

Tuneladoras de Presión de Tierra para el Plan 1999-2003 de ampliación del Metro de Madrid [2ª Parte: Nueva tuneladora para el Proyecto Metrosur]

Manuel Melis Maynar

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, M.Sc, MBA

Director General de Infraestructura del Transporte. Comunidad de Madrid

Felipe Mendaña Saavedra

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Asesor de la Comunidad de Madrid

Jesús M. Trabada Guijarro

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Jefe de Servicio de la Comunidad de Madrid

RESUMEN

METROSUR es el Proyecto de túneles más importante del PLAN DE AMPLIACIÓN 1999-2003 del Metro de Madrid, con una longitud de más de 40 km. Los tramos 7, 8 y 9 del mismo, con 7,5 km de longitud total, atraviesan formaciones kársticas de yesos masivos, con importantes rellenos de arcillas negras. Las características de estos terrenos recomendaron el empleo de una tuneladora de presión de tierra. Su diseño, que se ha basado, por una parte, en los de las tuneladoras empleadas con pleno éxito en el PLAN DE AMPLIACIÓN anterior, ha tenido en cuenta, por otra, los condicionantes de dichas formaciones kársticas, sobre las que la experiencia del trabajo con escudos es muy limitada. El artículo describe los estudios realizados y las características principales de la moderna tuneladora que se ha diseñado para estos trabajos.

ABSTRACT

The 40 km long METROSUR, the South Madrid Metro Extension, is the most ambitious tunnel project within the 1999-2003 EXTENSION PLAN for the Madrid Metro. The sections 7, 8 and 9 of this new underground line, with a total of 7.5 km, pass through karstic formations of massive chalk with black clay infills. The characteristics of these soils lend themselves to the use of an earth pressure balance TBM. This machine has been partly designed on the basis of the TBMs which were successfully employed on the preceding underground EXTENSION PLAN, and takes into account the nature of these karstic formations, and the very limited experience of shield tunnels in this type of soil. This article describes the studies carried out and the main characteristics of the modern EPB designed for these works.

1. LOS TERRENOS YESIFEROS DEL PROYECTO METROSUR

METROSUR es el nombre del Proyecto de ferrocarril subterráneo metropolitano, con trazado en forma de anillo, que dará servicio a los cinco municipios más densamente poblados del Sur de Madrid (LEGANÉS, ALCORCÓN, MÓSTOLES, FUENLABRADA Y GETAFE) que, con el Sur de Villaverde y algunos otros núcleos próximos en desarrollo, alcanzan una población de 1,5 millones de habitantes. Las obras más importantes del actual PLAN DE AMPLIACIÓN 1999-2003 del Metro de Madrid son las de este Proyecto, junto con sus enlaces a las redes de METRO y de Cercanías de RENFE de la capital.

El contrato para la ejecución de los tramos 7, 8 y 9 de METROSUR (ver Figura 1) que corresponden, prácticamente, al municipio de GETAFE, con una longitud total de 7,5 km (desde el PK 20 + 954) al PK 28 + 265), comprende, en principio, 6 estaciones, las denominadas G-2 / G-3 (Conexión RENFE)/ G-4 / G-5 / G-6 (Conexión RENFE) y G-7.

El trazado de METROSUR atravesará, en general, todos los niveles típicos de los terrenos detríticos del MIOCENO de Madrid, pero también las facies yesíferas del Este y Sureste del alfoz de Madrid, de las que, las más próximas a la depresión del Tajo presentan serias dificultades, debidas a las formaciones "kársticas" de yesos masivos. Ello unido a la alta densidad de edificación del Sector antiguo de GETAFE, decidió a la COMUNIDAD a ejecutar esta obra con tuneladora EPB para asegurar el cumplimiento de los plazos del Programa en estos terrenos que presentan la mayor dificultad. Los reconocimientos efectuados con sondeos y pozos pueden resumirse como sigue:

▼ 1ª Campaña de sondeos. Se realizó en dos fases (abril y agosto-septiembre de 1999) para el reconocimiento general de los tramos 7 / 8 / 9, detectándose ya las potentes

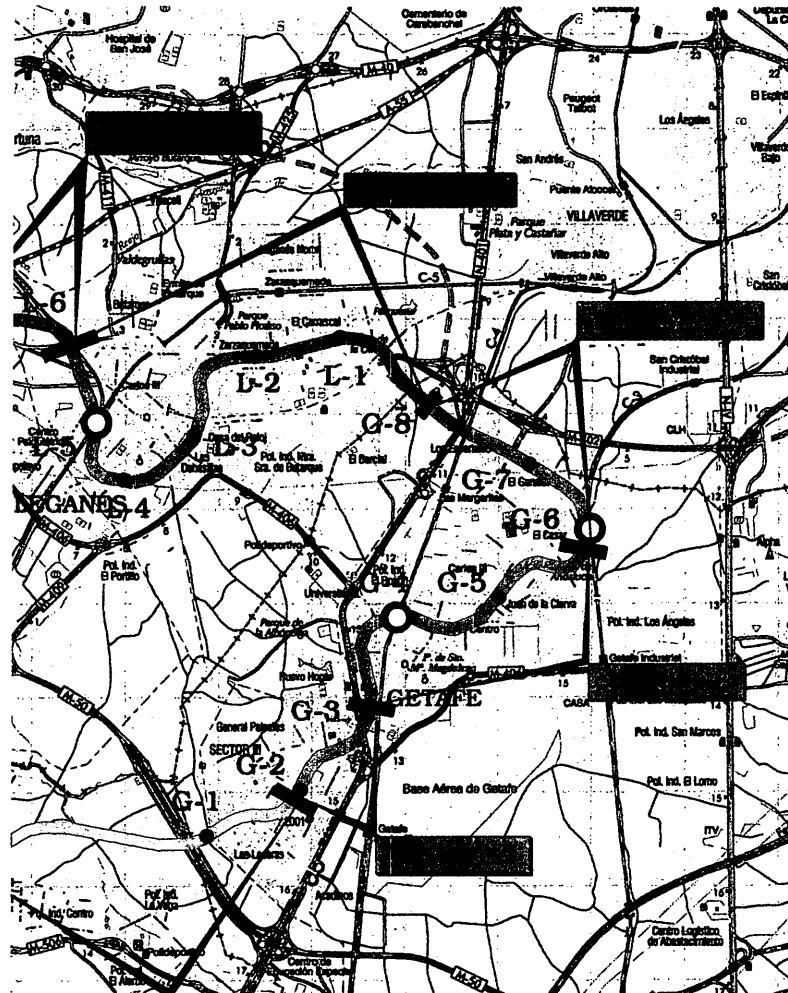


Figura 1.- Zona Este del Proyecto METROSUR.

