

La construcción de túneles en terrenos mixtos con tuneladoras de gran diámetro. Experiencias recientes de algunas obras

Boring of tunnels in mixed face conditions with large diameter TBMs.
Recent experiences

Felipe Mendaña Saavedra. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
AETOS. Consultor (S.P.I.C.C., S.L.). fms@spicc.e.telefonica.net

Resumen: El autor se refiere a la evolución del tamaño de las tuneladoras de última generación, a través de obras que marcaron hitos en la aparición de las tuneladoras de gran sección. Se comenta la evolución de los diseños de las distintas tipologías de máquina: rocas duras y abrasivas (topos; escudos simples y dobles escudos); escudos E.P.B. en frentes mixtos de rocas blandas e "hidroescudos" en frentes mixtos de rocas blandas y suelos saturados. Se comentan los resultados satisfactorios para responder a las nuevas demandas, pero también los aspectos que todavía están pendientes de una solución adecuada.

Palabras Clave: TBM abierta; Modo doble escudo; Modo escudo simple; Diseño dual (E.P.B.); Calle 30 Madrid; % de aberturas de entrada; Detector de desgastes

Abstract: The author describes the ongoing development in the size of the latest tunnel boring machines by referring to those civil works that have served as landmarks in the appearance of large diameter TBMs. Reference is made to the developments in the design of different types of machine: hard and abrasive rock (single and double shield TBMs); EPB shield in mixed faces of soft rock and Hydro-Shield in mixed faces of soft rock and saturated ground. The author comments on the satisfactory response to new demand, but also refers to those aspects that still require a suitable solution.

Keywords: Open TBM; Double shield open mode; Single shield close mode; Dual system EPB shields; Percentage wheel openings; Wearing detector

1. Introducción

La incorporación de diseños de túneles de diámetros superiores a los 10 metros en los Planes Directores de los modernos Proyectos de Infraestructuras es una tendencia claramente mantenida en los últimos 7 años.

Los objetivos de esta tendencia pueden ser muy variados: integrar mas de un sistema de tráfico en el proyecto de un túnel carretero (como son los casos de los túneles de la Calle-30 de Madrid, o del Tunel bajo el Yangtze en Shanghai), o bien, integrar el diseño

de un túnel carretero y un gran colector de tormentas (como es el caso de Kuala Lumpur), u otros similares.

Por otra parte, son indudables las ventajas de la técnica de la excavación mecánica de túneles, que aporta seguridad, tanto en lo relativo a las subsidencias que pueden producirse, de importancia esencial en zonas pobladas, como a la prevención de riesgos de los operarios que construyen el túnel o de los habitantes del área afectada por las obras, a la vez que ofrece ventajas indudables de los plazos de ejecución y una razonable certeza del coste esperable, siempre que se elija la máquina adecuada.

Pues bien, ante el futuro incremento de este tipo de proyectos, el problema no está, como veremos, en el diseño de tuneladoras de gran diámetro para operar con seguridad en suelos o en rocas duras, excavando, incluso, en terrenos mixtos; la dificultad sigue siendo el insuficiente conocimiento previo de las características geológico - geotécnicas de los terrenos del trazado del nuevo túnel.

Nunca podremos alcanzar un exacto conocimiento previo del terreno, cuyo grado de incertidumbre es inherente a las obras subterráneas que, en algunos casos extremos, presentan condiciones realmente imprevisibles. Pero ello no significa que, en muchos otros casos, las obras se convierten en sonados fracasos por causas bien conocidas: la insuficiente dotación de plazos y de recursos económicos para los estudios previos del proyecto, sea debida a objetivos de plazo muy ajustados por razones puramente políticas, o, simplemente, limitaciones marcadamente económicas.

Por ello, y salvo casos realmente excepcionales, se suele achacar piadosamente dichos fracasos a condiciones inesperables del terreno, cuando lo que sucede es que la selección del método, o del tipo de máquina, se ha hecho sin un conocimiento razonable del comportamiento esperable del terreno ante la construcción.

En esta comunicación comentaremos algunos casos de construcción de túneles en diversos tipos de terreno con máquinas de gran diámetro, a partir de referencias objetivas, tanto propias como recogidas de otros. La casuística no cubre todavía, como sería deseable, un gran número de casos, pero es indudable que las exposiciones objetivas de estas primeras experiencias aportan una base previa para futuros desarrollos, tanto porque ofrecen algunas pautas a seguir, como porque previenen de posibles errores en los que no se debe reincidir.

2. Tuneladoras para rocas duras y abrasivas

Cuando el trazado discurre a través de rocas duras y abrasivas, el problema del trabajo en frentes mixtos se presenta al pasar tramos afectados por accidentes geológicos o por contactos con otras formaciones de rocas más blandas, con frentes inestables

en general, en los que aparecen bloques de roca dura, junto con materiales blandos, fruto de la alteración geológica sufrida, y agua.

Nuestra experiencia directa en este tipo de terrenos se refiere principalmente a túneles de diámetros entre 9,50 y 12 metros. En concreto, se trata de los siguientes:

- Proyecto bitubo de los **Túneles de Guadarrama (29,5 km de longitud y \varnothing_{exc} 9,50 m)** en granitos y gneises en la práctica totalidad del trazado. Recubrimiento máximo de unos **900 m**.
- Proyecto bitubo de los **Túneles de Perthus (8,5 km de longitud total y \varnothing_{exc} 9,96 m)** con más de 4 km en granodioritas y granitos. Recubrimiento máximo de **400 m**.
- Proyecto bitubo de los **Túneles de Pajares (26 km de longitud total y \varnothing_{exc} 10,10 m)**, con más de 5 Km en pizarras, areniscas y cuarcitas. Recubrimiento máximo de **950 m**.
- Proyecto de la **Línea 9 del Metro de Barcelona (40 Km de longitud total y \varnothing_{exc} 12,05 m)** con tramos en granitos y con longitudes máximas entre estaciones del orden de 1 km.

