel de la Autopista A-86 Paris, del Periférico oeste (zona de Versailles), de 10.5 km de longitud y 11.56 m de $\varnothing_{exc}$. con dos calzadas superpuestas para sendos sentidos de tráfico de vehículos ligeros. El diseño presentó la característica de que los cambios a realizar en la TBM se diseñaron para poderlos realizar en obra en un periodo de unas 3 semanas, lo cual, unido a que solo fue necesario hacer una transformación a lo largo de los 10.5 km de longitud, permitió asegurar un plazo mínimo de ejecución, con reducción del coste final, comparado con el de otras alternativas estudiadas. No obstante lo anterior, el interés de este diseño dual se ve hoy día limitado también por la posibilidad de ampliación del campo de utilización de los tipos básicos de escudos de frente en presión, que se comentan más adelante.

3.2. El sistema de transporte de escombros

Los incrementos del tamaño, y, por tanto, de la capacidad de producción de las tuneladoras, están íntimamente ligados al transporte de escombros que, aparte del caso de los Hidroescudos, sólo tiene 3 alternativas: Trenes de vagones, Dumpers o Cinta continua. Ahora bien, con la velocidad de avance usual hoy día en las tuneladoras, tanto si son de roca dura, como si se trata de escudos abiertos o de tipo EPB, las locomotoras actuales más potentes tienen su límite de aplicación en las tuneladoras de un diámetro de excavación del orden de 9.0 m. En todo caso, el empleo de trenes tiene los inconvenien-

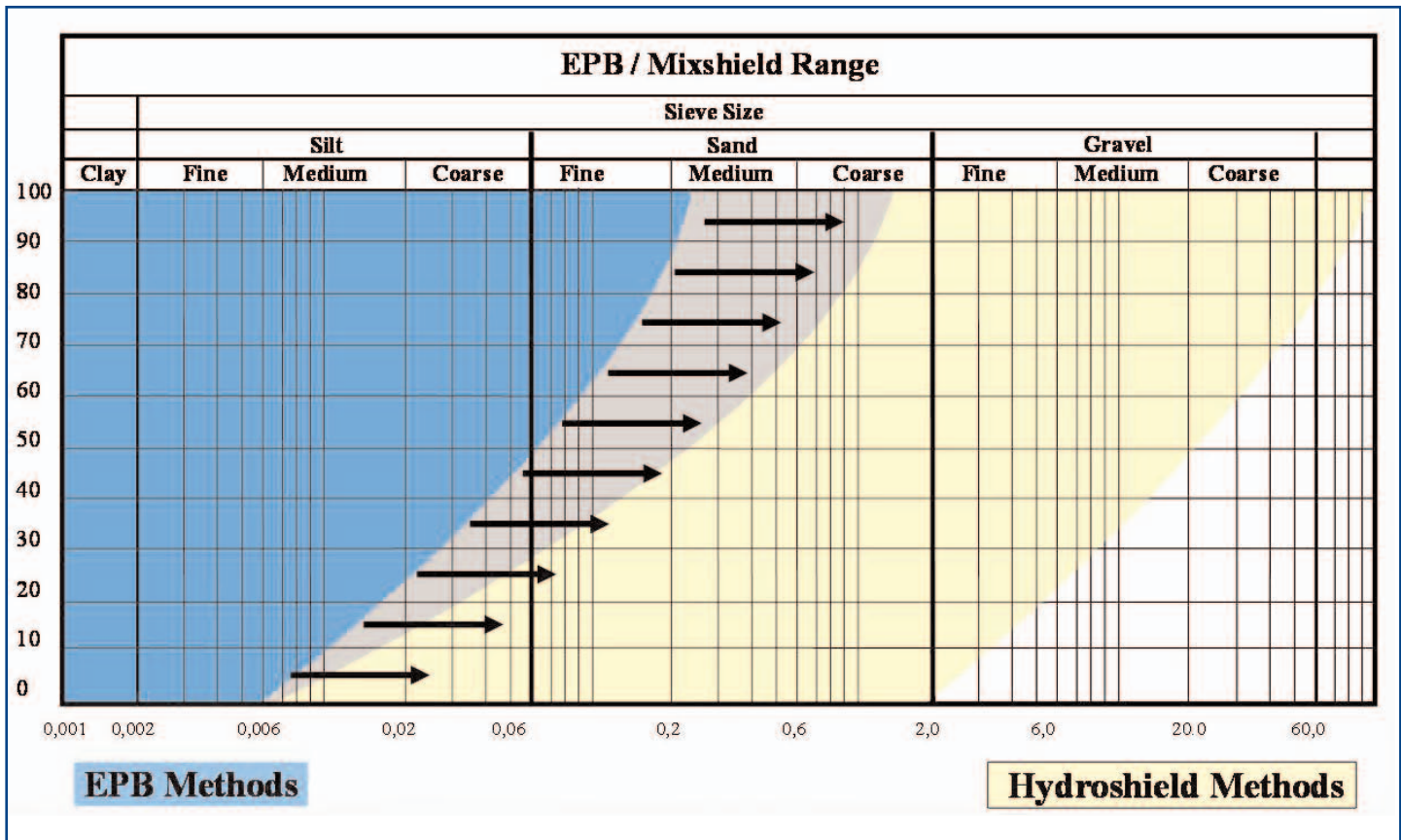
the other hand, in case of "Slurry shield / Open shield" two independent transport systems are required (mud pipe circuit and conveyor tunnel belt or railway truck). However, there is an increasing trend to consider these auxiliary installations as conventional and, therefore, of existence 'must have' in any specialized company. Another advantage of these systems is that the "Open mode" configuration can be used for ground pre-exploration or ground conditioning, if necessary, at tunnel front face.

