

La ejecución de túneles con tuneladora en la Ampliación del Metro de Madrid

Construction of tunnels with EPB in the Madrid Metro Extension

Jesús Trabada Guijarro. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Consejero Delegado de MINTRA. Director General de Infraestructuras del Transporte de la Comunidad de Madrid.
jesus.trabada@mintramadrid.es

Raúl Talavera Manso. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Madrid Infraestructuras del Transporte, MINTRA. raul.talavera@mintramadrid.es

Resumen: En el presente artículo se resumen las principales directrices y las experiencias más importantes obtenidas en la ejecución de túneles con tuneladora EPB en la Ampliación 2003-2007 del Metro de Madrid. En primer lugar, se hace una breve descripción de los terrenos de Madrid y de las tuneladoras EPB que han intervenido. Posteriormente se repasan los puntos básicos del planteamiento utilizado por MINTRA para acometer estos túneles. Por último, se tratan las experiencias más relevantes obtenidas y las conclusiones y recomendaciones que de ellas se pueden extraer.

Palabras Clave: Tuneladora EPB; Diseño; Operación; Calidad

Abstract: The present article summarises the main guidelines and the most important experiences gained from the construction of tunnels with EPB tunnel boring machine in the 2003-2007 Extension of the Madrid Metro network. The article starts with a brief description of the soil conditions in Madrid and the EPB machines employed in the work. The article goes on to summarise the basic guidelines established by the Madrid Transport infrastructure Department (MINTRA) for the construction of these tunnels, before describing the most relevant experiences obtained and the conclusions and recommendations that may be drawn from the same.

Keywords: EPB tunnel boring machine; Design; Operation; Quality

1. Introducción

La primera gran Ampliación del Metro de Madrid llevada a cabo entre 1995 y 1999 supuso la aparición de las tuneladoras de presión de tierras EPB como el método constructivo fundamental en la ejecución de los túneles de línea.

A lo largo de las sucesivas ampliaciones acometidas, el papel de las tuneladoras ha sido capital en el éxito de las mismas, y la experiencia adquirida ha redundado en la mejora continua de todo el proceso.

Esta mejora implica a las propias máquinas, a su operación, a los consumibles que emplea, a las dove-las que materializan el túnel, etc. y se ha traducido en recomendaciones dadas por MINTRA para mejorar en lo posible la seguridad y la calidad en la ejecución de los túneles.

2. Los terrenos de Madrid

Desde el punto de vista geológico, Madrid se inscribe dentro de la Cuenca de Madrid, unidad sedi-

mentaria menor incluida dentro de la Depresión del Tajo delimitada por las sierras de Guadarrama y Somosierra al noroeste, Altomira al este y los Montes de Toledo al Sur (Figura 1).

La Fosa del Tajo está constituida fundamentalmente por materiales terciarios y, en menor medida, cretácicos, cuyos afloramientos se restringen a los márgenes de la misma.

Se reconocen tres tipos de depósitos:

- Facies de borde (Facies Madrid), con formaciones detríticas de naturaleza arenosa (arenas cuarzo-feldespáticas) en los niveles superiores y más arcillosas en los inferiores.
- Facies Central, química (margas yesíferas, yesos y calizas).
- Facies de transición (arcillas margosas, núcleos de "chert" (cuarzo), arenas micáceas y arcillas de alta plasticidad).

Todos estos depósitos se distribuyen de forma que, moviéndose en dirección perpendicular a la Sierra, se

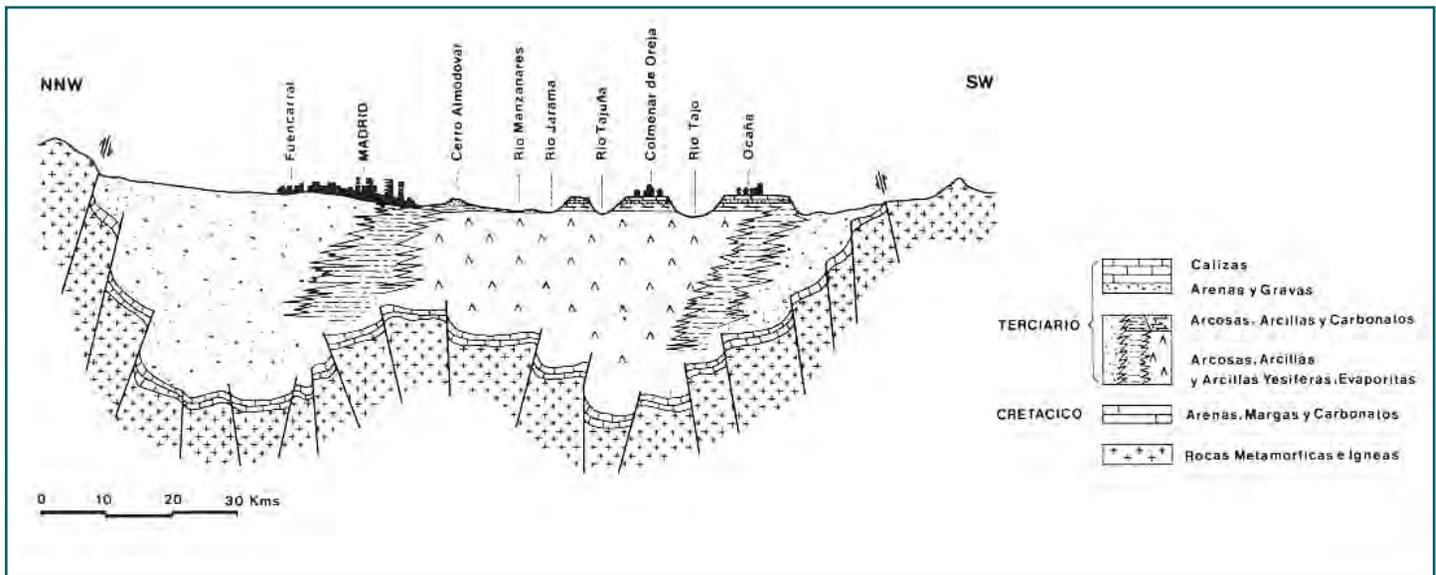


Fig.1 Cuenca de Madrid. (Geología, Geomorfología, Hidrogeología y Geotecnia de Madrid. VV.AA. Temas Urbanos de Ecología, núm. 10. Área de urbanismo e infraestructuras del Ayuntamiento de Madrid).

pasa de los sedimentos detríticos a los de transición (arcillas litificadas de alta plasticidad localmente denominadas peñuelas) y terminando en los yesos.

Desde el punto de vista de la excavación con tuneladora, la experiencia lleva a distinguir dos grupos de terrenos claramente diferenciados:

- Por un lado, los terrenos detríticos (alternancia de arenas y arcillas), donde los principales problemas que se pueden presentar son de desgaste de las herramientas por la alta abrasividad de las arenas y de inestabilidad. Las arenas suelen presentar entre un 40-60% de cuarzo.
- Por otro lado, están las formaciones de peñuelas y yesos. Más estables que las detríticas, el principal problema es la excesiva dureza de los yesos para las herramientas de suelos blandos.

3. Las EPB de Madrid

El Plan de Ampliación de la red de Metro de Madrid 2003-2007 ha supuesto la construcción de casi 90 nuevos km de línea, de los que 40,8 km han sido ejecutados con un total de diez tuneladoras EPB.

De estas diez EPB, seis ya habían ejecutado 39 km de la Ampliación 1999-2003 y otros 21 en la 1995-1999. Otras tres tuneladoras han sido de nueva fabricación y una más que, aunque reutilizada, era la primera vez

que trabajaba en Madrid. En el Tabla 1 se muestran las características básicas de estas EPB.

Las tuneladoras más antiguas (las NFM, las Herrenknecht S-120 y S-122, y la LOVAT) se concibieron para la excavación en terrenos detríticos. Tras la primera ampliación, la experiencia aconsejó revisar algunos aspectos, fundamentalmente referidos al accionamiento de la rueda de corte (el par motor estaba demasiado limitado) y al sistema de extracción del escombro de la cámara (se optó en exclusiva por el tornillo sinfín, en lugar de un sistema dual tornillo-cinta).

Tras los reconocimientos geotécnicos realizados para el contrato V de Metrosur, se decidió diseñar una nueva tuneladora (la S-165) teniendo en cuenta los terrenos yesíferos detectados, que planteaban nuevos problemas. El resumen de las decisiones tomadas respecto al diseño de esta EPB es el siguiente:

- Solución mixta de la rueda de corte, con cortadores de roca y cinceles de suelos, con una separación de 200 mm tanto entre discos como entre cinceles contiguos. Con esta disposición, el cortador de disco inicia la fragmentación de la roca y los cinceles, algo menos salientes, terminan la excavación venciendo la tenacidad del material.
- Mayor ángulo de ataque de los cinceles, para favorecer el corte de los terrenos duros.