En los dos primeros Proyectos se utilizaron **TBM para roca dura del tipo “doble escudo”** (4 máquinas en Guadarrama y 2 en Perthus).

En Pajares, se utilizaron **4 escudos no presurizados (o escudos abiertos) con cabeza para roca** en los túneles de línea (4 máquinas, una en cada tubo de unos 11 Km cada uno, en que se dividieron los lotes de construcción 1, 3 y 4) y un **“doble escudo”** (para hacer la galería descendente de acceso y los tubos más cortos del lote 2, con una longitud total similar).

Finalmente, en el caso de Barcelona se adoptaron **escudos de frente en presión de tierras (o escudos ‘EPB’) con cabezas de tipo mixto**.

2.1. Las TBMs para roca “Tipo doble escudo”

De la experiencia en las obras citadas hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- **Las TBMs tipo “doble escudo”, con rueda de corte para roca dura y abrasiva, permiten lograr, en terreno de calidad geotécnica media y alta** (Clases

I, II y III) rendimientos netos del avance similares a las TBMs abiertas, o “topos”.

En efecto, aunque con $RMR > 60$ puede hablarse de que la relación de avances netos mantenidos “doble escudo / TBM abierta” es del orden de un 0,8 (800 m/mes contra 1000 m/mes), en cuanto entramos en rangos menores de calidad del terreno ($45 < RMR < 60$) la relación puede incluso invertirse, porque en las TBMs abiertas son necesarios sostenimientos, al menos de bulonado y malla de acero para protección del personal.

En el caso de los “topos”, el revestimiento del túnel ha de hacerse, en todo caso, en una fase posterior y, por eso, si se considera el **rendimiento global medio** de la construcción del túnel en terrenos de la calidad geotécnica citada (Clases I, II y III) las máquinas del tipo “doble escudo” pueden ofrecer mejores resultados.

Por otra parte, las TBMs de roca tipo “doble escudo” permiten trabajar en terrenos de calidad medio/baja y baja, lo que es una clara ventaja sobre los “topos”.



Fig. 1. “Doble escudo” HNK de los Túneles de Perthus.



Fig. 2. “Doble escudo” (HNK) del Lote 2 de los Túneles de Pajares.

Fig. 3. Escudos simples (NFM) y HNK para roca del Lote 1 de los Túneles de Pajares.



Téngase en cuenta que, en tales casos, la colocación inmediata del revestimiento para que actúe como sostenimiento primario, sustituye con ventaja las fases de ejecución de sostenimientos de tipo pesado que precisan las máquinas abiertas (anillos de hormigón proyectado e, incluso, cerchas).

Y, por lo que se refiere a terrenos de muy baja calidad en los que los posibles tratamientos previos de consolidación son similares, el “doble escudo” tiene la posibilidad de trabajar en el llamado “modo escudo simple”, cerrando el telescopaje de la máquina, lo que hace posible, en muchos casos, asegurar el avance con el sostenimiento primario prefabricado, lo que es inviable con las TBMs abiertas convencionales.

2.2. El “doble escudo” y el escudo no presurizado (o escudo simple) para roca dura

La experiencia en los múltiples tramos del Proyecto de Pajares debe calificarse de positiva.

Por otra parte, los avances mantenidos logrados con los 4 escudos no presurizados y el “doble escudo” son muy parecidos, si se tienen en cuenta las correcciones debidas a las condiciones de trabajo (grandes caudales de agua en varios tramos y un 6% de pendiente en la galería descendente construida

con el “doble escudo”), por lo que, al menos de esta experiencia, no cabría deducir ventaja alguna a favor de una u otra de estas dos tipologías de máquinas no presurizadas para roca.

Por supuesto, el tipo de frentes mixtos del Proyecto de Pajares difiere bastante del caso de Perthus e, incluso, de los de las fallas de Valparaiso y La Umbria del Proyecto de Guadarrama que, en gran parte, son terrenos de Clase III con alteración de la roca base dominante, mientras que en los Lotes 3 y 4 de Pajares dichos frentes mixtos son consecuencia del contacto de las rocas duras con pizarras de características geotécnicas bajas o muy bajas, por lo que puede decirse que se trata de terrenos de Clase IV o V en los que no es apreciable ventaja alguna.

Como consecuencia de todo lo anterior, nuestra opinión puede resumirse como sigue:

- En general, es solamente en los terrenos de Clase I o II, así como en una parte de los terrenos de Clase III, donde puede esperarse alguna ventaja del “doble escudo”, respecto del escudo simple.
- En cuanto a las posibles extrapolaciones a diámetros del orden de los 12 m, consideramos que, teniendo en cuenta las experiencias de Barcelona (a las que nos referiremos a continuación) se mantiene la similitud de una y otra tipología.

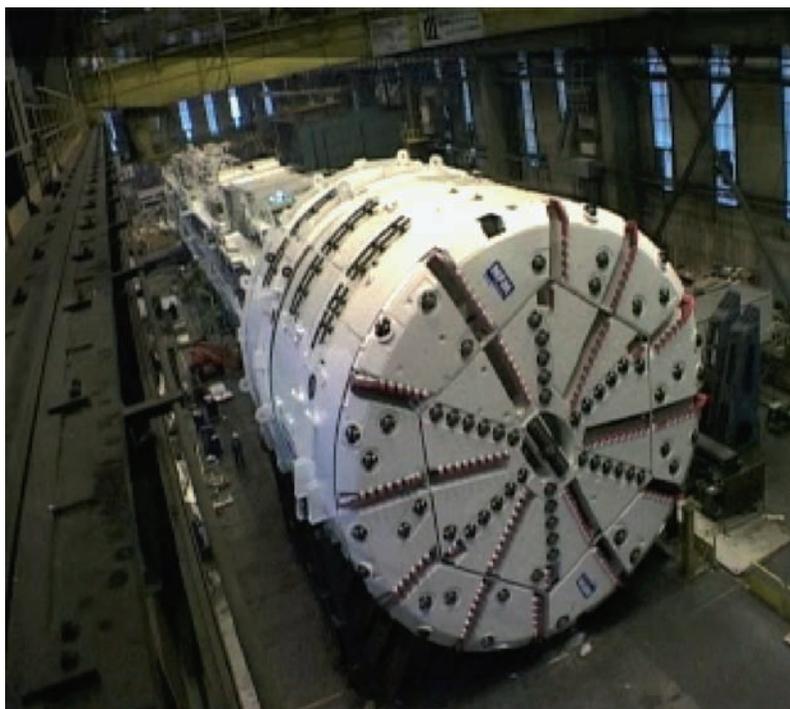


Fig. 4. Escudo NFM de tipo dual (\varnothing_{exc} : 11,96 m) de la Línea 9 del Metro de Barcelona.