nes similares. Con el fin de realizar un estudio específico del problema, se decidió la construcción de dos pozos de reconocimiento de 2 m de diámetro: el P-2 entre las estaciones G-5 y G-6 y el P-3, entre las G-6 y G-7. Estos pozos, aparte de confirmar la estratigrafía típica ya conocida por los sondeos, detectaron la presencia de importantes filtraciones de agua que, en el P-3 alcanzaron los 20 litros/s de caudal mantenido. Se comprobó que proceden de un gran nivel de aguas colgadas, que viene siendo utilizado históricamente para riegos de las fincas próximas.

▼ Experiencias de obras próximas. A todo lo anterior, se añadieron las experiencias de los miembros del equipo técnico de la Dirección General en formaciones próximas parecidas: excavaciones a cielo abierto en carreteras en ejecución; colectores construidos con "retro" o en túnel con rozadora en épocas anteriores -Mercamadrid, Arroyo Culebro, etc.; tuneladoras convencionales de los años 70-80 en las líneas 6 y 9 del Metro de Madrid y colector de Butarque de diámetro 2,7 m, actualmente en ejecución, además del Soterramiento del ferrocarril de RENFE a su paso por GETA-

capas de yeso masivo y los rellenos de las cavidades del "karst" por arcillas negras.

▼ 2ª Campaña de Sondeos. Se realizó a continuación (septiembre-99) para ampliar la información y añadir ensayos de caracterización de los terrenos. Confirmó la presencia de capas potentes de yeso masivo, muchas de ellas con importantes cavidades "kársticas" rellenas de arcillas altamente plásticas y algunas capas areniscas duras de potencia decimétrica (ver Figura 2).

▼ Pozos de reconocimiento. La COMUNIDAD DE MADRID estableció contactos con laboratorios especializados así como con los departamentos técnicos de fabricantes de tuneladoras, sin encontrar una experiencia práctica directa en formacio-

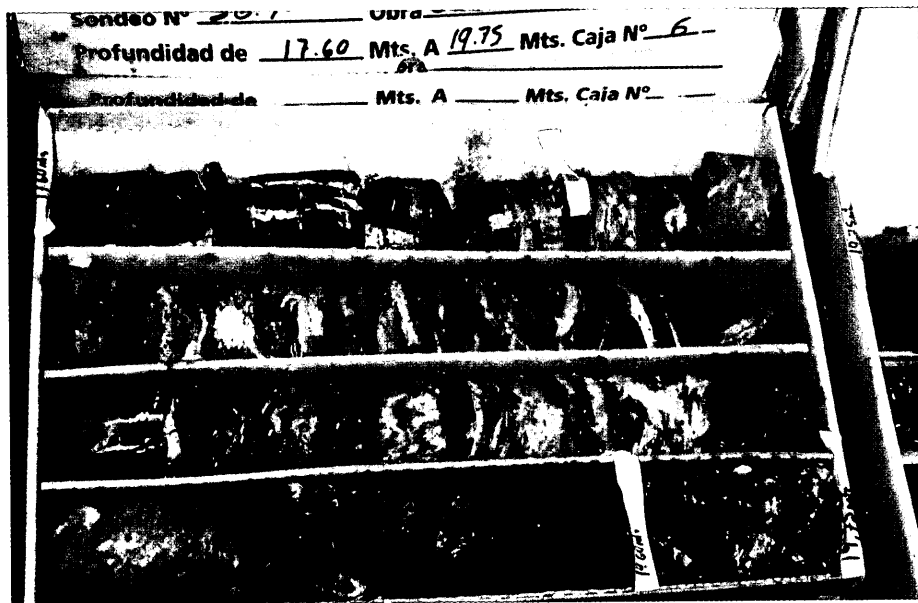


Figura 2.- Sondeos. 2ª Campaña de sondeos.

FE (G-3), dependiente de la misma Dirección General de la COMUNIDAD).

▼ Como resumen de todo ello, y para definir las características de la tuneladora lo más adecuada posible, se consideró que las secciones del túnel presentarían las alternativas siguientes: a) Capas típicas del MIOCENO de Madrid (arenas arcillosas y toscos arenosos) con intercalaciones de margas yesíferas de posible presencia en los 3 tramos; b) Terrenos de dificultad especial en los tramos 8 y 9 principalmente, donde abundarán los yesos masivos (aunque



Figura 3.- Yesos "Kársticos" excavados en el Pozo 3.

en la parte superior pueden aparecer niveles más blandos de arenas típicas de Madrid); c) Formaciones yesíferas potentes, pero con cavidades "kársticas" importantes rellenas de arcillas muy plásticas (ver Figuras 2 y 3) y d) Dificultad adicional de grandes caudales de filtración (20 lts/seg) en dichas formaciones yesíferas.

2. ESTUDIOS PARA EL DISEÑO DE UNA NUEVA TUNELADORA

Para la construcción de estos tramos se ofreció una tuneladora HERRENKNECHT de nuevo diseño que, partiendo del mismo proyecto básico de las antes construidas para el PLAN 1995-99, presentó ciertas novedades con vistas a afrontar los problemas de los terrenos cuyas características se acaban de

exponer.

Para este nuevo diseño asesoró al fabricante el Prof. Dr. Fritz GEHBAUER de la Cátedra de "Mecánica de Rocas - Aplicaciones a la maquinaria" de la Universidad de Karlsruhe, que dictó un Informe relativo al Proyecto de construcción de la tuneladora.

De las conversaciones mantenidas sobre Informe y diseño previo por los miembros del Equipo Técnico de la Comunidad, se llegó a un consenso sobre los puntos básicos a tener en cuenta, que se resumen seguidamente.

1. Concepto y campo de aplicación de las EPBMs

▼ Las EPBMs se han ideado para excavar suelos arcillosos-limosos y limo-arenosos de consistencia entre pastosa y blanda, con un contenido mínimo de finos del orden del 30% (Curva 1 de la Figura 4).