- b) Less common dual designs. In those cases where it is mandatory to excavate in pressurized face mode throughout the tunnel alignment, choosing "Slurry shield" or "EPB shield" conveniently depends on ground characteristics. A project of reference in the use of this technology was the A-86 Paris Highway Tunnel west ring road (Versailles area), of 10.5km long and 11.56m excavation diameter, with two levels of roadway, one for each direction of light vehicle traffic. The most important feature of the TBM was that changing the operation mode could be carried out in only 3 weeks time, which, combined with the fact that it was only necessary to make only one transformation, made it possible to reduce time and economic costs compared with other alternatives studied. However, dual design advantages are limited due to the increasing application range of Earth Pressure Balance basic shields.*

3.2. Spoil transportation System

The increasing size and, therefore, production capacity of tunnel boring machines, are closely linked to the spoil extraction which, except the case of Slurry shields, has only 3 alternatives: railway truck, dumper truck or conveyor belt. However, considering the usual advance rates of current tunnel boring machines, whether they are hard rock or EPB TBMs, the application of today's most powerful locomotion systems is limited to a maximum excavation diameter of around 9.0m. Furthermore, the use of railway truck means time wasting due to ordinary manoeuvres or other incidents that generally occur (breakdowns, derailments, etc.) and when using a dumper truck, it is mandatory to consider, above all, tunnel ventilation.

Due to the reasons above mentioned, the most widespread current view in TBM industry is that a tunnel conveyor belt offers the greatest volume



tes de las pérdidas de tiempo derivadas de las maniobras ordinarias o de los incidentes que suelen ocurrir (averías, descarrilamientos, etc) y en cuanto a los dumpers sobre ruedas, es decisivo, sobre todo, la afección a la ventilación.

Por todo lo anterior, la opinión actual más generalizada es que la solución de cinta continua ofrece capacidades muy sobradas para el transporte de escombros en túneles de gran sección ($\varnothing_{exc} > 9\text{ m}$) aunque la TBM esté avanzando al ritmo máximo. Por otra parte, la ventilación del túnel se mejora notablemente, al reducir a un mínimo el número de locomotoras u otros vehículos de transporte con motores de explosión y la cinta continua no tiene pérdidas de tiempo por maniobras o averías y las paradas para su prolongación son cortas y pueden programarse. Por otra parte, la cinta es imprescindible para mantener los rendimientos en túneles largos (la banda construida con armadura de cable puede alcanzar longitudes de túnel de hasta 20 km) y, aún en longitudes de túnel de unos 2 a 3 km muchos especialistas consideran que la cinta es la solución óptima para TBMs de gran tamaño.

capacity for the mud transportation in great size tunnels ($\varnothing_{exc} > 9\text{ m}$) even during the maximum advance rate of the TBM. Tunnel ventilation is significantly improved, since the number of combustion engine vehicles in the tunnel is minimized. Conveyor belt transport has no major time wasting due to manoeuvres or breakdowns, and standstills for its extension are short and they can be easily scheduled. Moreover, a conveyor belt system is essential to keep acceptable tunnelling performances in case of long tunnels (belt with steel wire reinforcement can reach 20km long) and, even for 2 to 3km lengths, many experts consider this system as the optimal solution for great sized TBMs.

Fig.7. Campos de aplicación de los Escudos de Frente en presión, en función de la granulometría de los suelos. EPB / Mixshield range related to the soils granulometry.

3.3. Choosing earth pressure balance shield type

a) Ground grain size criteria. The graph summarizing these criteria should be considered as purely indicative (See Figure 7).

- In the event of a ground falling within one of the application fields indicated, it is necessary to

3.3. La elección del tipo de escudo de frente en presión

a) Criterios basados en la granulometría de los terrenos. El gráfico que resume estos criterios debe considerarse como simplemente orientativo. (Fig. 7)

- En el caso de que el terreno corresponda a uno de los "campos" de aplicación señalados, es necesario elegir los aditivos adecuados con ensayos previos sobre muestras del terreno en laboratorio. Dicho de otro modo, la elección y la tasa de aplicación de los aditivos para lograr un acondicionamiento óptimo del terreno deben determinarse por ensayos en laboratorio, porque esa decisión no depende sólo de la granulometría del terreno(13).
- Por ejemplo, en cuanto a la trabajabilidad de la mezcla, un determinado tipo de tratamiento puede mejorarse simplemente variando el FIR de un espumante y manteniendo estable el resto de valores de los otros aditivos.

b) Empleo de Escudos EPB en tramos de terrenos no cohesivos, que se presenten en el trazado. Puede lograrse un comportamiento aceptable con las dos medidas siguientes que hemos verificado en los estudios para los futuros TÚNELES BAJO EL GUADALQUIVIR de la SE-40, en Coria del Río (Sevilla): Incorporar finos a la cámara, además de los aditivos químicos, por bombeo de lodos arcillosos densos preparados con materiales arcillosos de préstamos en proporciones que pueden variar entre el 15% y el 30% del total del material en la cámara, o bien suspensiones en agua de otro tipo de materiales, como puede ser el polvo de carbonato cálcico, obtenido por molienda (actualmente en experimentación). Por otra parte, con arenas finas y limos arenosos, la adición de espumas y polímeros reductores de agua puede dar excelentes resultados.

c) Empleo de Hidroescudos en tramos de terrenos cohesivos. Se pueden excavar terrenos cohesivos con Hidroescudos con pérdidas importantes de bentonita, lo que podría asumirse cuando, por ejemplo, es posible hacer un vertido directamente al mar. Aparte de ello, las plantas de se-

choose the suitable additives and to take samples for laboratory testing. In other words, the choice and quantity of additives to ensure the optimal ground conditioning must be determined by laboratory tests, because this decision does not only depend on the grain size of ground (13).

- For instance, with regard to "workability" of the mixture, a particular conditioning formula can be improved by simply modifying the FIR (Foam Injection Ratio) of a surfactant agent and keeping all other additive values stable.

b) Use of EPB shields in sections where non-cohesive ground is encountered. Acceptable performances can be achieved with the following countermeasures, proved in surveys for the future SE-40 roadway tunnels in Coria del Río (Sevilla), running under Guadalquivir River: addition of fine-grained material and chemical additives, by means of the injection of dense clayey mud made of loaned clay materials, in proportions ranging from 15% to 30% of total material in excavation chamber; or a liquid solution made of other kind of materials like calcic carbonate powder from grinding (currently at experimental stage). On the other hand, for soils consisting of fine sands or sandy silts, addition of foam and polymer agents to reduce water should be successful.

c) Use of Slurry Shields (Hydroshields) in sections where cohesive ground is encountered. It is possible to excavate cohesive soils with Hydroshields only with substantial loss of bentonite, which could be admitted when, for instance, it is possible to make a direct discharge into the sea. Besides, modern separation plants have undergone marked improvement, so the spoil obtained from the separation of bentonite slurry does not require a long drying period and can be loaded and transported to landfill sites by conventional means. There are prototypes of separation plants with bentonite loss of less than 5%, but at the expense of increasing power to, as yet, unacceptable economic costs.

