

AMPLIACIÓN DEL METRO DE MADRID

EXPERIENCIAS DE LA EXCAVACIÓN CON ESCUDOS EN LAS FORMACIONES MIXTAS DE ROCAS Y SUELOS

THE MADRID UNDERGROUND EXTENSION

EXCAVATION WITH EPBS IN COMPOSITE ROCK AND SOIL FORMATIONS

JESÚS TRABADA GUIJARRO. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
 Director de Construcción de la Comunidad de Madrid. *admon@mintra.c.telefonica.net*
 MANUEL MELIS MAYNAR. Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
 Consejero Delegado de MINTRA. *admon@mintra.c.telefonica.net*

RESUMEN: Se expone el tratamiento de la excavación con escudos de presión de tierra en las formaciones mixtas de rocas y suelos de las obras de Ampliación del Metro de Madrid. Se trata en particular el diseño de un escudo EPB construido para un contrato del proyecto Metrosur, correspondiente a la zona del sureste de Madrid en la que se excavaron formaciones en yesos masivos y suelos arcillosos, trabajos que constituyen una experiencia hasta ahora inexistente en la tecnología de las tuneladoras.

PALABRAS CLAVE: ESCUDO DE PRESION DE TIERRA, CORTADOR DE DISCO, PICAS, CINCELES, YESOS MASIVOS, YESOS Y ARCILLAS

ABSTRACT: The article describes the excavation using EPBs in composite rock and soil formations during the work on the Madrid Underground Extension. The EPB was specially designed for a contract within the Metrosur project, corresponding to the south-east area of Madrid and requiring excavation through massive chalk and clayey soils. These particular works being the first of their kind in tunnelling technology.

KEYWORDS: EPB SHIELD, DISC CUTTER (ROCK CUTTER), SOFT GROUND TOOLS, MASSIF GYPSUM, GYPSUM AND CLAY.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de los túneles de línea de la Ampliación de la Red del Metro de Madrid con escudos de presión de tierra nos ha permitido estudiar el comportamiento de estas máquinas en la excavación de formaciones mixtas de rocas y suelos. En lo que sigue, se describe el resultado de estas experiencias, que puede tener interés para el estudio de casos similares.

En la ejecución de los túneles principales de la Ampliación de la Red se emplearon un total de siete escudos, de los cuales cinco construyeron los túneles de doble vía y los otros dos

los de vía sencilla. Estas cinco máquinas de 9,40 m. de diámetro de excavación fueron escudos de presión de tierra, especialmente diseñados para los terrenos del subsuelo del área metropolitana de Madrid. Las primeras cuatro máquinas, gemelas dos a dos, iniciaron sus trabajos en 1996, en las obras del primer Plan y continuaron después en 1999 en las del Segundo Plan. La quinta y última máquina se fabricó el año 2000 para construir los tramos VII a IX del Proyecto Metrosur, lo que constituyó la parte más problemática del segundo Plan, precisamente debido a las características de las formaciones mixtas de yesos masivos y suelos blandos con yesos que requerían un estudio especial de su excavación con escudo.

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de marzo de 2003. Recibido: diciembre/2002. Aprobado: diciembre/2002

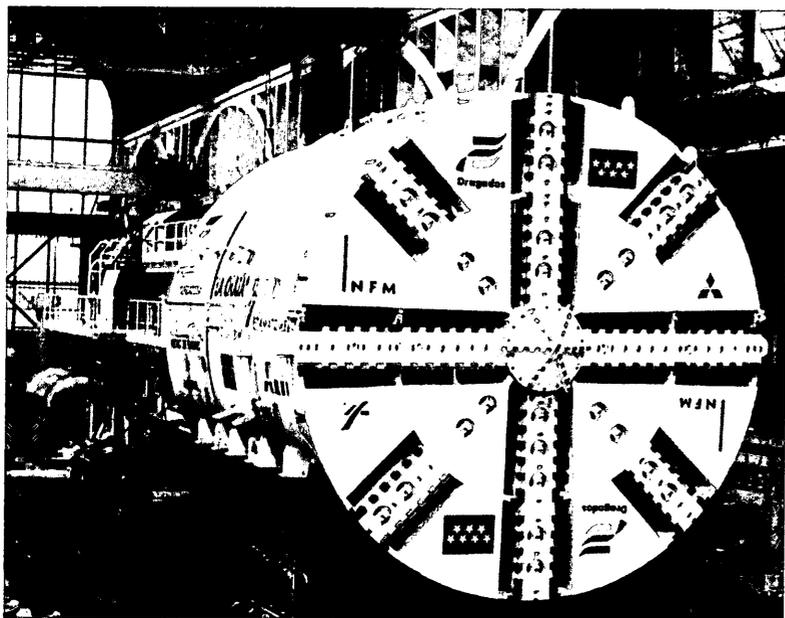


Figura 1.
Escudo EPB
"NFM"
Ø 9.40m
(1996).
A la derecha,
figura 2.
Escudo EPB
"HERREN-
KNECHT" Ø
9.40m (2000).