- Pero, cuando se trata de diámetros mayores, del orden de los 15 m, hay aspectos pendientes de experiencias que avalen su viabilidad, sobre todo en la tipología “doble escudo”, como son los siguientes:

- Solución de problemas del sistema actual de telescopaje (deformaciones, rozamiento del terreno, etc.), o nuevo diseño del mismo, para los grandes diámetros.
- Trabajo en “modo simple escudo”: Mejora de la solución actual (empuje con el equipo auxiliar que produce problemas de guiado) o nueva solución del sistema de empuje.

2.3. Escudos presurizados tipo “EPB” para roca

La excavación en granitos con los escudos tipo EPB de \varnothing_{exc} 12,06 m de la Línea 9 del Metro de Barcelona se realizó con dos tipos de cabezas de corte (Ver Figuras 4 y 5):

- Escudo con cabeza de roca de tipo “dual” (modo abierto con cinta / modo “EPB” con tornillo) con aberturas del orden de un 22% de la superficie de la rueda, giro en un sólo sentido y herramientas de roca dura (69 cortadores de disco de 17” y 12 uni-

dades de 14”) y de suelos (151 unidades tipo “scraper” y 84 de tipo “rippers” en la periferia).

- Escudo “EPB” (extracción con tornillo) con cabeza de tipo mixto, con aberturas del orden de un 34% de la superficie de la rueda, giro en ambos sentidos y herramientas de roca dura (71 cortadores de 17” de doble o simple disco) y de suelos (151 unidades tipos “scraper” en el frente y “ripper” en la periferia).

A continuación, damos nuestra opinión respecto de la aplicabilidad de ambos tipos de solución, de acuerdo con lo observado hasta ahora en las obras de Barcelona.

2.3.1. Las soluciones tipo a): El diseño “dual”

Una de las primeras experiencias de escudos trabajando en roca dura (granitos), exclusivamente en “modo EPB”, fue la del METRO DE PORTO. Como consecuencia de un grave accidente sufrido al comienzo de la obra, cuando se trabajaba como escudo no presurizado (o en “modo abierto”) la Autoridad obligó a realizar toda la obra restante trabajando en “modo EPB”, es decir, siempre con el frente en presión de tierras y, por tanto, con extracción del escombros con tornillo.

Por nuestra parte, los diseños de tipo “dual” (extracción por cinta en “modo abierto” y con tornillo “modo EPB”) se aplicaron en las máquinas de \varnothing_{exc} 9,40 m, diseñadas en 1996 y 2000, para trabajar en los suelos y rocas blandas de las nuevas líneas de los dos primeros PLANES DE AMPLIACIÓN DEL METRO de Madrid.

La dificultad de determinar exactamente los puntos de aparición de frentes inestables, unida al plazo requerido para modificar la configuración de la cámara de la tuneladora (plazo del orden de 1 semana, como mínimo, para los diseños de la época) llevó a ordenar también en Madrid trabajar siempre con extracción de escombros por tornillo.

La solución tipo a), o sea el diseño “dual”, se aplicó en una de las TBMs de Barcelona que fue en su día la EPB mayor del mundo. En Ella, por otra parte, se decidió:

- Construir una rueda típica de roca dura, es decir, con un % reducido de aberturas de entrada a la cámara, y

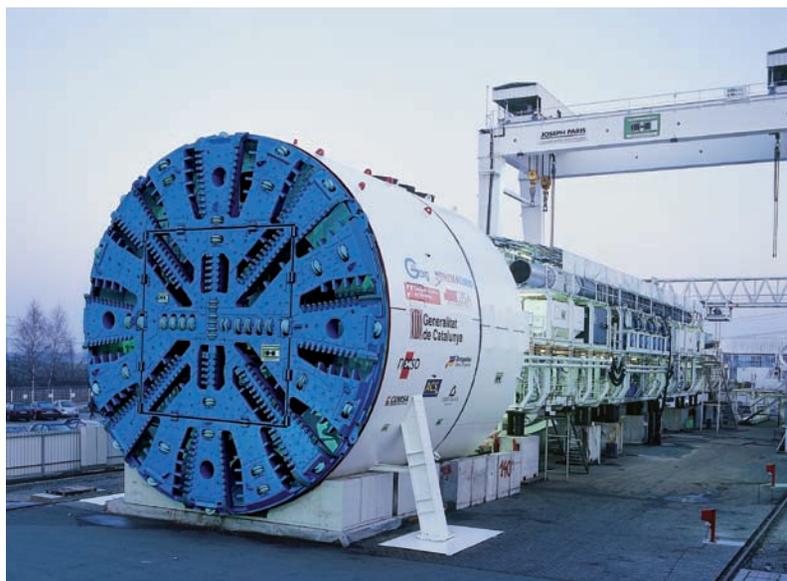


Fig. 5. Escudo HNK tipo "EPB" (\varnothing_{exc} : 12,06 m) de la Línea 9 del Metro de Barcelona.

- Diseñar un accionamiento con giro en un solo sentido y con un Par dimensionado para el corte de roca dura.

