

El Tramo Can Zam – Besòs de la Línea 9 del Metro de Barcelona

The Can Zam – Besòs Section on Line 9 of the Barcelona Metro

Revista de Obras Públicas
nº 3.498. Año 156
Abril 2009
ISSN: 0034-8619

Carme Deulofeu Palomas. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Directora General Obra Civil, GISA. cdp@gisa.cat

Joan Serratosa Bellés. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director División "Línea 9". jsb@gisa.cat

Henning Schwarz. Dipl. Ing. Univ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Jefe Oficina de Auscultación y Geotecnia. hsc@gisa.cat

Resumen: La Línea 9 del Metro de Barcelona es la mayor infraestructura de transporte de nueva construcción en el área metropolitana de Barcelona. Las condiciones específicas del territorio han llevado a diseñar para la mayor parte del proyecto un túnel de 10,90m de diámetro interior dividido por una losa intermedia que separa dos niveles independientes uno para cada dirección de circulación. Este diseño permite incluir la zona de andenes, vías de aparcamiento de trenes, apartaderos y rampas de comunicación dentro del túnel.

A lo largo de las fases de proyecto y ejecución de las obras se desarrollaron metodologías específicas que posteriormente han sido empleadas para la construcción de otras infraestructuras subterráneas gestionadas por GISA. El presente artículo resume la metodología aplicada desde la fase de proyecto hasta la finalización de la obra civil del tramo Can Zam – río Besòs.

Palabras Clave: Túnel; Proyecto; Obra; Metodología y Control; Metro Barcelona

Abstract: Line 9 on the Barcelona Metro is the largest transport infrastructure to be built in the Barcelona metropolitan area over recent years. The specific ground conditions have meant that the majority of the work is designed as a 10.90 m diameter tunnel divided by an intermediate slab separating two individual levels, one for each direction of travel. This design allows the inclusion of platform areas, siding and passing areas and communication ramps within the tunnel. Specific methodologies were developed during the design and construction of the work which have subsequently been employed in the construction of other underground infrastructures managed by GISA. The present article gives a summary of the methods applied from the design stage to the termination of the civil works on the Can Zam – río Besòs section.

Keywords: Tunnel; Design; Construction; Method and Control; Barcelona Metro

1. Introducción

La Línea 9 del Metro de Barcelona es la mayor infraestructura de transporte de nueva construcción incluida en el Plan Director de Infraestructuras (1). Los municipios atravesados corresponden a las zonas de mayor densidad poblacional del Área Metropolitana de Barcelona tal y como se aprecia en la foto aérea (fig. 1).

De Norte a Sur discurre por: Santa Coloma de Gramenet, Badalona, Barcelona, L'Hospitalet de Llobregat y El Prat de Llobregat. Su función será la de convertir el esquema radial del Metro de Barcelona en una red mallada que acercará el transporte colectivo a zonas no comunicadas de forma óptima como Santa Coloma de Gramenet, Badalona, la zona industrial y de servicios de Zona Franca, el municipio de El Prat de Llobregat o el acceso al aeropuerto, facilitando los