▼ Por ello, cuando el material no tiene esas características, como puede ser el caso al aumentar la proporción de yesos de dureza media, debe ser acondicionado debidamente en la cámara. Hoy día el acondicionamiento con suspensiones de bentonita y/o espumas y polímeros permite resolver el problema, si bien a costa de un gran esfuerzo en el estudio de las dosis de estos aditivos para cada tipo de terreno previsible.

CURVAS GRANULOMETRICAS DE LOS TERRENOS

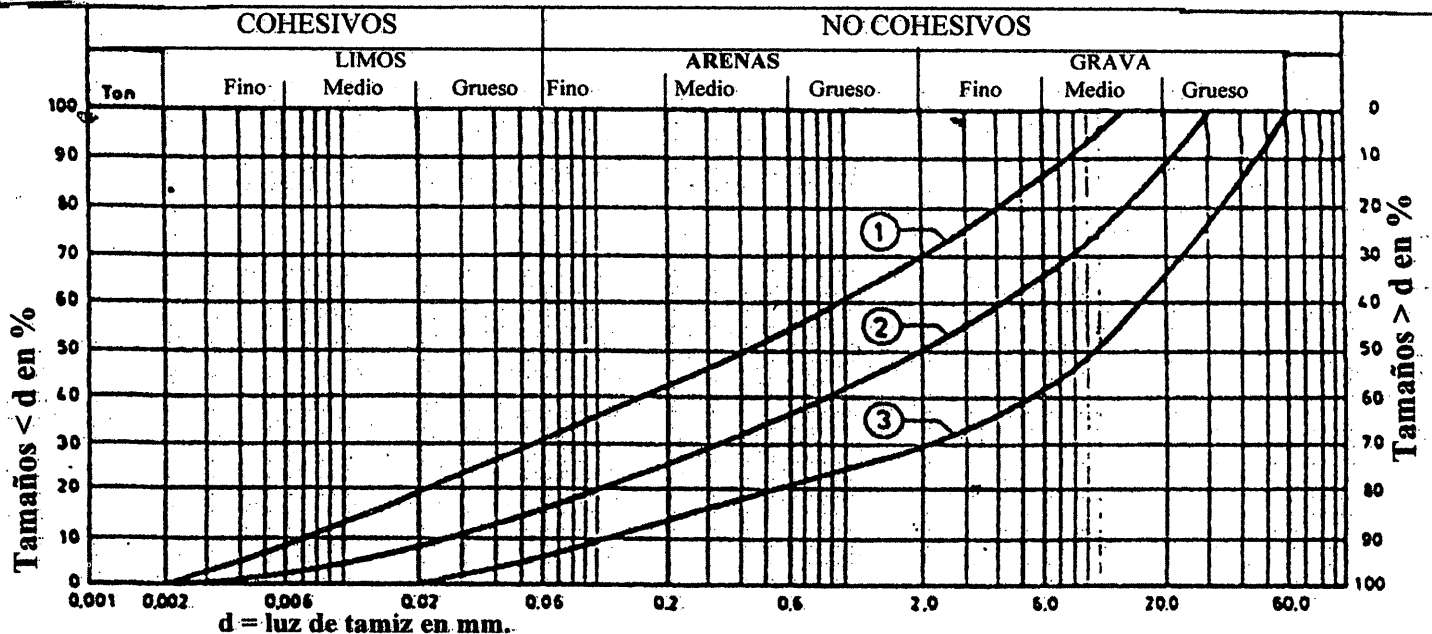


Figura 4.- Granulometría de los terrenos y aplicación de los escudos.

▼ Para lograr el transporte por cinta y vagones, la consistencia de la masa no debe ser excesivamente blanda, sino más bien pastosa (entre $I_c = 0,4 - 0,75$ e $I_c = 1$).

▼ Es usual que los escudos EPB tengan un total de aberturas de la rueda de corte del 25% - 30%. En algunos casos se adoptan aberturas superiores (Taipei: 42%) para dar paso a bolos o bloques de roca dura que no se pueden triturar previamente (como en los "hidros"), teniendo que adaptar a ello el diámetro del tornillo, por una parte, y el par de la cabeza, por otra. La apertura debe superar ligeramente el 30% en la nueva E.P.B.M.

2. Posibles dificultades de los terrenos a lo largo del trazado

TRAMO 7 (0 m - 2.634 m): En los 1.400 primeros metros se avanzará en "toscos" de alta plasticidad o "peñuelas" de plasticidad media a alta. No debe haber dificultades, ni siquiera al atravesar zonas más arenosas, capas carbonatadas o duras e, incluso, capas de yesos de espesor métrico. Se señala alguna dificultad de guiado en unos 300-400 m próximos a G-2, al existir roca dura en el borde inferior, muy diferente de la del resto de la sección. Por lo demás, y hasta el final del tramo, se atraviesan "peñuelas" y arcillas negras. La resistencia es inferior siempre a los 100 kg/cm², lo que no debe ser problema incluso si se usan sólo cuchillas de corte.

TRAMO 8 (0 m - 3.956 m): En los primeros 1.450 m se presentan arcillas negras con intercalaciones de yeso en la se-

miseción superior y de "peñuelas" en la superior con alguna capa dura, pero de poco espesor, de areniscas abrasivas, todo lo cual no debe ofrecer dificultades.

En el tramo 1.450 - 1.800 m aparece una capa de yeso que llega a los 4 m de espesor, con intercalaciones de arcilla negra. En los ensayos se midieron resistencias de 250 kg/cm² que quizás pueden resolverse sólo con las cuchillas convencionales. Es de esperar que para la preparación de la masa, el yeso combine bien con la arcilla, dada la proporción esperable.

En los 2.156 m restantes aparecen arcillas negras con intercalaciones de yeso. La muestra de arcillas negras del Pozo 2 se descompone rápidamente en agua. Hay un antecedente en Munich (años 95/96) en que un terreno similar no pudo ser transportado por cinta dada la fuerte descomposición del terreno al añadir agua. Por ello, para excavar la arcilla negra será necesario controlar la cantidad de productos de adición y, especialmente, de agua.