Difficulties when boulders and blocks are encountered. With some frequency, there are sections with large sized loose gravel, known as boulders (those units unable to pass through a square mesh with a clear span of 300 x 300), which can lead

paración modernas han tenido un notable perfeccionamiento, de manera que el escombros que se obtiene de la separación del lodo bentonítico no necesita una larga fase de desecación y puede ser cargado y transportado a vertedero con medios convencionales. Por otra parte, se han logrado prototipos de plantas que permiten separar un escombros arcilloso con pérdidas de bentonita inferiores al 5% pero a costa de incrementar la potencia de la planta a cifras, de momento, antieconómicas. Por todo ello, puede decirse que, en contra de lo que sucede con los escudos EPB en terrenos no cohesivos, y salvo circunstancias especiales, el uso de Hidroescudos en terrenos cohesivos no es, por ahora, económicamente viable.

- d) El problema de la presencia de bloques y bolos. Con alguna frecuencia, suelen presentarse tramos del trazado con bloques de roca o gravas sueltas de gran tamaño que conocemos como "bolos" (tamaños que no pueden pasar por una malla de 300 x 300 mm), que plantean uno de los problemas más graves para el avance de un escudo de frente en presión. Sobre ello puede decirse:

En los Escudos EPB de diámetro mayor de 13 m. el tamaño máximo que puede pasar por el tornillo es del orden de los 300 mm, pero en máquinas de menor tamaño puede ser imposible la extracción por tornillo a partir de cifras del orden de los 200 mm.

- e) Los diseños del tipo tornillo sin eje ("ribbon type screw") admiten tamaños un 20% superiores a los del diseño estándar. En todo caso, si no hay una proporción significativa (del orden del 25%) de materiales menores de dichos máximos, el tornillo no puede mantener la presión siendo imposible el trabajo del Escudo EPB.

En el caso de Hidroescudos, es necesario romper los bolos para reducirlos a un tamaño máximo bombeable, del orden de 4" de diámetro (unos 100 mm). Por ello, si se conoce la existencia de bolos, el hidro ha de montar una machacadora por delante de la admisión de la bomba principal.

Finalmente, en casos extremos hay que recurrir a consolidar previamente la masa a atravesar, pa-

to one of the most difficult problems for EPB driving. With regard to this matter, it can be said:

In EPB shields of diameter over 13m. the maximum size that can pass through the screw conveyor is around 300mm, but in smaller machines extraction by screw conveyor can be impossible from figures of around 200mm.

d) The problem of the presence of boulders. Frequently, there are sections of the route consisting of masses of loose gravel of a large size (do not pass through a 300 x 300 mm grid), known as "boulders", which can become one of the most serious problems for the advance of an EPB shield. With regard to the average size of the boulders:

In EPB shields with a diameter of over 13 m. the maximum size that can pass through the screw conveyor is around 300 mm, but in smaller machines extraction by screw can be impossible from figures of around 200 mm.

- e) Ribbon type screw designs admit 20% larger sizes than those of standard design. In any case, if there is not a significant proportion (around 25%) of materials smaller than these maximums, the screw cannot maintain the pressure making the work of the EPB shield impossible.*

In the case of an Hydroschild, it is necessary to break the boulders to reduce them to a maximum pumpable size of around 4" in diameter (about 100 mm). Then, it is necessary to install a crusher ahead of the main pump intake.

In extremely difficult cases a prior consolidation of the ground to be tunnelled has to be done, in order to immobilize the boulders to break them with the cutting wheel bits. The consolidation of the layers of boulders can either be done with a "forest" of piles in masse (or screen elements) or injections of mass or "jet grouting" treatments. In all cases, as can be imagined, this work represents a considerable increase in time and cost.

3.4. Current developemnts in TBM tools

In hard rock TBMs, although $\varnothing_{exc} \approx 17"$ cutres are the most commonly used, in some cases $\varnothing 19"$ disc cutters for extra hard rock have been once again installed.

With regard to bit wear control, the "hydraulic system" is the most used solution. It consists of simple measuring points installed in the metal structure of the