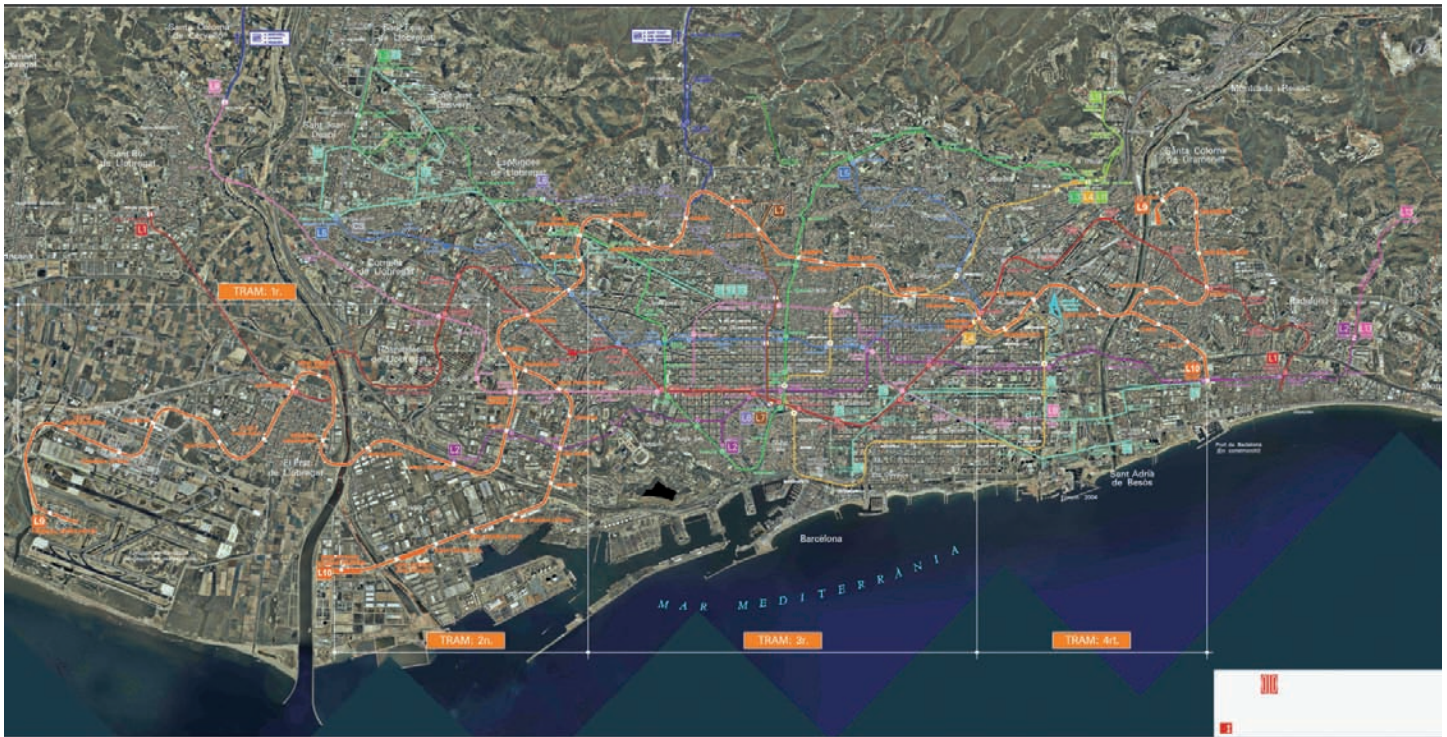


Fig. 1. Fotografía aérea de Barcelona con el trazado de la futura Línea 9.



Fig. 2. Red de Metro actual incorporando la Línea 9.

intercambios tanto monomodales como intermodales. Es por tanto una línea de metro que aumenta y mejora las condiciones socioeconómicas y de accesibilidad de áreas densas y consolidadas pero faltas de comunicación. (ver Fig. 2).

La línea tendrá una longitud de 47,8 Km. De las 52 estaciones que la componen, 20 serán de intercambio con otras líneas de metro y otras líneas ferroviarias como son las de Ferrocarrils de la Generalitat (FGC), Tranvía, Cercanías, Regionales, Largo Recorrido y Alta Velocidad de RENFE.

Para su construcción se optó por la ejecución de túneles con excavación mecanizada mediante tuneladoras de tipo EPB en suelos y roca blanda, y mediante tuneladora convertible de EPB a TBM y viceversa dependiendo de las características de la roca que se encuentre en su trazado. En gran parte del trazado, el diámetro interior del túnel es de 10,90m., por lo que se requiere de máquinas de hasta 12,06m. de diámetro de excavación. En el interior de este túnel de gran diámetro se construye una losa intermedia que permite independizar cada uno de los sentidos de circulación y disponer la nave de andenes en el interior del túnel sin necesidad de tener que excavar grandes recintos de estaciones desde superficie o cavernas bajo zonas edificadas. Asimismo, en la zona del Delta del río Llobregat, y con el objetivo de proteger el acuífero profundo se optó por un túnel más superficial y único de dos vías y estaciones convencionales entre pantallas. Novedoso para Barcelona es un tramo de Metro sobre viaducto en la zona industrial y terciaria de la Zona Franca.