TRAMO 9 (0 m - 2.909 m): Está todo él en "peñuelas" y yesos. El tanto por ciento de éstos últimos es constantemente creciente, llegando a ocupar el 100% de la sección. Se hacen las siguientes observaciones sobre posibles dificultades:

▼ Será difícil convertir el yeso en una masa plástica, debido a su resistencia, y además el "acondicionamiento", aún con suspensiones de arcilla de alta viscosidad (o espumas y polímeros), estará dificultado por la permeabilidad al agua debido a las cavidades "kársticas" (caudales de unos 20 lts/s a presión del orden de los 2 Bar).

▼ En estos yesos, la TBM tendrá que demostrar su capacidad de excavar roca: la rotura del yeso en tamaños centimétricos aumentará la fricción y el par. Por debajo de la curva 1 de la Figura 4 aumenta considerablemente la fricción interna del material así como la permeabilidad al agua.

▼ De los ensayos de la Universidad de Karlsruhe se deduce que el yeso no es soluble en agua, lo que aumenta la dificultad que habrá para lograr una masa plástica, siendo previsible porcentajes altos de sustancias de adición, que no deben suponer problema en los vertederos, por ser productos biodegradables.

En resumen, y por lo que a los tramos de yeso se refiere, puede decirse:

▼ La "performance" del escudo EPB con agua subterránea a presión de unos 2 Bar entre las curvas 2 y 3 de la Figura 4, que es la peor situación prevista en METROSUR, puede ser aceptable. Por debajo de la curva 3, y si la permeabilidad es demasiado alta, los productos de adición (o acondicionamiento) pueden no tener efecto alguno.

▼ Dicho de otro modo, puede haber problemas si al cortar los yesos resulta un tanto por ciento de finos muy bajo y la presión del agua es alta. El problema no se resolverá con bombear agua, lo que, por el contrario, puede producir hundimientos.

▼ Unos primeros tanteos sobre consumo de espumas (con la fórmula de OBAYASHI u otras) para supuestos muy pobres en finos (10% hasta 0,08 mm y 20% desde esa cifra hasta los 0,42 mm), llevan a consumos tan altos, que se entraría en el rango de los líquidos, haciendo imposible el transporte por cinta. Por ello, puede adelantarse que la solución debe orientarse en el sentido siguiente: Avanzar a velocidad reducida para aumentar el tanto por ciento de finos por trituración del yeso y tener estudiadas fórmulas de adición de polímeros de los dos tipos complementarios (tensoactivo y espesante) disponibles hoy día, no insistiendo en el uso exclusivo de espumas.

3. Otras posibles dificultades

a) *Adhesividad del material:* Se considera un alto grado de adhesividad, si el índice de plasticidad supera valores $IP > 20\%$ (según varios autores), lo que sucede en las arcillas de los tres tramos (que tienen hasta $I_p = 72$). Ahora bien, I_p es solamente uno de los criterios para evaluar la adhesividad esperable y no es criterio decisorio sobre el riesgo de la "pegajosidad" del material a la rueda.

Por ello se utiliza también el Índice de consistencia (I_c) y los estudios de Tewes demuestran que los casos de mayor peligro (rango de I_c entre 0,75 y 1,25), suceden con minerales de tipo expansivo. Los ensayos de Karlsruhe han

confirmado este posible riesgo en METROSUR, al detectar la presencia de ilitas, que son arcillas expansivas.

La recomendación general es diseñar un porcentaje alto de "aberturas" en la superficie de la rueda de corte. En nuestro caso se recomendó alrededor de un 32%, lo que debe ser suficiente porque, además, y de acuerdo con las recomendaciones del equipo técnico de la Comunidad, la máquina tendrá recursos extraordinarios al disponer de ocho toberas de espuma y doce de agua de alta presión, con una de cada tipo en el centro.

b) *Herramientas de corte:* En un caso como el presente (suelos más rocas duras) hay que llegar a un compromiso sobre el uso de herramientas típicas de uno u otro tipo de terreno, combinando cortadores de disco y cuchillas. A este respecto puede decirse:

▼ Según Rutschmann, las cuchillas pueden usarse en terrenos de hasta 80 N/mm^2 (800 kg/cm^2), si bien hay autores que elevan este límite hasta los 90 N/mm^2 . Prinz propone clasificar como roca blanda la que presente una resistencia de hasta 60 N/mm^2 y menos de 25% de materiales abrasivos. En nuestro caso, la muestra de los yesos del túnel METROSUR llegaron a 25 N/mm^2 con una media del 12% de material abrasivo.

▼ Las 4 tuneladoras del PLAN 1995-99 están diseñadas para montar cortadores de disco pero se utilizaron solamente con cuchillas. Con ellas se atravesaron sin problemas terrenos de dureza similar a la antes mencionada si bien en capas aisladas y de poco espesor.

▼ En la literatura reciente sobre rozadoras y para llegar a los 100 N/mm^2 (1.000 kp/cm^2) se propugnan picas ("cuchillas de vástago cilíndrico") por su mejor penetración en la roca dura en vez de los convencionales cinceles ("cuchillas planas").

▼ Por otra parte, Fliegner aporta la *tenacidad como característica adicional* a tener en cuenta y propone definirla por la relación entre las resistencias a compresión y a tracción. Para rocas sedimentarias (como los yesos de Madrid), una relación superior a 10 indica mayor fragilidad (menor tenacidad). Según los ensayos de Karlsruhe, esa relación es < 10 , debiendo esperar un menor rendimiento de la excavación, y por ello si se parte de un módulo elástico de 400 N/mm^2 (4.000 kg/cm^2), debe esperarse que el yeso se deformará 40 a 50 veces más que un hormigón antes de la rotura y ello es desfavorable al arranque con cortadores de disco.

En resumen, las conclusiones sobre el particular fueron las siguientes:

▼ *Picas planas con bordes de metal duro:* La duración media esperable es de 500 m de avance de la tuneladora,

según el fabricante, y el diseño se considera bueno porque, en definitiva, debe primar la experiencia de aquel para decidir el tipo de herramientas para rocas blandas y HERRENKNECHT propone las cuchillas planas (o cinceles).

▼ *Cortadores de doble disco:* Como puede haber zonas de yesos, de resistencia mayor que la máxima obtenida de las muestras, así como la posibilidad de atravesar muros de hormigón, se espera que los discos faciliten, en todo caso, la labor de las cuchillas planas.

En definitiva, el resumen del consenso a que han llevado los estudios realizados fue el siguiente:

▼ La TBM HNK-S165 es un diseño básico adecuado a los terrenos de los tramos 7, 8 y 9.