2. EXPERIENCIAS DE LA EXCAVACIÓN CON ESCUDOS EN LAS FORMACIONES MIXTAS DEL PRIMER PLAN

En los dos Planes de Ampliación se adoptaron diseños de tipo superficial para los túneles y estaciones, por lo que puede decirse que la mayoría de las excavaciones se han realizado en los suelos típicos de las series detríticas superior e intermedia del subsuelo de Madrid, cuyas características figuran en otras comunicaciones de esta revista. Así sucedió en la práctica totalidad de los proyectos del Primer Plan, no obstante lo cual, se consideró la posibilidad de tener que excavar materiales de mayor dureza debido a la posible presencia de viejas obras de fábrica o bien a la aparición de capas de areniscas y rocas calizas de dureza media, detectadas en los sondeos o conocidas por referencias de obras anteriores.

Por esta razón, los cuatro escudos de 9,40 m. de diámetro se diseñaron con herramientas básicas de suelos (dientes o cinceles) pero añadiendo cortadores de roca de simple o doble disco.

En general, los diseños de las cabezas o ruedas de corte de estas máquinas (Figuras 1 y 2) respondieron a una distribución de los cortadores de roca de forma que marcasen huellas o pistas en el frente con una separación constante, correspondiendo una pista a cada cortador. En cuanto a los cinceles, se distribuyeron de forma que entre cada dos huellas contiguas de los cortadores de disco hubiese una huella de estas herramientas de suelos, huella por la que se procuró pasasen al menos dos cinceles.

Los cortadores de disco, típicos de roca, resolvieron perfectamente el problema y cabe señalar solamente que al trabajar en suelos no se optó por sustituirlos, como era



posible, por herramientas típicas de terrenos blandos, sino que, o bien se mantuvieron montados, sin mayor problema, o se retiraron sustituyéndolos por cierres metálicos debidamente diseñados para fijarlos a las carcasas de los cortadores, cerrando el hueco.

3. CARACTERÍSTICAS DE LAS FORMACIONES MIXTAS DEL PROYECTO METROSUR

El proyecto Metrosur es el nombre dado al nuevo anillo que enlaza los términos municipales de Alcorcón, Móstoles, Fuenlabrada, Getafe y Leganés y que queda unido a la red metropolitana por la Extensión de la Línea-10 (Figura 3).

El trazado de Metrosur atraviesa, en general, todos los niveles típicos de los terrenos de Madrid citados en el apartado anterior, siendo en su mayoría formaciones detríticas. Sin embargo, en los tramos VII, VIII y IX del Proyecto, zonas Este y Suroeste de Madrid que corresponden al municipio de Getafe, los terrenos predominantes los constituyen formaciones evaporíticas yesíferas de los niveles inferiores del Terciario.

En los apartados siguientes de esta Comunicación nos referiremos a la excavación en estas formaciones de yesos masivos alternados con suelos, constituidos generalmente por arcillas con yesos.

La experiencia de la excavación mecánica en este tipo de formaciones presenta problemas importantes de rendimientos, debidos a la combinación de las dos características mecánicas típicas de las rocas de yeso: su resistencia a compresión de tipo medio y su tenacidad, consecuencia



Figura 5.
Yesos
kársticos
extraídos de
los pozos.

jardines. En la Figura 5 puede verse el material yesífero "kárstico" excavado en estos pozos.

c).- *Otros estudios y trabajos de reconocimiento complementarios.*

Conocido los resultados las nueva campañas de sondeos, se decidió realizar una serie de contactos con expertos y unos estudios complementarios.

- UNIVERSIDAD DE TURÍN. En reuniones con expertos de GEODATA adscritos a esta Universidad planteamos la cuestión de la excavación mecánica de yesos masivos de carácter kárstico.

Las experiencias de obra de Yugoslavia y países próximos se referían principalmente a formaciones kársticas de naturaleza caliza con una escasa experiencia del corte mecánico con tuneladoras.

En general, en estos países se recurre al Laboratorio de la DENVER SCHOOL OF MINES, de Denver. Co para el estudio de rocas salinas y yesos con vistas a su caracterización mecánica en explotaciones a cielo abierto.

- OBRAS DIVERSAS REALIZADAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MADRID. Se recogieron datos de las ex-

periencias recientes en las obras de carreteras y del Tren de Alta Velocidad, en cuyas trincheras y túneles se excavaron suelos con yesos que, en algún caso, suponían un porcentaje relevante de la formación.

La única experiencia que dio algún dato sobre el corte mecánico fue la excavación con rozadoras dotadas de picas cónicas. En todo caso, los ritmos de avance mejores fueron siempre muy inferiores a los que deben esperarse de una tuneladora.

- EXPERTOS DE FABRICANTES. Se celebraron 2 reuniones con geólogos de Herrenknecht que fue el fabricante de escudos, seleccionado por el contratista FERROVIAL-AGROMAN. Se llevaron muestras de los sondeos a sus laboratorios de Alemania para definir los parámetros básicos de los yesos de las formaciones.

3.2.- BREVE DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA - GEOTÉCNICA DE LA TRAZA

El Tramo IX (1.894 m) comienza en la zona de El Bercial, situada en el término municipal de Getafe, donde se situó el Pozo de Ataque de la tuneladora, y finaliza en la Estación de Getafe 6 (El Casar). En este tramo, el terreno presenta una capa de yeso de gran espesor, así como un estrato de arcillas negras con yesos. Sólo a su paso por la estación de Getafe 7 (Los Espartales), cambia a peñuelas blandas y duras de la fase de transición.