Tabla 1. EPBs empleadas en Madrid 2003-2007

EPB	Fabricante	Diámetro Rueda	Empuje (kN)	Par (kNm)	Presión operativa	Extracción material	Obras	Obras Previas
Madriladora	HNK S-120	9,33 m	73.200	17.400	3 bar	Vagones de 17 m ³	Metronorte 1B (4,6km)	Metrosur IV (3,3km) Línea 8 (3,4 km) Línea 7 (3,4 km)
Chotis	HNK S-295	9,36 m	73.200	22.617	4 bar	Cinta de 1.100 t/h	Metronorte 1C-2A (5,5 km)	-
Metromachine	HNK S-280	9,33 m	73.200	22.617	4 bar	Vagones de 17 m ³	Metronorte 2B (5,5 km)	-
Verne	HNK S-274	8,92 m	70.613	17.197	3,5 bar	Cinta de 1.100 t/h	Conexión Líneas 1-4 (3,4 km)	Metro Oporto
Carpetana	HNK S-165	9,33 m	86.000	20.236	3 bar	Vagones de 17 m ³	Línea 1 (2,6 km) Línea 5 (2,1 km)	Metrosur V (6,5 km)
Rompearenas	LOVAT	7,35 m	30.200	5.590	-	Vagones de 14 m ³	Línea 7 tr 2 (2 x 2,1 km)	Cierre línea 10 (1,6 km) Línea 8 (2,1 km) Línea 10, tr 2 (6,1)
Mascastiza	HNK S-122	9,33 m	73.200	16.000	3 bar	Vagones de 17 m ³	Línea 7 tr 3 (5,7 km)	Línea 9 (3,4 km) Metrosur I (7,4 km)
Adelantada	NFM	9,38 m	80.080	16.730	4 bar	Vagones de 17 m ³	Línea 3 tr 2 (2,5 km) Línea 8 T4 (1,4 km) Línea 7 (3,2 km)	Línea 8 (3,6) Línea 10 tr 1 (2,7 km) Metrosur II (4,0 km)
Guster	HNK S-302	9,37 m	86.000	22.600	4 bar	Vagones de 17 m ³	Línea 3 tr 1 (4,3 km)	-
Excavolina	NFM	9,38 m	80.080	16.730	4 bar	Cinta de 1.100 t/h	Línea 11 (2,1 km)	Línea 4 (3,6 km) Línea 8 (1,4 km) Metrosur VI (6,2 km)

- Porcentaje de aberturas de la rueda de, al menos, un 32 %, para disminuir los problemas de pegajosidad.
- Barras batidoras en el interior de la cámara de escombros (zona periférica).
- Equipos de inyección de espuma capaces de conseguir unas tasas de tratamiento elevadas.
- Parámetros básicos de la máquina: empuje nominal de 80.000 kN y par nominal de 20.050 kNm.

Durante la ejecución de la obra, surgieron una serie de problemas adicionales, que se fueron solucionando sobre la marcha, realizando modificaciones en la propia tuneladora:

- Estabilización al giro del escudo. El corte liso de los yesos hace que el rozamiento sea bajo y la máquina se vaya girando por encima de los valores de rodadura permitidos pese a que habitualmente trabaja girando alternativamente la cabeza en ambos sentidos. Se solucionó soldando unos estabilizadores en la parte inferior del escudo, para aumentar el rozamiento.
- Pegajosidad de las arcillas en la zona central de la rueda de corte. Este problema se resolvió aportando mayor inyección de espumas.
- Fraguado del yeso en la zona central del interior de la cámara de escombros. Se incorporaron barras batidoras en esa zona, para mantener el



Fig. 2. Barras batidoras en cámara.

material en movimiento y evitar el fraguado (Figura 2).

- Rotura de la herramienta central (nariz). La nariz de origen no fue capaz, en algunos casos, de soportar los esfuerzos que se requerían en el empuje para producir la rotura del terreno. La solución fue rediseñar una nariz más robusta que resistiera dichos esfuerzos.
- Rotura de rastreles. La rotura de estas piezas de perfilado del gálibo, debido al gran esfuerzo que se requería para cortar el terreno, derivó en un nuevo diseño de herramienta en una única pieza, y con dientes de corte, de forma que los esfuerzos que antes soportaba un rastrillo se reparte entre varios, ya que los dientes también contribuyen al corte del terreno.

Todos estos problemas y sus respectivas soluciones aportaron una valiosa experiencia que se tomó en cuenta para el diseño de las máquinas nuevas y la adaptación de las existentes que se emplearon en el plan de Ampliación 2003-2007.

4. Estrategia general

Con la experiencia acumulada en las anteriores obras ejecutadas, se adoptaron una serie de medidas, de diversa índole, para mejorar el proceso completo de ejecución de los túneles con tuneladora. Estas medidas pueden agruparse en:

- Diseño de las máquinas
- Operación de las mismas
- Mejoras en materiales
- Mejora en los controles de calidad

4.1. Diseño de las EPBs

De acuerdo con las experiencias obtenidas con la tuneladora para yesos (S-165), para la última Ampliación se decidió incorporar estas mejoras tanto a las máquinas antiguas, como a las tres máquinas de nueva adquisición:

- Parámetros básicos Empuje y Par de giro con valores nominales de 86.000 kN y 22.600 kNm respectivamente (sólo en las nuevas EPB).
- Aumento del porcentaje de aberturas de la cabeza hasta el 32 % (sólo en las nuevas EPB).
- Posibilidad de variar el ángulo de inclinación de los cilindros de empuje, para ayudar a corregir la rodadura (Esta opción solo se realizó en una de las tuneladoras nuevas, la HK S-280).
- Posibilidad de sistema mixto de herramientas de corte; cortadores de disco para rocas y cinceles para suelos.
- Estabilizadores en la parte inferior del escudo. Refuerzo de la herramienta central de corte.
- Barras batidoras tanto en la periferia como en la zona central de la cámara de escombros.
- Sistema de inyección de espumas con caudales de 350 m³/h, para poder alcanzar tasas de tratamiento elevadas.

Además, a todas las máquinas se les decidió incorporar un sistema de básculas para pesar el escombro extraído, así como un sistema de inyección secundaria en el back-up para posibilitar las reinyecciones en trasdós.

Alguna de la máquinas (Verne, Chotis, Excavolina) utilizó la cinta continua como sistema de extracción del escombro.

4.2. Operación de las EPBs

Las experiencias previas (no sólo en Madrid) acumuladas en la ejecución de túneles urbanos con EPB llevaron a MINTRA a intentar unificar y sistematizar la operación de las EPB de cara a aumentar la seguridad y minimizar los riesgos de sobre-excavación.