Las características anteriores demostraron lo inadecuado de la solución para el trabajo como "EPB" en frentes mixtos, generalmente formados por granitos de dureza media o alta con suelos procedentes de la excavación en "jabre" (granito muy descompuesto) o del aluvial del trazado.

2.3.2. Las soluciones tipo b): Escudo "EPB" de cabeza mixta.

Esta modalidad, que fue la adoptada en los últimos PLANES DE AMPLIACIÓN DEL METRO de MADRID (2003 en adelante) se aplicó también en Barcelona en las mismas fechas a la otra tipología de las máquinas de la Línea 9, excluyendo toda posibilidad de trabajar con configuración de extracción por cinta. En consecuencia:

- Sólo es posible la extracción del escombro por tornillo, tanto si se trabaja en "modo abierto" como en "modo EPB".
- La solución evita la dificultad de la aparición, siempre de modo prácticamente instantáneo, de un frente inestable, porque la presurización puede hacerse de inmediato.
- Se ha demostrado que la extracción por tornillo tiene la misma capacidad que si se hace por cinta.

- Pero, lo que, obviamente, sucede es que el coste puede ser bastante superior en la extracción por tornillo cuando se trata de materiales muy abrasivos, aunque se empleen aditivos adecuados.

En resumen, estas experiencias con TBMs hasta \varnothing_{exc} 12 m en frentes mixtos y formaciones de rocas duras, señalan para el futuro diseño de máquinas de diámetros de 15 m en adelante una imperiosa necesidad, en parte ya señalada al principio de esta Comunicación:

«Incrementar muy notablemente los trabajos de reconocimiento previo del terreno del trazado, para aumentar la seguridad operativa de las máquinas. En todo caso, es esencial dimensionar holgadamente los parámetros básicos de las máquinas»

3. Escudos de gran diámetro en frentes mixtos de rocas blandas: los túneles de la Calle 30 de Madrid

El Proyecto denominado CALLE 30 de Madrid, se construyó en los años 2003 a 2007 y es un ejemplo de la aplicación de modelos de desarrollo sostenible a la mejora de las infraestructuras de transporte de una gran ciudad.

En el caso de Madrid, la M-30 es el primer periférico, o perimetral interior propiamente dicho, de la ciudad, de unos 32 km de desarrollo y cuyo segmento Sureste - Sur - Suroeste, que constituía una de las zonas más deprimidas de la periferia, fue objeto de esta nueva obra de infraestructura de tráfico.

Con la construcción del nuevo Proyecto del citado segmento Sur, prácticamente en subterráneo en toda su longitud, con un total de más de 12 km de circuito bitubo en túnel, incluidos los enlaces a las vías radiales de la ciudad, se mejoraron notablemente: la capacidad de tráfico del periférico (que aumentó más del doble); la seguridad vial (ahorro de al menos 400 accidentes/año) y la contaminación ambiental (estimando una reducción de unas 35.000 t/año de CO₂), a la vez que se hizo posible la restitución de amplias zonas verdes en todo el espacio exterior recuperado.

En cuanto a los diversos tramos de esta gran obra de ingeniería civil, destaca la construcción con tune-

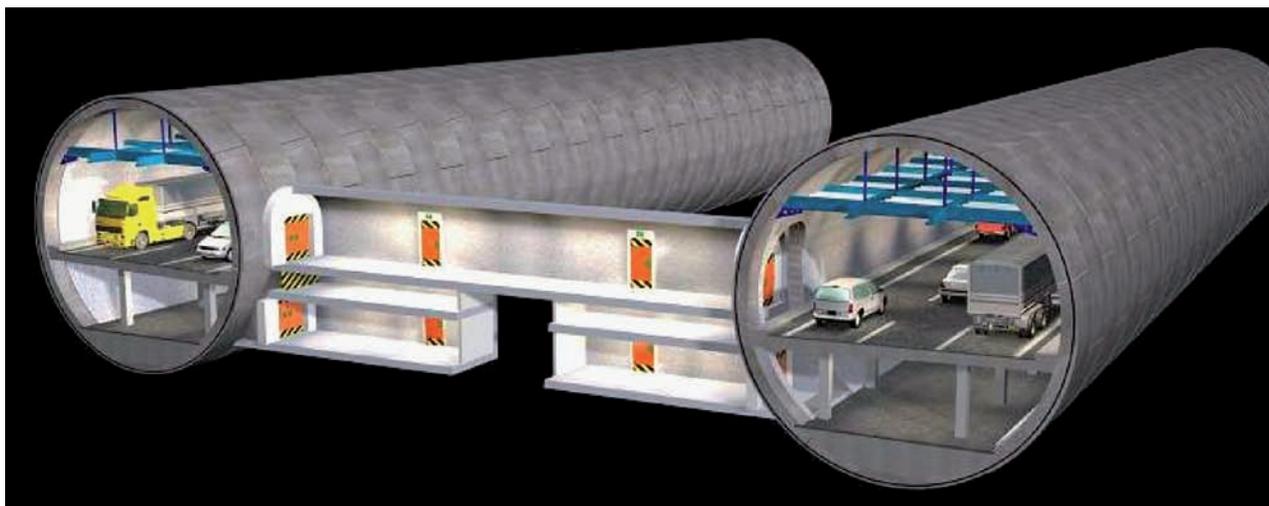


Fig. 6. Sección Tipo de los Túneles de Calle 30 (Madrid).

ladoras de gran diámetro de dos túneles, uno para cada sentido del tráfico, de un diámetro interior de 13,45 m y longitudes de 3.663 m (Túnel Norte) y 3.539 m (Túnel Sur). La sección transversal tipo incluye, en un primer nivel, 3 carriles de 3,50 m, con arcenes de 0,50 m y acera de 0,8 m y, en un nivel inferior, una ruta de rescate. Los dos tubos se conectan entre si por medio de 8 galerías de comunicación (tres de ellas para vehículos) y cada tubo lleva su pozo de ventilación, sensiblemente situado en el punto medio de su trazado (Figura 6).