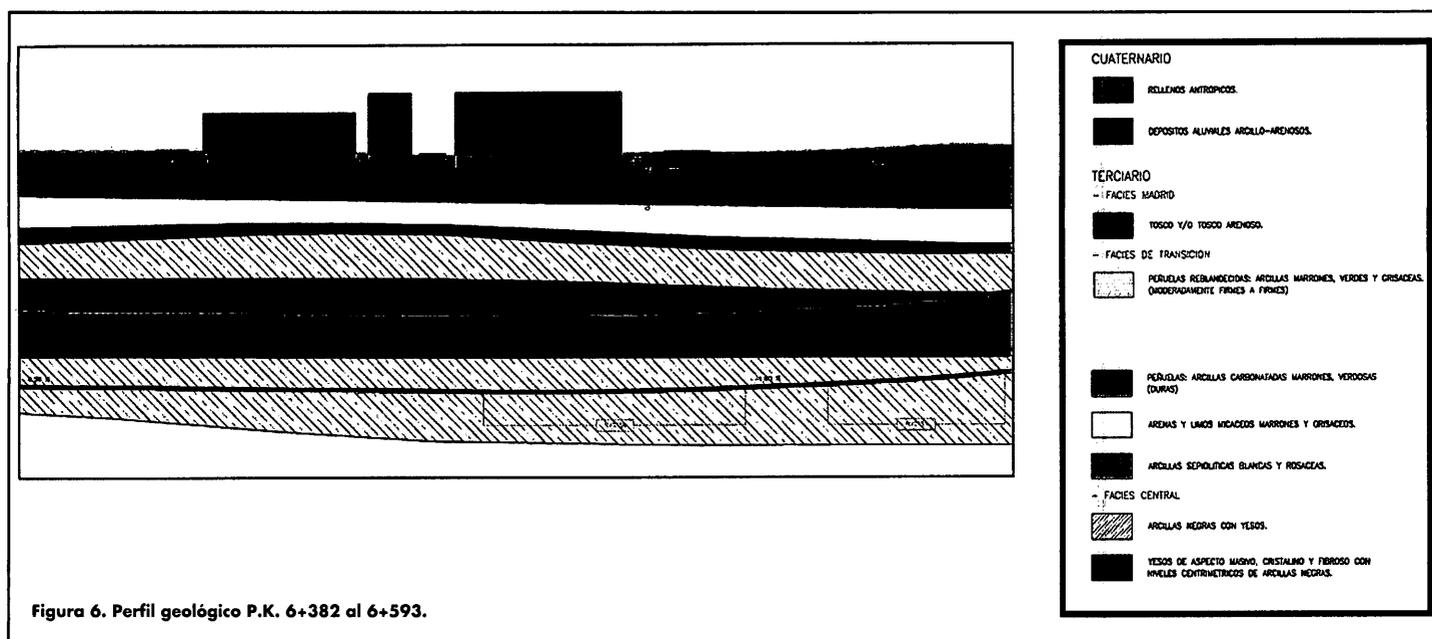
La cobertura del túnel la componen estratos de arenas, arcillas y rellenos antrópicos, con un espesor de entre 6 y 12 m. La solera del túnel se sitúa entre las cotas 593 y 605 metros, mientras que el nivel freático oscila entre los 610 y 615 metros.

El Tramo VIII (4.022 m) discurre en su mayoría por el centro de la ciudad, hasta la estación de Getafe 3. En este tramo, al igual que en el anterior, predomina los yesos masivos y las arcillas con yesos. Sólo al final del tramo, se atraviesan peñuelas y arenas.

Así mismo, la cobertura la componen rellenos antrópicos, peñuelas, arenas, toscos e incluso un estrato de yesos. Su espesor varía entre 9 y 20 m. La solera del túnel se sitúa entre las cotas 595 y 610, y el nivel freático oscila entre los 610 y 630 m.

En la figura 6 puede verse un detalle de uno de los tramos.

Finalmente, el Tramo VII es el situado entre las estaciones de Getafe 3 y Getafe 2. Este tramo difiere de los anteriores en que los terrenos a excavar son los correspondientes a la Facies de transición, es decir a las peñuelas, arcillas carbonatadas y arenas de la Facies Madrid. El terreno de cobertura es de tipo tosco y tosco arenoso, con un espesor de unos 18 m.



En general, el trazado de los tres tramos discurre en su mayor parte bajo calles y avenidas, aunque en algunos casos fue necesario pasar bajo edificios. Es de destacar así mismo, que el trazado del túnel pasa dos veces bajo la carretera de Toledo N-401 y también bajo el Ferrocarril Madrid-Badajoz.

4. DISEÑO DEL ESCUDO. ASPECTO MECÁNICOS

La investigación realizada a través de los expertos europeos de mayor prestigio acerca de la experiencia existente sobre tuneladoras en este tipo de formaciones dio un resultado negativo. Teniendo en cuenta este hecho, y la dificultad añadida de la naturaleza y estructura de los terrenos a excavar, que se ha descrito en el anterior apartado, se desarrolló un diseño diferente de lo habitual, con modificaciones que pueden suponer un modelo a seguir en obras posteriores. Las principales innovaciones introducidas en la tuneladora se describen a continuación.