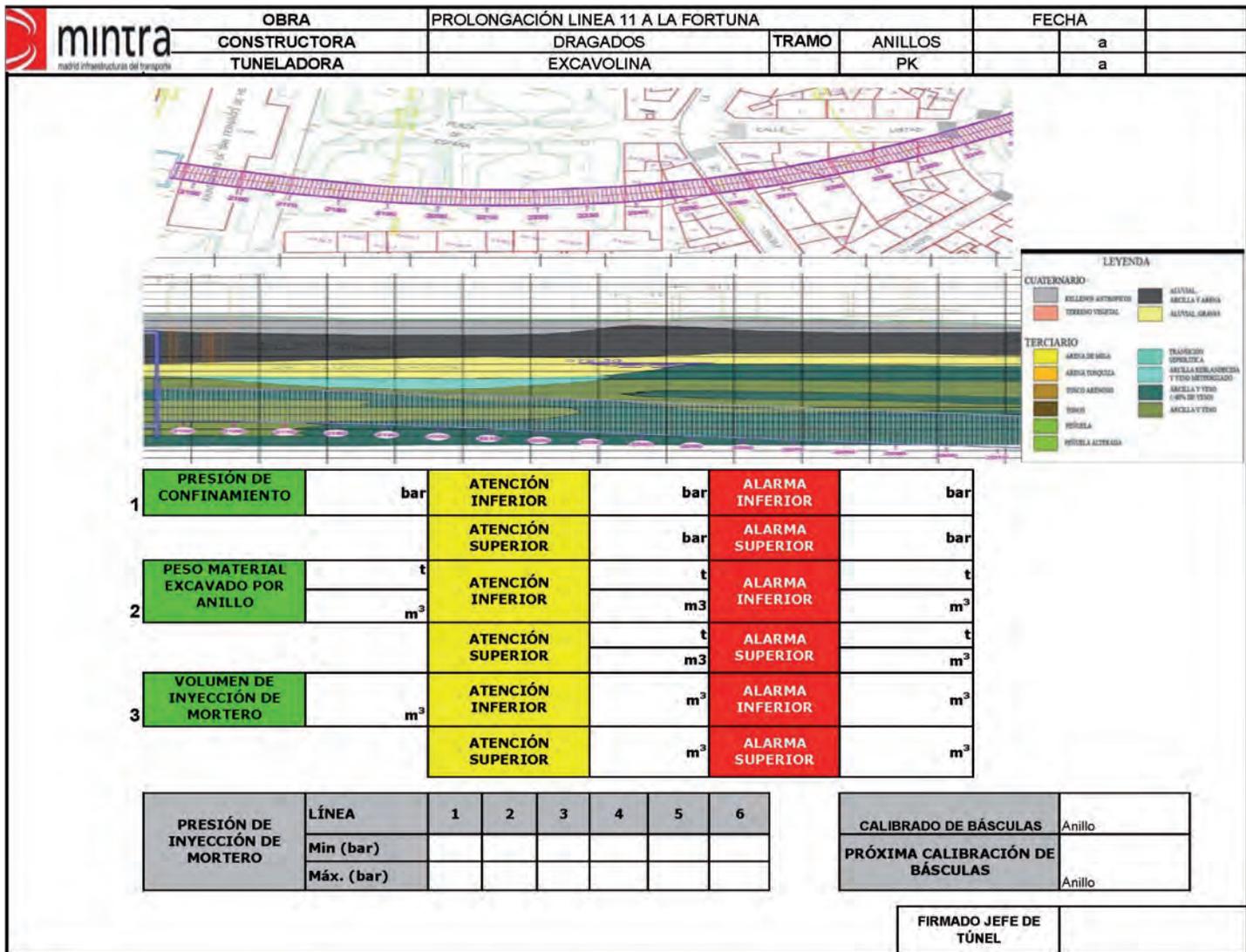


Fig. 3. Hoja de excavación.

Básicamente, lo que se pretendió fue establecer un procedimiento que permitiera controlar e incidir sobre una serie de aspectos que se consideran fundamentales en la excavación de túneles con tuneladora EPB, y que sirven tanto al contratista, para ejecutar el túnel con seguridad y sin riesgos, como a la Dirección de las obras, para llevar una sistemática de control durante la ejecución del túnel.

La metodología de dicho procedimiento contempla 2 partes fundamentales:

- Primero, la definición previa de un Plan de Avance de la tuneladora que, en base a la información disponible, permite establecer por tramos el rango de trabajo de la EPB.

- Segundo, el seguimiento de la excavación, para comprobar el grado de ajuste de las hipótesis establecidas en el Plan de Avance con la realidad y, en su caso, detectar anomalías en el proceso y aplicar las medidas de corrección correspondientes en tiempo útil.

El Plan de Avance se resume en una serie de Hojas de Excavación, en las que para tramos de terreno con propiedades similares, se definen los valores de referencia de los parámetros fundamentales de operación de la EPB (Figura 3).

Tras definir los tramos representativos del túnel, para cada uno de ellos hay que establecer los valores teóricos de los siguientes parámetros principales:

- **Peso del material extraído.** Se realizan los cálculos teniendo en cuenta las características geotécnicas del terreno, el agua y los aditivos que se añaden a la excavación.
- **Presión en el frente.** Se fija la presión teórica que será la suma de la presión hidrostática más la presión de tierras. Siempre teniendo en cuenta la presencia o no de edificios e infraestructuras próximas.
- **Volumen teórico de mortero.** Se calcula el volumen teórico del gap, teniendo en cuenta el diámetro de excavación de la máquina y el diámetro exterior del anillo.
- **Presión de inyección.** Como valor de referencia, se puede establecer que la presión de inyección se sitúe 0,5 bares por encima de la presión de tierras en la parte superior de la cámara.

Una vez definidos los valores teóricos, se fijan unos valores de atención y alarma referidos a aquellos y que implican, en el caso de los de atención, un mayor control del proceso de excavación, y en el caso de los segundos, la aplicación inmediata de medidas correctoras.

Estos valores de atención y alarma se fijan como % de los teóricos. Como referencias iniciales, se toman:

- En el caso de la presión y el peso, la banda de atención viene dada por valores que oscilen respecto del teórico entre el $\pm 10\%$ y el $\pm 20\%$. A partir del $\pm 20\%$, salta el valor de alarma.
- Respecto al volumen de inyección, el rango de atención se ubica entre el $+20\%$ y el $+30\%$ por exceso, y entre el -10% y el -30% por defecto. El umbral de alarma se sitúa en el $\pm 30\%$.

Las hojas de excavación de cada tramo deben proporcionarse al piloto de la EPB.

El siguiente paso es realizar desde la máquina un control continuo del proceso de excavación referido a la hoja previamente definida. En este proceso de control hay que vigilar los siguientes aspectos:

- **Control de la presión en frente.** Con las presiones predefinidas se realiza el control de operación de la máquina. Para ello, y aprovechando cortas paradas en el avance o el montaje del anillo, se verifica la presión en reposo. Si sube, es que la presión calculada es inferior a la necesaria. Si por el con-

trario la presión en parada baja sensiblemente, es que el acondicionamiento del terreno es defectuoso.

- **Control de pesos.** Es prioritario realizar el seguimiento de la evolución del peso del material excavado durante el avance de la excavación y si se comprueba que la progresión de pesos supera el rango establecido se deben tomar las medidas necesarias para, en cada caso, solventar la situación. Siempre hay dificultad para el control del peso excavado y por tanto para la determinación de posibles sobre-excavaciones en tiempo real. Esta dificultad está determinada por la fiabilidad en la determinación de los pesos mediante las básculas colocadas en las cintas de evacuación del escombros, por las variaciones de la densidad del material excavado en la cámara y por los aditivos inyectados para el acondicionamiento del terreno. La fiabilidad de las balanzas se mejora con una calibración sistemática en base a frecuentes contrastes con pesas. Se dispone generalmente doble sistema de pesado, para aumentar la fiabilidad.
- **Control de las condiciones del material en cámara.** Para un correcto trabajo del escudo hay que mantener la cámara llena de terreno acondicionado. Es necesario garantizar que la presión que marcan los sensores se corresponde a la presión de tierras y no a la presión de los acondicionadores en la zona superior de la cámara (burbuja del aire inyectado con las espumas). Es decir, verificar que la parte superior de la cámara no se encuentra vacía de tierras. Una densidad mínima del material en la cámara se puede controlar, en tiempo real, por la diferencia de presión entre los sensores situados en la zona superior y en la inmediata inferior. Este control cualitativo sirve para ver si la cámara está parcialmente llena.
- **Control de la inyección de mortero.** El mortero de inyección rellena el gap entre excavación y trasdós de dovelas. Lo aconsejable es utilizar la máxima presión compatible con la capacidad del cierre en las juntas del cierre de cola y por la limitación en la circulación de mortero hacia el frente. El procedimiento de inyección ha de limitarse por presión y no por volumen; es decir, se ha de terminar de inyectar el gap por anillo cuando el valor de la presión alcanza el límite superior y no cuando se llega al volumen teórico de mortero.