La obra subterránea restante se hizo con predominio del método "cut and cover", complementado con el sistema tradicional de avance por fases (Método Madrid).

Por lo que a los túneles de 15 m de diámetro de excavación se refiere, los terrenos fueron los suelos areno-arcillosos y arcillosos, típicos de Madrid, con alternancias de formaciones yesíferas de dureza medio baja (< 30 MPa) y baja. El recubrimiento medio fue de unos 30 m (2 diámetros) con máximos de 65 m y mínimos inferiores a los 15 m en las cercanías de los portales.

En cuanto al revestimiento, se adoptó un anillo prefabricado "tipo universal" de 9 dovelas similares mas 1 dovela de clave. El espesor del anillo fue de 600 mm y su longitud de 2.000 mm. La unión entre dovelas del anillo se hizo por medio de 3 tornillos por dovela y la unión entre anillos contiguos por medio de 4 tornillos por dovela (mas 2 biconos de posicionamiento). El hormigón armado se reforzó con fibras de polipropileno para mejorar la resistencia a tracción de esquinas y bordes, así como la resistencia al fuego.

La magnitud de las secciones recomendó hacer la extracción de escombros del frente por cinta a lo largo de todo el túnel, pero planteó problemas de logística en el transporte adicional a través de la ciudad. La excavación por anillo de 2 m de longitud es de 361 m³ en perfil, y como los avances medios superaron siempre los 450 m/mes fue necesaria una flota de 700 camiones pesados para el transporte de escombros y 60 trailers más para el suministro de los prefabricados.

El diseño y fabricación de las máquinas tuneladoras se decidió en el año 2004. Los plazos de fabricación fueron de **6 meses para el diseño de detalle y 12 meses para la fabricación de cada máquina.**

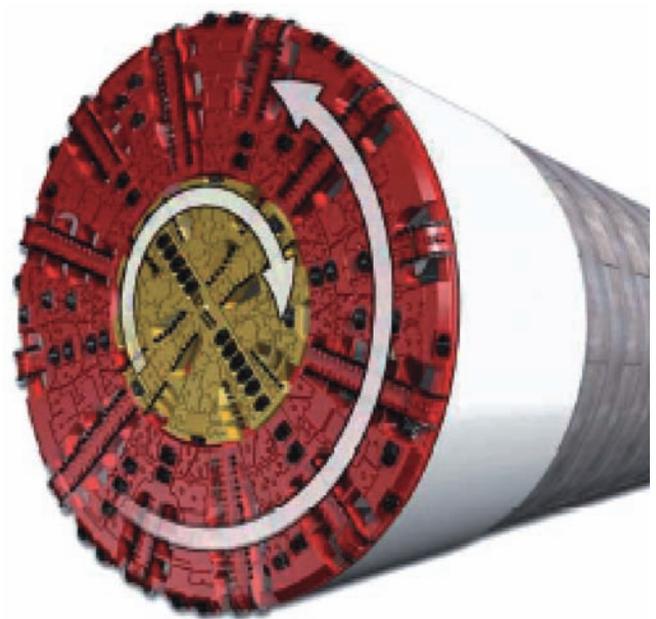
La construcción del Túnel Norte (\varnothing_{exc} 15,16 m) se empezó el 21.11.2005 y se terminó el 11.07.2006. El Túnel Sur (\varnothing_{exc} 15,01 m) se inició el 11.04.2006 y se terminó el 26.10.2006. Las dos máquinas utilizadas, que fueron las EPB más grandes construidas hasta entonces, tienen diseños totalmente diferentes, que se resumen a continuación.

3.1. El escudo "EPB" alemán HERRENKNECHT

El trabajo de un escudo EPB de \varnothing_{exc} 15 m en suelos cohesivos, como son los de Madrid, requiere un Par de giro muy elevado, por lo que el diseño de esta máquina puede decirse que se basó en evitar la rotación de la máquina sobre su eje, lo que podría ser motivado por tal esfuerzo.

Para ello, la cabeza de corte se dividió en dos partes que giran en sentido opuesto durante el avance: una rueda central de \varnothing_{exc} 7,00 m mas una corona concéntrica con la anterior. De este modo, el Par

Fig. 7. Escudo HNK tipo "EPB" (\varnothing_{exc} : 15,16 m) del Túnel Norte de Calle 30 (Madrid).



de giro de la corona exterior se ve compensado en parte por el de la rueda central (Figura 7).

La rueda central tiene una velocidad de giro mayor que la corona exterior, a fin de evitar el riesgo de atasco en la parte central de la cámara, por endurecimiento del material.

Este concepto de cabeza había sido ya utilizado por el fabricante para máquinas del tipo "hidroescudo", pero fue la primera vez que lo aplicó a un escudo EPB.

La rueda central de 7 m de diámetro ($38,5 \text{ m}^2$) tiene 6 radios y una configuración de rueda mixta (cortadores dobles de 17" para roca y herramientas tipo "scaper" para suelos). La corona exterior, con una superficie de 143 m^2 dispone de 12 radios y una configuración similar.

El conjunto de estas dos partes monta un total de 57 cortadores dobles de 17" y 332 herramientas para suelos tipo "scaper", mas 24 piezas fijas de perfilado exterior ("rascadores"), además de una pieza central o "de nariz". **Las aberturas de entrada de material a la cámara suman un 32% de la superficie total de la cabeza de corte (1).**

(1) Se suelen defender cifras máximas de este orden cuando se prevén posibles fallos en la operación de la máquina, con posibilidad de provocar caídas de la presión de confinamiento, lo que supondría problemas serios con un % mayor de huecos.

La motorización de la cabeza de corte es hidráulica, tecnología de aplicación muy frecuente por este fabricante. La rueda central lleva 10 motores que atacan el engranaje interior del cojinete, mientras que la corona exterior de la cabeza es accionada por 24 y 32 motores, que engranan interior y exteriormente con el cojinete correspondiente.

