

Ejecución de túneles con EPB en diversos tramos de la Línea 9 del Metro de Barcelona

DIDAC PLANA AGUILAR (*)

RESUMEN La nueva Línea 9 del Metro de Barcelona tiene un trazado de unos 48 Km de longitud y cruza la ciudad por la zona norte uniendo las poblaciones de Badalona y Santa Coloma de Gramanet por un lado con el Hospitalet, el Prat de Llobregat y el Aeropuerto en el otro extremo. El trazado discurre por zonas densamente urbanizadas y atraviesa una gran variedad de terrenos y condiciones geológicas en algunos casos complejas. La construcción del túnel se realiza en su mayor parte con tuneladora (TBM) y principalmente en modo de presión de tierras en el frente (EPB). El artículo hace referencia a los tramos que FCC Construcción está participando en su ejecución, se comentan las características de las máquinas empleadas, el control realizado de los parámetros de funcionamiento de éstas, los asentamientos que se han generado y como se han resuelto algunas situaciones particulares como son las zonas de muy bajo recubrimiento y los tramos en los que la sección de excavación se encuentra con terrenos de gran contraste de resistencia con presencia de suelos y roca en un mismo frente.

EPB TUNNELLING IN DIFFERENT SECTIONS OF THE METRO LINE 9 IN BARCELONA

ABSTRACT *New 48-km Line 9 to the Barcelona underground runs along the northern edge of the city, connecting the towns of Badalona and Santa Coloma de Gramanet on one end to Hospitalet, Prat de Llobregat and the airport on the other. The line crosses densely urbanized areas and a wide variety of terrains and geological conditions, some particularly complex. Most of the tunnel is being bored with a tunnelling machine (TBM), primarily using earth-pressure balanced (EPB) technology. The article, which discusses the sections in which FCC Construcción took part, covers the specifications of the machines used, the monitoring of their operating parameters, the subsidence generated and the solutions to special situations, such as areas with a very low cover and runs in which terrain with widely varying strength was encountered in the same excavation face: soil and rock, for instance, in one and the same front.*

Palabras clave: Túnel urbano, Tuneladora, EPB, Asientos, Bajo recubrimiento, Secciones mixtas.

Keywords: Urban areas tunnelling, Tunnel Boring Machine (TBM), Earth Pressure Balance (EPB), Low depth tunnel, Ground mixed conditions.

1. INTRODUCCIÓN

La Línea 9 del Metro de Barcelona es una línea de nueva construcción que representa una importante ampliación de la red de movilidad subterránea de la ciudad y una notable mejora de las interconexiones con otras líneas del Metro, de ferrocarril (Renfe y FGC) y con la línea de alta velocidad (TGV), además de facilitar el acceso a importantes infraestructuras del área metropolitana como el Aeropuerto del Prat, la Zona de Actividades Logísticas del Puerto, la Ciudad Judicial o la Fira de Barcelona.

Con una longitud de casi 48 kilómetros de recorrido y 52 estaciones, cruzará Barcelona de forma sensiblemente paralela al mar conectando distintos barrios con gran demanda de transporte público y unirá las poblaciones de Badalona y

Santa Coloma de Gramanet situadas al noreste de la ciudad con las poblaciones del Hospitalet de Llobregat y el Prat de Llobregat situadas al sur así como el sector de la Zona Franca.

Las condiciones geológicas del trazado son muy variables y distintas, abarcando un amplio abanico de dificultades y comportamientos geotécnicos diferentes, desde materiales muy blandos de origen aluvial y bajo el nivel freático en los entornos de los ríos Besos y Llobregat, hasta zonas de rocas de gran resistencia y dureza, pasando por tramos de rocas muy fracturadas y con fallas importantes. A todo esto se le añade la dificultad que impone el carácter urbano de esta infraestructura por la afección que puede provocar en las edificaciones y servicios existentes en sus inmediaciones.

La construcción de los distintos tramos del túnel se realiza en prácticamente todo el trazado con máquina tuneladora TBM (Tunnel Boring Machine), siendo en gran parte de estos tramos necesarias máquinas tipo EPB (Earth Pressure Balance) que permiten estabilizar el frente de excavación presurizándolo con el propio terreno recién excavado y adecuada-

(*) Ingeniero-Geólogo. Delegado del Dpto. de Geotecnia en Barcelona. Servicios Técnicos de FCC Construcción.

Nombre de la UTE	Empresas de la UTE	Túnel	Total (Km)	Ejecutado (Km)	Modo excavación/diámetro (m)
UTE Túnel Aeroport 1; UTE Túnel Aeroport 2 UTE Túnel Metro L9	FCC COPISA OHL FERROVIAL SCRINSER	Mas Blau - Parc Logístic (El Prat de Llobregat)	9,0	2,7	EPB / 9.40 m
		Mas Blau – Aeroport (El Prat de Llobregat)	4,4	1,8	EPB / 9.40 m
UTE Fira	FCC COPISA OHL FERROVIAL SCRINSER	Fira 2 - Parc Logístic (El Hospitalet)	1,5	1,5	EPB / 9.40 m
UTE L9 Hospitalet	FCC COPISA COMAPA	Fira 2 - Amadeu Torner – Bifurcació (El Hospitalet)	1,3	1,3	En mina o entre pantallas
UTE Triangle Línea 9	FCC ERROVIAL OHL COPISA COPCISA	Trajana - Sagrera (Pozo Cruce) (Barcelona)	1,9	1,9	EPB / 12.0 m
		Sagrera (Pozo Cruce) – Mandri (Barcelona)	7,3	1,2	EPB de Sagrera hasta Meridiana, TBM-Abierto de Meridiana hasta Mandri / 12.0 m
UTE Línea 9	FCC FERROVIAL OHL COPISA COPCISA	Can Zam - Can Peixauet (Santa Coloma de Grama- net)	5,1	5,1	TBM-Abierto y EPB en algún tramo / 12.0 m EPB / 12.0 m
			30,5	15,5	

TABLA 1. Tramos de túnel de la L9 ejecutados o en ejecución por FCC Construcción.

mente acondicionado, que permiten abordar con garantías de seguridad razonables la ejecución de este tipo de obras.

FCC Construcción ha ejecutado o está construyendo en UTE con otras empresas varios tramos de la Línea 9 además de varias de las estaciones. Los tramos de túnel adjudicados representan aproximadamente 30,5 kilómetros de longitud, de los cuales se llevan ya ejecutados unos 15,5 kilómetros. De ellos se han excavado con TBM-EPB unos 9,5 Km, mientras que unos 1,3 kilómetros se han ejecutado en mina o entre pantallas y 4,7 kilómetros en TBM en modo abierto con condiciones en roca estable en el frente (a diciembre de 2008). En cuanto a las estaciones, FCC Construcción participa en UTE en la construcción de un total de 27 de las cuales están ejecutadas totalmente o en una fase avanzada de ejecución unas 13 de ellas. En la tabla 1 se presenta una relación de los tramos de túnel ejecutados o en construcción por FCC Construcción, y de ellos los ejecutados en EPB.

En la figura 1 se presenta la planta del trazado de la Línea 9 indicando los tramos de túnel en los que participa FCC Construcción en su ejecución y de ellos los que se han realizado en TBM-EPB.

Para la ejecución de los tramos de túnel en los que participa FCC Construcción ha utilizado 3 máquinas TBM - EPB con diámetros de 9.40 metros en dos de ellas y de 12.0 metros en la otra. Esta última es una máquina dual que permite trabajar como EPB con presión de tierras y tornillo sinfín (modo cerrado o EPB) o adaptarla para trabajar en modo abierto y sin el sinfín (con cinta).

En el artículo se analizan y recogen algunas experiencias obtenidas en los tramos de túnel de la Línea 9 ejecutados con EPB y se hace referencia principalmente a las características del terreno, al modo de operación de la máquina y a los movimientos de subsidencia generados en superficie.

2. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO DE LA LÍNEA 9

A lo largo de todo el trazado de la Línea 9 aparecen una gran variedad de terrenos y condiciones geológicas muy diversas. A grandes rasgos, se puede diferenciar los siguientes contextos geológicos:

A) ZONA DELTAICA DEL RÍO LLOBREGAT

El trazado discurre por materiales aluviales blandos y normalmente consolidados. Corresponde a los tramos del Aeropuerto y del Prat de Llobregat (Tramo 1 de la L-9) con un diámetro de túnel de 9.40 m. La traza discurre con unos recubrimientos variables entre 1 y 2 diámetros, llegando incluso a ser inferiores a un diámetro en algún caso en las entradas y salidas de estaciones.

En la mayor parte del trazado la sección del túnel se encuentra parcialmente en los materiales granulares que configuran el acuífero superior del Delta del Llobregat (arenas finas con gravas y limos, de la unidad QL2) y los materiales predominantemente cohesivos que configuran la cuña intermedia que separa el acuífero superior del inferior (arcillas limosas del QL3m o limos arenosos del QL3s). Los primeros se encuentran en la parte superior de la sección del túnel y los segundos en la inferior, en proporciones variables según la profundidad de la rasante y la zona en la que se encuentra. Todo el trazado se encuentra bajo el nivel freático, el cual se sitúa muy cerca de la superficie, normalmente entre 2 m y 4 m de profundidad.

Se presenta en la figura 2 un perfil longitudinal representativo de esta zona, y en la tabla 2 los valores tipo de los principales parámetros geotécnicos del terreno.



FIGURA 1. Planta de la Línea 9 del Metro de Barcelona. Tramos de túnel de la L9 ejecutados o en ejecución por FCC Construcción, en diciembre de 2008.