▼ Las 12 toberas de agua a alta presión (300 Bar) pueden ser una ayuda importante para resolver el efecto de "pegajosidad" de las arcillas.

▼ La "abertura" del orden del 32% ha dado buenos resultados en máquinas EPB, reduciendo el peligro citado, aunque pudiera considerarse desfavorable para la estabilidad del frente.

▼ En cuanto a las herramientas, hay que aceptar un compromiso, admitiendo, en principio, cortadores de disco, dada la resistencia medio alta de los yesos, por lo cual:

▼ Pese a los posibles inconvenientes de los discos (más adhesividad de la arcilla y aumento de par de giro requerido), se asegura con ellos el debilitamiento inicial de la roca dura.

▼ En algunos tramos en que se han comprobado resistencias de los yesos menores de 10 N/mm² (100 kg/cm²), podrían no emplearse.

▼ Puede pensarse en usar cuchillas con ángulo mayor (40° - 45°) en limos y arcillas poco abrasivos.

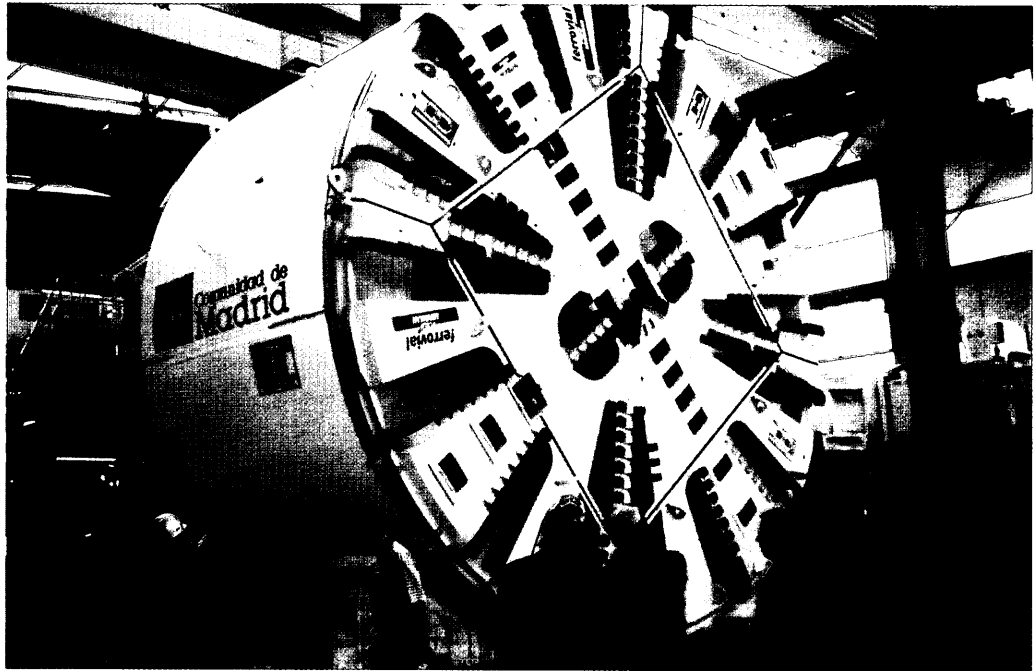


Figura 5.- Vista de la cabeza de corte.

vos añadidos para dar una respuesta adecuada al desafío que suponen las formaciones descritas. Seguidamente se resumen las características principales de la máquina.

3.1.- Rueda de corte

Además de un reparto en sectores diferentes para facilitar el transporte, las modificaciones más importantes son (ver Figura 5):

▼ Aumento de la superficie de "aberturas" hasta el 31,5% del total, con lo que se facilitará la entrada de bolos o bloques de yeso o arcilla. Aumento adicional del volumen de la cámara que equivale a un 40% sobre diseños anteriores.

▼ Herramientas de corte de dos tipos: 21 cortadores de roca de doble disco Ø 16,5" (420 mm), más 100 cuchillas convencionales y 2 "copy cutter".

Se han dispuesto las cuchillas, de modo que el esquema de las huellas de corte tiene una separación uniforme de 100 mm entre huellas. La separación entre ellas y entre los filos de un cortador de doble disco es la misma (100 mm) y queda un espacio de 200 mm entre dos discos contiguos, centrado con el cual hay siempre una huella de cuchillas.

▼ Nueva distribución de las cuchillas convencionales en los brazos de la TBM de modo que haya siempre más de una pasando por cada huella y eso en ambos sentidos de giro.

3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA TUNELADORA

Respecto de los equipos anteriores de la misma marca, la nueva tuneladora HERRENKNECHT - S165 presenta diferencias importantes, tanto en sus capacidades, como en los dispositi-