La potencia total del accionamiento es de **14.000 kW** que, teniendo en cuenta la pérdida de rendimiento de las transmisiones hidráulicas, del orden de un 30%, se convierten en 10.700 kW realmente aplicados. Con ello se logra un **Par de giro nominal máximo de 9.600 Txm** (a 0,81 rpm) en la corona exterior y **8.450 Txm** (a 1,5 rpm) en la rueda central. Los valores de los Pares de desbloqueo son, respectivamente, 12.500 Txm y 10.900 Txm.

El desescombro se hace por medio de 3 tornillos sinfín: uno, de 600 mm de diámetro, corresponde a la rueda central y los otros dos, de 1.200 mm de diámetro, toman el material desde la zona inferior de la cámara, como puede verse en la Figura 8.

El escudo, construido en Alemania, tiene una longitud de 11,5 m y solo lleva la articulación pasiva que une el escudo central al escudo de cola. La cola monta 4 filas de cepillos de grasa y el erector, de agarrar por mesa de vacío, es de diseño estándar.

En los gráficos de la Figura 8 se recogen esquemas que se refieren a ciertas características de esta máquina:

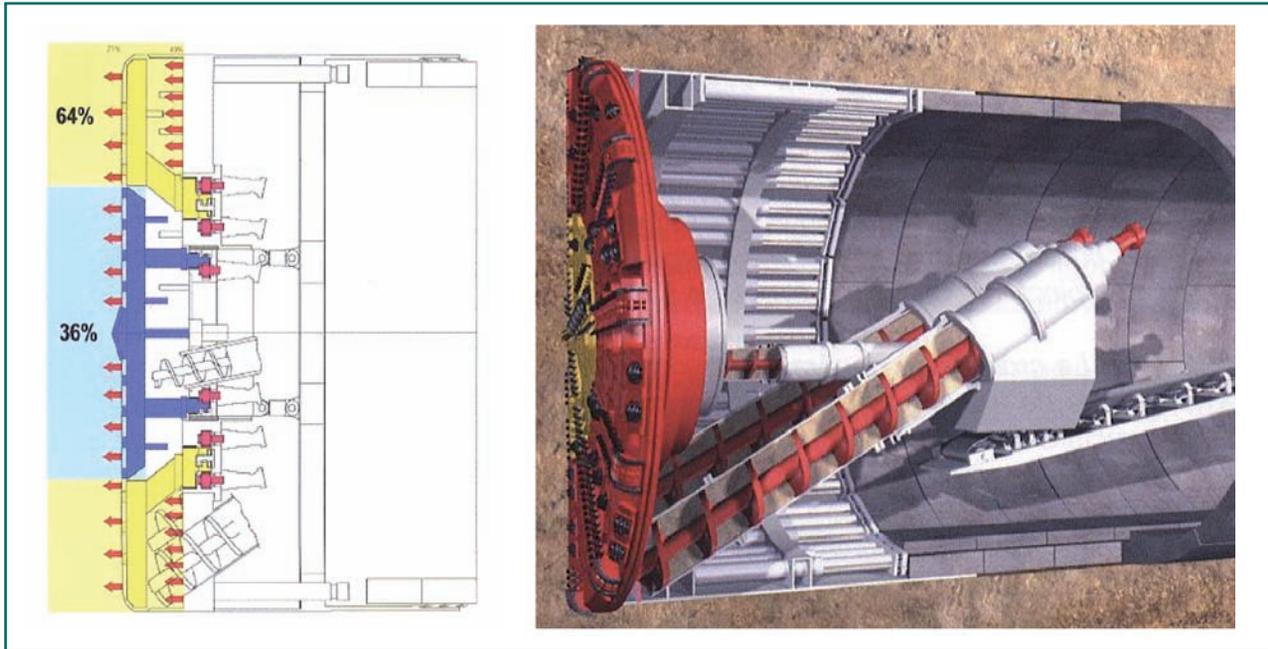


Fig. 8. Aplicación de aditivos en el frente de la rueda y esquema de la extracción de escombros.

- En el primero se indican los % en que se ha dividido la capacidad total de los equipos de tratamientos del frente con aditivos.
- En el segundo esquema representa la disposición adoptada por la extracción de escombros con tres tornillos sinfín.

perficie frontal de la rueda, lo que marca otra diferencia importante con el diseño alemán. En nuestra opinión, es una demostración perfecta de que para la adecuada contención del material inestable del frente, lo correcto es **mantener una presión ade-**

Fig. 9. Escudo MITSUBISHI tipo "EPB" (\varnothing_{exc} : 15,010 m) del Túnel Sur de Calle 30 (Madrid).

3.2. El escudo "EPB" japonés MITSUBISHI

Este diseño es básicamente distinto del anterior, pudiendo señalar los tres aspectos principales siguientes:

- En primer lugar, el diseño sigue las líneas convencionales de la tecnología de los escudos de presión de tierras: **la cabeza de corte es una rueda única**, de configuración mixta, y la contrarrotación se logra, **tanto por las alternancias del sentido de giro a lo largo del avance, como por la reorientación de los cilindros de empuje** para lograr la debida reacción estabilizadora contra los anillos del revestimiento. Siguiendo la citada línea convencional de los "EPB", la rueda monta 44 cortadores de triple disco de 17", 678 herramientas para suelos, de tipos diferentes, con modelos que van desde el "scraper" hasta tamaños mayores, de tipo "ripper", además de una pieza central o "de nariz".
- En segundo lugar, **las aberturas de entrada a la cámara suman un total de huecos del 43% de la su-**



Fig. 10. Montajes en fábrica y en obra de los escudo de Calle 30 (Madrid)



cuada de confinamiento del material de la cámara y disponer de una superficie de huecos lo mas amplia posible para transmitirla al frente con un mínimo de pérdidas por obstáculos, logrando así valores lo mas ajustados posible del Par nominal (2).

En efecto, la máquina tiene un Par nominal máximo de 8.600 Txm a 1,05 r.p.m. siendo el Par de desbloqueo de 12.700 Txm, menor que la alemana.