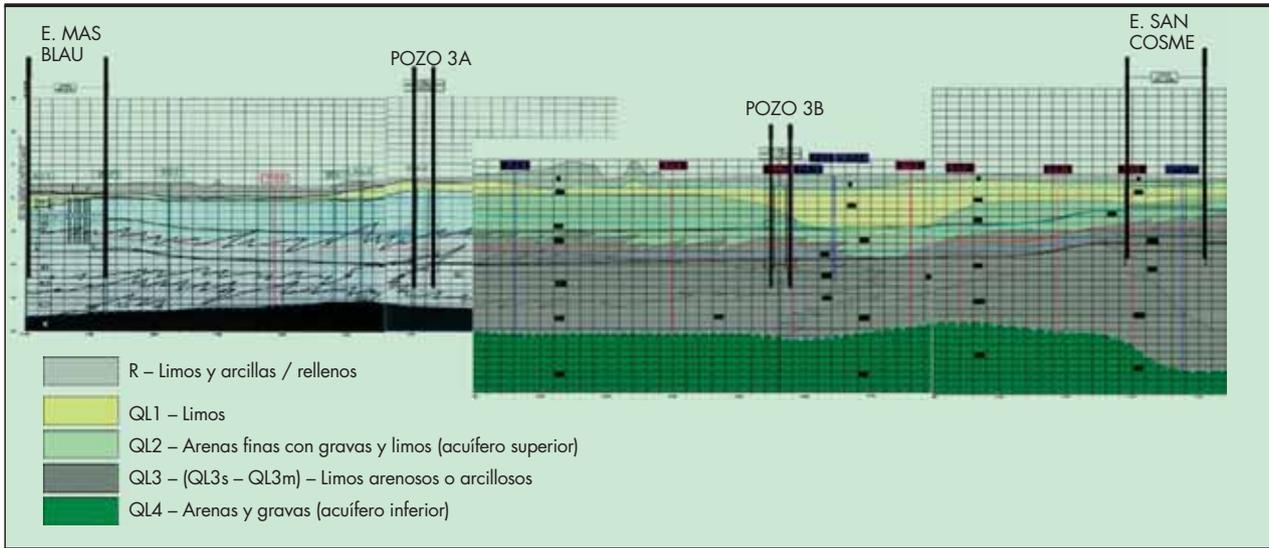


FIGURA 2. Perfil longitudinal geológico del tramo entre Mas Blau y San Cosme en el Prat de Llobregat (L-9 del Metro de Barcelona).

Unidad	Descripción	SPT	Densidad (T/m ³)	Ángulo de rozamiento (°)	Cohesión c' (T/m ²)	Módulo elástico E (T/m ²)	Cc	Cs
R	Rellenos	-	1.85-2.0	25	0.0 -	300	-	-
QL1	Limos	2-10	2.00	29	0.5	700	-	-
QL2	Arenas finas	12-24	1.95 -2.0	34	0.0	1000-2000	-	-
QL3m/QL3	Limos arcillosos	8-12	1.85	28-29	0.5-1.0	600-1200	0.11	0.01
QL3s	Limos arenosos	15-25	1.90	33	0.0	1000-2200	0.09	0.008

TABLA 2. Parámetros geotécnicos tipo de los materiales de la zona deltaica del Llobregat.

B) ZONA DE SUSTRATO GRANÍTICO HERCINIANO DE SANTA COLOMA DE GRAMANET

El trazado discurre principalmente en el sustrato rocoso constituido en su mayor parte por los granitos que configuran el subsuelo de Santa Coloma de Gramanet y la Sierra de Marina. Corresponde al tramo de Can Zam a Can Peixauet (Tramo 4A), con un diámetro de sección de excavación de 12.0 m y que en su mayor parte se excavó en modo abierto excepto algunos puntos en los que la zona de alteración de los granitos (jabres o sauló) llegaba a cota de túnel y obligó a trabajar en modo EPB al objeto de mantener la estabilidad del frente. Los recubrimientos en general son grandes, salvo tres puntos bajos donde se reducen por debajo de los 3 diámetros. Corresponden estos puntos al paso por debajo de la carretera B-20 con unos 3 diámetros de recubrimiento, algo más de dos diámetros en la zona del barrio de Fondo y aproximadamente 1.5 diámetros en el tramo final de Can Peixauet hasta el pozo de salida.

La geología del trazado de este tramo se caracteriza por la presencia variable de rellenos en superficie, por debajo depósitos de tipo coluvial que cubren el relieve del sustrato rocoso antiguo, y el propio sustrato que en este caso es granítico en sus distintos grados de alteración desde suelos (jabre o sauló) hasta roca sana con resistencias a compresión simple de más de 1000 Kg/cm². El macizo granítico de la zona se caracteriza además por varios factores como son: (i) la aparición de diques de pórfidos de distinto tamaño, algunos de varios metros de es-

pesores; (ii) la presencia de dos familias de fallas conjugadas muy desarrolladas y algunas con brechas de falla amplias; (iii) existencia de agua asociada a actividad hidrotermal en algunos casos. En la figura 3 se presenta el perfil geológico de este tramo.

C) ZONA DE MATERIALES PLIOCENOS Y CUATERNARIOS ANTIGUOS DE LA SAGRERA (BARCELONA)

Corresponde al tramo entre el pozo de Trajana y el Pozo de Cruce y de éste a la Avda. Meridiana (Tramo 4C), con un diámetro de excavación de 12.0 m. El trazado discurre por varias litologías entre las que destacan los materiales pliocenos (principalmente argilitas / arcillas muy firmes) y materiales cuaternarios coluviales y de pie de monte generalmente bastante consolidados (arcillas con gravas y limos de la unidad del “Triciclo”, y arenas limoso/arcillosas del “Pretriciclo”), aunque también atraviesa algunos depósitos aluviales asociados a la cuenca aluvial del río Besós y sus rieras afluentes. Incluso en algún sector el sustrato granítico llega a cota de túnel. Todo el trazado se encuentra bajo el nivel freático con alturas de agua encima de la clave de hasta unos 20 m. Los recubrimientos medios están entorno a los 2 diámetros, variando desde valores mínimos de 1 diámetro hasta los 3 diámetros. Toda la excavación se ha realizado en modo EPB. En la figura 4 se presenta un tramo del perfil geológico de esta zona del trazado, y en la tabla 3 los parámetros geotécnicos característicos de los materiales.

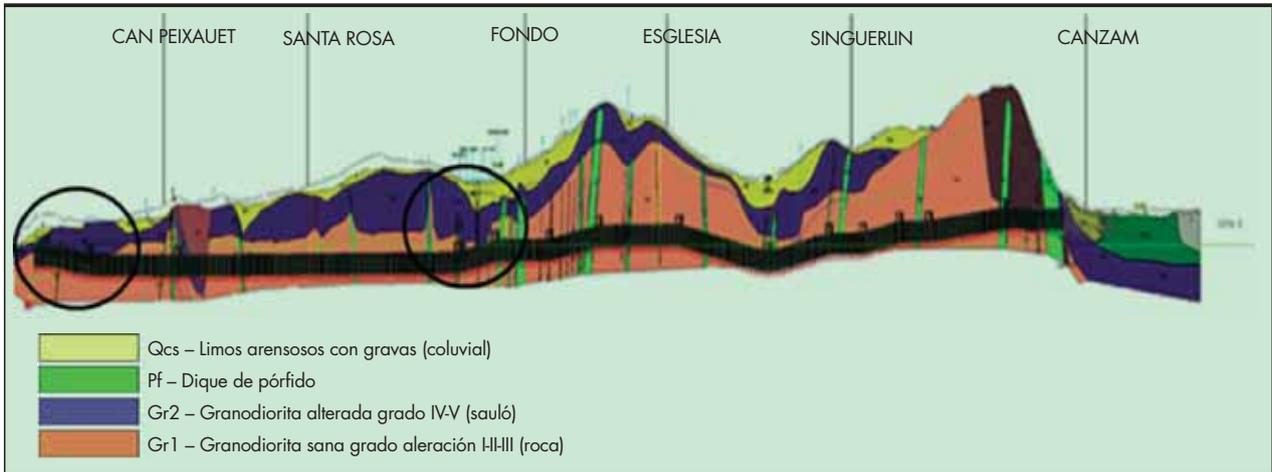


FIGURA 3. Perfil longitudinal geológico del tramo de Santa Coloma de Gramanet (L-9 del Metro de Barcelona).

Unidad	Descripción	Densidad T/m ³	Ángulo de rozamiento (°)	Cohesión c' (T/m ²)	Módulo elástico E (T/m ²)
R	Rellenos	1.80	24	0.0 - 1.0	500-1000
Qcb	Gravas y arenas limosas coluviales	2.00	30	0.0 - 0.5	3000
Qb2	Arenas y gravas aluviales	2.00	32	0.0 - 0.5	3000 - 6000
Qa	Arcillas con gravas (Cuaternario Triciclo)	2.15	30	2.5 - 5.0	3000
PQ	Arenas limosas (Pliocuatnario "Pretríciclo")	2.10	35	0.5 - 1.0	2500
PL1	Arcillas ocreas	2.00	27	3.0	6000
PL2	Argilitas grises	2.00	25	5.0	8000 - 9000

TABLA 3. Parámetros geotécnicos tipo de los materiales de la zona de Sagrera.

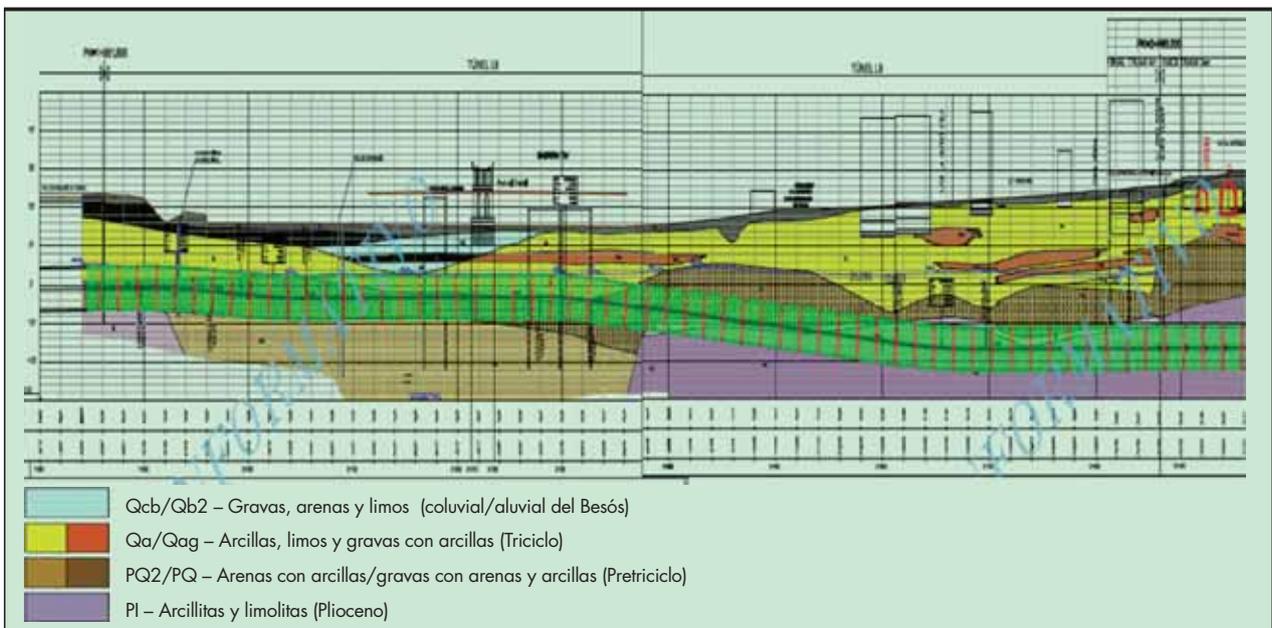


FIGURA 4. Perfil longitudinal geológico de tramo entre Sagrera (Pozo de Cruce) y Meridiana en Barcelona (L-9 del Metro de Barcelona).