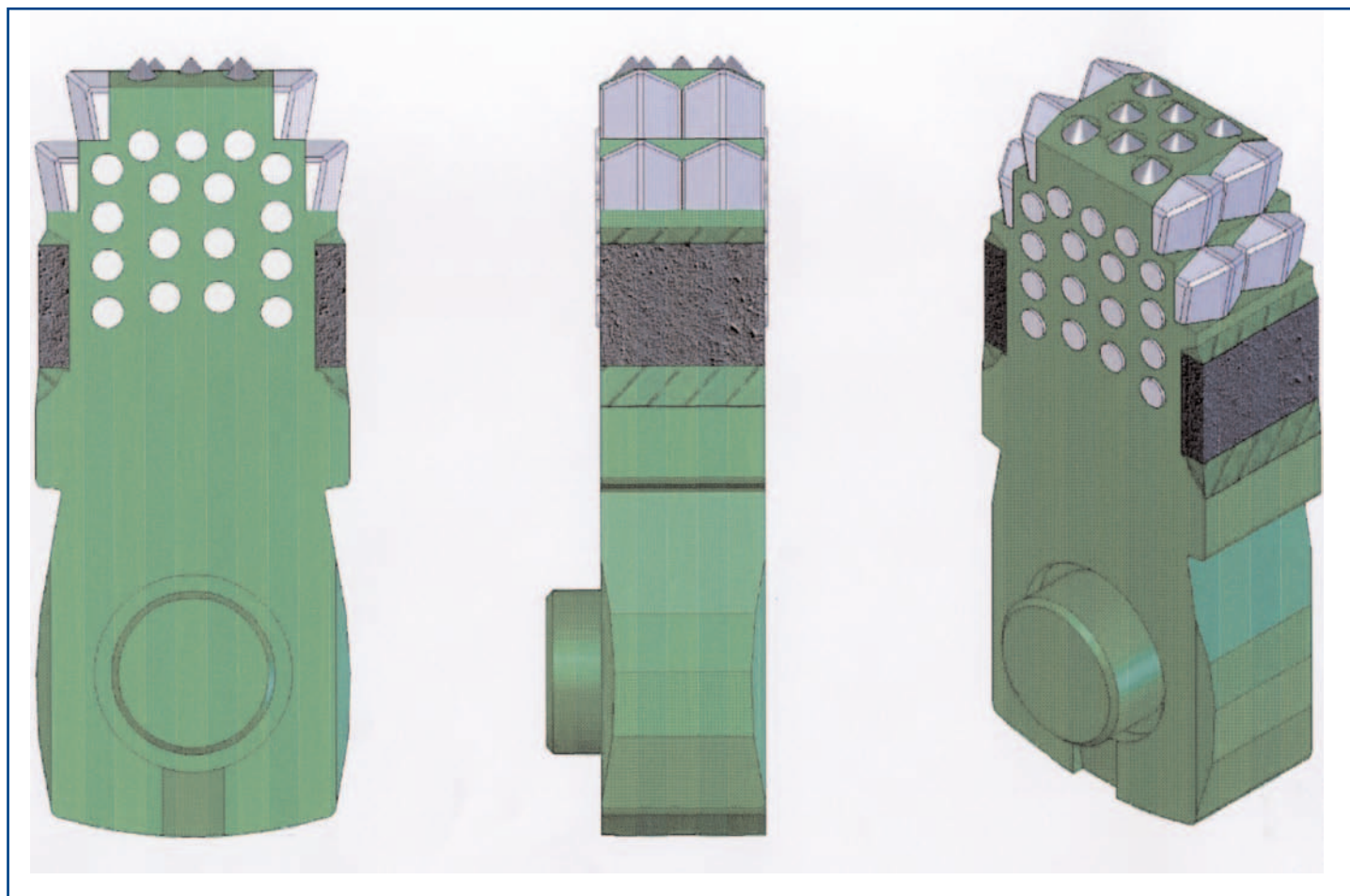


Fig. 8.
Herramientas
pesadas tipo
"ripper"/Heavy
"ripper" type
bits.

ra darle la cohesión que permita inmovilizar los bolos para romperlos con las herramientas de la Rueda de Corte. La consolidación puede hacerse, bien con un "bosque" de pilotes en masa (o elementos de pantallas) o con inyecciones de masa o tratamientos con "jet grouting", trabajos que representan siempre un incremento importante de plazo y de coste.

3.4. Novedades actuales en las herramientas de las tuneladoras

En las TBMs de roca dura, aunque lo más frecuente es usar cortadores de disco de $\varnothing_{exc} \approx 17"$ se han vuelto a montar cortadores de disco de $\varnothing 19"$ en algunos casos de rocas extraduras.

En cuanto a la detección de los desgastes, la solución más frecuente consiste en disponer puntos de detección instalados dentro de piezas de acero fijadas a la estructura de la rueda en posiciones simi-

cuting wheel, occupying the position of cutting tools at a distance from the edge of the structure equal to the maximum admissible wear. Thus, when the wear reaches the measuring point, the hydraulic circuit empties, with total loss of pressure, transmitting an alarm to the TBM operating screens. The latest tests with sensors installed on the edge of some cutters have shown some prototypes having good results. Their commercial application can be expected soon.

In soil and soft rock TBMs it is increasingly used the "Ripper" type bits for rocks of up to medium hardness. Usually interchangeable with the disc cutters which can be carried by the wheel. See figure 8.

Furthermore, designs of the simple bits with carbide blades types shown in Fig. 9 are now of widespread use.

Nowadays, it can be said that in all modern non-pressurized TBM's the bits can be changed from inside the chamber. As for most earth pressure balance shields, the change of bits, when the machine is working

lares a las de las herramientas y conectados a un "circuito hidráulico" a presión. La posición del punto de detección coincide con el desgaste máximo admisible, por lo que cuando se alcanza éste, el circuito hidráulico se vacía, con pérdida total de presión, transmitiéndose una alarma a las pantallas de operación de la TBM. Los ensayos actuales de sensores montados en el filo de algunos cortadores, están a nivel de prototipo con buenos resultados, por lo que es de esperar una pronta aplicación comercial.

En las TBMs de suelos y rocas blandas se usan con frecuencia creciente herramientas tipo "ripper" para rocas hasta de dureza media. Suelen ser intercambiables con los cortadores de disco que puede llevar la Rueda. Ver Figura 8.

Además son ya de uso generalizado los diseños de herramientas sencillas con filos de metal duro de los tipos de la Figura 9.

Por último, puede decirse que en todas las TBM modernas no presurizadas se pueden cambiar las herramientas desde el interior de la cámara a presión atmosférica, pero por lo que se refiere a la mayoría de los escudos de frente en presión el recambio de herramientas, cuando la máquina trabaja como tal, exige una intervención hiperbárica, que puede llegar a requerir de 4 a 5 turnos de trabajo. Ahora bien: desde hace unos 10 años, en Hidroescudos de gran diámetro se diseñaron brazos radiales huecos, que se pueden aislar del resto de la cámara, y acceder a ellos, a través de la junta giratoria, para sustituir herramientas trabajando a presión atmosférica.

Pues bien, actualmente hay aplicaciones similares japonesas que están en fase de diseño para dotar de esta posibilidad a los Escudos del tipo E.P.B. Su comportamiento real se conocerá en breve (Fig. 10). Por supuesto, en todo caso siempre se puede recurrir a la intervención hiperbárica, tanto para sustituir el resto de herramientas no accesibles desde el interior de los brazos, como para resolver situaciones de avería en el sistema operativo de reposición a presión atmosférica.