4.1. CABEZA DE CORTE. HERRAMIENTAS BÁSICAS.

En las formaciones masivas kársticas que detectamos en la zona afectada, el yeso se caracteriza como una roca de dureza media y medio / baja, pero a la vez es un material tenaz que presenta una gran resistencia a la fragmentación debido a su estructura fibrosa, lo que dificulta su excavación.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se plantearon las siguientes hipótesis en cuanto al diseño de las herramientas de la rueda de corte. El fabricante de la tuneladora, insistía

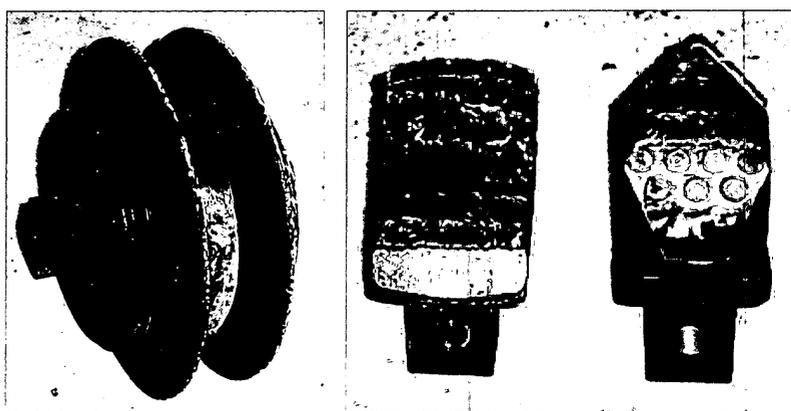
en la posible utilización exclusiva de herramientas típicas de los suelos. Por nuestra parte, entendimos que la estructura "kárstica" recomendaba una solución mixta que fue la adoptada finalmente. Uno y otro de tipo de herramientas pueden verse en las Figuras 7 y 8. El proceso seguido hasta que se tomó dicha decisión se describe seguidamente.

a). Empleo exclusivo de picas y cinceles.

Las picas y los cinceles son las herramientas típicas de los suelos blandos. Este tipo de herramientas se dispone a lo largo del contorno de las aberturas de la cabeza, con el filo hacia el hueco, de forma que, dependiendo del sentido de giro de la máquina, trabajan unas herramientas u otras.

Cada fabricante emplea unos diseños concretos, teniendo en cuenta siempre el terreno en el que va a trabajar la máquina. Para ello, hay que considerar dos aspectos muy

Figura 7. Cortador de doble disco para roca. A la derecha, figura 8. Cinceles para suelos.



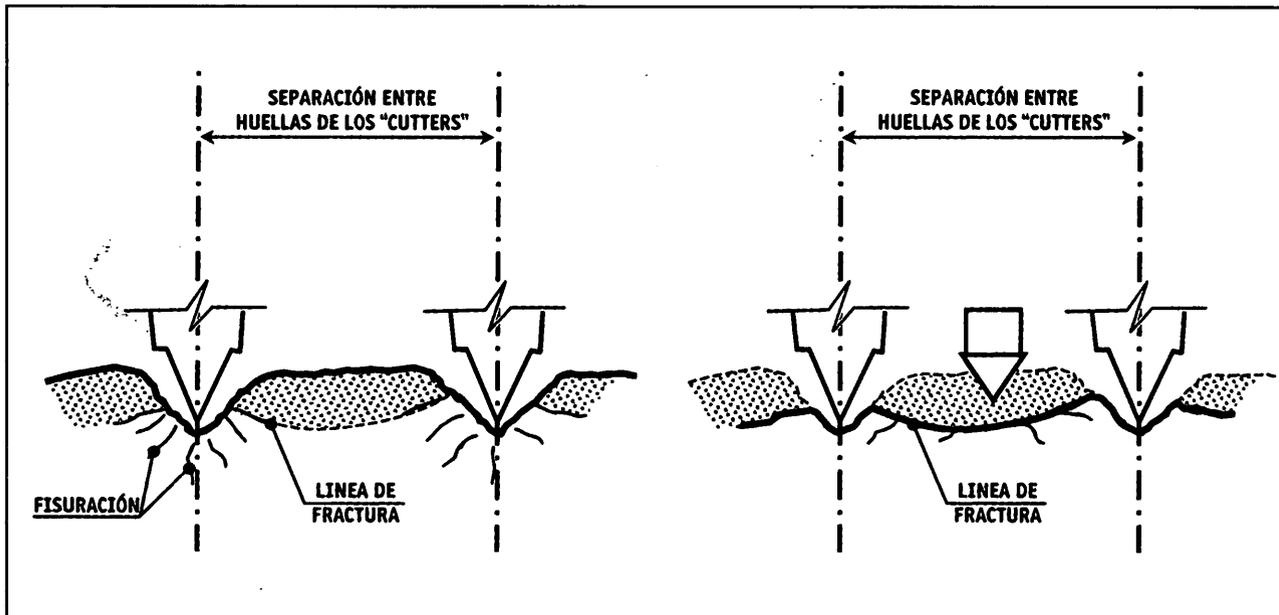


Figura 9.
Corte mecánico
de rocas.

importantes: la capacidad real de la máquina para la excavación por corte mecánico y el desgaste por abrasión.

En el caso de la tuneladora Herrenknecht elegida por la constructora, el asesor del fabricante planteó la posibilidad de diseñar la rueda de corte sólo con este tipo de herramientas considerando que la dureza del yeso no era lo suficientemente alta para utilizar los discos de corte propios de las tuneladoras de roca dura.

Según la bibliografía consultada, Prinz propone clasificar como roca blanda la que presente una resistencia de hasta 60 N/mm^2 y menos del 25 % de materiales abrasivos. En nuestro caso, las muestras ensayadas de los yesos de Metrosur llegaron a 32 N/mm^2 , con una media del 12 % de material abrasivo.