D) ZONA DEL SUSTRATO PALEOZOICO Y GRANITOS HECINIANOS DE BARCELONA

Este tramo está pendiente de ejecutar en prácticamente toda su longitud. La traza discurre a través de los materiales rocosos que configuran el sustrato antiguo de la sierra de Collserola a los pies de la cual se asienta la ciudad de Barcelona (Tramo 3). El diámetro del túnel es de 12.0 m y los recubrimientos son elevados en todo el trazado, superiores a los 3 diámetros. Las características de las rocas son muy variables, desde granitos y pórfidos muy duros y abrasivos hasta rocas blandas como pizarras muy fracturadas, pasando además por abundantes fallas algunas de tipo regional con grandes anchos de milonitas y brechas de falla. La presencia de agua puede ser abundante en ciertas zonas como son las fallas y los contactos con algunos diques.

En líneas generales existe un primer tramo entre la Avda Meridiana y la estación de Guinardó donde la traza discurre por el sustrato granito en general bastante sano con presencia de fallas y diques de pórfidos. Desde Guinardó hasta la estación de Sanllehy, aparecen los materiales metamórficos Ordovícicos afectados además en diversos grados por el contacto de la intrusión granítica (corneanas, filitas, filitas moteadas, pizarras moteadas, etc), en general con una elevada fracturación y afectadas en algunos tramos por multitud de fallas. Entre Sanllehy y la estación de Muntanya se entra en los materiales del Carbonífero después de cruzar una nueva falla con un gran desarrollo, apareciendo materiales tipo areniscas y conglomerados. Ya llegando a la estación de Putget se cruzan los materiales Silúricos formados por pizarras negras carbonosas con elevada foliación, y posteriormente las calizas Devónicas. Finalmente entre Putget y la estación de Mandri vuelven a aparecer las filitas moteadas del Ordovícico. Una vez llegado al entorno de la estación de Mandri se vuelve a encontrar el granito que se mantiene hasta el final del tramo en la estación de Zona Universitaria.

3. TÚNELES DE LA LÍNEA 9 EJECUTADOS EN EPB

3.1. ASPECTOS GENERALES

La conducción de las máquinas tipo EPB está en relación con una serie de parámetros de funcionamiento que dependen de varios factores que los condicionan. Entre estos factores cabe señalar:

- Diámetro y trazado del túnel en planta y perfil (recubrimiento sobre el túnel, radios mínimos, pendientes máximas, edificaciones y servicios afectados, etc...).
- Características del terreno (resistencia, abrasividad, granulometría, plasticidad, permeabilidad, contenido de humedad, niveles freáticos y condiciones hidrológicas, grado de karstificación, etc...).
- Variabilidad de las características del terreno dentro de la sección de excavación (secciones de composición mixta roca dura – suelo, existencia de bolos o bloques de gran tamaño, etc...).
- Características técnicas de la máquina (apertura de la cabeza de corte, potencia, par, empuje, etc...).

Los parámetros operativos a controlar en el funcionamiento de la EPB son básicamente:

- Acondicionamiento del material excavado. Consistencia y permeabilidad del escombros en la cámara (espumas, polímeros, aire, agua adicional, bentonita, aporte de finos etc...).
- Régimen de presiones en el interior de la cámara de escombros (presiones totales de trabajo registradas en el mamparo, gradiente vertical de presiones, presiones efectivas entre las partículas de material, estabilidad de la presión, etc...).

- Velocidad de avance de la excavación y salida del material de la cámara de escombros a través del tornillo sinfín (velocidad del tornillo y control de pesadas del material).
- Empuje, par motor y velocidad de rotación de la máquina. Desgaste de las herramientas de corte y de la cabeza de la EPB y tornillo sinfín.
- Eventuales inyecciones a través de la coraza del escudo (presión y volumen de bentonita). Inyecciones de grasa en los cepillos de la cola del escudo.
- Inyección de los anillos por la cola del escudo (sistema de inyección, sincronización con el avance de la máquina, control de volúmenes y presiones, limpieza y mantenimiento de las líneas de inyección, etc...).

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS TBM-EPB'S EMPLEADAS

Para la excavación de los tramos de túnel de la Línea 9 en los que interviene FCC Construcción se han utilizado como se ha dicho 3 máquinas tuneladoras EPB distintas.

CARACTERÍSTICAS CABEZA DE CORTE EPB GUSTER y HADES	
DESCRIPCIÓN	TBM
Diámetro nominal (mm)	9.400
Modo de excavación	EPB
% superficie abierta	31.4%
Configuración	1 cuadrado central + 4 pétalos periféricos
Par máximo (kNm) / revoluciones (rpm)	22.617 / 1.03
Par de desbloqueo (kNm) / revoluciones (rpm)	26.386 / 0.75
Velocidades (rpm)	0-3,2
Radio mínimo TBM	200 m
Potencia neta en cabeza de corte (kW)	2.448
Peso (tn)	125
Sentido giro de cabeza para EPB	horario / antihorario
Empuje máximo recomendado cortador (kN)	250
Espacio entre huellas de cortadores (mm)	100
Nº puntos inyección agua/espuma al frente	8 / 8
MODO EPB	
Discos de corte dobles 17"	21 (Guster) / 22 (Hades)
Picas frontales	51
Cuchillas sustituibles	174
Parejas rastreles giro izquierdas	16
Parejas rastreles giro derechas	16
Barras de mezcla	
Junta modo EPB	
Tornillo sinfín	
Espuma	

TABLA 4. Características de las EPB's de 9.40 m de diámetro empleadas en el Prat y el Aeropuerto: "Hades" y "Guster" (UTE Fira y UTE Túnel Aeroporti).

CARACTERÍSTICAS CABEZA DE CORTE DUAL	
DESCRIPCIÓN	TBM
Diámetro nominal (mm)	11.950
Modo de excavación	abierto / EPB
% superficie abierta	22%
Configuración	1 hexágono central + 6 pétalos periféricos
Par máximo (kNm) / revoluciones (rpm)	28.930 / 0-1,25 9.774 (3,7)
Par de desbloqueo (kNm)	37.000
Velocidad (rpm)	0-3,7
Radio mínimo TBM	200 m
Nº de motores	15
Potencia accionamiento (kW)	15x315=4.725
Peso (tn)	245
Sentido giro de cc	horario
Empuje máximo recomendado cortador (kN)	245
Máxima penetración (mm/min)	80
Espacio entre huellas de cortadores (mm)	81
Nº puntos inyección agua/espuma al frente	8 / 8
MODO EPB / MODO ABIERTO	
Discos de 17" (opción de taparlos)	0 / 69
Picas / discos de 14"	12 / 12
Cuchillas	151
Cuchillas periféricas	48
Barras de mezcla / Palas (12 conjuntos ext. y 12 conjuntos int.)	
Junta modo EPB / Junta modo Abierto	
Tornillo sinfin / cinta y tolva de escombros	
Espuma / Agua	

CARACTERÍSTICAS CABEZA DE CORTE EPB	
DESCRIPCIÓN	TBM
Diámetro nominal (mm)	11.950
Modo de excavación	EPB
% superficie abierta	34%
Configuración	1 hexágono central + 6 pétalos periféricos
Par máximo (kNm) / revoluciones (rpm)	36.800 / 0-1
Par de desbloqueo (kNm)	40.600
Velocidad (rpm)	0-3,4
Radio mínimo TBM	200 m
Nº de motores	15
Potencia accionamiento (kW)	15x315=4.725
Peso (tn)	225
Sentido giro de cc	horario / antihorario
Empuje máximo recomendado cortador (kN)	245
Máxima penetración (mm/min)	80
Espacio entre huellas de cortadores (mm)	80
Nº puntos inyección agua/espuma al frente	8 / 8
MODO EPB	
Discos de corte dobles 17"	66
Picas frontales	238
Parejas rastreles giro izquierdas	12
Parejas rastreles giro derechas	12
Barras de mezcla	
Junta modo EPB	
Tornillo sinfin	
Espuma	

TABLA 5. Características de la TBM de 12 m de diámetro "Besi" con la cabeza de corte dual y la cabeza de EPB pura (UTE Línea 9 y UTE Triangle).

Dos de ellas son de diámetro 9.40 m y son prácticamente gemelas. Se están empleando para excavar los tramos del Aeropuerto y del Prat del Llobregat. La primera de ellas, denominada "Hades", es una máquina nueva adquirida para la construcción de la Línea 9 y que ha ejecutado el tramo de Fira a Parc Logísitic y está actualmente ejecutando el tramo de Mas Blau hacia el Prat de Llobregat (UTE Túnel Aeroport). La segunda es una máquina del Parque de Maquinaria de FCC Construcción, llamada "Guster", y que está ejecutando el tramo de Mas Blau hacia el Aeropuerto. En la tabla 4 se presentan las características técnicas, que son equivalentes para ambas máquinas.

La otra TBM en funcionamiento es una máquina dual de 12.0 metros de diámetro y que permite trabajar como EPB o en modo abierto si se hacen una serie de modificaciones y adaptaciones. Ha ejecutado el tramo de túnel de Santa Coloma de Gramanet entre Can Zam y Can Peixauet (UTE Lí-

nea 9) trabajando en la mayor parte del recorrido en modo abierto salvo ciertos tramos donde fue necesario trabajar en modo EPB. La cabeza de corte que se empleó para la realización del tramo de túnel de Santa Coloma de Gramanet es de tipo "dual" en el sentido que tiene un diseño híbrido entre una cabeza pura de EPB y una cabeza pura de roca. Posteriormente esta misma máquina ha realizado el tramo de túnel entre el Pozo de Trajana y el Pozo de Cruce en La Sagrera y del Pozo de Cruce a Sagrera/Meridiana (UTE Triangle Línea 9) empleando en este caso otra cabeza de corte específicamente pensada para una excavación pura en EPB acorde con las condiciones geológicas de este tramo. En la tabla 5 se indican las características de esta máquina con las particularidades para la cabeza de corte "dual" y para la cabeza pura de EPB.

En las figuras 5,6,7 y 8 se presentan las fotografías de las tres máquinas.



FIGURA 5. Máquina EPB de 9.40 m "Hades" (UTE Fira y UTE Túnel Aeroport).



FIGURA 6. Máquina EPB de 9.40 m "Guster" (UTE Túnel Aeroport). Cale en Terminal Actual.