3.5. Equipos complementarios actuales de las TBMs

- a) Básculas de pesaje del material excavado. Montadas en la cinta primaria de la máquina son el complemento necesario para el control

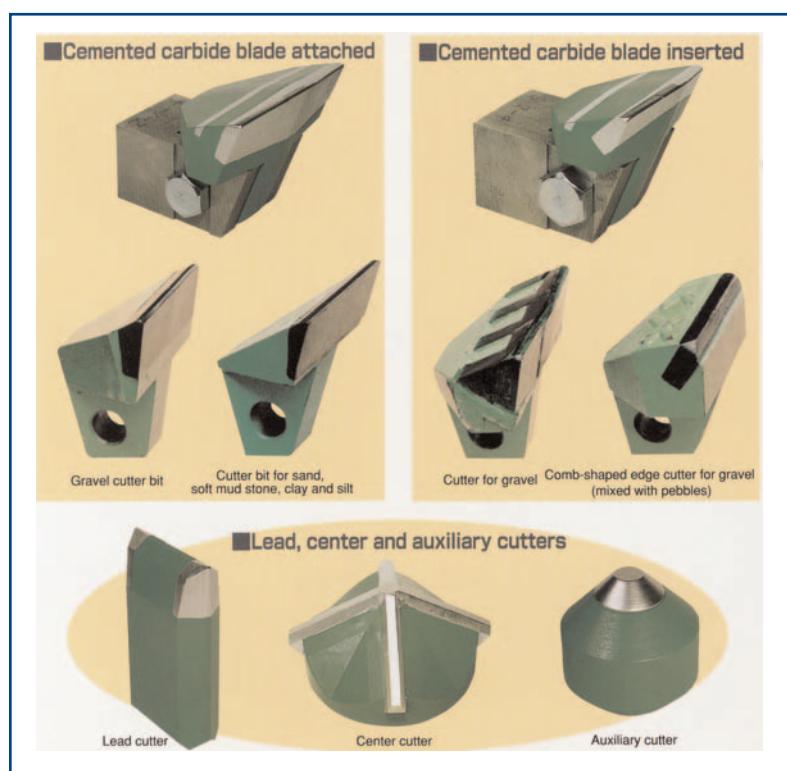


Fig. 9.
Herramientas tipo "scraper" con filos de metal duro/Scraper type bits with carbide blades.

as such, requires a hyperbaric intervention, which requires at least 4 or 5 work shifts. However, about 10 years ago, in large diameter hydroshields, hollow radial arms were designed, these being maintained at atmospheric pressure and isolated from the rest of the chamber, which can be accessed via the rotating joint to replace the bits attached to them, working at atmospheric pressure.

Currently there are similar Japanese applications in design phase to provide this possibility in E.P.B. type shields. Their actual behaviour will be known shortly (Figure 10). Of course, in all cases it is always possible to resort to hyperbaric intervention, either to replace the tools not accessible from the inside of the arms, or to resolve failures in the operating system for replacement at atmospheric pressure.

3.5. Current additional equipment for TBM's

- a) Scales weighing the material excavated. Mounted on the machine's primary belt is the necessary complement to the real control of the correct operation of a TBM. They are irrelevant, obviously, in the case of Hydroshields, but are considered essential to operate the EPB shields. To verify the proper calibration of the scales, it is usually

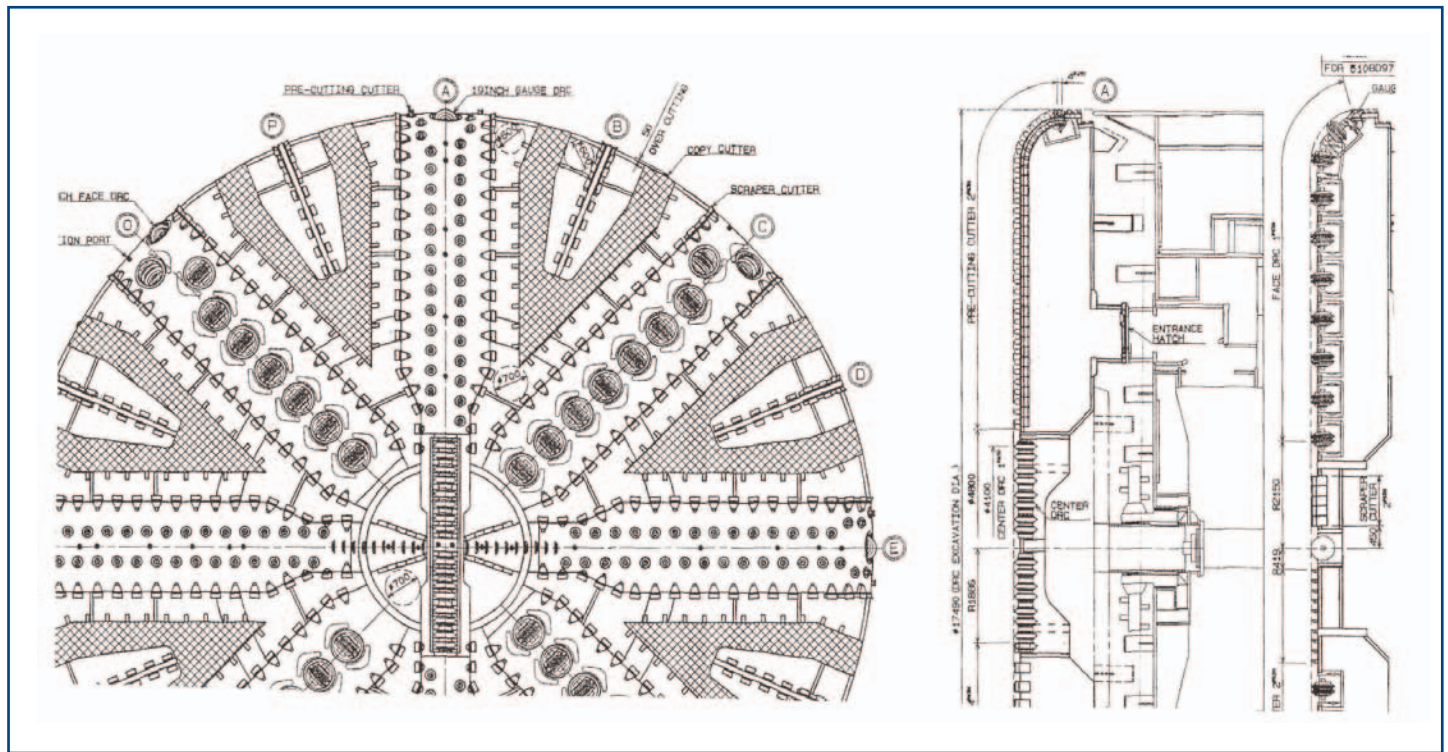


Fig. 10.
Esquema de un
escudo EPB
KAWASAKI/KAWASAKI
WASAKI EPB
Shield.
Cutterhead and cutter
change
schemes.

real de la operación correcta de una TBM. Son inaplicables, obviamente, al caso de los Hidro-escudos, pero se consideran imprescindibles para operar los escudos EPB. Para la comprobación del adecuado tarado de las básculas, suele exigirse una tolerancia máxima del 5% respecto del peso real.