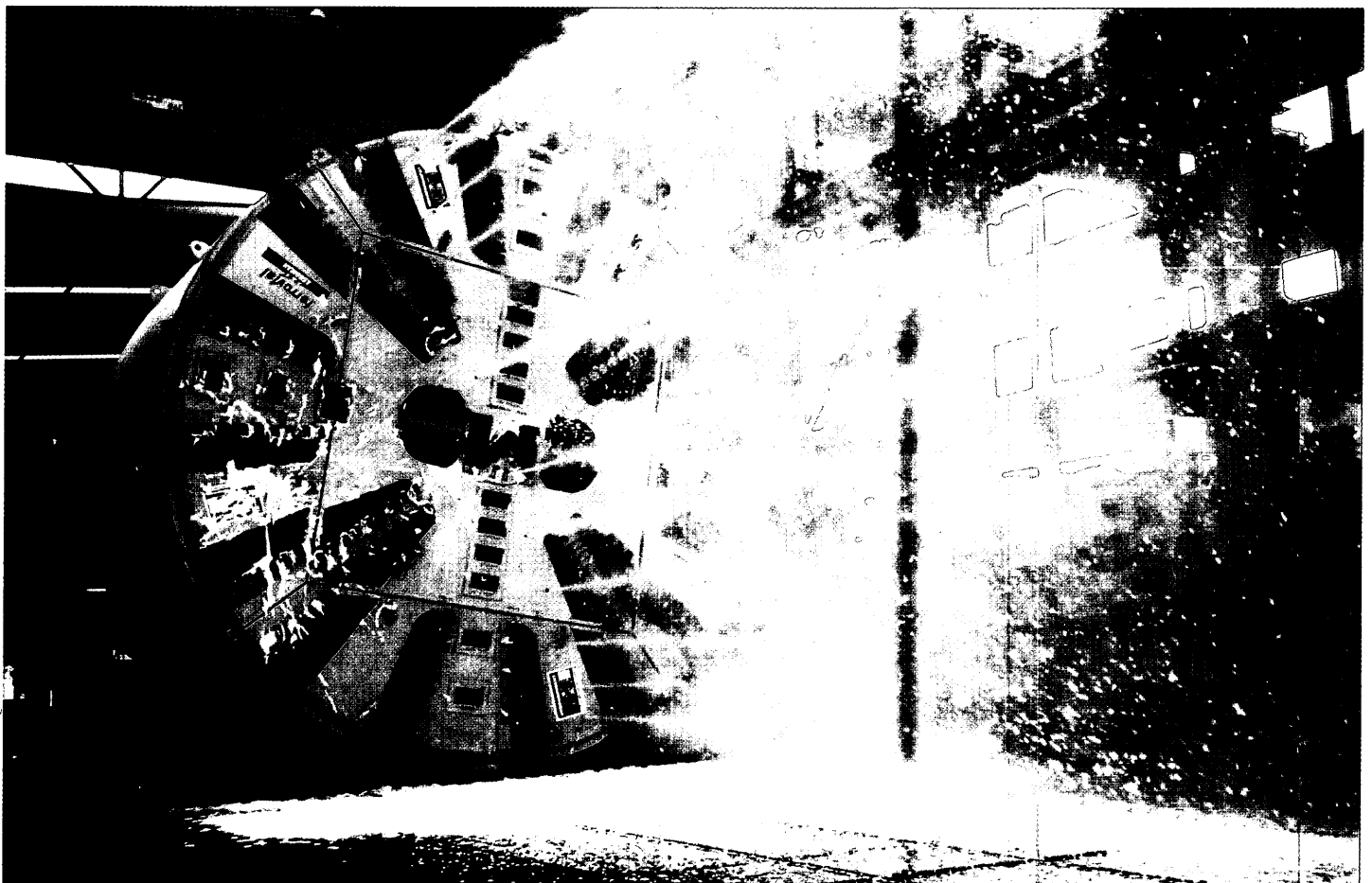
Figura 6.- Parte central de la rueda y prueba de inyección de espumas (baja presión)
Abajo, figura 7.- Prueba de los ductos de alta presión.

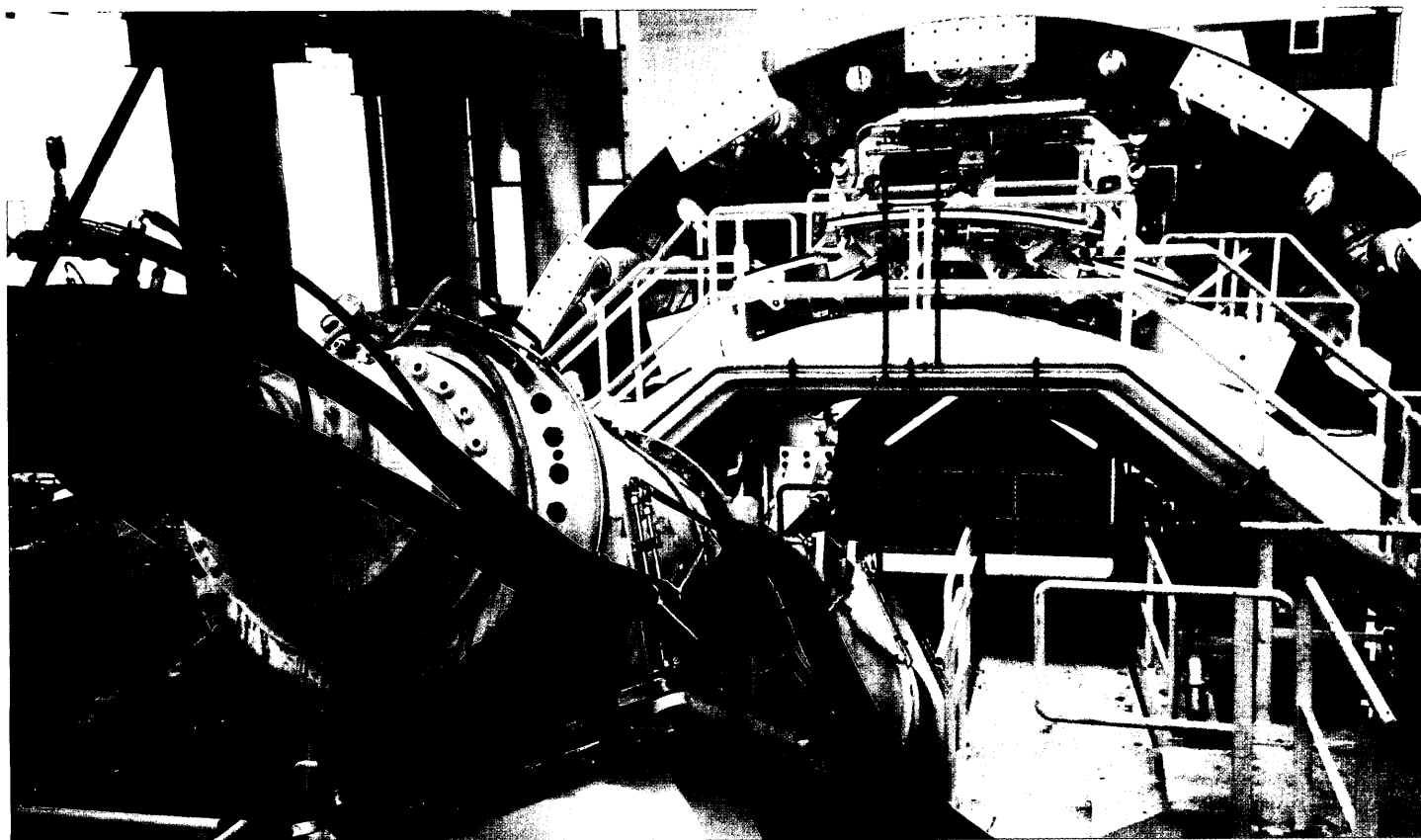
Por otra parte, su longitud se ha reducido a 140 mm (comparada con los 160 mm de las anteriores máquinas), de modo que su corte va retrasado unos 5 cm respecto del de los discos que debilitarán previamente la roca.