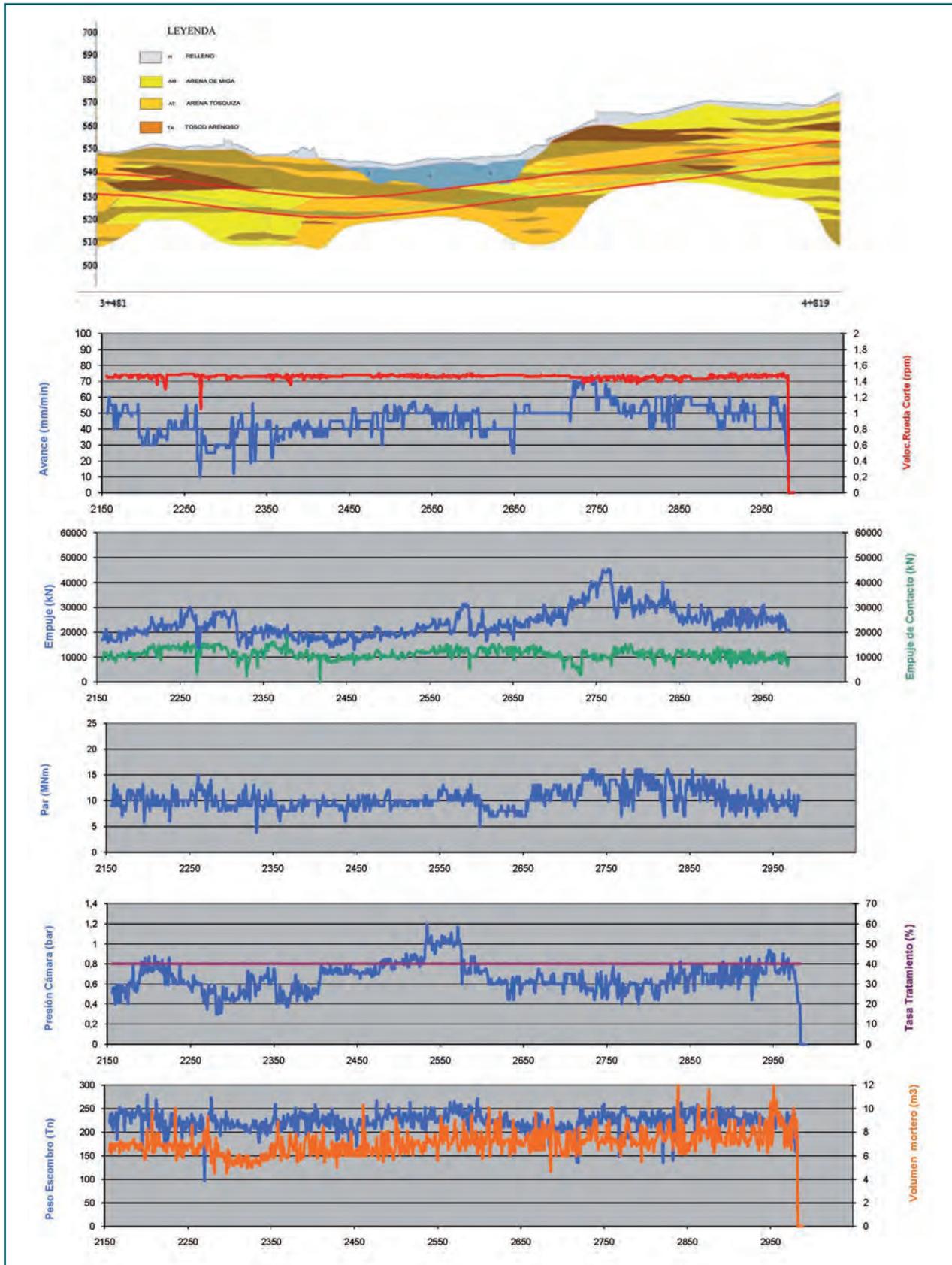


Fig. 4. Gráficos de operación de la EPB Chotis.

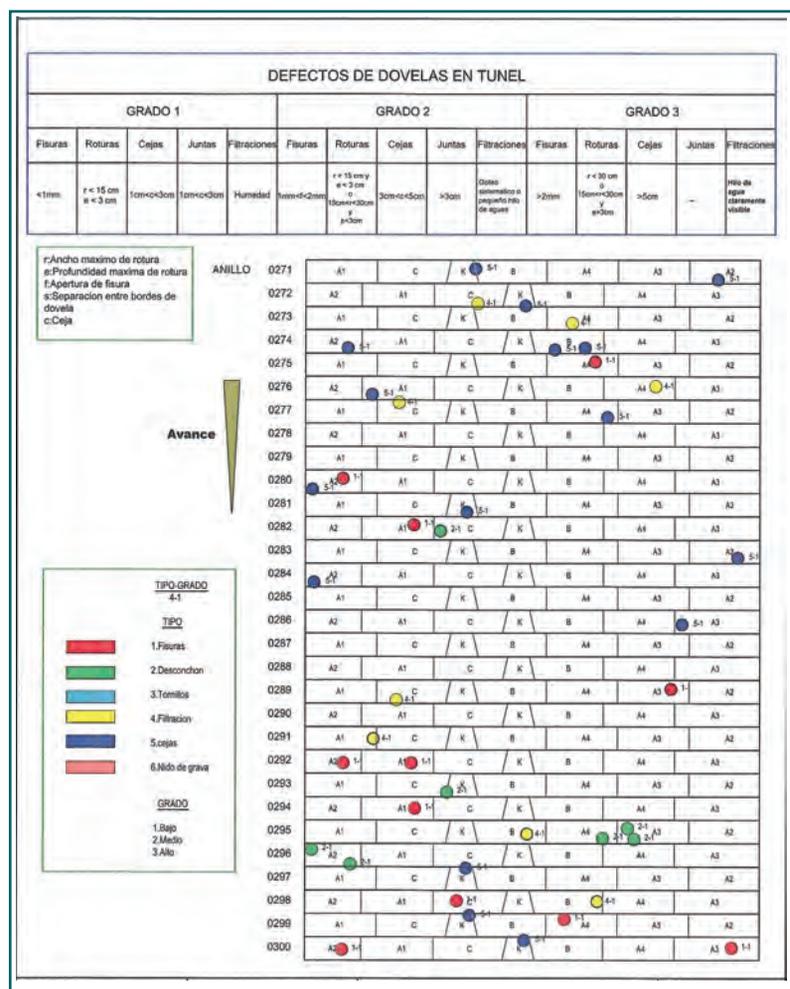


Fig. 5. Ficha de inventario de defectos en túnel.

- **Control de subsidencias.** La instrumentación sirve para analizar si las presiones de trabajo utilizadas en la tuneladora son correctas. Si se producen asentamientos antes de llegar con el escudo la presión debe ser corregida al alza y de la misma manera si se produce una elevación del terreno el resultado es debido a una presión alta que debe ser corregida a la baja.

Cuando se detecten valores anómalos de pesos, mortero inyectado, bajas densidades en cámara, o diferencias notables de cualquiera de estos valores en anillos consecutivos, se puede recurrir a la realización de inyecciones secundarias desde el back-up. Estas inyecciones tienen por objeto completar el llenado de los espacios vacíos, que no hayan sido rellenados con la inyección de cola. Se realizan a suficiente distancia del último anillo colocado para evitar circulación de lechada hacia el escudo, pero tampoco de-

masiado alejados para evitar que si hay espacios vacíos en terrenos inestables, estos espacios emigren hacia arriba antes de realizar la inyección y, en consecuencia, provoquen subsidencias.

4.3. Novedades en materiales

Otro campo en el que las experiencias previas recomendaban la revisión de las directrices básicas fue en lo referente a los materiales empleados. Fundamentalmente, se mejoraron en tres aspectos:

- La adición de fibras metálicas al hormigón de las dovelas.
- El empleo sistemático de packers en las juntas entre dovelas y anillos.
- Las características del mortero de inyección para relleno del gap.

De entre los defectos más habituales que suelen presentar las dovelas prefabricadas que materializan el revestimiento de los túneles ejecutados con EPB, hay dos en los que el recubrimiento necesario para la fabricación de las dovelas tienen un papel capital.

Uno de ellos es la rotura lajosa o “spalling” por la acción de los gatos sobre los cantos de las dovelas. El otro es la rotura por desviaciones en los planos de contacto entre anillos o entre dovelas de un mismo anillo.

El recubrimiento de la dovela está ligado inevitablemente a la resistencia al fuego de la misma. Aumentos de resistencia al fuego obligan a incrementar los recubrimientos lo que, a su vez, redundará en una mayor aparición de defectos.

Para evitar la aparición de los efectos señalados se planteó la adición de fibras metálicas de 50x0,7 mm (25 kg/m³), reduciendo sensiblemente la fisuración y formación de roturas de esquina en las dovelas.

Otra medida, muy extendida, que contribuye a evitar esta rotura, y mejora el contacto entre dovelas de un mismo anillo o entre anillos consecutivos es la incorporación de packers. Estos packers suelen ser láminas de plástico duro o de fieltro bituminoso, que se distribuyen de forma regular en los cantos transversales y longitudinales del anillo.

Un último aspecto por el que se revisaron las recomendaciones iniciales fueron las características del mortero de inyección, debido a las numerosas incidencias observadas en este proceso.



La experiencia acumulada recomendaba el empleo de arena caliza de tamaño no superior a 2 mm, evitando la de naturaleza silíceas por su influencia en los atascos del circuito de inyección.

Además, se fijaba el inicio de fraguado entre las 7 y 10 horas, y el fin de fraguado entre las 3 y 6 horas siguientes. Las resistencias a conseguir eran de 1,25 N/mm² tras 1 día y de 7,5 N/mm² a los 28 días.

4.4. Mejoras en los controles de calidad

Al igual que con la operación de las máquinas, los km de túnel ya ejecutados llevaron a MINTRA a intentar sistematizar los controles de calidad para los túneles ejecutados con EPB, estableciendo unas recomendaciones para la redacción de un Plan de Calidad específico.