Según Rutschman, las picas pueden usarse en rocas de hasta 80 N/mm^2 , e incluso algunos autores elevan este límite hasta 90 N/mm^2 . Estos resultados han sido obtenidos en ensayos de laboratorio y aplicados a rozadoras, pero no al caso de una tuneladora, por lo que consideramos muy difícil lograr los mismos resultados por las siguientes razones:

- Con los cinceles es imposible lograr un rendimiento razonable en rocas de la dureza media.
- Las picas (perfil cónico) son las que consiguen excavar las rocas de mayor dureza pero concentrando estas herramientas en la pequeña cabeza de una rozadora, lo que se traduce en un fenómeno de rotura muy peculiar.
- No se ve la posibilidad de aplicar este tipo de herramientas con la disposición habitual en una TBM sin riesgo de roturas constantes que pondrían en peligro el resto de las herramientas y tampoco es posible reproducir la disposición empleada en las rozadoras.

- La tenacidad no puede determinarse mediante ningún ensayo homologado. Fliegner propone definirla como la relación entre las resistencias a compresión y a tracción. Para rocas sedimentarias, como es el caso de los yesos, una relación superior a 10 indica mayor fragilidad (menor tenacidad). Según los ensayos realizados en los yesos del Proyecto Metrosur, la relación es inferior a 10, lo que indica que ha de esperarse un menor rendimiento de la excavación, que podría decirse equivale a mayor la resistencia a compresión hasta en un 40 %.

b). Empleo exclusivo de cortadores de disco.

Los cortadores de disco son las herramientas típicas de las TBM de roca dura, aunque también se incorporan a los escudos, cuando son de esperar intercalaciones de capas de alta dureza (roca, obras de fábrica antiguas, etc.), como se hizo en las 4 máquinas del Primer Plan de Ampliación.

Las cabezas de corte de las diversas tuneladoras de roca, trabajan bajo un mismo principio básico. Las herramientas de corte ruedan en trayectorias concéntricas bajo una determinada carga sobre la superficie del frente del túnel; el cortador ejerce una fuerte compresión puntual, una "indentación", generando fisuras que se extienden por la masa de la roca alrededor de la trayectoria del cortador. Si la distancia entre dos trayectorias de discos es la adecuada al tipo de roca, las fisuras se unen provocando la rotura del terreno.

Este mecanismo, con el que suele explicarse el corte mecánico de las rocas (Figura 9), se basa en que éstas ofrecen una resistencia al corte que, una vez alcanzada, va seguida de una rotura frágil. Los yesos ofrecen una resistencia residual, debida a su tenacidad, que dificulta la rotura entre

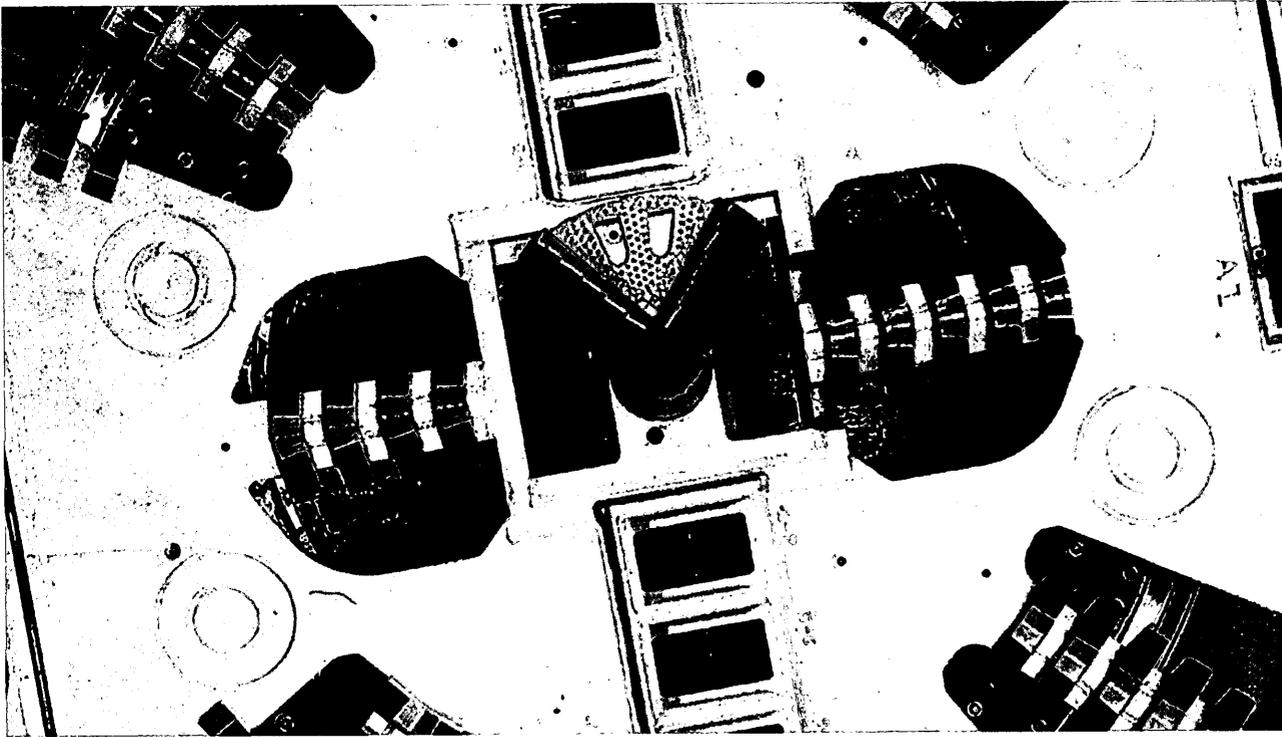


Figura 10.
Herramienta
central de
corte.

dos huellas contiguas, dejando surcos marcados sin completar la rotura.

c). Solución mixta: empleo de cortadores de disco y cinceles.