- b) Reconocimiento del terreno por perforaciones desde la máquina. Desde hace algo más de 5 años, se vienen utilizando perforadoras a rotopercusión montadas en la máquina, para hacer taladros inclinados (10° a 12°) exteriores a la sección de excavación con el fin de detectar: presencia de agua; huecos ("karst"); cambios de terreno, etc. Se montan en una estructura independiente, lo que permite hacer reconocimientos sistemáticos (taladros de unos 30 m como máximo), o bien en el erector, para reconocimientos puntuales.

En TBMs no presurizadas, las perforadoras pueden usarse para construir, en la parte superior de la sección, paraguas de micropilotes o bulones autoperforantes horizontales por encima del revestimiento. En esos casos es posible inyectar lechada de cemento al tratarse de volúmenes pequeños.

required a maximum tolerance of 5% over the actual weight.

- b) Ground pre-exploration by drillings from the machine. For more than 5 years we have been using rotopercussion drills installed on the machine to make inclined drill holes (10° to 12°) outside the excavation section, in order to detect: the presence of water; hollows ("karst"); changes of ground, etc. The system is set on an independent structure, allowing systematic exploration to be carried out (drill holes of about 30 m. maximum), or it can be temporarily set on the erector for specific exploration.

In non-pressurized TBM's, the drills can be installed for drilling, at the top of the section, micropile umbrellas or horizontal self-drilling anchors above the lining. In these cases it is possible to inject grout because of the small volumes involved.

- c) Continuous ground exploration close to the front face by sound waves. This is based on the reception and analysis of the reflected waves, which show alterations due to the presence of obstacles or changes in the geology of the ground. In the case of hydroshields, this technique has been successfully applied, and major improvements of the system have been achieved over the last 3 years, making it

c) Exploración continúa del terreno próximo al avance por ondas acústicas. Se basa en la recepción y análisis de las ondas reflejas que muestran alteraciones debidas a la presencia de obstáculos o a la variación de la geología del terreno. Esta técnica se ha aplicado con éxito en Hidroescudos, presentando importantes mejoras recientes en los últimos 3 años, que han permitido reconocer el terreno hasta 30 a 40 m delante de la Rueda. Su aplicación a los Escudos EPB sólo es posible si no se emplean espumas. Las espumas impiden la transmisión de las ondas que necesariamente han de atravesar la cámara de tierras y el terreno que rellena las aberturas de la Rueda (6).

3.6. Novedades en componentes y equipos auxiliares de las TBMs

a) En los escudos EPB, deben señalarse:

- Equipos automáticos para relleno del "gap" terreno / escudo. El producto más utilizado es el lodo bentonítico con inyección automática a presión (en general, del orden de 0,2 a 0,3 Bar por encima de la presión de confinamiento de la cámara). Hay variantes del sistema para aplicar morteros inertes que, en general, son sensiblemente más caras.
- Equipos automáticos para mantenimiento de la presión de confinamiento en la cámara. Son equipos de inyección de lodos bentoníticos con capacidad para asegurar de inmediato el restablecimiento de la presión de confinamiento y se aplican tanto en el proceso de avance, como en las paradas programadas y en la preparación de las intervenciones hiperbáricas. El depósito principal de lodos debe tener una capacidad importante, del orden de 1/3 del volumen de la cámara.
- Otras novedades a señalar son: el desplazamiento axial de la rueda de corte, del orden de los 200 mm como mínimo, que facilita el recambio de herramientas; el sistema anti-rolling, por inclinación de los gatos de empuje, para contrarrestar la tendencia al giro del escudo sobre su eje; las Células de presión sustituibles en carga, desde la cara posterior del mamparo y el Control automático de la temperatura del escombros en la cámara, con sensores colocados en la pared del mamparo. Por último, los Detectores de me-

possible to examine the ground up to 30 to 40 m. ahead of the wheel. Its application to EPB shields is only possible if foams are not used. Foams prevent the transmission of the waves which must necessarily cross the earth chamber and the terrain that fills in the wheel openings (6).

3.6. Developments in some tbm components and auxiliary equipment

a) In EPB shields:

- Automatic equipment for the ground / shield gap filling: The most widely used product is bentonite slurry using automatic high pressure injection (generally around 0.2 to 0.3 Bar above the confining pressure of the chamber), based on previously established values. There are variants of the previous system for applying inert mortars, which are generally significantly more expensive.
- Automatic equipment for maintaining the confining pressure in the chamber. This is bentonite slurry injection equipment with the capacity to ensure the immediate restoration of confining pressure. It is applied both in the process of advance and in the scheduled stops and preparation of hyperbaric interventions. The main slurry tank should have a considerable capacity, of around 1/3 of the volume of the chamber.
- Other innovations are: positioned on the wall of the bulkhead. Metal detector on the primary belt (or conveyor belt). This is used to warn of the possible breakage of tools or heavy protection plates, by transmitting an alarm which can be picked up on the operator screens.

b) In Hydrosields, confining pressure, both in the chamber and in the shield / ground gap, pressure is controlled and maintained by the bentonite slurry pumping system with submerged screen air bubble, which is the modern basis of this technology. The remaining control equipment (pressure cells, mix temperature) may be similar to that of E.P.B. shields.

3.7. Current situation and new trends in precast linings for shields (9)

a) Segment linings reinforced with fibre only. The project of the CTRL, the high speed line linking the

tales en la cinta primaria (o cinta continua), para avisar de la posible rotura de herramientas o placas de protección pesadas, transmitiendo una alarma a las pantallas del operador.