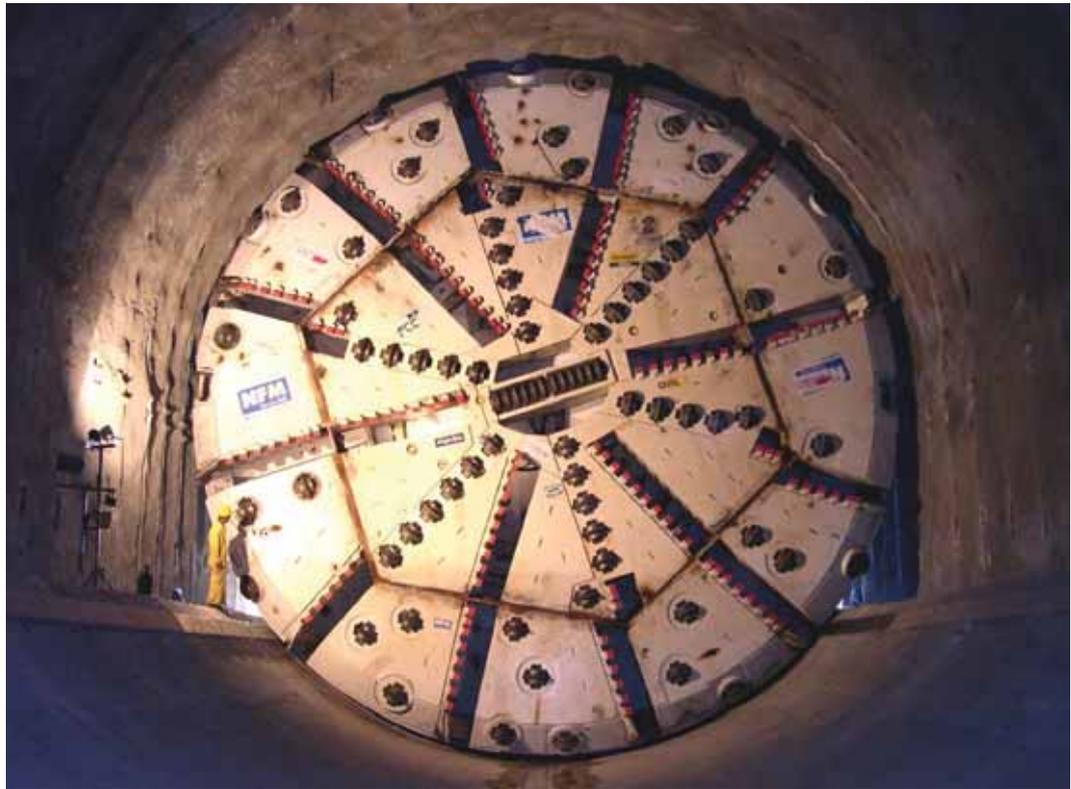


FIGURA 7. Cabeza de corte dual de la TBM "Besi" (UTE Línea 9).



FIGURA 8. Cabeza de corte EPB del a TBM "Besi" (UTE Triangle). Cale en el Pozo de Cruce.

3.3. FUNCIONAMIENTO DE LA TBM-EPB Y PRESIONES EN EL FRENTE

La presión total que ejerce el escombros sobre el frente es lo que garantiza su estabilidad y puede condicionar los asentamientos que se producen por delante de la cabeza de corte. El escombros es el producto de la excavación convenientemente tratado con distintos elementos entre los cuales destacan: espumantes, tensoactivos (generadores de espuma); polímeros (retienen y confinan el agua además de lubricar); aire, agua; y eventualmente bentonita.

El tratamiento del material excavado es necesario realizarlo a fin de obtener una consistencia, homogeneidad y plasticidad adecuada que permita una distribución correcta de las presiones ejercidas sobre el frente de excavación. En el caso de terrenos permeables y bajo el nivel freático el escombros debe de tener además la impermeabilidad necesaria para que se produzca una pérdida adecuada de la carga hidráulica total a lo largo de la cámara y del tornillo sinfín.

Las presiones de confinamiento en el frente se controlan equilibrando el avance del escudo y la descarga de material a través del tornillo sinfín. Por ello el correcto control del peso del material extraído resulta fundamental. Para que este control sea fiable es necesario mantener limpias y calibradas las básculas en todo momento.

Para la determinación de la presión de trabajo que se necesita en el frente cabe aplicar métodos numéricos o de carácter empírico. Mediante análisis numéricos tridimensionales se determina la presión límite inferior que provoca el colapso del frente y la presión límite superior que provoca el levantamiento o rotura pasiva del frente (blow out). Al valor límite inferior se le suele aplicar un cierto coeficiente de seguridad (1,4 – 1,5) para determinar la presión teórica de funcionamiento.

En cuanto a los criterios empíricos existen varios métodos para la determinación de la presión en el frente de avance según el tipo de suelos, además de procedimientos analíticos basados en métodos de cálculo por equilibrio límite. Para el caso de túneles someros ($H/D \leq 1$) o túneles en suelos normalmente consolidados, es usual proponer como presión de trabajo un valor próximo a la presión de reposo que tiene el terreno a la pro-

fundidad del túnel (entendida como la presión horizontal efectiva más la presión intersticial). A este valor se le suele añadir una cantidad adicional ($\approx 0,2$ bares) tratando de contrarrestar las oscilaciones y caídas de presión dentro de la cámara. Para túneles más profundos ($H/D > 1$), se admite la determinación de la presión necesaria en el frente por métodos numéricos u otros métodos de equilibrio límite, dotados con un adecuado coeficiente de seguridad.

En los tramos de la Línea 9 en la zona de El Prat de Llobregat y del Aeropuerto, con coberturas usualmente entre 1 y 2 diámetros en terrenos blandos normalmente consolidados, se han determinado las presiones de trabajo según métodos empíricos y según métodos numéricos tridimensionales, dando resultados coherentes entre ellos y que se han mostrado adecuados para controlar los asentamientos. En la figura 9 se presentan los valores de presión en el frente calculado para un tramo de El Prat de Llobregat entre las estaciones de Plaza Cataluña y Eixample Nord, comparando los resultados según método numérico 3D y con el método empírico del empuje al reposo.

En la figura 10 se muestra el registro a lo largo de unos 400 m del túnel de La Fira-Parc Logistic de los valores medios de las presiones de tierra durante la perforación de cada anillo en las 7 células existentes en la cámara de escombros, incluyendo además el valor mínimo registrado para la célula superior P1, y se puede observar que la variación por defecto en esta célula respecto al valor medio de la misma célula no supera el 10% salvo casos puntuales. Esto es indicador de un correcto modo de avance con EPB manteniendo un régimen de equilibrio entre la masa de material extraído de la cámara y la masa teórica que corresponde al avance.

La figura 11 muestra la evolución detallada de las presiones de tierra medidas en algunas de las células de la EPB en un intervalo de tiempo del orden de 4 horas en una determinada sección del túnel la Línea 9 en El Prat de Llobregat. Se pueden ver las oscilaciones que experimentan dichas presiones que en general no sobrepasan el 10% respecto al valor medio, y además se pueden apreciar las variaciones que tienen según la posición de la célula que las registra y la tendencia a disminuir que experimentan en los momentos de las paradas del avance.

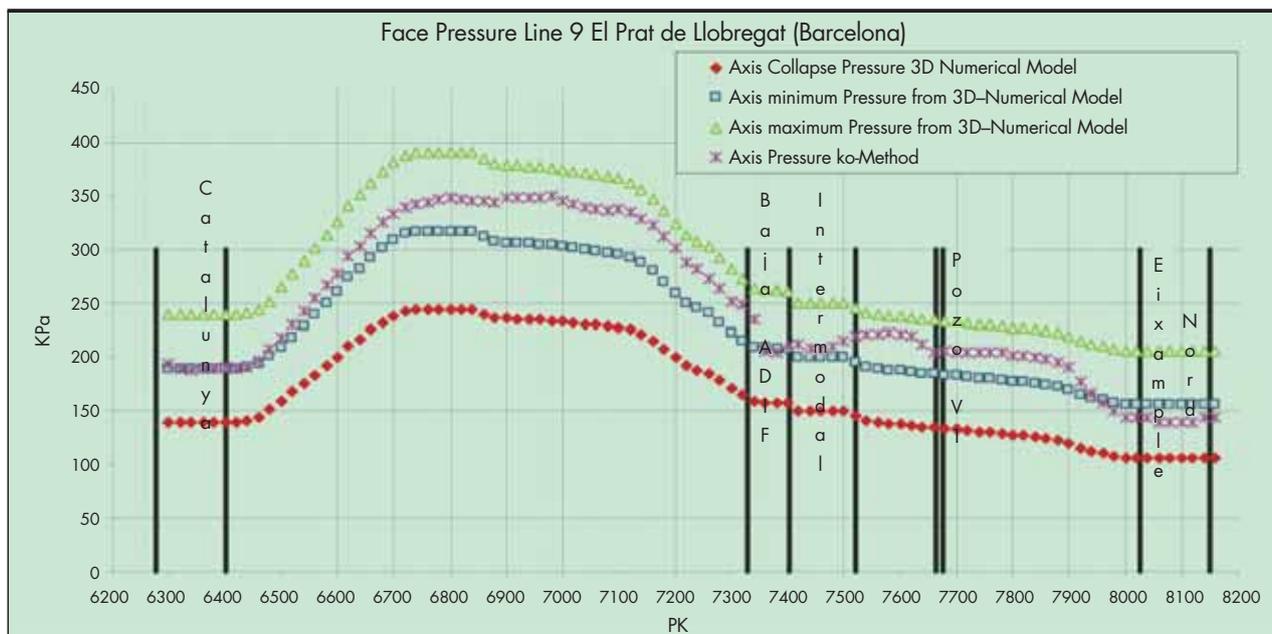


FIGURA 9. Valores para la presión de frente en el eje según métodos numéricos 3D y según métodos empíricos en la L-9 en un tramo de El Prat de Llobregat.