Por todo lo anterior, optamos por una solución mixta, de forma que las herramientas fueran capaces de excavar tanto terrenos blandos como duros. En los tramos de yesos masivos, los discos hacen un corte incompleto y a continuación los cinceles son los que se encargan de terminar de romper la franja de terreno situada entre huellas contiguas.

Por el contrario, en los tramos de terrenos blandos, peñuelas y toscos, los cinceles son los que trabajan rozando el terreno, e impidiendo que los discos puedan llegar a bloquearse si el terreno es muy pegajoso.

d) Distribución de las herramientas de la rueda de corte.

El radio de acción de los cortadores de disco y de los cinceles, se distribuyó en el frontal de la rueda alternando las correspondientes pistas de corte. Es decir, los cortadores se colocaron con una separación de 200 mm disponiendo los cinceles con análoga separación pero alternados con los anteriores para crear huellas intermedias a 100 mm de distancia de las de los cortadores contiguos. De esta forma se produce el mecanismo de corte descrito.

El número de cinceles que pasa por cada pista aumentó desde el centro hacia los extremos. En las pistas 1 a 9 no fue posible disponer más de un cincel por cada sentido de giro,

mientras que, en las pistas más externas, pasan 4 cinceles por cada huella, para cada sentido de giro de la TBM. Así se evitó que se produjeran desgastes por abrasión en la estructura de la cabeza a lo largo de una pista que pudiera haber sin herramienta. Es esta una diferencia importante respecto las TBMs del Plan anterior.

En total hay 21 cortadores de disco, de los cuales dos son cortadores de gálibo para facilitar la excavación en curva. Por otra parte, se dispusieron 16 herramientas fijas de gálibo ("rastrillos") en la zona de la periferia, de forma que son 8 (la mitad de ellas) las que realiza el corte en cada sentido de giro. De este modo se mantiene el diámetro de excavación a la vez que se produce una limpieza rápida de la zona perimetral.

e) Herramienta central

La herramienta central típica de las Tuneladoras de roca es un cortador múltiple, de 4 ó más discos, completando a veces con dos de doble disco dispuesto en cruz: la rotura frágil hace caer el escombro que lo recogen los cangilones perimetrales.

Ya se comprende que en un escudo, en que el escombro ha de entrar directamente a la cámara, no se pueden hacer aberturas centrales de tamaño suficiente, teniendo que "orientar" el escombro hacia las más próximas, lo que no puede hacer la herramienta de disco, que produce una masa de suelo adherida a la cabeza, que impide el avance.

Por ello, adoptamos un diseño de mandril central, formado por dos rejas en ángulo de algo más de 90° y equipadas con metal duro en los labios de corte (Figura 10). El diseño sufrió

variaciones hasta llegar a un modelo muy robusto, sin entradas centrales y en el que las rejas orientaban el escombros hacia las aberturas más próximas.

4.2. PARÁMETROS DEL ESCUDO

Los parámetros básicos del nuevo escudo se fijaron de acuerdo con las consideraciones, siguiente:

a) Características de los terrenos a atravesar

- Los tramos VII a IX del Proyecto Metrosur presentan por una parte, tramos similares a los conocidos en las obras del Plan anterior (1995 – 1999), básicamente suelos muy cambiantes con zonas de alta cohesión por una parte y otras de elevada abrasividad. Con frecuencia aparecen intercalaciones yesíferas de poca potencia que no tienen relevancia especial.
- Característica singular, no obstante, fue la presencia significativa de yesos masivos de estructura kárstica, a su vez rellena con suelos arcillosos muy plásticos.

b) Empuje nominal máximo (F_n)

- En los escudos $\Phi_{exc} = 9.40$ m del Primer Plan no llegaron a rebasar las 5.000 t de empuje máximo a lo largo de su trabajo, sin llegar a situaciones de "atrapamiento" o "bloqueo" de la máquina, que podían esperarse de tener que atravesar zonas de terreno muy suelto, con un recubrimiento significativo.
- Ahora bien los yesos duros recomendaban mantener cifras más altas, que también podían ser necesarias en terrenos de relleno. Por ello, se mantuvieron las cifras máximas de las 4 máquinas anteriores:

$$F_n = 8.000 \text{ t para régimen continuo}$$

$$F_n \approx 9.500 \text{ t para desbloqueo}$$

c) Par de giro nominal máximo (Mg_n)

Por el contrario a lo sucedido con el Empuje, la experiencia del Plan 1995 – 99 había evidenciado fundamentalmente dos cosas:

- Dimensionamiento insuficiente del Par, por debajo de la cifra especificada de $Mg = 2.000 \text{ T x m}$, que se demostró totalmente necesaria.
- Necesidad de un rediseño de las reductoras ROLLSTAR, aumentando su vida técnica.