▼ Nuevo diseño de la parte central, de mayor simplicidad (Figura 6), así como del sistema de "paso giratorio" para los conductos de inyección al frente de espumas o de agua a alta presión. En la Figura 7 pueden verse las pruebas en factoría de estos últimos.

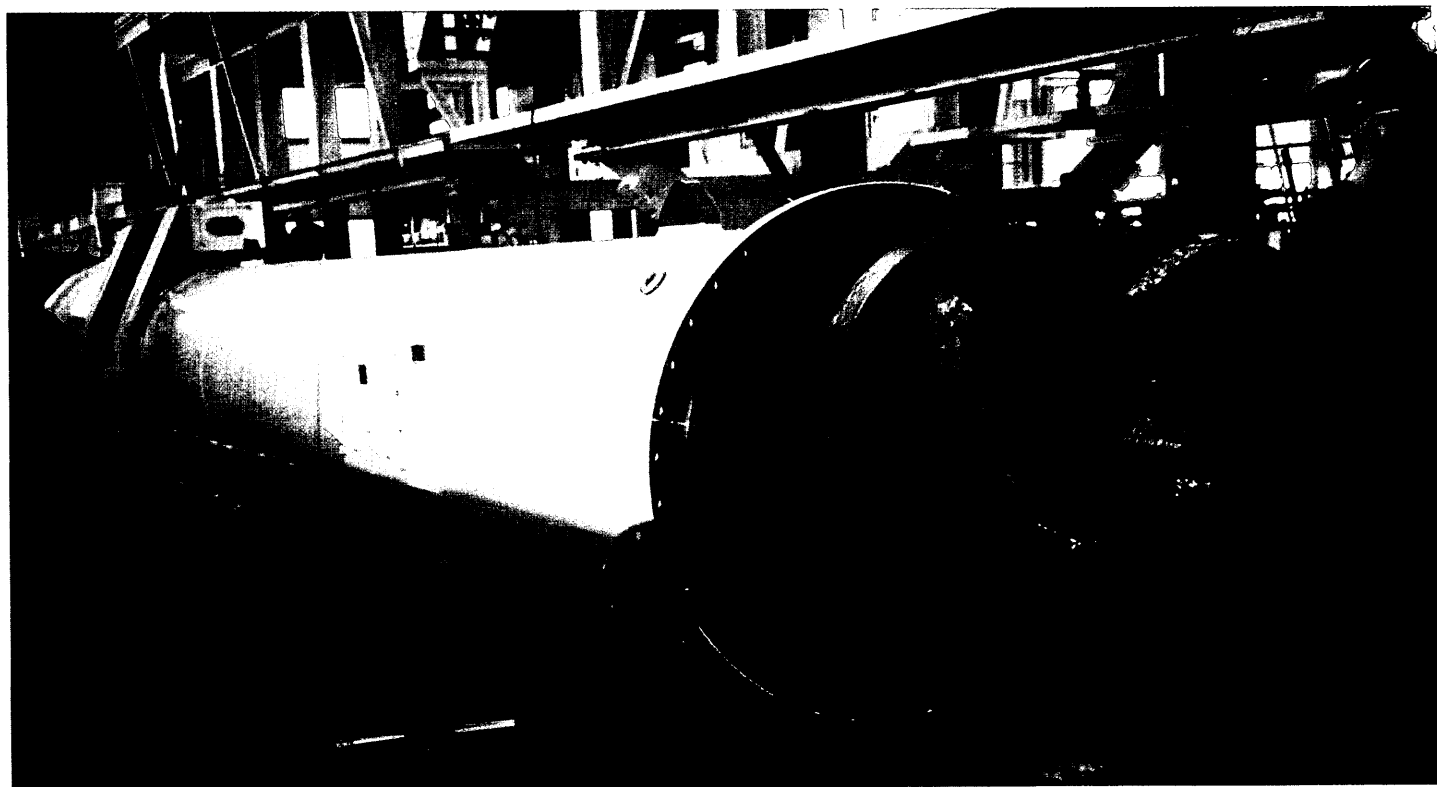
3.2.- Tipo de diseño y parámetros básicos del mismo

a) *General:* Diseño EPB (7 células en la cámara) con mamparo es-





**Figura 8.- Motor y reductora del tornillo sinfin (HERRENKNECHT - S165).
Abajo, figura 9.- Tornillo sinfin (extremo anterior) y hélice con borde reforzado.**



tanco para trabajar en continuo hasta 3 bar. $\varnothing_{exc} = 9.330$ mm. Longitud total $l = 8.680$ mm (Cabeza: 1.310 mm / Escudo: 3.420 mm / Cola: 3.950 mm). Articulación para curvas de $R_{min} = 250$ m.

b) *Empuje longitudinal*: 13 conjuntos de 26 (13 x 2) cilindros de empuje repartidos en 4 sectores. Carrera: 2.200 mm. Parámetros básicos:

- ▼ Empuje máximo nominal (continuo): $F_n = 8.000$ t
- ▼ Empuje máximo instantáneo (desbloqueo): $F = 9.500$ t (~ 20% sup. a F_n)

c) *Rueda de corte*: 17 motorreductores hidráulicos con refrigeración adicional por agua. 2 sentidos de giro. Velocidades de 0 a 1,48 rpm (I) y de 0 a 3 rpm (II). Potencia total instalada: 2.800 kW. Diseño de satélites análogo al estudiado para la modificación de las máquinas del PLAN 1995-99. Parámetros básicos:

- ▼ Par máximo nominal (continuo): $Mg_n = 2.024$ mxt (\varnothing 119 mxt por reductora)
- ▼ Par máximo instantáneo (arranque / desbloqueo): $Mg = 2.400$ mxt (18,5 % superior a Mg_n)

d) *Articulación*: 13 cilindros $F_{Total} = 1.070$ t

3.3. Extracción de escombros

La tuneladora "HERRENKNECHT S-165" monta un solo sistema de extracción por tornillo sinfín, lo que aumenta el espacio disponible en la parte alta de la máquina (Figura 8). Se mantiene el sistema de transporte de escombros en vagón sobre vía, pero se dispondrá de vía doble en todo el túnel. Las características más destacables de la extracción son:

- ▼ Tornillo sinfín extensible \varnothing 1.000 mm y 16.180 mm de largo / 22 módulos de hélice de borde reforzado (63 – 100 mm de espesor y 630 mm de separación) / 3 ventanas para control y reparación / 1.500 mm de carrera del telescópico. Tamaño máximo de las piedras: 350 mm. Ver figura 9.
- ▼ Par máximo: 28 txm / $V = 0-22$ rpm / Capacidad de transporte: 550 m³/hora / Potencia instalada 400 kW con un motor hidráulico de accionamiento y 2 sentidos de rotación / Presión máxima en compuerta de obturación: 4 Bar.
- ▼ Carga de vagones: Cinta primaria de 52 m y 1.200 mm de anchura / 2,5 m/s de velocidad y capacidad de 800 t/hora (45 kW) / Pesaje directo. Cinta reversible para carga

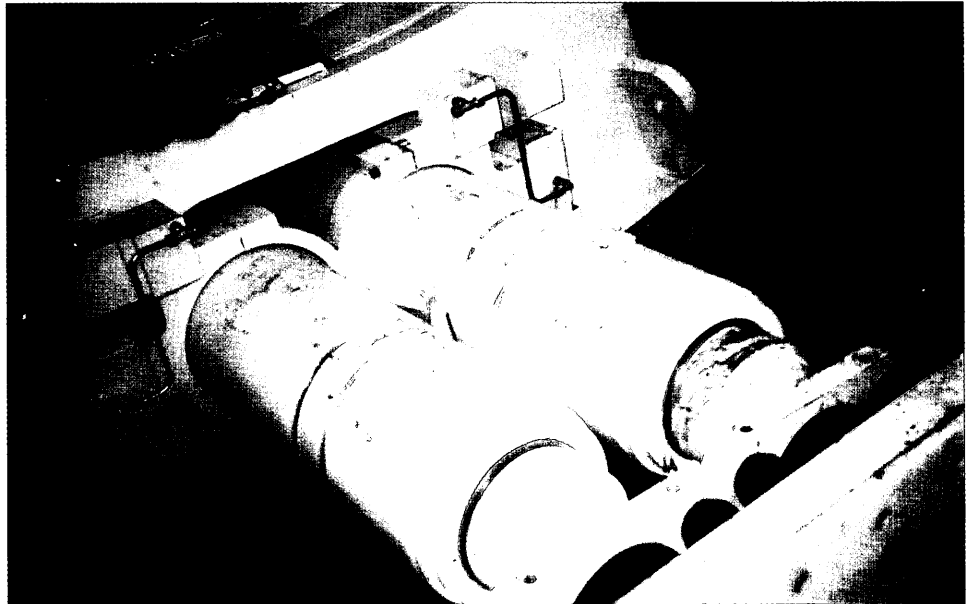


Figura 10.- Detalle del centrador hidráulico de los gatos de empuje.

vagones de 25 m y 1.200 mm de ancho / 2,5 m/s de velocidad y 800 t/hora (45 kW).

3.4. Otras características de la tuneladora

a) *Reconocimientos e inyecciones a través del escudo*

- ▼ Esclusa de dos cámaras para personal (2 x 3 personas // 2 x 5 m³)
- ▼ Orificios para sondeos (6 \varnothing a 12° + 2 \varnothing a 0° a través mamparo)
- ▼ Conductos mortero (Forma y \varnothing : DN65) 6 conductos dobles
- ▼ Lubricación camisa: 12 orificios con válvula de 2"
- ▼ Inyección de alta presión: 6 + 6 toberas con capacidad de 156 l/min a 300 Bar para grupo 6 toberas
- ▼ Inyección bentonita / espumas: 8 toberas

b) *Elementos singulares del escudo*

- ▼ Zapatas de apoyo de los cilindros de empuje con menor excentricidad que en las máquinas anteriores. Además, se adoptó el diseño de HNK de "centradores hidráulicos" para autocorregir las posiciones con el propio autómatas de la máquina, antes de volver a aplicar el empuje (Figura 10).

c) *Erector de dovelas*

- ▼ Análogo al de las máquinas anteriores, lleva 3 placas de succión (una de ellas para la pieza clave) con capacidad doble de la carga de la dovela más pesada y 30 min de tiempo de sujeción con el depresor de vacío en "of".



Figura 11.- Rodillos de apoyo del "back-up" (TBM HNK - S165).

d) *Nuevo diseño del "back-up"*

▼ Vista la conveniencia de instalar doble vía en todo el túnel, el "back-up" hubo de rediseñarse según una estructura abierta (es decir, sin travesaño inferior) para aumentar el gálibo necesario para el llenado de vagones a uno y otro lado de la cinta de reparto.

Elemento básico de ese diseño son los "bogies", que llevan sus 2 x 2 rodillos revestidos de "teflón" (Figura 11). Con ello cada "bogie" puede dar los giros necesarios para mantener el "back-up" centrado con el eje, además de disponer de un mecanismo para corregir posibles desplazamientos.

4. CONCLUSIONES

Como resumen general de lo que la Dirección General de Infraestructura espera de las tuneladoras de gran diámetro que están iniciando sus trabajos en el PLAN DE AMPLIACIÓN 1999-2003 del METRO DE MADRID, podemos decir:

▼ Las 4 tuneladoras del PLAN anterior han sido mejoradas con elementos de nuevo diseño que las convierten, una vez más, en las máquinas EPB de última generación más adecuadas a los terrenos típicos de Madrid.

▼ Con ello se espera que los rendimientos medios del nuevo PLAN DE AMPLIACIÓN mejorarán los del anterior, calificados de excelentes y no superados por ningún otro proyecto en todo el mundo.

▼ En cuanto a la tuneladora EPB de nueva construcción, debe calificarse como modelo de la última generación de escudos de presión de tierra.

▼ Finalmente, debe señalarse la dificultad con que va a trabajar esta máquina, en condiciones difíciles por las filtraciones y por el tipo de terreno, de lo que no hay experiencia suficiente. No se puede asegurar qué nivel de éxito se logrará, pero sí que no se escatimarán esfuerzos para lograr los objetivos del PLAN y poder ofrecer a nivel mundial una experiencia que hoy falta y que permitirá afrontar futuros casos semejantes. ■