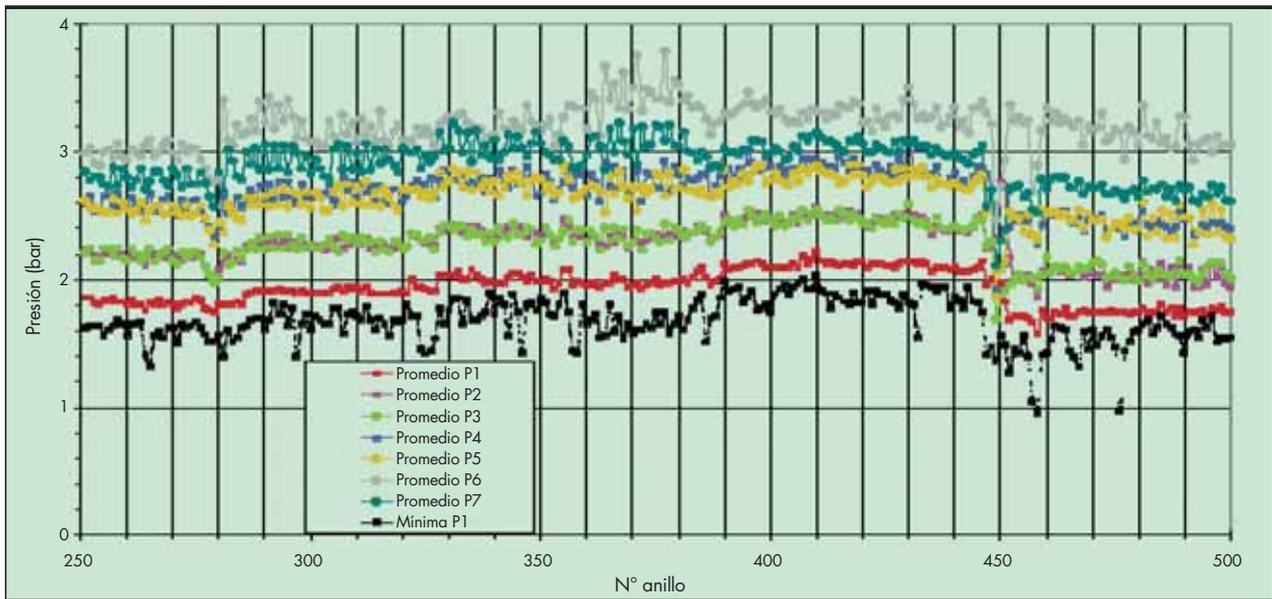


FIGURA 10. Línea 9 del Metro de Barcelona entre La Fira - Parc Logístic. Presiones de tierra en la cámara de escombro.

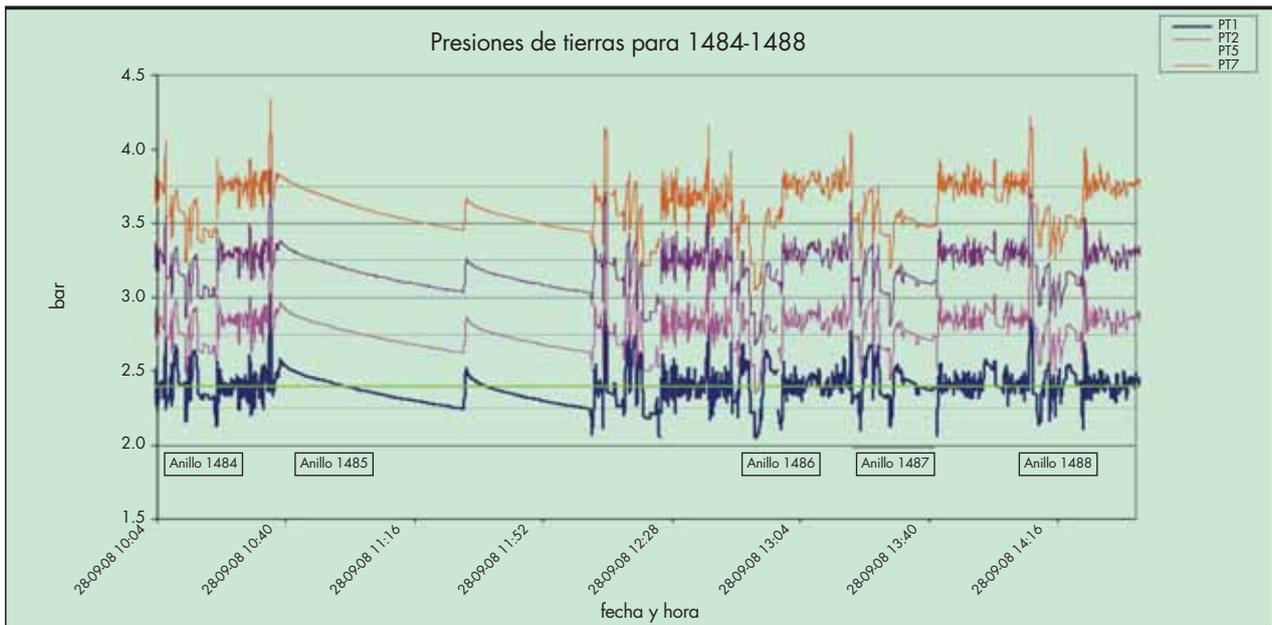


FIGURA 11. Tramo entre San Cosme y la Plaza Cataluña (El Prat de Llobregat) de la L-9 Metro de Barcelona. Presiones de tierra en la cámara de escombro para varios anillos.

En la figura 12 se muestran los valores del gradiente vertical de las presiones de tierra medidas en la cámara de escombro a lo largo del túnel de la Fira de la Línea 9. En general los valores se sitúan entre 1 y 2 $T/m^2/m$, siendo el valor medio del orden de 1,5.

3.4. ASIENTOS MEDIDOS

En la figura 13 se presenta un esquema simplificado del rango de magnitud porcentual en el que se han situado los asientos generados en superficie, en buena parte de las secciones analizadas correspondientes a varios tramos de la L9, y su evolución respecto de la posición relativa que guardan el punto de control

y el escudo. El terreno, la profundidad y diámetro del túnel, y el modo de operación de la EPB condicionan el asiento.

En lo que corresponde al modo de operación de la EPB se observa, a la vista de las experiencias conocidas, que los factores más importantes desde el punto de vista de los asientos son:

- El régimen de presiones de confinamiento que el escombro ejerce sobre el frente. Esto tiene su influencia en los asientos que se generan por delante de la cabeza de corte.
- La inyección de los anillos en la cola del escudo (sistema utilizado, características del material inyectado y control de volúmenes y presiones). Esto influye en los asien-

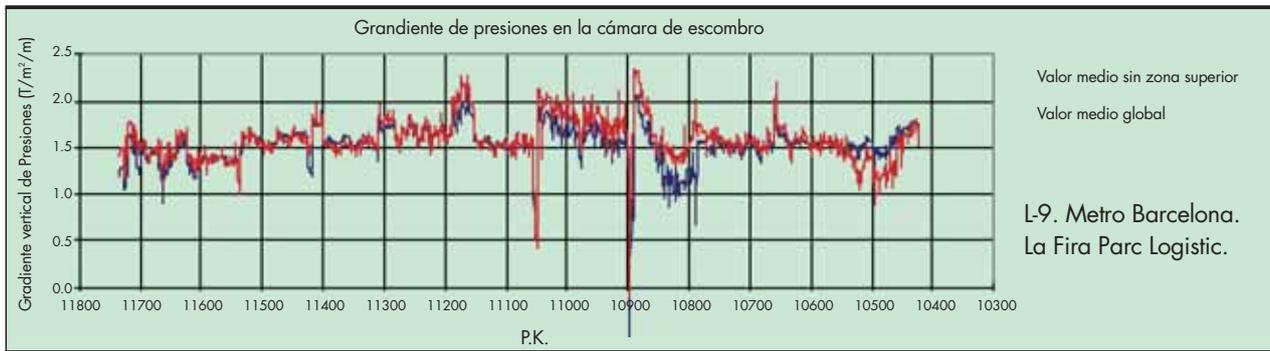


FIGURA 12. L-9.Metro de Barcelona. La Fira- Parc Logistic. Gradiente de presiones en la cámara de escombro.

tos que se producen en la vertical de la cola del escudo, donde con el avance de la máquina se genera el hueco que debe rellenarse con la inyección.

- La velocidad de avance del túnel.

En general, las experiencias en la Línea 9 muestran una mayor relevancia de aquella parte del asiento que se genera en la cola del escudo, siendo muy sensible a la inyección del mortero de cola lo que ha obligado a establecer unos procedimientos muy estrictos en cuanto a volúmenes mínimos y presiones de corte de la inyección.

En cambio el asiento generado a lo largo del escudo tiene, generalmente, una importancia relativa menor si no se producen paradas y se mantienen las velocidades de avance normales de la EPB. Este asiento queda también minimizado por el procediendo de la inyección de bentonita alrededor de la coraza del escudo con presiones intermedias entre las del frente y las de inyección de mortero en la cola y que se ha realizado de forma sistemática en todos los tramos de la Línea 9.

En cuanto al asiento generado al paso del frente se han medido valores relativamente pequeños respecto al asiento total en los distintos tramos ejecutados allí donde se ha podido valorar este efecto.

En la figura 14 se muestra para el tramo de la Línea 9 entre Fira y Parc Logístic la evolución de los asientos, los volúmenes de asientos medidos, las presiones en el frente y las presiones de inyección del mortero de cola.

En la figura 15 se presentan los asientos y volumen de asientos medidos entre Mas Blau y San Cosme. Se observa que salvo el sector en la zona de inicio donde se constituyó un campo de pruebas para el ajuste del funcionamiento de la EPB, los volúmenes de asiento han sido marcadamente inferiores al 0.5% y con asientos en el eje por debajo de los 10 mm.

En el túnel de UTE Triangle Línea 9 entre Pozo de Cruce y Sagrera de 12 m de diámetro, en suelos firmes ligeramente sobreconsolidados, los asientos medidos han sido mucho más pequeños, en la mayoría de casos inferiores a 5 mm y con volúmenes de asientos inferiores al 0.2%. En la figura 16 se muestran estos registros a lo largo del tramo mencionado.

En las condiciones de funcionamiento normales los volúmenes de asiento medidos en los distintos túneles de la Línea 9 del Metro de Barcelona considerados y que se han ejecutado en modo EPB, han quedado limitados en líneas generales por los valores que se indican en la tabla 6.

Aquellas zonas ocasionales en las que los volúmenes de asiento superaron los límites indicados, se correspondieron con zonas de bajo recubrimiento o en tramos donde se produjeron algunas incidencias puntuales en las operaciones de la EPB.