Otro aspecto del cambio sustancial que representará para el transporte público de masas es la operación con trenes de conducción automática y cerramientos de andenes con puertas operadas de forma sincronizada con los trenes. En la actualidad en un primer tramo bajo el municipio de Santa Coloma de Gramenet se están realizando las pruebas para la puesta en servicio de este nuevo sistema a finales del presente año.

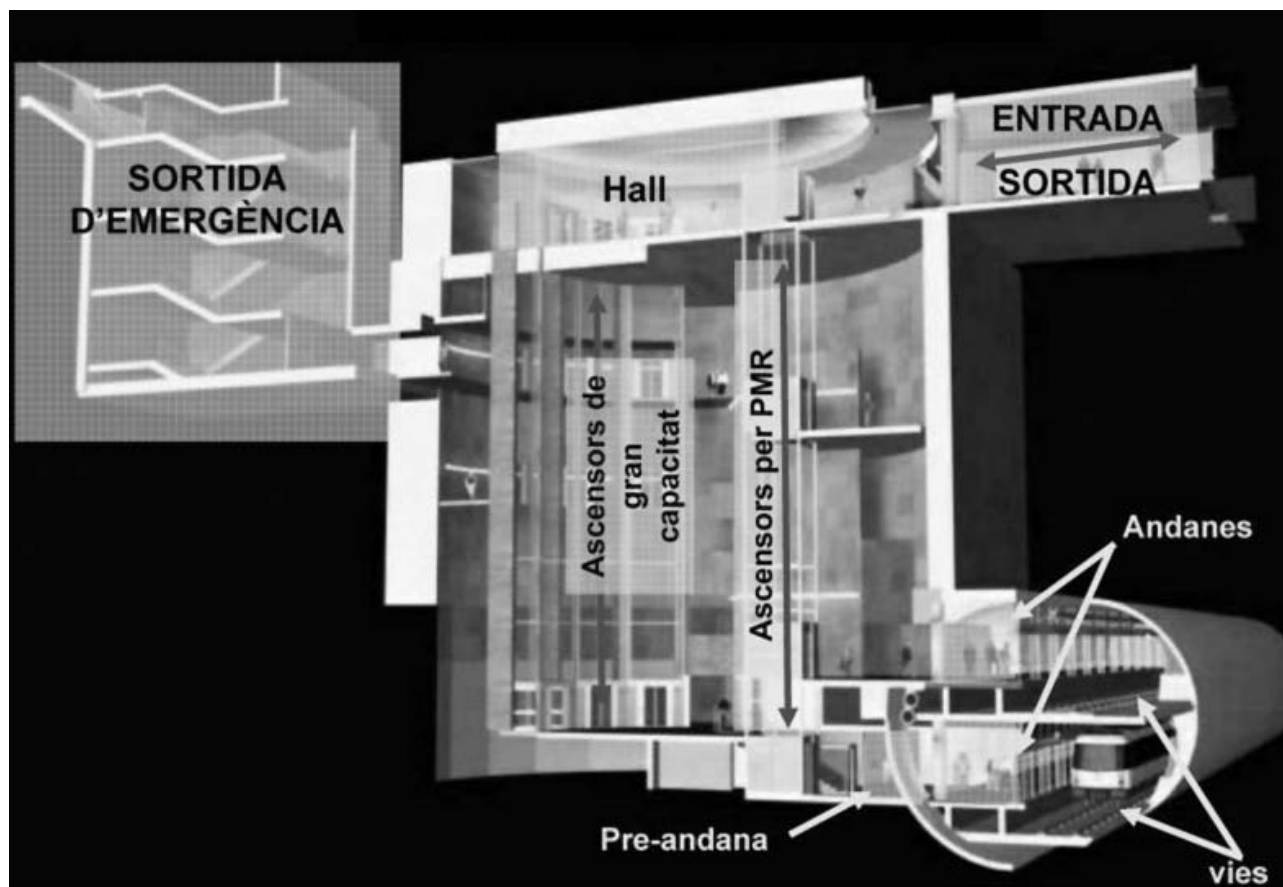
Con posterioridad se llevarán a cabo sucesivas puestas en servicio de otros tramos, hasta concluir toda la línea.