En consecuencia para el nuevo escudo, se adoptaron las cifras básicas siguientes:

$$Mg_n = 2.024 \text{ t x m para régimen continuo}$$

$$Mg_n \approx 2.400 \text{ t x m para desbloqueo}$$

d) Condiciones adicionales

- Dada la preferencia del adjudicatario de la obra a favor del accionamiento hidráulico, se aumentó de 14 a 17 el número de motores, a fin de reducir los esfuerzos unitarios en cada uno de los piñones de ataque a la corona.
- Se adoptaron reductoras de aceite denso con refrigeración adicional por agua y capacidad de 119 t x m por unidad en funcionamiento continuo.

En resumen, en el cuadro 1 (página siguiente) se muestran las especificaciones técnicas definitivas, de los principales elementos de la tuneladora.

7. CONCLUSIONES

A primeros de marzo de 2002 se completó la construcción de los 7,6 Km del túnel de línea de los Tramos VII a IX del Proyecto Metrosur, con el escudo Herrenknecht de nuevo diseño (Figura 11, en la página 47), habiendo realizado con éxito los trabajos en las zonas de máxima proporción de yesos masivos alternados con suelos arcillosos con yesos.

Los principales problemas resueltos a lo largo de la construcción del túnel fueron los tres siguientes:

- Tendencia al giro del escudo al excavar la roca yesífera (yesos masivos), ya que se produce una superficie de corte muy lisa que no aporta el rozamiento debido a la carcasa del escudo para su estabilidad al giro, como sucede con los suelos.

El problema se resolvió soldando a la cara exterior del escudo unas barras de acero longitudinales, cuyas huellas de incisión en la roca sirvieron para lograr dicha estabilidad.

- Formación de grandes bloques de material dentro de la cámara, debido al fraguado del yeso excavado que, con el enorme calor generado en el corte mecánico se transforma en yeso anhidro. La dimensión de tales bloques (a veces una masa dura que ocupaba más del tercio inferior de la cámara) obstruía la entrada al tornillo, impidiendo toda posibilidad de avance.

Se ensayaron sin éxito soluciones químicas (añadiendo inhibidores de fraguado del yeso) y se tuvo que recurrir a colocar gruesas barras metálicas fijadas al mamparo de la cámara, que rompían los bloques al girar estos adheridos a los brazos de la cabeza de corte.

- La gran pegajosidad de las arcillas plásticas que rellenaban las cárcavas de disolución de los yesos, lo que impedía su entrada a la cámara y el manejo dentro de la misma. La combinación de las espumas y polímeros desincrustantes resolvió el problema.

Consecuencia de todo ello, ha sido un rendimiento medio mantenido de 14 anillos/día en los últimos 4 me-

CUADRO 1. ESPECIFICACIONES PRINCIPALES

Generalidades:	Escudo tipo EPB. Presión máxima operativa de 3,5 bares. Diámetro unidad de corte: 9.330 mm. Longitud total: 8.680 mm. Peso aproximado: escudo, 454 t; cola del escudo, 63 t.
SISTEMAS DE EMPUJE Y DE ARTICULACIÓN DEL ESCUDO	
Cilindro de propulsión:	Potencia instalada: 132 Kw; nº de cilindros = 2 x 13 = 26 (4 grupos) Carrera = 2.200 mm. Fuerza total de empuje: 10.000 t.
Cilindros de articulación:	Velocidad de avance: 0-80 mm/min Nº de cilindros: 13. Carrera: 150 mm. Fuerza total de tracción: 10.000 kN.
RUEDA DE CORTE	
Dimensiones y composición:	Diámetro: 9.330 mm. Estructura de acero con un peso aproximado de 125 t. Abertura aproximada 31%. 2 sentido de giro.
Datos técnicos:	Giro: 0-3 r/min; 0-1,48 r/min, 1-0 3 r/min Par de desbloqueo (aproximado): 24.000 kNm. Potencia instalada: 2.800 kW.
Accionamiento:	17 Motorreductores hidráulicos. 17 Piñones con doble alojamiento. Diámetro: 5.000 mm.
Herramientas:	196 Herramientas con potencia antidesgaste. 21 Alojamiento para cortadores de discos de 17". 2 Copy-cutters accionados hidráulicamente.
SISTEMAS INSTALADOS EN EL ESCUDO	
Erector:	Hidráulico proporcional; velocidad de giro, 2r/min; con 6 grados de libertad Sujeto en sistema de vacío a más de 80%. El vacío se mantiene durante varias horas.
Inyección de alta presión	Toberas de alta presión: 12 unidades. Suministro mediante paso giratorio preparado para soportar hasta 300 bares. Equipamiento de alta presión 90 kW. Caudal: 156 l/min, para 6 toberas. Presión 300 bar.
Conductos de mortero:	6 conductos dobles de inyección de mortero en la cola del escudo.
SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ESCOMBROS	
Transportador Sinfin:	Extensible (telescopio), sinfin transportador helicoidal, Tamaño máximo de grano: 350 mm. Velocidad de giro: 0-22.3 r/min. Capacidad de transporte: 550 m³/h Potencia instalada: 400 kW con 2 sentidos de rotación. Presión máxima en la compuerta de obturación: 4 bar.
Cinta de extracción:	Ancho: 1.200 mm Potencia instalada: 45 kW. Velocidad; 2,5 m/s Capacidad: 800 m³/h (1.340 t/h)
SISTEMAS INSTALADOS EN EL TREN DE APOYO (BACK UP)	
SISTEMA DE GUIADO:	Sistema de guiado SLS-T de VMT Programa de selección de anillos.
SEGURIDAD:	Extintores a través de todo el escudo y del tren de apoyo. Cortina de agua antihuco al final del remolque 3. Equipo de detector de gases CH ₄ O ₂ CO ₂ . Iluminación de emergencia la TBM y en los remolques.