- Finalmente, el accionamiento de la rueda es eléctrico de frecuencia variable: la potencia total de

10.700 Kw, se reparte en 28 motores de 358 Kw cada uno, que atacan la corona del rodamiento principal por su cara exterior. Ello es una buena muestra de las ventajas económicas de este tipo de accionamiento, que presenta las pérdidas mínimas de potencia en la transmisión de su cadena cinemática.

Como innovación de este diseño debe comentarse el éxito de la instalación en la cámara de un agitador central de 3 brazos, con un diámetro de 5 m y accionamiento hidráulico a una velocidad de 2 r.p.m., prácticamente el doble de la de la rueda, para evitar la formación de bloques en el material que entra a la cámara por la parte central de la rueda.

(2) Por supuesto esta metodología exige la aplicación en tiempo real de las presiones de confinamiento necesarias, vigilando su mantenimiento para evitar todo tipo de incidentes, que podría producir una operación menos cualificada.

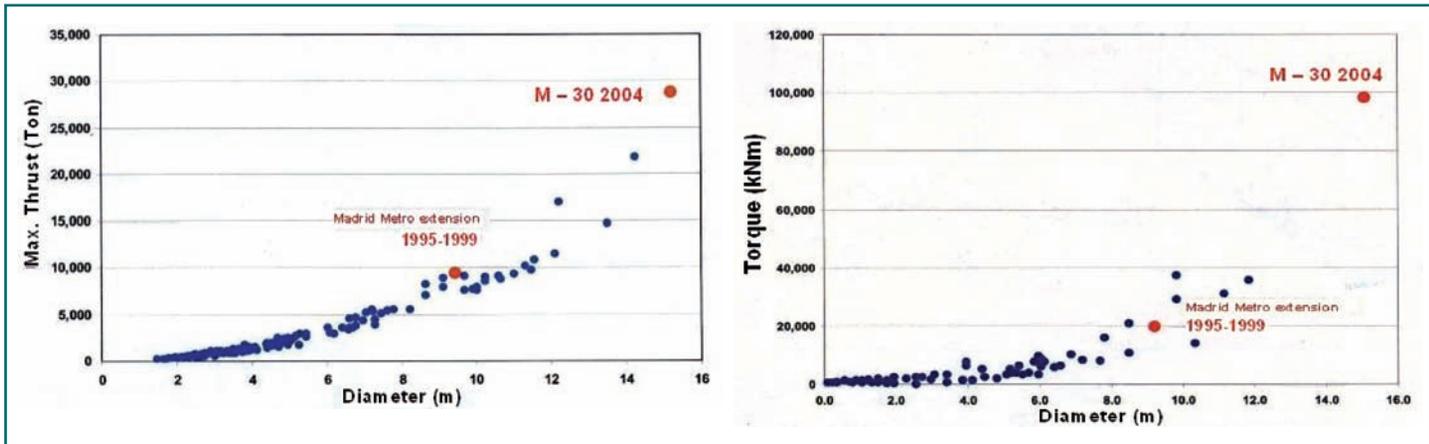


Fig. 11.-Evolución de los parámetros básicos de los tipo "EPB" (Refª M-30 año 2004).

Por otra parte, MITSUBISHI presentó una segunda innovación, un erector de dovelas de dos mesas de vacío, para que la mesa más próxima al alimentador sea la que tome la dovela. De hecho, no se hizo uso de esta posibilidad, sino que el diseño se utilizó para disponer de una alternativa en caso de avería de una de las mesas, lo que contribuyó en parte al excelente rendimiento conseguido con el escudo una media de avance mantenido de 570 m/mes.

yendo el Proyecto bitubo de los Túneles de 7,2 km de longitud bajo el Yangtze-kiang, que unirá la margen del río en Pudong con la isla de Changxing. Ver Figura 12.

La construcción de los túneles se hizo con dos escudos HERRENKNECHT de \varnothing_{exc} 15,4 del tipo "hidroescudo".

Cada tubo incluirá tres carriles de tráfico automóvil en el nivel principal y un carril de rescate y pasarela de seguridad, en el inferior.

Fig.12. Situación y sección transversal tipo de los Túneles de \varnothing 15,43 m de Shanghai.



Finalmente, debe decirse que el escudo tiene una longitud de unos 12 m y posee: un único tornillo sinfín de 1500 mm de diámetro; una articulación activa y otra pasiva en la unión con el escudo de cola, y 4 filas de cepillos en este último. MITSUBISHI lo construyó en los talleres españoles de DUROFELGUERA.

Como resumen de lo que ha supuesto el incremento necesario de los parámetros básicos para máquinas EPB de este diámetro de 15 m, sobre lo fabricado hasta ahora, presentamos los gráficos de la Figura 11.

4. Escudos de gran diámetro en rocas blandas y suelos saturados: los túneles de carretera bajo el Yangtze en Shanghai

Para dotar de infraestructuras modernas de transporte a una de las zonas de desarrollo de la ciudad de Shanghai, desde finales de 2006 se está constru-

Las condiciones hidrogeológicas de este Proyecto, con un trazado profundo de hasta 65 m bajo el cauce del río, a través de suelos y rocas blandas de naturaleza arcillosa, lo convierten en un caso de dificultad extrema de ejecución, al obligar a diseñar los escudos para trabajar con una presión de agua muy elevada (que se estableció en 6 Bar).

La rueda de corte de la máquina (Figura 13) diseñada con 6 grandes radios lleva 68 herramientas para suelos en los bordes de los radios y 7 grandes cortadores en sus centros para pasar las capas de roca blandas. Para resolver el problema de la pegajosidad de las arcillas, la parte central de la rueda está equipada con un circuito de inyección de aditivos, lo que, junto con las grandes aberturas de la rueda facilita la entrada del material a la cámara o el flujo adecuado para el transporte hidráulico en el modo "hidro".