3.5. TRATAMIENTOS ESPECIALES. TÚNELES SOMEROS

En las líneas de Metro es frecuente que los túneles discurren con poco recubrimiento en algunas partes de su trazado, generalmente a la entrada y salida de las estaciones, donde pueden

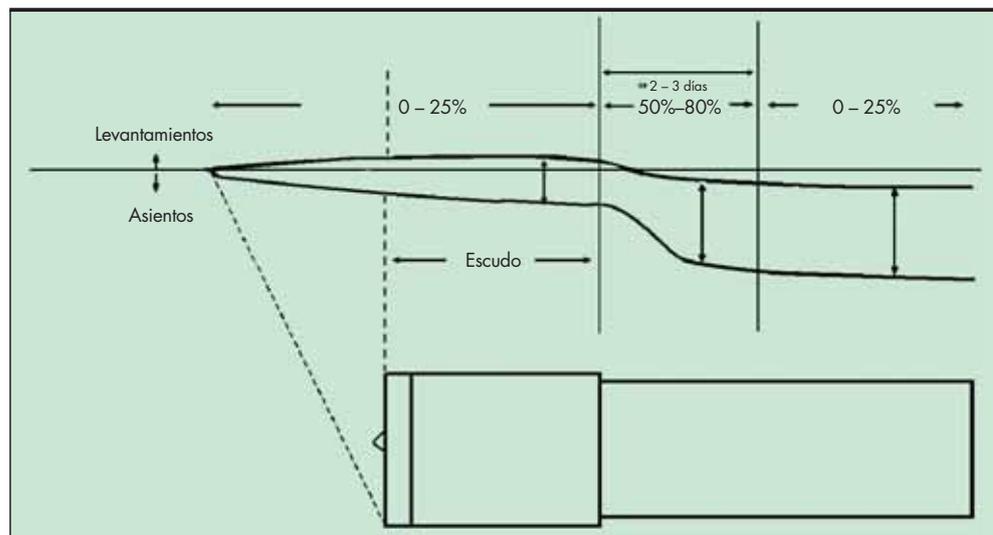


FIGURA 13. Rangos aproximados del desarrollo de los asientos medidos en varios túneles ejecutados con EPB.

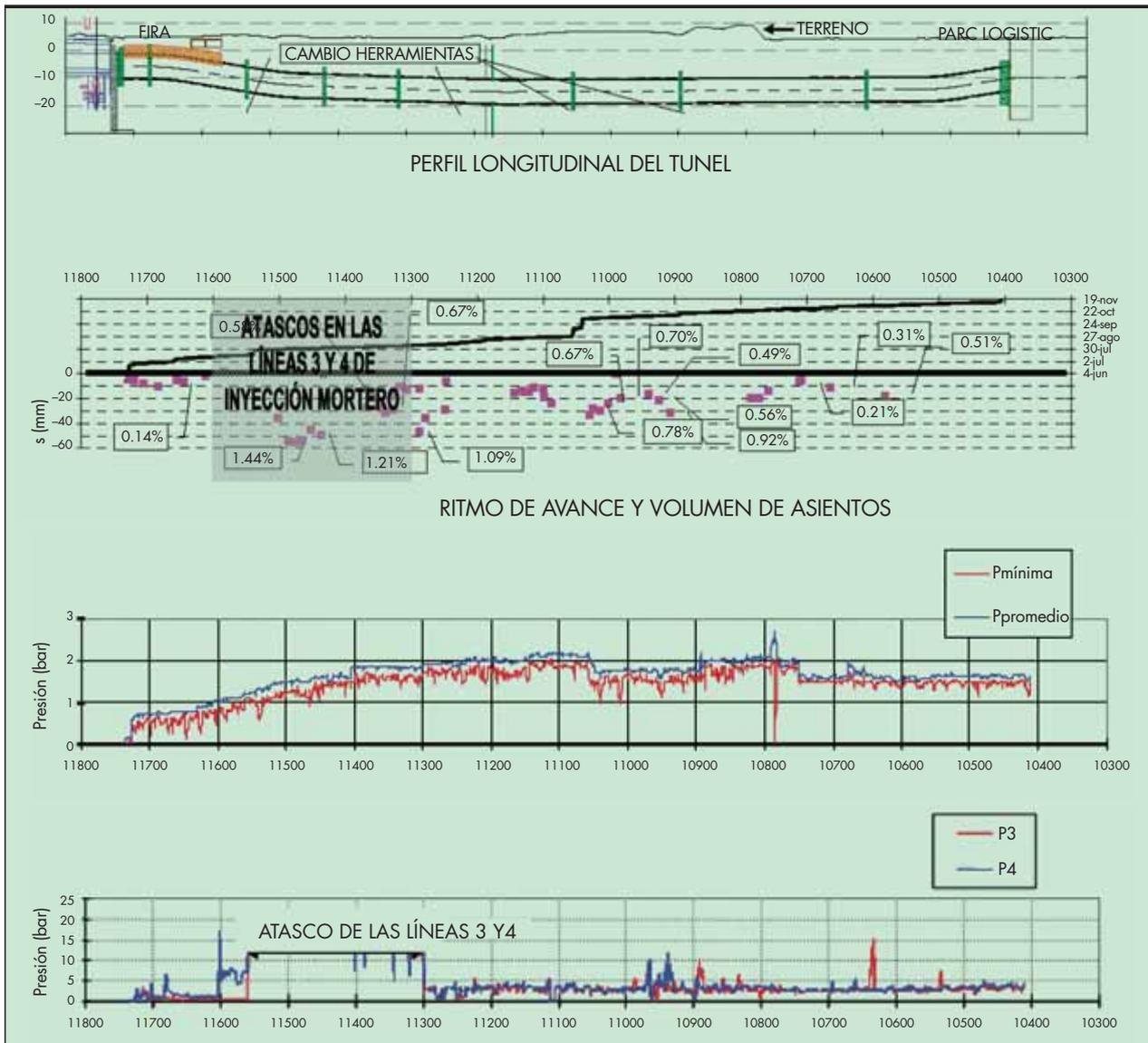


FIGURA 14. Línea 9 Metro de Barcelona, tramo Fira-Parc Logistic: (i) perfil longitudinal del túnel; (ii) volúmenes de asentamientos; (iii) presión de tierras en la célula superior con el valor medio y el mínimo por anillo; (iv) presión de inyección de mortero en dos líneas P3 y 4.

tener recubrimientos inferiores al diámetro. Una buena parte de este recubrimiento lo pueden constituir terrenos poco consistentes como rellenos antrópicos recientes.

Asimismo, las presiones de tierra con las que se opera en estas zonas superficiales son relativamente bajas y consecuentemente las oscilaciones que ocasionalmente experimentan pueden representar un porcentaje alto de su valor, lo que supone un riesgo de aumento de los asentamientos en superficie y/o incluso de inestabilidades y colapsos. Con un terreno flojo y túnel con bajo recubrimiento la subsidencia en superficie crece y el riesgo de colapso aumenta.

Esta es la razón por la que en determinadas situaciones se recurre a tratamientos de mejora del terreno con anterioridad al paso del túnel. En la figura 17 se presentan los tratamientos realizados al comienzo del túnel de la Línea 9 del Metro de Barcelona en el tramo La Fira – Parc Logistic. Los parámetros de funcionamiento en este punto han sido los que se muestran en la tabla 7.

3.6. PASO EN SECCIONES MIXTAS CON ROCA Y SUELOS

Se hace referencia a secciones mixtas aquellas en las que la sección de excavación en el frente del túnel está compuesta parcialmente por rocas competentes y suelos en el resto de la sección. Son situaciones muy desfavorables por la dificultad que plantean para realizar en ellas una correcta operación de avance en modo EPB, lo que resulta obligado en la mayor parte de los casos para mantener estable el frente.

En la obra de la Línea 9 del Metro de Barcelona en la zona de Santa Coloma de Gramanet se han atravesado tramos con secciones mixtas en las zonas de Fondo y de Can Peixauet. En las figuras 18 a 20 se muestran las plantas y las secciones de las zonas de sección mixta referidas. En ambos casos la sección excavada se caracteriza por la presencia en la parte inferior de roca granodiorita sana y en la parte superior de un suelo producto de la alteración de la granodiorita (jabre, granodiorita con grados de alteración IV – V) con existencia además de agua freática.

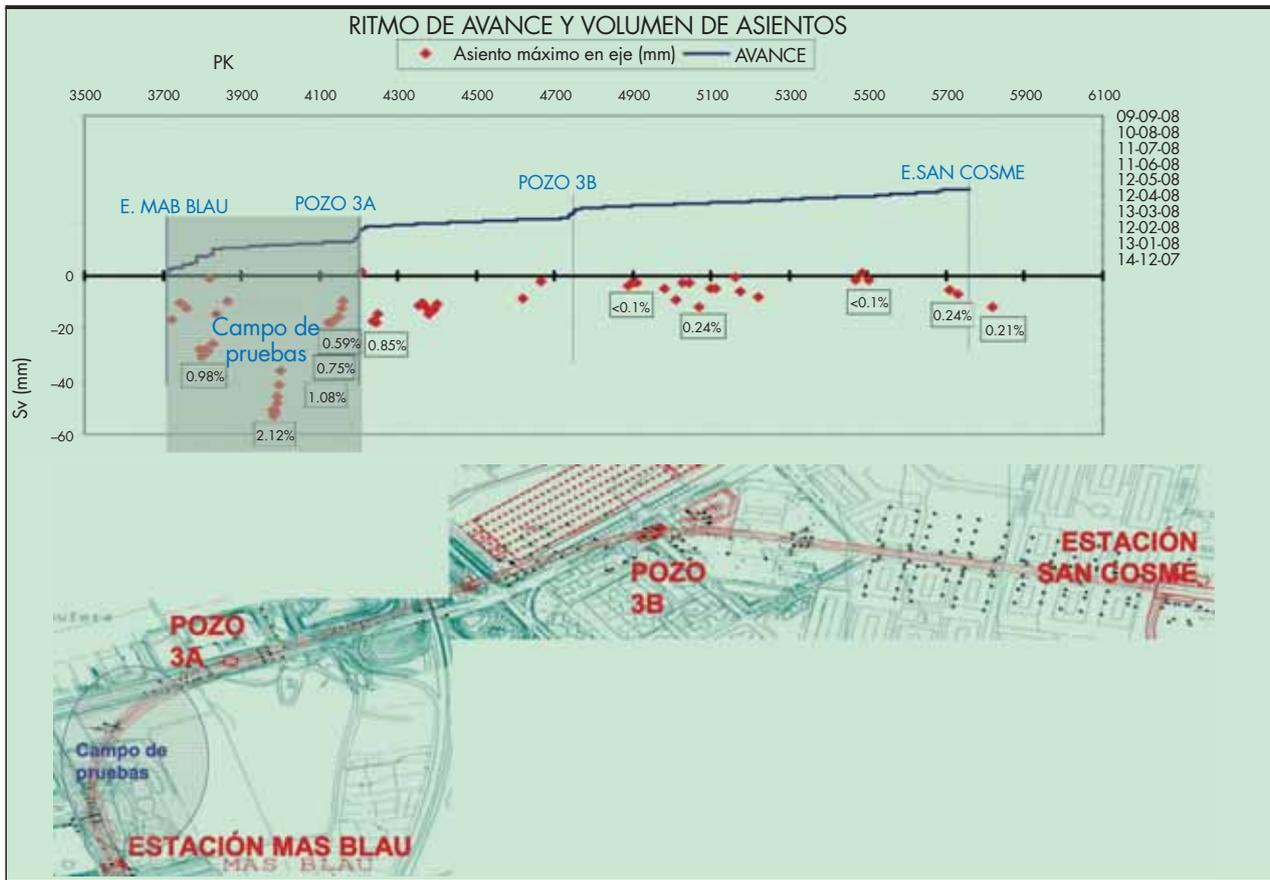


FIGURA 15. Evolución de los asentamientos en la Línea 9 del metro de Barcelona, tramo entre Mas Blau y San Cosme.