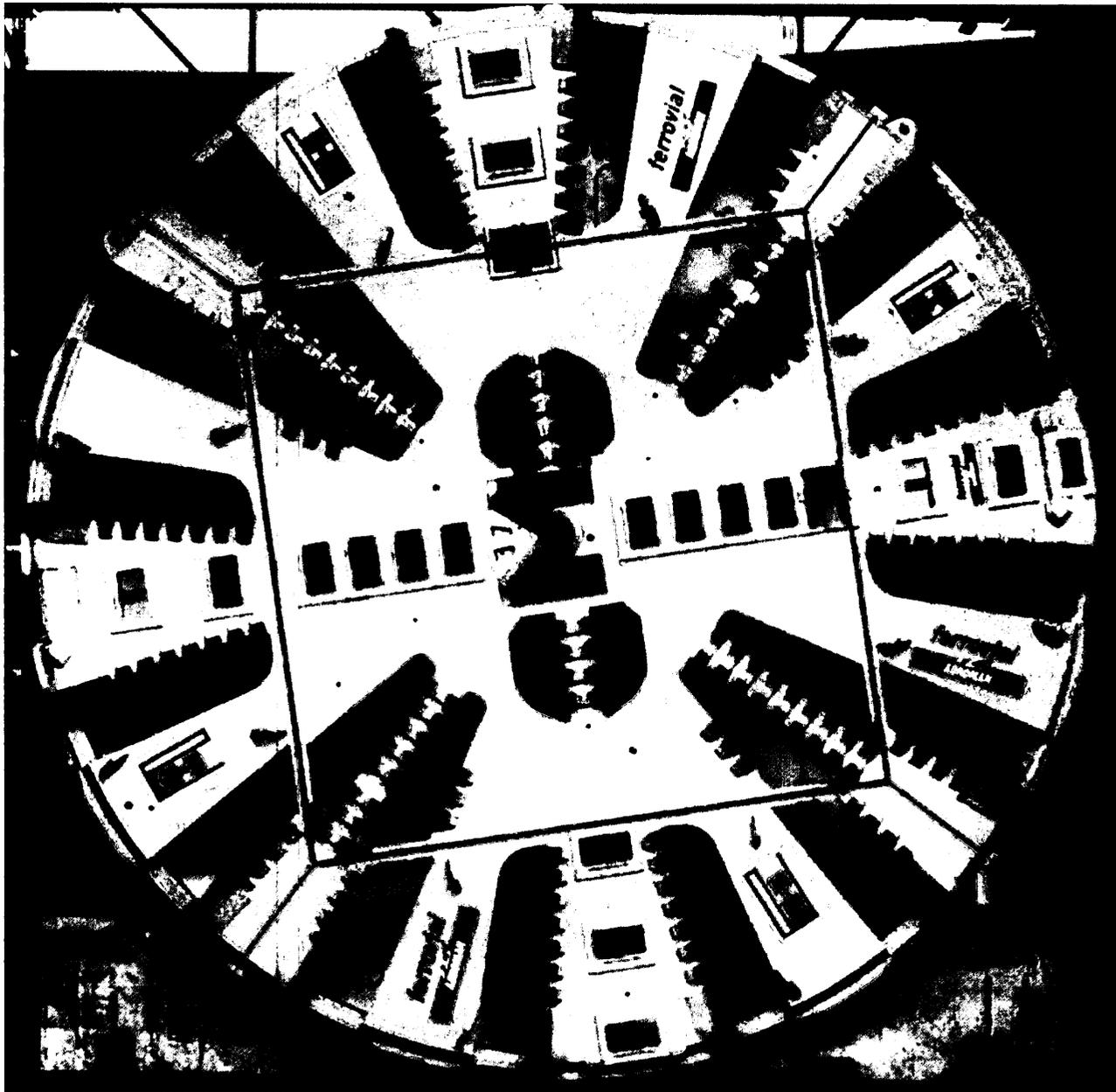


Figura 11. Escudo EPB para los yesos masivos y suelos de METROSUR (2000).

ses, y de 10 anillos/día desde el origen, excluidos los tiempos de paso de la máquina por las estaciones previamente construidas. Por ello puede decirse que el diseño básico adoptado ha tenido pleno éxito.

Por otra parte, el trabajo de la máquina nos ha permitido resolver otro tipo de problemas de carácter operativo, como son los resultados de los distintos tipos de herramientas ensayados; el tratamiento de las diversas clases de terrenos atravesados, según las proporciones de yesos y de arcillas; la problemática de aditivos recomendables según los casos, etc.

En resumen, la información disponible sobre todo estos problemas es muy importante y nuestro propósito es recogerla debidamente para proponer una serie de recomendaciones que per-

mitan disponer de información relativa a este tipo de terrenos que, hasta la fecha, era prácticamente inexistente en la tecnología concreta de los escudos de presión de tierras.

8. AGRADECIMIENTOS.

Hemos de agradecer las ayudas que recibimos para todos estos trabajos de los ingenieros de la Dirección de las obras y de la Asistencia Técnica, así como al personal técnico de la empresa constructora y a los Doctores Ingenieros de Caminos Canales y Puertos D. Felipe Mendaña Saavedra y D. Carlos Oteo Mazo por la colaboración, consejos y asesoramiento prestados durante su realización. ■