Este Plan de Calidad tiene dos partes diferenciadas:

- Control de la Fabricación del revestimiento
- Control de Ejecución del túnel

Control de la Fabricación del Revestimiento

El Control de Calidad en la Fabricación del revestimiento contempla ensayos y comprobaciones habituales en hormigón armado, junto con otros específicos para el caso de túnel ejecutado con EPB, y comprende las siguientes fases:

- **Idoneidad de los medios de fabricación y operaciones previas.** Se comprueban instalaciones, laboratorio, moldes, básculas, etc. También se comprueban procedimientos y fórmulas de fabricación.
- **Control cualitativo de componentes y materiales.** Realización de ensayos previos de control durante la construcción a componentes y materiales, así como control de la resistencia del hormigón.
- **Comprobación de la armadura.**
- **Seguimiento del proceso de fabricación de la dovela.** Este seguimiento incluye las siguientes operaciones:
 - Limpieza del molde
 - Colocación de la armadura e insertos
 - Dosificación de fibras
 - Procedimiento de hormigonado: Dosificación correcta, plasticidad de la amasada y tiempos de vibrado
 - Fratasado y acabado
 - Periodos, temperatura y % de humedad en el curado

- Desencofrado
- Colocación de juntas
- Trazabilidad. Se marcará la dovela en el intradós
- Inspección de acabado
- Comprobación de recubrimientos mediante pachómetro
- Acopio

- **Control de recepción de dovelas.**

Control de Ejecución del túnel

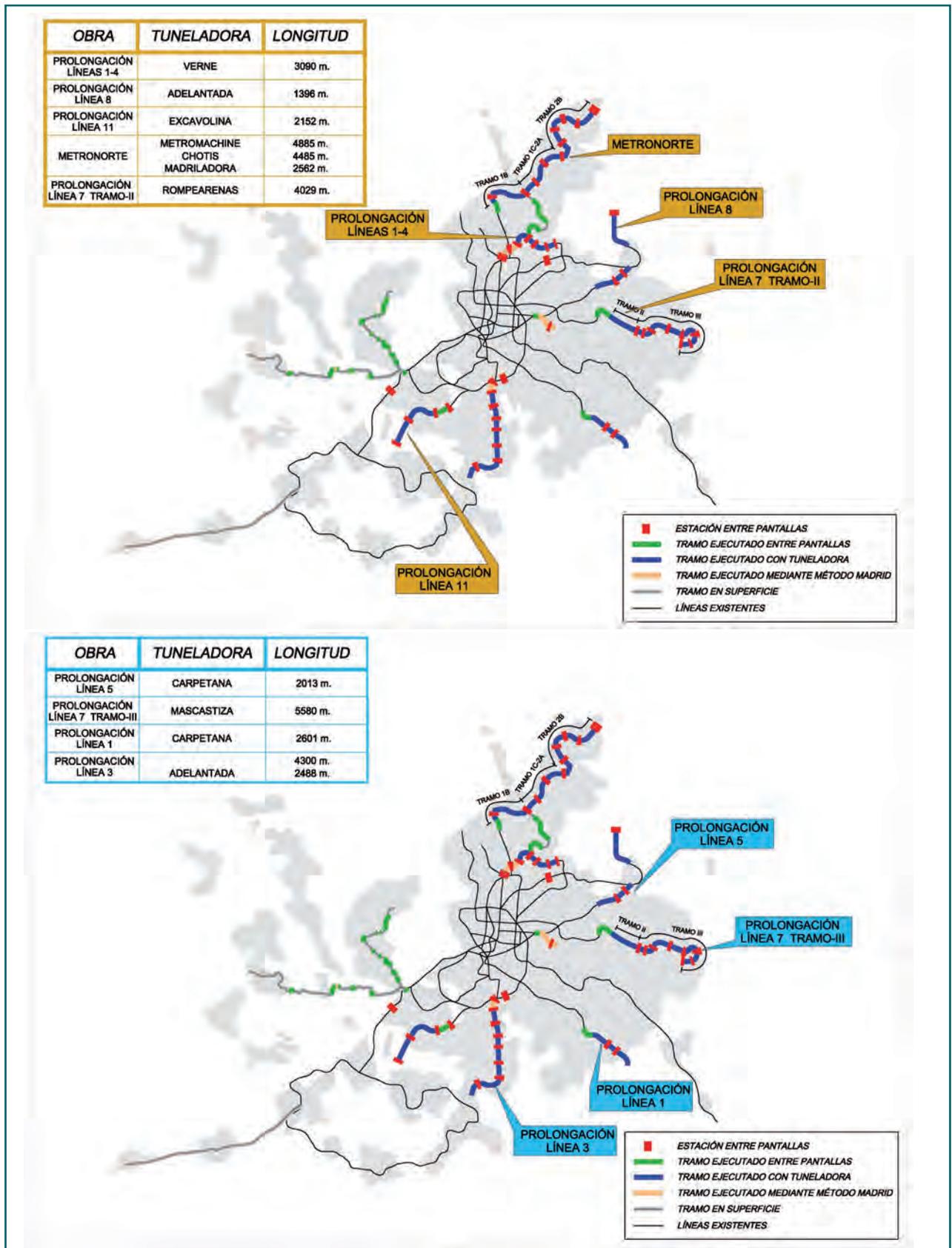
Respecto al Control de Calidad en la Ejecución del túnel, las tareas a realizar son las siguientes:

- **Excavación del túnel mediante tuneladora.** Este control es el descrito anteriormente.
- **Guiado de la máquina y control geométrico.** Se comprueba el guiado de la máquina, cotejando los registros de guiado de la máquina con las tolerancias prefijadas. También se contrastan los datos de guiado con las comprobaciones geométricas de la posición del eje del túnel sobre anillo colocado y con el trazado teórico.
- **Comprobación de la inyección del trasdós.** Se comprueba el estado de la inyección del trasdós con la extracción de testigos (diámetro superior a 42 mm y longitud mínima de 300 mm). En el primer km de túnel, estos testigos se extraen cada 50 m. Si los resultados son adecuados, se puede aumentar la distancia a 100-150 m. En caso de que se detecten huecos, se procederá a la reinyección.
- **Control y reparación de defectos del revestimiento.** Se realiza un inventario de defectos en el túnel ya ejecutado, identificando tipos de defecto y grado de los mismos. Estos defectos se reparan con posterioridad, muchos desde el back-up de la tuneladora.
- **Seguimiento de la auscultación e instrumentación.**

5. Experiencias obtenidas

Como ya se ha señalado, las obras de Ampliación en el periodo 2003-2007 han supuesto la construcción de casi 41 km de túnel excavados con diez EPBs. De estas diez EPBs (Tabla 1), cuatro han trabajado en terrenos yesíferos, y las restantes seis más una de las anteriores (en una segunda obra) en los

Fig. 6.
Distribución de
EPBs según
terrenos de
Madrid.



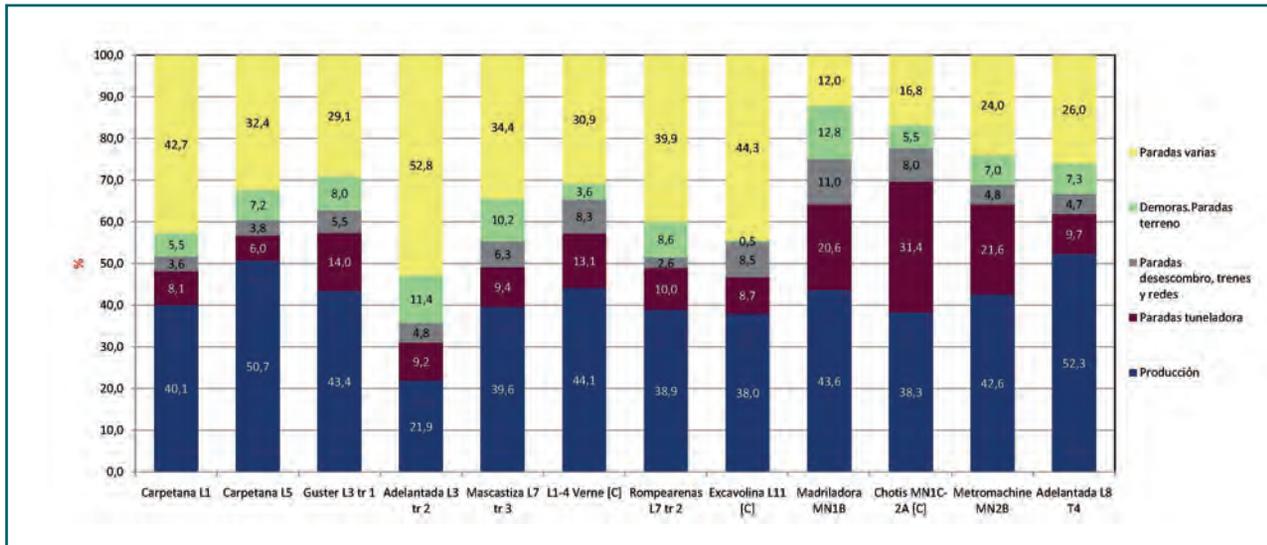


Fig. 7. Distribución de tiempos a origen en las EPBs.

característicos terrenos detríticos. En la Figura 6 se representa esta distribución de tuneladoras.