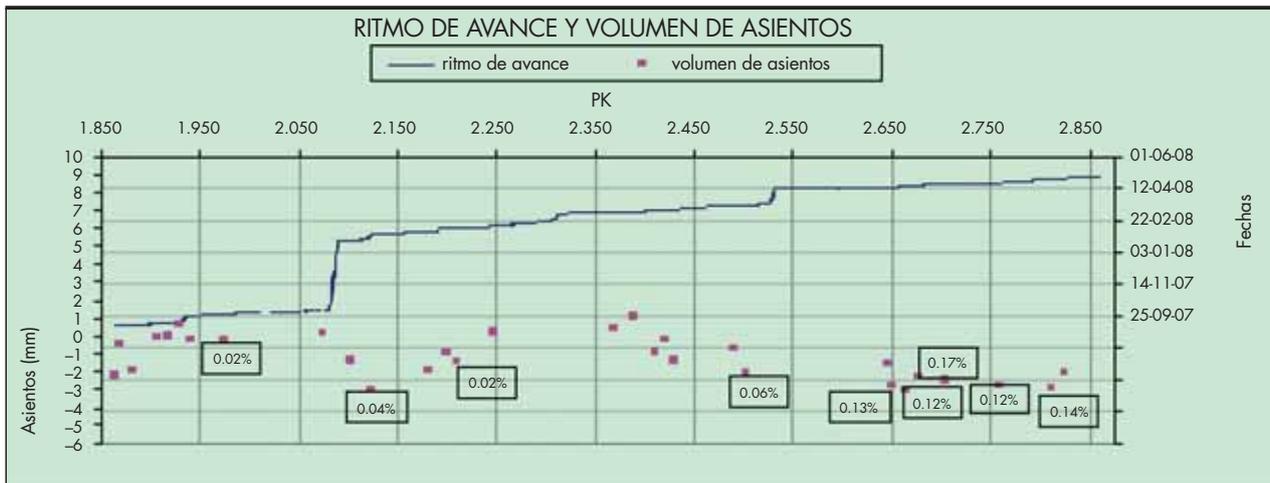


FIGURA 16. Evolución de los asentamientos en la Línea 9 del metro de Barcelona, en el tramo 4C entre el Pozo de Cruce y Sagrera/Avda. Meridiana.

L-9. Metro de Barcelona	Volúmenes de asentamientos	Asiento en eje
Zona del Prat de Llobregat y Aeropuerto	< 0.50 %	< 10 mm
Zona de Cuaternarios ("Tricicle") y Plioceno en Barcelona: Trajana – Sagrera – Meridiana	< 0.20 %	< 5 mm

FIGURA 6. Valores de referencia para el volumen de asiento y asiento máximo en las experiencias con EPB en la Línea 9 de Barcelona.

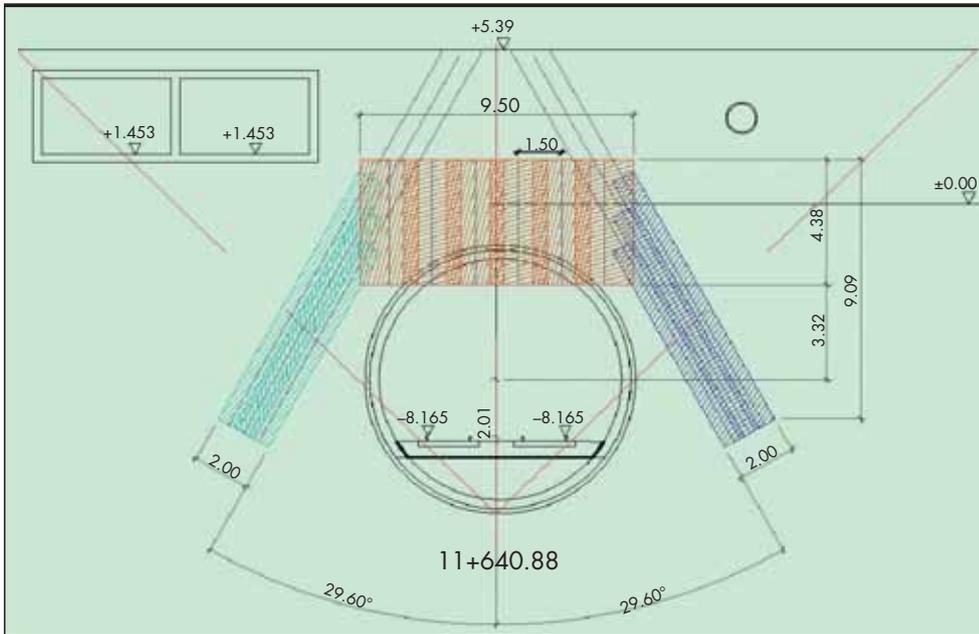


FIGURA 17. L-9. Metro de Barcelona. Fira – Parc Logistic. Tratamiento del terreno con Jet-Grouting en el tramo inicial.

En la zona de Fondo se llegó con la TBM excavando en modo abierto hasta que la cobertura en roca sana fue inferior a los 2.5 m, determinando el momento para cambiar a modo EPB mediante prospecciones con sondeos desde el frente de la máquina. Ya trabajando en modo EPB se produjo una sobreexcavación que aconsejó realizar una serie de actuaciones desde superficie antes de retomar la excavación, consistentes en inyecciones de mortero e inyecciones de cemento a través de perforaciones con tubo manguito instalado además de ejecutar una serie de bombeos para reducir la altura piezométrica. Todas estas actuaciones permitieron retomar la excavación logrando pasar con éxito los aproximadamente 80 m en terreno mixto.

En la zona de Can Peixauet, el tramo de sección mixta se prolonga alrededor de 270 m en un recorrido despejado en su mayor parte menos en la zona final en el que el trazado pasa por el lado de un edificio. En este caso los trabajos de consolidación del terreno y protecciones se realizaron con antelación al paso de la tuneladora. Consistieron por un lado en proteger el edificio mediante una doble pantalla de micropilotes dispuestos en tienda de campaña (figura 20), y por otro lado se redujo la altura piezométrica de la zona mediante el bombeo de 6 pozos dispuestos a lo largo de la traza. Además se realizaron unas zonas apantalladas cada 80 m para poder detener la tuneladora con seguridad y realizar revisiones y cambio de útiles de corte. La excavación se realizó manteniendo velocidades de giro de la cabeza bajas, y se logró superar este tramo comprometido sin incidencia remarcables y con asientos despreciables.

En las secciones mixtas resulta cuestionable el principio sobre el que se basa el funcionamiento de las máquinas EPB. En ellas no es posible garantizar un control total de la sección de excavación.

Llevar la cámara llena de material, acondicionar el escombro correctamente y avanzar con un régimen de presiones adecuado en la célula superior del mamparo, no evita que puedan producirse vibraciones y fluctuaciones importantes y no controlables en la presión real de soporte que existe en el frente y, en consecuencia, puedan producirse sobreexcavaciones de la sección. Dicha presión sólo se puede generar correctamente si está perfectamente relleno el espacio que existe entre el frente y la cabeza de corte. Este relleno puede no ser perfecto cuando en la misma sección existen materiales con resistencias y penetración muy distintas (con facilidad para producir sobreexcavaciones en un caso y con dificultad de excavación en el otro).

Por otra parte, la sección en roca podría proporcionar ocasionalmente bloques de cierto tamaño que complicarían el acondicionamiento correcto del escombro y su salida por el tornillo sinfin. Con el giro de la cabeza de corte las herramientas sufren esfuerzos dinámicos considerables al pasar del terreno blando a la roca dura aumentando el número de roturas en dichas herramientas.

En determinados casos resulta necesario realizar un tratamiento previo del terreno en la zona de suelo que reduzca el carácter mixto de la sección o que trate de evitar las sobreexcavaciones.

Debe de extremarse el control sobre todos los parámetros de operación de la EPB en las zonas de secciones mixtas, especialmente los relativos al avance y pesaje del material y a la inyec-

	Recubrimiento (m)	Diámetro túnel (m)	Terreno sobre la clave de túnel	Tratamiento	Presión de tierras célula superior (bar)	Avance mm/min	Asiento Máximo (mm)
Fira-Parc Logistic (Inicio Túnel)	7	9,40	Arenas, arcillas y rellenos antrópicos N.F.+1 clave	Jet-Grouting	0,8-1,0	15-30	10

TABLA 7. Parámetros de funcionamiento en el inicio del túnel de la Fira en la Línea 9 de Barcelona.