2. Los Proyectos

Los proyectos de túneles urbanos y en concreto los de la Línea 9 tienen en cuenta una serie de condicionantes entre los que destacan:

- La población a la que desea dar servicio, y por lo tanto los estudios de demanda realizados previamente.
- Los condicionantes topográficos: desde áreas deltaicas planas y bajas hasta zonas montañosas en el centro y en el extremo norte.
- Los condicionantes de trazado teniendo en cuenta las infraestructuras de toda índole preexistentes: líneas de metro, infraestructuras ferroviarias, túneles viarios, gran alcantarillado, etc.
- Los condicionantes geológicos y geotécnicos en unas zonas geológicamente complejas: suelos blandos en los deltas (arenas y limos), rocas fracturadas (pizarras) y fallas, y rocas duras. Requieren para su determinación cortes longitudinales y transversales, incluso modelos de bloque o de interpretación tridimensional (2). Se aplican las metodologías recogidas en el Eurocódigo 7 (3) y también se realizan estudios probabilísticos similares a los que presenta Boone, S. (4). Aparte de los cálculos estructurales del túnel es importante la comprobación de estabilidad del frente y presiones de trabajo, según diferentes métodos (investigación de Ruse, N.) (5).
- Otros condicionantes del subsuelo como son pozos o minas de agua antiguos y refugios antiaéreos de la Guerra Civil. Extrapolando en este sentido a otros proyectos del área metropolitana y de Cataluña se realizaron inventarios específicos también de zonas kársticas y de cuevas neolíticas, como en el caso de los estudios para la futura línea 12.
- Los condicionantes que derivan de la presencia de niveles freáticos o flujos de aguas subterráneas. Por ello hay que prestar mucha atención en la definición de los protocolos de bombeo que deben formar parte intrínseca del proceso constructivo.
- Los condicionantes de tipo urbanístico, en áreas densas con escasas avenidas amplias, son determinantes para la ubicación concreta de las estaciones, accesos, rejillas de ventilación, pozos de agotamiento, salidas de emergencia, etc.
- Los condicionantes funcionales que emanan de la propia concepción de una línea automática, accesible y que gozará de la más alta tecnología del momento.
- Huelga decir que los condicionantes de seguridad, tanto durante la construcción como durante la explotación, son fundamentales ya desde la fase de diseño.

Fig. 3. Detalle de estación tipo pozo y vías superpuestas en dos niveles separados por una losa intermedia.



- Los proyectos de construcción de GISA incluyen además la previsión de Inspecciones Técnicas de Edificios (ITE) y un Estudio Constructivo de Instrumentación y Auscultación (ECIA) (6) que es la base del Plan de Auscultación.

En consecuencia, para la construcción de la línea 9, y atendiendo a los condicionantes anteriormente citados, se diseñaron diferentes tipologías estructurales:

- Tramos entre pantallas: sólo ejecutables en zonas con espacios o avenidas amplias.
- Túnel menos profundo en el tramo 1: 9,40 m de diámetro con doble vía al mismo nivel y, estaciones entre pantallas.
- Viaducto: en la zona industrial del tramo 2, cercana al mar.
- Túnel profundo en los tramos 2, 3 y 4: 12,00 m de diámetro de excavación con vías superpuestas, nave de andenes en el interior del propio túnel, y estaciones tipo pozo a profundidades entre 35 - 70 m desde la superficie

- Pequeña longitud de túnel en mina también con vías superpuestas.