A continuación se detallan los resultados y experiencias obtenidos en la ejecución de dichas obras.

5.1. Funcionamiento de las EPBs

En este apartado se analizan los principales datos de producción y funcionamiento de las EPB, distinguiendo entre las que trabajaron en terrenos detríticos y las que lo hicieron en yesíferos.

Túneles en terrenos detríticos

Como se observa en Figura 6, son siete las tuneladoras que trabajaron en terrenos detríticos. Todas ellas han tenido comportamientos similares.

Los rendimientos obtenidos han sido buenos (Figura 8) y muy parecidos en todos los casos, con rendimientos máximos por encima de los 700 m/mes. Sólo las paradas en estaciones, y la gran reparación necesaria en la Chotis han "separado" las gráficas de avance, muy similares en los primeros 1000 m.

La velocidad de avance media (mm/min) es similar en todas las máquinas de Metronorte y Línea 1-4, alrededor de los 40 mm/min, mientras que en la Línea 11 y en la Terminal 4 los valores se sitúan en 57 y 54 mm/min respectivamente (Tabla 2).

En los tramos donde predomina la arena de mi-ga frente al tosco, se alcanzan mejores velocidades, siempre que no haya que llevar una presión elevada en el frente por posibles inestabilidades del terreno.

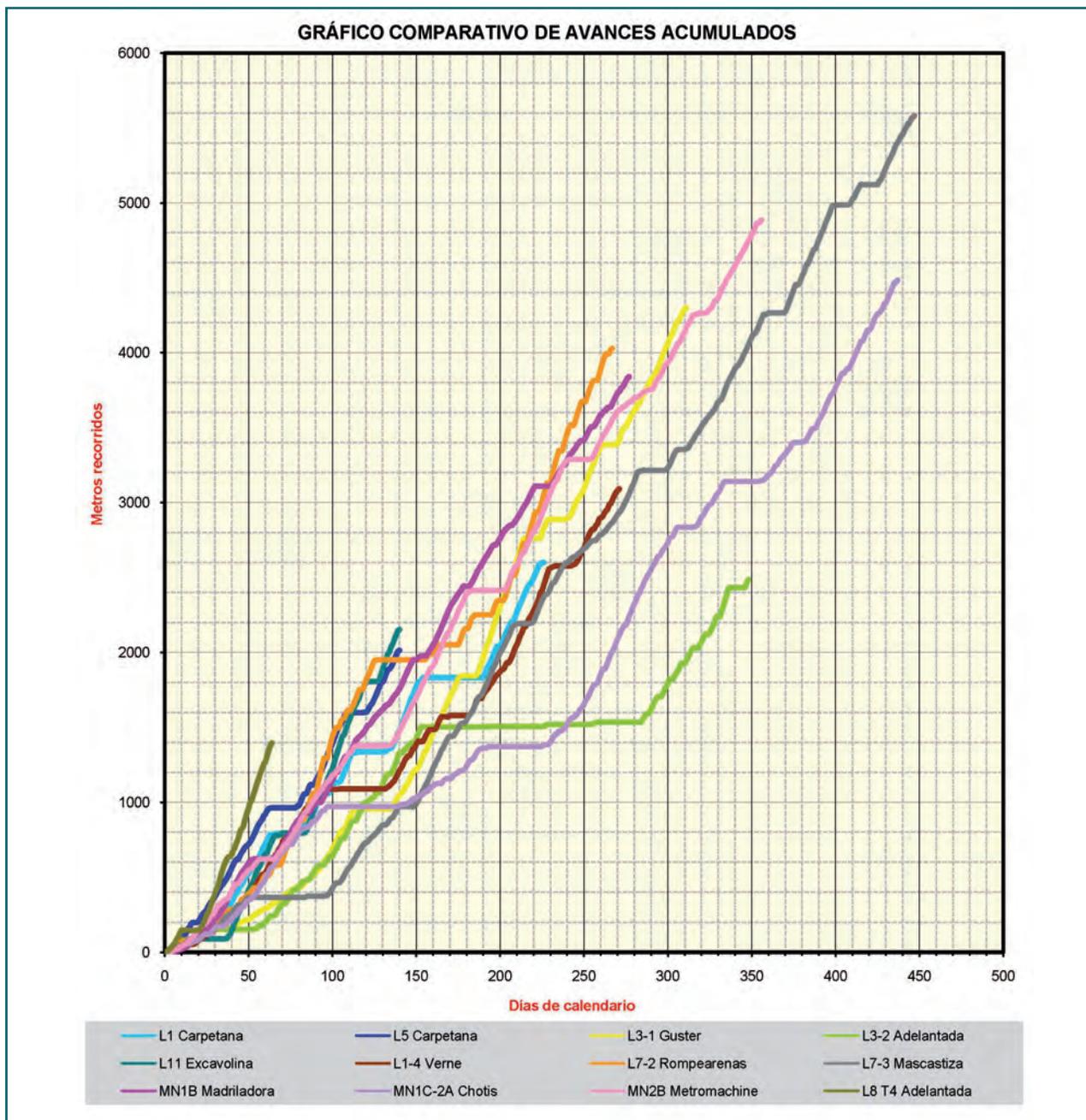
La presión en la cámara es un parámetro que ha variado bastante en las obras (dependiendo de la geología, la cobertera por encima del túnel, la existencia de estructuras en superficie, etc). Por lo general, en zonas sin riesgos de incidencias en superficie se ha trabajado con valores medios de entre 0,4 y 0,6 bares medidos en la célula superior, elevando la presión hasta 1 bar en zonas próximas a edificios y con coberteras de terreno de mala calidad donde previamente se habían realizado tratamientos del terreno. La Figura 4, perteneciente a la EPB Chotis, sirve de ejemplo.

Respecto al empuje, todas las máquinas han quedado bastante alejadas de sus límites nominales. En el caso del par motor, las que han trabajado más al norte (Chotis y Metromachine) han necesitado desarrollar valores más altos, con un máximo de 18 MNm en el caso de la Metromachine. Esto corrobora el acierto en decidir aumentar el par nominal en las nuevas máquinas.

Túneles en terrenos yesíferos

Las 4 EPB que han trabajado en terrenos yesíferos han tenido rendimientos muy parecidos a las otras EPB. La Guster, por ejemplo, pese a presentar una curva de aprendizaje más tendida que sus gemelas Chotis y Metromachine, ha obtenido mejores rendimientos totales, con puntas de hasta 900 m/mes. La Carpetana se encuentra al nivel del resto, y la Mascastiza, por motivos que se desarrollan más adelante, comenzó con más problemas pero acabó con puntas de más de 700 m/mes (Figura 8).

Fig. 8. Avance EPBs.



Las velocidades medias de avance en estos terrenos son similares a las que se obtienen en los terrenos detríticos, sin embargo no se alcanzan velocidades máximas tan elevadas, y en las zonas con mucho contenido en yeso los valores disminuyen a 30 mm/min (Tabla 2).

Por ejemplo, para la EPB Mascastiza, en la Línea 7- tramo III, debido al elevado porcentaje de yesos en las arcillas, ha supuesto en algunos tramos una disminución considerable de la velocidad de avan-

ce, y en consecuencia un aumento en el ciclo de la excavación. Mientras que en tramos más arcillosos se trabajaba con velocidades de 50 - 60 mm/min, en los tramos con yesos masivos bajaban hasta 20 - 40 mm/min, lo que da lugar a tiempos de excavación de más de una hora. En estas mismas zonas se observa un aumento del empuje de la máquina, debido a la dureza de los yesos.