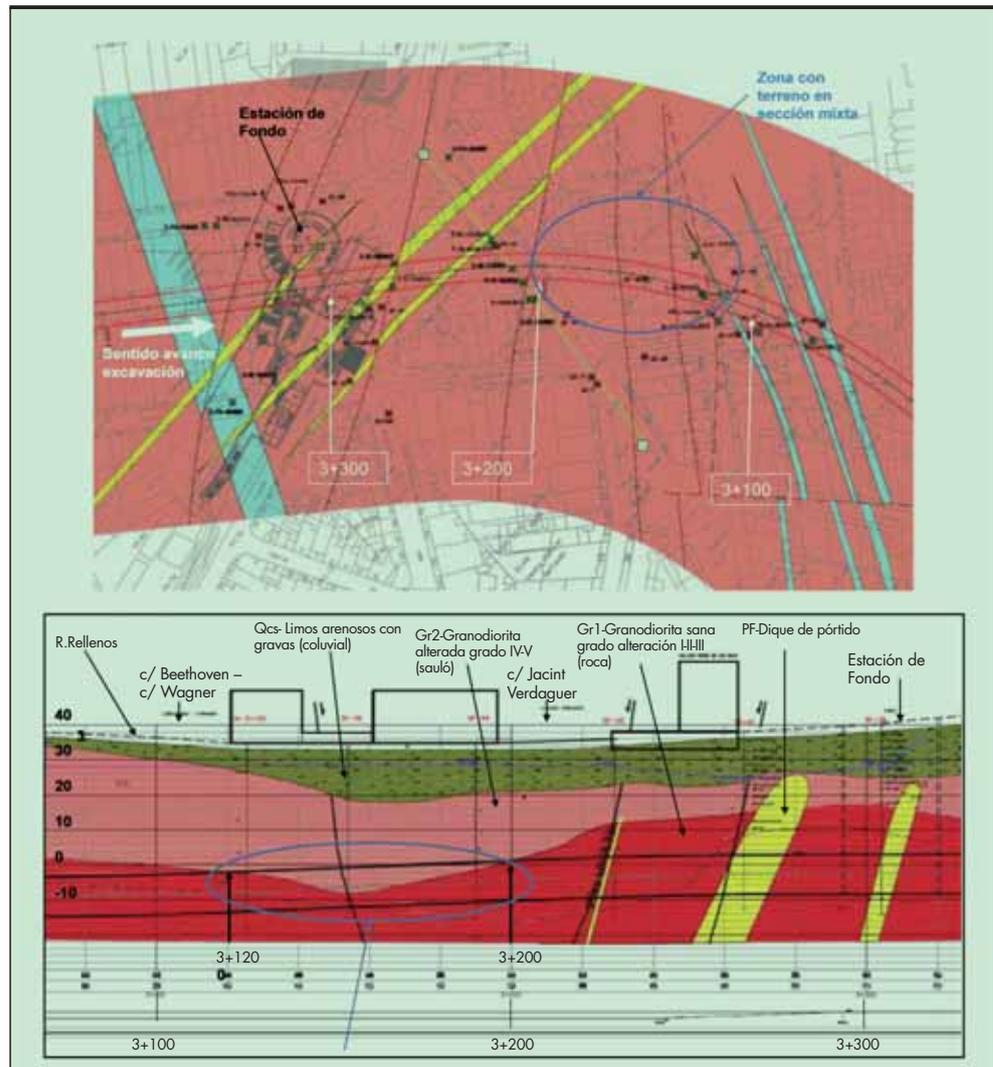


FIGURA 18. Planta y perfil geológico de la zona de Fondo con terreno mixto del P.K. de 3+200 al 3+120. Túnel de la Línea 9 del Metro de Barcelona en Santa Coloma.

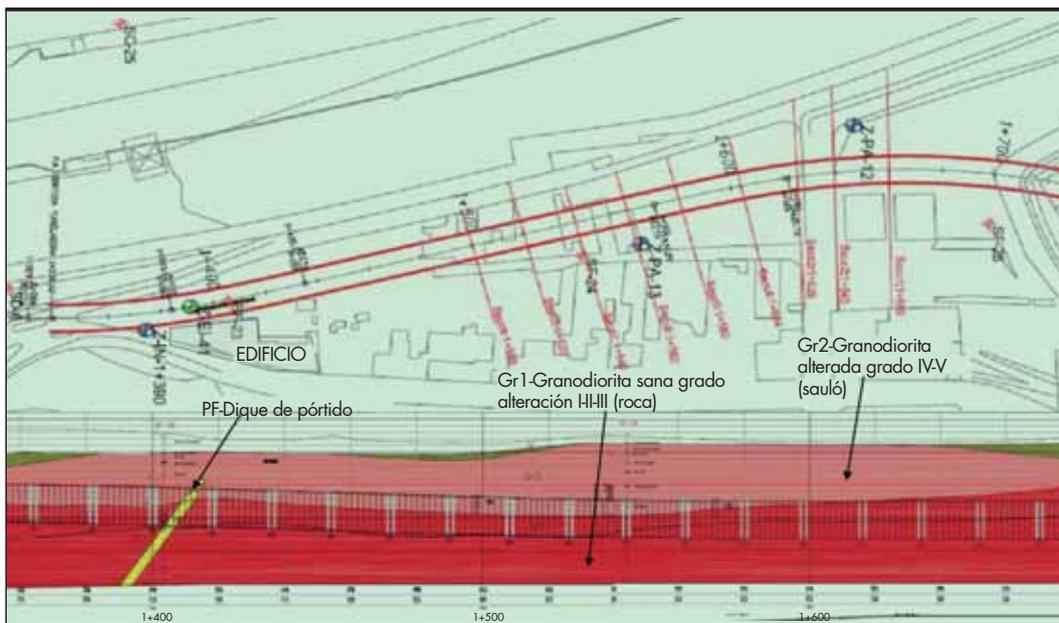


FIGURA 19. Planta y perfil geológico del tramo de Can Peixauet en terreno mixto entre el P.K. 1+640 y 1+370. Túnel de la Línea 9 del Metro de Barcelona en Santa Coloma.

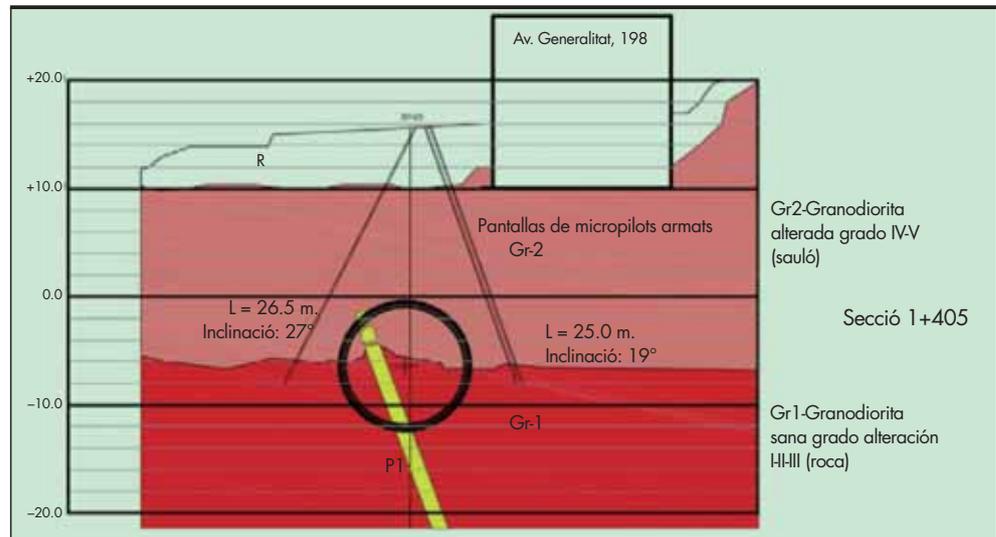


FIGURA 20. Sección transversal del paso junto al edificio del P.K. 1+405, en Can Peixauet. Túnel de la Línea 9 del Metro de Barcelona en Santa Coloma.

ción de mortero por cola. Asimismo, conviene que sea bajo el número de revoluciones de la cabeza de corte (1 – 2 Rpm) y que la penetración por vuelta no supere los 20 mm/rev, para evitar que los discos de corte de la zona periférica se destruyan al pasar de la zona superior disgregada a la inferior competente. Esto supone que el avance de la excavación, que está condicionado por la parte más resistente de la roca, será reducido. En la zona más comprometida del P.K. 1+400 de la Línea 9 del Metro de Barcelona en Can Peixauet se avanzó a una velocidad de 8 m/día.

4. CONCLUSIONES

El túnel de nueva construcción de la Línea 9 del Metro de Barcelona permite atravesar la ciudad de un extremo a otro conectando varias poblaciones del entorno de la ciudad y con varias infraestructuras como el Aeropuerto, la zona industrial del Puerto o el recinto Fira-2.

FCC Construcción ejecuta en UTE con otras empresas más de la mitad de los 48 kilómetros que tiene la línea, en su mayor parte excavados con máquina tuneladora (TBM). Actualmente (a diciembre 2008) lleva ejecutados unos de 15.5 kilómetros de túnel de los cuales 14.2 kilómetros se han excavado con TBM y de estos aproximadamente 9,5 kilómetros se han realizado en modo EPB, es decir en modo cerrado y con presión de tierras en el frente.

Las condiciones geotécnicas del terreno a lo largo de la L-9 del metro son muy variables y en algunos tramos especialmente complejas, lo que dificulta el manejo de la máquina TBM y obliga a adaptar los equipos a cada circunstancia. Además tratándose de un túnel urbano, obliga a tomar todas las medidas para lograr las mejores prestaciones de las máquinas y generar los mínimos asentamientos de subsidencia.

Los volúmenes de asentamientos medidos han sido, en general, inferiores al 0,2% en los terrenos consolidados del Plioceno y Tricicle de Barcelona, con asentamientos máximos en la vertical de la traza marcadamente inferiores a los 5 mm en un elevado porcentaje de casos. En los terrenos poco consolidados del Prat de Llobregat se están logrando volúmenes de asentamientos inferiores al 0,5%, con asentamientos en la vertical del trazado mayoritariamente inferiores a 10 mm.

La inyección del trasdós del anillo al salir de la cola del escudo tiene una gran trascendencia desde el punto de vista de los asentamientos en superficie. Entre las medidas que se toman para lograr este objetivo se halla el tener en un correcto estado

de limpieza el sistema de inyección que permita mantener operativas todas las líneas, además de una programación adecuada y una perfecta sincronización entre el suministro de mortero y el avance de la excavación.

En situaciones de bajo recubrimiento y cuando se atraviesan secciones mixtas aumenta el riesgo de que se produzcan sobreexcavaciones de la sección. En dichas situaciones los parámetros de funcionamiento de la EPB se controlan de manera especial evitando en todo lo posible las fluctuaciones significativas de las presiones de trabajo en la cámara y del volumen de escombros que se extrae por el tornillo. Normalmente, resulta conveniente trabajar con pocas revoluciones en la cabeza de corte. Esto supone en el caso del paso de secciones mixtas que se reduce significativamente la velocidad de avance y por lo tanto bajan los rendimientos.

En situaciones de muy bajo recubrimiento y en secciones mixtas donde existe posibilidad de afecciones a terceros, se han realizado tratamientos previos de mejora y consolidación del terreno o de protección de los elementos cercanos a la traza.

5. AGRADECIMIENTOS

Los Servicios Técnicos de FCC Construcción quieren expresar su agradecimiento de forma general a todas las personas que han estado involucradas en la dirección y construcción de las obras que se comentan en el artículo.

En particular, queremos reconocer la labor de gestión y dirección realizada por GISA, Gestió d'Infraestructures, S.A., así como a las empresas que realizan la dirección de las obras PAYMA, AUDING, TEC4, GPO.

Se debe agradecer también la dedicación y el buen trabajo realizado por el personal de las empresas FERROVIAL, COPISA, OHL, SCRINSER, COPCISA, COMAPA que juntamente con los técnicos y operarios de FCC Construcción han participado en la ejecución de las obras a las que nos hemos referido.

De una forma especial se desea reconocer la dedicación que desde el Servicio de Maquinaria de FCC Construcción se ha realizado para el buen funcionamiento de las máquinas EPB empleadas. Y en particular recordar a Carlos Cebamanos Jarreta, recientemente fallecido, por su aportación decisiva en el desarrollo y explotación de las TBM y en su tarea de dirección y formación del grupo de trabajo que hace posible que FCC Construcción tenga un nivel de excelencia en el campo de la ejecución de túneles con tuneladoras.