- b) En los Hidroescudos, la presión de confinamiento, tanto en la cámara como en el "gap" escudo / terreno, se controla y mantiene por el sistema de bombeo de lodo bentonítico con burbuja de aire en tabique sumergido, que es la base moderna de esta tecnología. Los restantes equipos de control (células de presión, temperatura de la mezcla) pueden ser análogos a los de los Escudos E.P.B.

3.7. Situación actual y nuevas tendencias en los revestimientos prefabricados de los escudos (9)

- a) Anillos armados sólo con fibras. El proyecto del CTRL, la línea de A.V. que une el Túnel del Canal de la Mancha con Londres, fue la primera obra importante en que se aplicó esta variante. Las principales circunstancias y características que concurren en el proyecto fueron estas: los estudios se basaron en ensayos a escala real de la resistencia de las dovelas a las cargas esperables y al fuego, es decir, no hubo cálculos estructurales propiamente dichos; en general, los terrenos (suelos cohesivos y rocas blandas arcillosas) presentaban condiciones favorables al trabajo del anillo a compresión; de todas formas, el número de dovelas fue mayor que el habitual en anillos armados con acero redondo; en la dovela se tendió más a la "forma de losa" que a "la de arco" y el acopio se hizo en posición vertical para simplificar la manipulación y lograr una resistencia uniforme (15).

Por otra parte, y si bien se añadieron fibras de polipropileno no estructurales para aumentar la resistencia al fuego, en muchos casos se considera que bastan las fibras de acero para resolver este problema.

- b) Aumento de resistencia en anillos con armadura convencional. En la mayoría de los proyectos actuales, la resistencia a las cargas del terreno se confía a una armadura convencional de acero de alta resistencia, pero se añaden fibras de acero (dosis de 15 a 25 kg/m³) para aumentar la resistencia a tracción en bordes y esquinas, además de la resistencia al fuego (7).

Channel Tunnel with London, was the first important work in which this variant was applied. The main circumstances and characteristics of the project were the following: studies were based on full-scale trials of the resistance of the segments to expected loads and to fire, i.e. there were no structural calculations as such. In general, the ground conditions (cohesive soils and soft clay rocks) were favourable for the work of the compression segment lining. At all events, the number of segments was higher than is usual with segment linings reinforced with round steel: in the segment, the tendency was more towards the "slab form" than the "arch form". Collection was done in a vertical position to simplify handling and achieve uniform strength (15). Although non-structural polypropylene fibres were added to increase fire resistance, in many cases steel fibres are considered to be enough to solve this problem.

- b) *Increased strength in segment linings with conventional steel reinforcement. In most current projects, resistance to the pressure of the terrain is entrusted to conventional armour, but steel fibres are added (at a proportion of 15 to 25 kg/m³) in order to increase the tensile strength at edges and corners, in addition to fire resistance (7).*

On the other hand, high strength concrete ($R_c = 100$ to 110 Mpa) is being used to increase the strength of the segment linings without changing their geometry, and enable them to be used in the sections of the route with high ground thrusts, in order to guarantee the long-term stability of the Project. This solution is now being applied to SORBAS twin tunnel Project (new L.A.V. Murcia - Almería) in a section where anhydrite has been found. In the Spanish case, the Reinforced Concrete Standards oblige to use a minimum amount of reinforcement steel depending on the concrete strength, which has been solved by maintaining the geometry and simply increasing their diameters.

- c) *Bicomponent mortar for filling the extrados of the segment linings. The usual product for filling the extrados of the segment linings is compound cement mortar (portland with bentonite or fly ash or simply lime powder) with $R_c = 1.2$ MPa at 24 hours and start of setting from 5 to 9 hours, and end of*

Por otra parte, se están utilizando hormigones de alta resistencia ($R_c = 100$ a 110 Mpa) para aumentar la de los anillos sin variar su geometría, y poder ser utilizados en los tramos del trazado de empujes elevados del terreno, con el fin de garantizar la estabilidad de la obra a largo plazo. Una solución de este tipo se está aplicando a los túneles gemelos de SORBAS (nueva L.A.V. Murcia-Almería) en un tramo con presencia de anhidritas: En el caso de España, la Instrucción de Concreto armado obliga a una cuantía mínima en función de la resistencia del hormigón, lo que hemos resuelto manteniendo también la geometría de la armadura e incrementado simplemente sus diámetros.

- c) Mortero bicomponente para el relleno del trasdós de los anillos. El producto usual para el relleno del trasdós de los anillos es el mortero de cementos compuestos (portland con bentonita o con cenizas volantes o, simplemente, con polvo calizo) que tenga una $R_c = 1.2$ MPa a las 24 horas y un inicio de fraguado entre 5 y 9 horas, con final a las 3 ó 4 horas adicionales. No obstante en los últimos 3 años, se ha venido utilizando un mortero bicomponente formado por lechada de cemento portland y silicato. En general es necesaria una amplia experiencia para evitar incidentes por atascos en las TBM en que se hace la inyección de mortero por cola, aunque si el mortero se bombea a través de los orificios de las dovelas, el proceso se domina con más facilidad (11).
- d) Anillos armados flexibles. Por último, se han ensayado con éxito prototipos de anillos flexibles o de diámetro ajustable (Fig. 11) para su aplicación a casos de esfuerzos extraordinarios del terreno, como sucede a veces en tramos de roca muy alterada de túneles con recubrimientos importantes en los que puede quedar atrapado el escudo. Tal aplicación se podría combinar con el empleo de hormigones de alta resistencia (12).