En estos terrenos también influye mucho el porcentaje de inyección de espumas y polímeros respecto al

Tabla 2. Rango de valores y valores medios en EPBs (las 6 primeras corresponden a terrenos detríticos y las 5 últimas a terrenos yesíferos)

EPB	Presión cámara (bar)		Tasa tratamiento (%)		Empuje (kN)		Par (MNm)		Vel. Rueda (rpm)		Avance (mm/min)	
	rango	media	rango	media	rango	media	rango	media	rango	media	rango	media
L1-4 Verne	0,4-0,6	0,4	30	30,3	20-25.000	20.693	4-5	3,7	1,0-1,4	1,4	30-60	39,9
MN1B Madrilladora	0,6-0,8	0,6	40-50	45	15-25.000	18.271			1,0-1,4	1,3	40-60	52,1
MN1C-2A Chotis	0,4-1,0	0,6	50-60	55	20-30.000	23.102	10-15	9,5	1,0-1,5	1,4	30-60	38,8
MN2B Metromachine	0,4	0,4	60	62,4	15-20.000	16.078	10	9,3	1,0-1,5	1,4	40-60	42,5
L11 Excavolina	0,4-0,8	0,6	55	52,5	15-20.000	18.859	10-15	7,9	1,0	1,0	40-90	57,0
L8 T4 Adelantada	0,4-0,6	0,4	45	45	20-30.000	25.108	5-7	5,6	1,0	1,0	40-70	54,0
L1 Carpetana	0,4-1,2	0,6	40	40	15-25.000	21.365	10-15	11,6	1,0-1,5	1,4	40-60	49,6
L5 Carpetana	0,5-0,8	0,5	40	40	15-25.000	18.399	10-15	10,6	1,0-1,5	1,5	30-60	39,4
L3-1 Guster	0,4-0,8	0,6	70-100	75,4	15-25.000	20.516	10-15	11,2	1,0-1,5	1,1	30-70	42,6
L3-2 Adelantada	0,2-0,8	0,5	45	44,6	15-25.000	19.434	10-15	6,4	1,0-1,5	0,9	30-70	44,8
L7-3 Mascastiza	0,4-0,6	0,5	30-50	50,2	10-30.000	15.878	5-10	7,2	1,0-1,4	1,3	30-60	41,5

volumen de terreno excavado (tasa de tratamiento). Lo habitual es ir a valores de entre el 40 y el 60%. En la EPB Guster (línea 3), durante toda la obra se ha trabajado con valores medios de un 75%.

La principal ventaja de estos terrenos frente a los detríticos es su estabilidad, y esto se refleja a la hora de establecer una presión de trabajo en el frente. En todas estas obras, se ha trabajado por seguridad continuamente con valores de 0,4 - 0,6 bares, y salvo en alguna zona muy concreta, se ha llegado a 0,8 bares por asegurar unos asientos mínimos y en zonas donde no se podían realizar tratamientos del terreno desde la superficie.

Por último, hacer una pequeña reseña a la distribución de tiempos en las tuneladoras. En la Ilustración 7 aparecen estos datos, separando entre tuneladoras de yesos (las primeras) y EPBs en terrenos detríticos, y marcanado con una "C" aquellas EPB cuyo sistema de extracción es la cinta continua. La separación raliada es la siguiente:

- **Tiempos de producción:** excavación y montaje de anillos
- **Tiempos de la tuneladora:** inspecciones a la rueda, cambios de herramientas, mantenimiento y reparaciones en escudo y back-up
- **Tiempos de desescombro, trenes y redes:** descarrilamientos y averías en trenes, prolongación y repa-

ración de redes, prolongación y reparación de cintas de extracción

- **Demoras y paradas por el terreno:** demoras en los procesos de inyección de gap o guiado de la máquina, demoras en la llegada de trenes, problemas de agua, de limpieza de la vía, etc.
- **Paradas varias:** averías en instalaciones exteriores, paso de estaciones, festivos, paradas atribuibles a obra civil, etc.

Se observa que los tiempos de producción (como es habitual en estas máquinas) oscilan entre el 40 y 50%. Las paradas varias dependen fundamentalmente de los pasos de estaciones y los festivos. La justificación del resto de paradas se debe fundamentalmente a las tareas de inspección de la cabeza y cambio de herramientas, a las paradas en los sistemas de extracción. En los apartados siguientes se detallan estos aspectos.

5.2. Extracción del escombro desde el túnel

Una de las novedades introducidas en esta última Ampliación, a tenor de las experiencias previas fuera de Madrid, ha sido la utilización de la cinta continua como sistema de extracción del escombro.

Con este sistema se ha observado un aumento en los rendimientos, ya que al no realizar el deses-

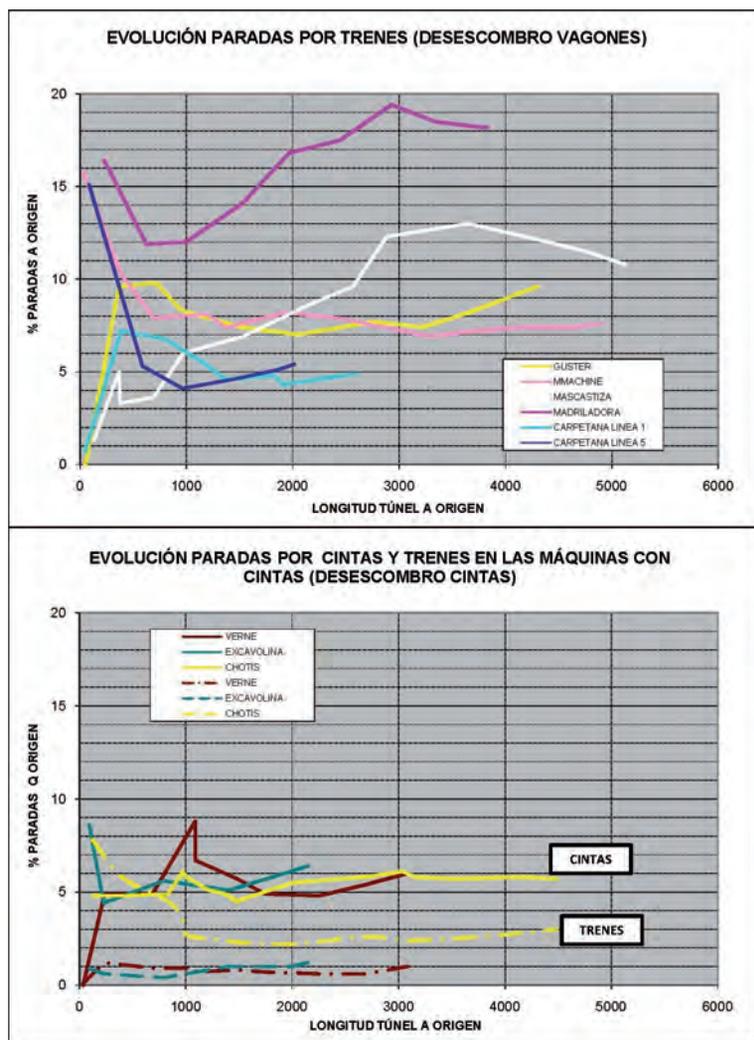


Fig. 9. Evolución de tiempos de parada por trenes en EPBs que descombran con trenes, y tiempos por cintas y trenes EPBs que descombran por cinta.

combro con vagones, los tiempos de espera de trenes cuando la longitud de túnel es importante, casi no se producen, y la vía se mantiene en mejores condiciones. En la Figura 9 se representan la evolución de los porcentajes de paradas a origen por trenes y cintas, a medida que el túnel avanza. En el caso de los vagones, estos tiempos perdidos por los trenes varían entre un 5 y un 16 %, dependiendo de la longitud del túnel y de los problemas particulares de cada obra. Por el contrario, en las máquinas con cinta, los tiempos perdidos por los trenes no llegan al 1%, y las paradas propias de la cinta continua (empalme de banda y averías) se sitúan todas en el entorno del 6 %.

Esta mejora ha sido especialmente notable en el caso de la Mascastiza en la ejecución de la línea 7, tramo 3. El alto contenido en yesos unido a la pegajosidad de las arcillas, provocó que el material se quedara adherido en los vagones (después de vaciarlos),

con el paso de las horas fraguaba y alcanzaba cierta resistencia, dificultándose su retirada. Debido a la necesidad de limpiar los vagones, los tiempos de esperas de trenes aumentaron considerablemente, obteniéndose una producción muy baja. Con todo esto, y viendo los escasos resultados que se obtenían se decidió cambiar el sistema de extracción de escombros a cinta continua, mejorando rendimientos considerablemente, obteniéndose producciones de 700 m/mes y un máximo semanal de casi 200 m.

5.3. Consumo de herramientas

Como se ha mencionado ya, en los terrenos detríticos, las herramientas de la rueda de corte sufren grandes desgastes, a consecuencia de la abrasividad sobre todo de las arenas. La frecuencia de cambios de herramientas en la excavación en estos suelos, no tiene nada que ver con los escasos desgastes que producen las peñuelas o las arcillas con yesos. En la figura (Ilustración 10), se pueden ver los tiempos consumidos en cambios de herramientas de corte, en función del tipo de terreno.

Por el contrario, la problemática de los yesos, es su dureza excesiva para una máquina con herramientas de suelos blandos. La incorporación de cortadores de disco supuso un gran avance, sin embargo tanto los cinceles como los rastrillos se ven sometidos a grandes esfuerzos, desgastándose bruscamente o llegando a arrancarse. Viendo la Figura 10, se puede establecer la correspondencia entre porcentaje de yesos en la sección y dureza de los mismos con el desgaste de herramientas. La Carpetana, en línea 5, discurre casi en su totalidad en peñuelas, con intercalaciones de sepiolitas, lo que supone un consumo mínimo de herramientas de corte. Las 2 tuneladoras de línea 3 atraviesan capas de peñuelas, arcillas con yesos y, más al Sur, alguna zona de yeso masivo. La Carpetana en línea 1 atraviesa zonas de peñuelas, arcillas reblandecidas y yesos con algún grado de alteración. La Mascastiza en línea 7 discurre fundamentalmente por niveles de arcillas con yesos y zonas de yesos masivos de gran dureza, por lo que su consumo de herramientas es superior.