Es debido a la imposibilidad de poder ejecutar estaciones convencionales desde superficie y la gran complejidad de ejecutar cavernas de estaciones en suelos y bajo nivel freático por lo cual se opta por un concepto innovador de túnel de gran diámetro excavado con tuneladora en varios de sus tramos. En la zona de túnel correspondiente al ámbito de la estación, se integran el conjunto de andenes y servicios de las estaciones. Las vías se encuentran superpuestas en dos niveles separados por una losa intermedia (fig.3), concepto similar al que se planteó en la misma época para la A-86 de circunvalación de París (SOCATOP) para tráfico de vehículos privados ligeros (turismos), para la vía colectora en Kuala Lumpur (SMART) o para el control de avenidas.

El proyecto de la Línea 9 se concibió en 4 tramos. A modo de resumen se indican los tramos de línea según la tipología de construcción (fig.4).

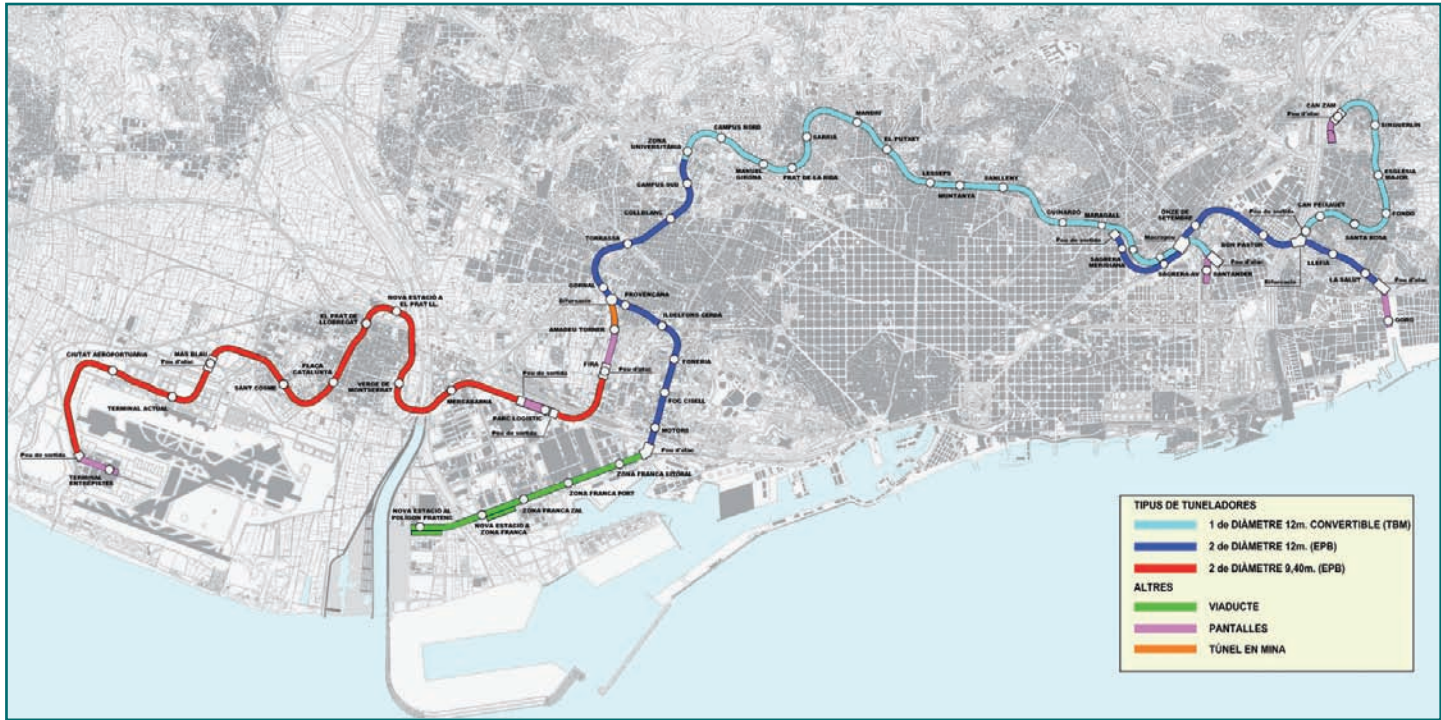


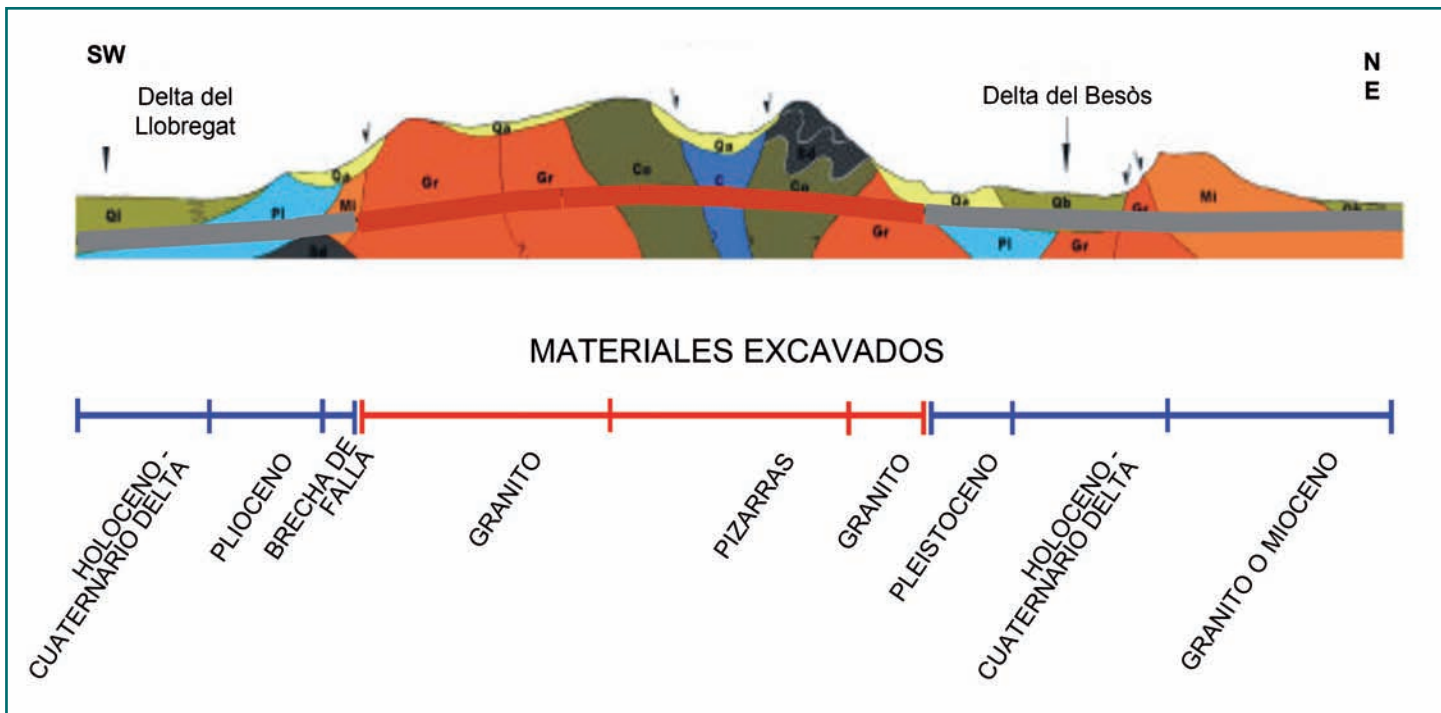
Fig. 4. Tipología de construcción de la Línea 9.

3. Documentación de Geología y Geotecnia

La Línea 9 de los Ferrocarriles Metropolitanos de Barcelona (Metro) discurre en su mayor parte bajo zonas con una densa edificación con calles estre-

chas. La orografía en el ámbito del proyecto es variada desde zonas onduladas a montañosas en el tramo central y los tramos de Santa Coloma de Gramenet y Badalona, hasta plana en los deltas de los ríos Besòs y Llobregat. Los materiales excavados varí-

Fig. 5. Corte geológico general.



an desde rocas graníticas de gran dureza, pasando por rocas blandas del Plioceno y Mioceno, hasta suelos sobre consolidados y suelos poco competentes de depósitos cuaternarios recientes. El nivel freático es alto, en todos los casos por encima de la clave del túnel.