Del fundamento de estos nuevos diseños, y de la experiencia de su aplicación, puede decirse lo siguiente: De la misma forma que en los métodos convencionales de excavación es posible ajustar los valores de los sostenimientos flexibles a la calidad real de la formación, los elementos flexibles (compresibles) de estos anillos de revestimiento, al comprimirse, crean nuevos caminos a la deformación de la roca, reduciendo su estado tensional y, en conse-

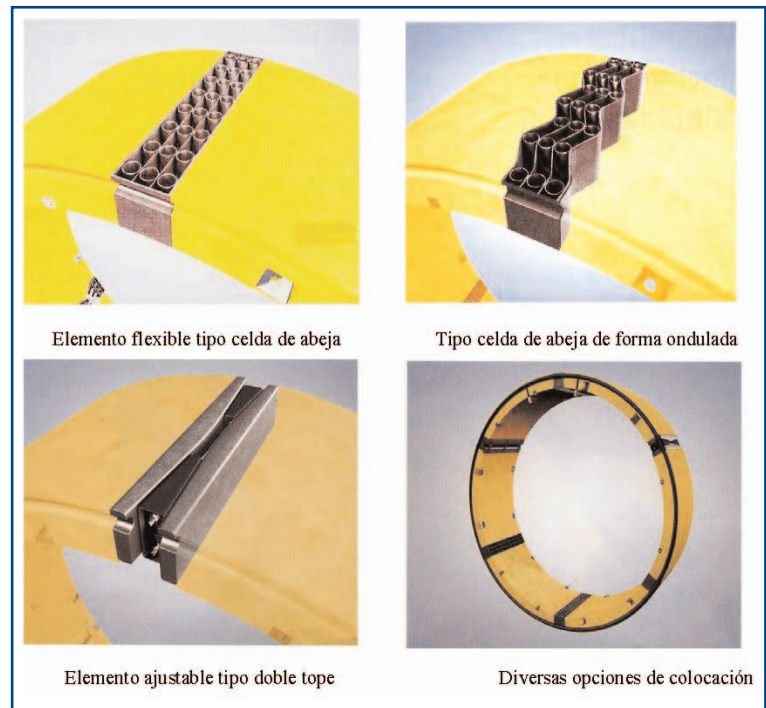


Fig. 11. Anillos flexibles o de diámetro ajustable/Flexible or adjustable diameter segment linings.

setting 3 or 4 hours later. However, over the last 3 years, a bicomponent mortar composed of portland cement slurry and silicate has been used. In general, wide experience is required to avoid incidents from blockages in the TBM's in which rear injection of mortar takes place. On the other hand, if the mortar is pumped through the holes in the segments, the process is carried out more easily (11).

- d) Flexible reinforced segment linings. Finally, prototypes of flexible or adjustable diameter segment linings have been successfully tested (Figure 11) for application in cases of extraordinary ground forces, as sometimes occurs in sections of highly altered rock in tunnels with major linings in which the shield might become trapped. This application could be combined with the use of high strength concretes (12).

The following can be said about the basis of these new designs and about the experience of their application: As in the conventional methods of excavation, it is possible to adjust the values of the flexible holders to the actual quality of the formation, the flexible (compressible) elements of these segment linings, when compressed, create new paths for the deformation of the rock, reducing its

cuencia, la presión sobre el revestimiento hasta llegar a un equilibrio de tensiones y fuerzas.

La puesta a punto de los diseños y los ensayos a escala real de su capacidad portante se llevaron a cabo en la Universidad Politécnica de Bochum (Alemania) y, por otra parte, el segundo tubo proyectado para el túnel de Tauern pudo ser excavado con escudo en zonas de falla de pésima calidad, gracias al empleo de anillos ajustables.

4. Agradecimientos

Han colaborado en este trabajo los técnicos de SPICC a quienes el autor agradece su dedicación, lo mismo que a la prestada por los fabricantes mencionados y por los técnicos de las empresas españolas ACCIONA, DRAGADOS, FCC CONSTRUCCIÓN, FERROVIAL-AGROMAN, OHL y SACYR. ♦

state of stress and, consequently, the pressure on the lining until a balance of stresses and forces is reached.

The development of the designs and full-scale tests of their carrying capacity took place at the Polytechnic University of Bochum (Germany), and the second tube designed for the Tauern tunnel could be excavated by shield in fault areas of very poor quality thanks to the use of adjustable segment linings.

4. Acknowledgements

They have collaborated in this work Spicc technical staff, to whom the author acknowledges his dedication, as well as the cooperation provided by respective manufacturers and technicians of the Spanish companies Acciona, Dragados, FCC CONSTRUCTION AGROMAN Ferrovial, OHL and SACYR. ♦

Referencias/References:

- (1) ADIF (Varios autores). (2005). "Túnel de Guadarrama". Editor: Entorno Gráfico (www.entornografico.com). (Hay una versión inglesa del mismo editor titulada GUADARRAMA BASE TUNNEL.
- (2) ADIF (Varios autores) (2009). TÚNELES DE PAJARES. Editor: Gráficas Arias Montano (www.ariasmontano.com).
- (3) BÄPPLER, K. (2010). Mechanised tunnelling for new highly efficiently infrastructure for traffic + supply systems. Tunnel 1.
- (4) DELLA VALLE, N. (2003). The new line 9 of Barcelona Metro. Proceedings of the RETC. New Orleans.
- (5) FERNANDEZ, E. et al. (2011). Technical approach on bid preparation to succeed on the

- Alaskan way project. Proceedings of the RETC. San Francisco.
- (6) GEHRIG, M. et al. (2010). Advance exploration accompanying the drive: mixshield with vision. Tunnel 3.
- (7) HANSELL, D. Y GUIRGUIS, Ph. (2011). Steel-fibre-reinforced segmental linings: state of the art and completed projects. Tunnel 1.
- (8) HERRENKNECHT, M. Y BÄPPLER, K. (2011). Large-diameter TBM technology. Proceedings of the RETC. San Francisco.
- (9) IRELAND, T. Y ASCHE, H. (2011). Developments in segmental lining design. Proceedings of the RETC. San Francisco.
- (10) MELIS, M. et al. (2006). The Madrid renewal inner ring Calle 30 with the largest EPB machines. International Symposium on underground excavation and tunnelling (ISUET) Bang Kok

- (11) PELLEGRINI, L. ET AL. PERRUZZA, P. (2009). Sao Paulo metro project-control of settlements in variable soil conditions through epb pressure and bicomponent backfill grout. Proceedings of the RETC. Las Vegas.
- (12) PODJADTKE, R. Y WEIDIG, G. (2010). Adjustable flexible segment lining. Tunnel 7.
- (13) THEWES, M. et al. (2010). Laboratory tests with various conditioned soils for tunnelling with earth pressure balance shield machines. Tunnel 6.
- (14) TRABADA, J. et al. (2007). La ejecución de túneles con tuneladora en el plan de ampliación del Metro de Madrid. Congreso AETOS. Madrid.
- (15) Several author (2003) Channel tunnel rail link (section 2. tunnelling). Tunnels & Tunnelling International. Supplement.