5.4. Control de Ejecución del túnel

Los inventarios de defectos realizados en los distintos túneles en paralelo a su ejecución (Figura 5),

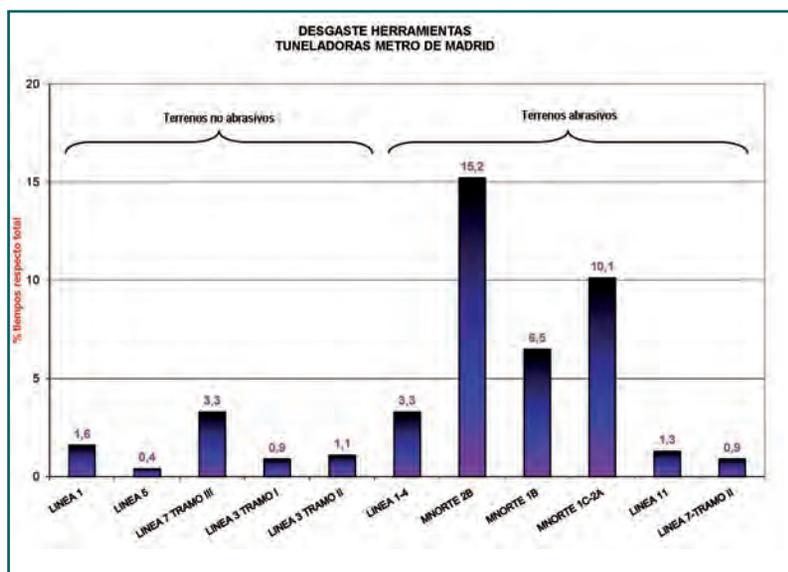


Fig. 10. Tiempos en revisión y cambios de herramientas.

ha permitido identificar dos tipos de defectos que, aún cuando se producían no con demasiada frecuencia, tenían difícil solución con el túnel acabado. Estos dos defectos han sido:

- Aparición de cejas entre dovelas por la holgura existente en las uniones atornilladas
- Aparición de filtraciones, pese a las juntas elásticas, en zonas bajo freático y generalmente en tramos de curva cerrada.

Su persistencia y/o dificultad de reparación han aconsejado la búsqueda de soluciones previas al montaje para evitarlas o, al menos, paliarlas.

En esta línea, para evitar los citados defectos, se han introducido en los nuevos proyectos de MINTRA algunas mejoras en la ejecución del túnel como son: morteros más impermeables que rellenen el gap y limiten la entrada de agua en el túnel, centradores entre dovelas que obligan a una colocación más precisa de los anillos, juntas hidrófilas que complementan la junta de neopreno y que, al aumentar su volumen en contacto con el agua, mejoran sensiblemente la estanqueidad del túnel, etc.

Respecto a los morteros de inyección para rellenar el gap, durante la ejecución de los túneles se han presentado dificultades para conseguir resistencias adecuadas cumpliendo con los tiempos de fraguado. Esto ha llevado a recomendar dosificaciones con mayor contenido de cemento y reducir los límites de inicio y fin de fraguado.

6. Conclusiones

En base a las experiencias referidas, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La exigencia de valores más altos del par nominal en las nuevas tuneladoras puede considerarse un acierto, puesto que aunque haya sido de forma puntual, en las EPB de la zona norte ha sido necesario recurrir a valores del par superiores a los 15 MNm para excavar algunos tramos
- En las tuneladoras que han ejecutado túneles en yesos, las medidas consideradas tras la experiencia acumulada con la primera EPB para yesos en Madrid, han permitido solventar la excavación con buenos rendimientos, sin que se presentaran los problemas descritos en el apartado 3.
- El control continuo realizado en la operación de las EPB, tal y como se describe en 4.2, ha permitido ejecutar los túneles sin asentamientos apreciables en superficie, especialmente en los puntos más delicados del trazado (cruce bajo edificios, carreteras y otros túneles)
- La utilización de las cintas continuas como elemento de extracción de las tierras se ha revelado como una gran alternativa, que mejora los tiempos de parada con relación a los trenes, lo que redundará en un mejor coeficiente de utilización
- Los grandes desgastes de herramientas sufridos en terrenos detríticos o con alto % de yesos recomiendan revisiones de herramientas cada 100-200 anillos, incluso menos en caso de que los terrenos sean arenas con alto contenido en cuarzo. Además, es necesario hacer revisiones completas de la máquina cada 1000-1500 m, aprovechando el paso de estaciones o, en caso necesario, generando espacios protegidos que permitan esta revisión.
- Deben adoptarse medidas tendentes a lograr la estanqueidad de los túneles. En este sentido, ha resultado eficaz la adopción de sendas medidas: por un lado, mejorando la unión entre dovelas con el uso de centradores bicónicos. Por otro, procurando la estanqueidad del túnel mediante la impermeabilización de las zonas más sensibles con el empleo de juntas hidrófilas

cas que mejoren el comportamiento de las juntas elastoméricas. No obstante, lo más eficaz es realizar un relleno adecuado del gap con mortero.

- Los problemas de resistencia a adquirir por los morteros de inyección, recomiendan variar la dosificación, aumentando el contenido de cemento de 50 kg/m³ a valores de 80-100 kg/m³. Igualmente, se han reducido los límites de fraguado: entre 5 y 8 horas para el inicio de fraguado, y entre 1,5 y 3 horas después del inicio para el fin de fraguado.
- La incorporación de fibras metálicas al hormigón ha mejorado la resistencia a la fisuración del mismo, reduciéndose de forma notable los casos de rotura de esquinas.

7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a todas las Direcciones de Obra de MINTRA, a las empresas constructoras (especialmente a los responsables de las tuneladoras) y las ingenierías y asistencias técnicas su dedicación en la ejecución de las obras y su colaboración en el análisis, estudio e implantación de todo lo que en el artículo se desarrolla.

Una mención especial merecen los Directores de Área de MINTRA y sus Asesores de tuneladoras (Felipe Mendaña, Ramón Fernández), y en particular Noelia Alonso, José Gómez y Francisco Gimeno, por ser los que han aportado gran parte de la información para el desarrollo del artículo. ♦

Referencias:

-F.MENDAÑA, R.FERNÁNDEZ, J.GÓMEZ, M.HERRE-
RA. (2007). Control de la excavación y segui-
miento de las tuneladoras del plan de ampli-
ación del Metro de Madrid (2003-2007). *Congreso
Internacional AETOS (Madrid)*, 317-328.
-J.TRABADA, M.MELIS. (Enero 2003). Experiencias
de la excavación con escudos en las formacio-
nes mixtas de rocas y suelos. *Revista de Obras
Públicas*, 35-47.
-J.TRABADA, N.ALONSO, F.MENDAÑA, R.FERNÁN-
DEZ. (2007). La ejecución de túneles con tunela-
dora en el plan de ampliación del Metro de Ma-

Madrid (2003-2007). *Congreso Internacional AETOS
(Madrid)*, 570-588.

-J.TRABADA, N.ALONSO, F.MENDAÑA,
R.FERNÁNDEZ. (2007). La excavación de túne-
les con tuneladora en los yesos del Sureste de
Madrid. *Congreso Internacional AETOS (MA-
drid)*, 589-602.

-M.ARNÁIZ, M.MELIS, F.MENDAÑA. (Diciembre
2007). Tuneladoras de presión de tierra para el
plan 1999-2003 de ampliación del Metro de
Madrid (1ª parte). *Revista de Obras Públicas*,
131-138.

-Madrid, A. d. (1986). *Geología, Geomorfología,
Hidrogeología y Geotecnia de Madrid*. Temas

Urbanos de Ecología, num.10. Área de urbanis-
mo e infraestructuras del Ayuntamiento de Ma-
drid.

-N.ALONSO. (Enero de 2009). Comunicaciones
privadas.

-R.OLIVÉ, N.NIETO, F.MENDAÑA, R.FERNÁNDEZ,
J.GÓMEZ, M.JIMÉNEZ, J.HARO. (2007). Repara-
ción de la tuneladora "Chotis" del tramo 1C-2A
de Metronorte. *Congreso Internacional AETOS
(Madrid)*, 779-791.

-RODRÍGUEZ ORTIZ, J. (Diciembre 2000).
Propiedades geotécnicas de los suelos de
Madrid. *Revista de Obras Públicas*, 59-84.