Se ha programado la ejecución de la obra civil de los túneles en 34 meses y se prevé su puesta en servicio a finales de 2010. En cuanto al diseño de las máquinas, mencionaremos lo siguiente:

- El accionamiento de la rueda de corte se hizo con motores eléctricos de frecuencia variable.
- Debe destacarse que, con el fin de poder hacer los cambios de herramientas con seguridad, **se diseñó la rueda de corte con seis recintos, accesibles desde el interior del escudo, que están sellados contra la presión de agua, y cuyos mamparos coinciden con los bordes de los radios principales del escudo. Desde ellos se puede acceder al frente y trabajar a presión atmosférica**, por lo que no son necesarias las actuaciones hiperbáricas con buzos.

El acceso a dichos recintos se hace desde el interior del escudo, a través de una esclusa. Sirven también para almacenar las herramientas de corte y llevan medios auxiliares para facilitar la entrada y salida de estas a través de la esclusa y para realizar las operaciones de reposición.

- Otra novedad es que **dos cangilones y ocho herramientas de suelos se equiparon con un sistema de detección de desgastes** para tener información fiable en tiempo real del estado de dichas piezas.

- La base del sistema consiste en un sensor electrónico integrado en el soporte de la herramienta y que está "conectado" a ella a través de ci-



Fig. 13. Uno de los escudos de \varnothing_{exc} 15,43 m de Shanghai.

clos de inducción, que permiten controlar el desgaste en tiempo real y detectar cuando se alcanza el límite recomendado.

- Con el sistema de control expuesto, el operador puede seguir de forma continua el proceso de desgaste y, además, **se dispone de información de los desgastes con la suficiente anticipación para planificar mejor las reposiciones y los trabajos de mantenimiento necesarios, optimizando la duración de las piezas y reduciendo al mínimo el número de los costosos procesos de acceso a los recintos estancos**, que es el inconveniente mayor que, por el momento, tiene el sistema de compartimentación de la rueda.

El revestimiento del túnel consiste en anillos de hormigón armado prefabricado, de 9 dovelas más 1 llave. Tiene un diámetro interior de 13,70 m; un espesor de 700 mm y una longitud de 2 m.

5. Conclusiones y agradecimientos

En nuestra opinión, la visión hacia el futuro de los grandes Proyectos de Infraestructuras, sobre todo de comunicaciones por ferrocarril o carretera, puede resumirse en la forma siguiente:

- Hay una tendencia general a planificar proyectos de túneles de diámetros superiores a los 10 m. en una gran parte de los PLANES DIRECTORES de nuevas Infraestructuras

- Desde la actual situación de la tecnología de diseño puede decirse que la construcción de tuneladoras de gran diámetro no está limitada a tipos especiales de terreno.
- Las tuneladoras de gran diámetro pueden construirse tanto para excavar en roca dura como en suelos o en condiciones mixtas.
- De las experiencias próximas pasadas se deducen bastantes recomendaciones a seguir y variaciones de diseño que deben abordarse.
- Con ello consideramos que en breve pueden acabar de perfeccionarse los logros existentes, que han rebasado ya los 15 m de diámetro, operando en condiciones de seguridad y acometer incluso tamaños mayores.

- De la comparación con los métodos convencionales de construcción de túneles, se deduce que las tuneladoras de gran diámetro, diseñadas con parámetros adecuados, además de ofrecer evidentes ventajas de seguridad en la construcción del túnel, permiten conseguir objetivos mejores de plazos y de costes.

Queremos agradecer la colaboración que nos han prestado los Organismos, Empresas constructoras y Fabricantes, y muy en especial las del Dr. Ing. Martin Herrenkchet y del Ing. Enrique Fernández, que nos autorizaron a reproducir datos y gráficos de sus publicaciones que figuran en la Bibliografía. ♦

Referencias:

-Bono, R. et al. SURFACE SETTLEMENT MINIMIZATION IN SOFT SOIL WHEN EXCAVATING WITH AN E.P.B.S. Jornada Técnica Túneles con EPB, Barcelona, Mayo 2008.
-Fernandez, E. THE MADRID RENEWAL INNER RING CALLE 30 WITH THE LARGEST EPB MACHINES. RETC Proceedings 2007.
-Fernandez, E. DOUBLE SHIELDS TO BUILD THE HIGH SPEED RAILWAY NETWORK IN SPAIN. RETC Proceedings 2005.

-Herrenknecht, M., Bäßler, K. RECENT DEVELOPMENTS IN THE TBM INDUSTRY- NEW AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES. RETC Proceedings 2005.
-Herrenknecht, M., Bäßler, K. THE DESIGN OF THE WORLD'S LARGEST EPB AND SLURRY SHIELD TBMs. Congreso Internacional de MÓNACO, AFTES, Octubre 2008.
-Maidl, U. GEOTECHNICAL AND MECHANICAL INTERACTIONS USING THE EARTH PRESSURE BALANCE SHIELD TECHNOLOGY IN DIFFICULT MIXED FACE AND HARD ROCK, RETC Proceedings 2003.
-Melis, M. LAS TUNELADORAS DE 3 CARRILES DE LA M-30. LAS MAYORES Y MAS POTENTES JAMÁS

FABRICADAS. Revista de Obras Públicas. Madrid Abril 2005.
-Melis M., Arnaiz, M., Fernandez, E. THE MADRID RENEWAL INNER CALLE 30 WITH THE LARGEST EPB MACHINES. International Symposium on Underground and Tunnelling ISUET Bangkok, Thailand. Febrero 2006.
-Mendaña, F. GUADARRAMA TUNNEL CONSTRUCTION WITH DOUBLE SHIELD TBMs. RETC Proceedings 2007.
-Monzon, A., Pardillo, J.M., et al, THE M-30 RING ROAD IMPROVEMENT PROJECT IN TERMS OF A SUSTAINABLE MOBILITY STRATEGY FOR MADRID. Revista de Obras Públicas Madrid, Abril 2005.