Desde los primeros estudios realizados por la "Autoridad del Transport Metropolitana" (ATM) hasta la realización de las obras se ha ido recopilando una gran cantidad de documentación técnica y en concreto la referida a las diferentes campañas geológicas-geotécnicas. Se dispone de las campañas de los estudios de ATM y de una o varias campañas en fase de realización del proyecto constructivo. Una vez iniciada la obra, se han realizado localmente campañas de investigación de detalle, inclusive ensayos de bombeo, donde tanto la ejecución de los pozos como la perforación de los piezómetros aportan información.

Para la instrumentación geotécnica también se realizan perforaciones con el objetivo de instalar extensómetros, inclinómetros, piezómetros y otros sistemas de auscultación. Al tener los inclinómetros una longitud que deberá llegar por debajo de la cota inferior de la obra subterránea, normalmente implantados a ambos lados de la traza, se realizan sondeos con recuperación de testigo y en su caso se realizan ensayos "in situ" y de laboratorio.

Para ubicar correctamente la zona de material filtrante de los piezómetros, éstos también se perforan a recuperación. Asimismo se realizan perforaciones en las campañas de geofísica para la detección de cimentaciones profundas.

Todos estos resultados se explotan en bases de datos específicas para su consulta y análisis con la finalidad de optimizar los procesos constructivos. Ello permite una visión tridimensional del subsuelo, que resulta de gran importancia en zonas de contactos entre materiales o fallas en los materiales rocosos.

4. Director de Obra, Responsable de Seguimiento y Control, Coordinador de Seguridad y Salud y otros contratos vinculados a las obras

GISA como gestora del promotor de las obras contrata las diferentes asistencias técnicas necesarias para el buen desarrollo de la obra: entre ellas

la Dirección de las Obras, el Responsable de Seguimiento y Control (LOP) el Coordinador de Seguridad y Salud, de forma independiente.

Además GISA pone a disposición de la Dirección de Obra otros contratos independientes como el Control de Calidad, la Auscultación topográfica y geotécnica y la Inspección Técnica de Edificios.

Especialmente para los tramos con excavaciones subterráneas se redactan unos planes y protocolos específicos de trabajo que incluyen los parámetros de control y las actuaciones a realizar en caso de superarse éstos.

Para el seguimiento de la ejecución de las obras se dispone de sistemas informáticos de transmisión de información en tiempo real a los cuales tienen acceso la Dirección de Obra, el Responsable de Seguimiento y Control, el Contratista, la UPC, GISA y aquellos en quien GISA delegue.

Los sistemas informáticos de auscultación ofrecen información en tiempo real. Para su mejor y eficaz análisis GISA ha creado una Base de Datos y GIS propios. La conexión con los sistemas informáticos de las tuneladoras ofrece una información directa sobre los parámetros de excavación. Mediante macros de análisis se puede contrastar conjuntos de valores y valorar la bondad del trabajo de las tuneladoras.

Desde GISA se está impulsando la mejora de estos sistemas y del análisis de los datos disponibles. Para ello se han elaborado fichas de puntuaciones y fórmulas de evaluación. Entre ellas una fórmula para la evaluación de la eficacia de la inyección del mortero de cola (7). Esta fórmula compara la pérdida de volumen o subsidencia por el efecto de descompresión del frente, con la pérdida de volumen primaria o subsidencia una vez fraguado el mortero de inyección por cola.

$$\eta_R = 1 - \left(\frac{V_{S(t)} - V_{S(c)}}{V_c - V_t} \right) \quad (1)$$

En la fórmula (1), el parámetro $V_{S(t)}$ representa el volumen de subsidencia final (m^3/m) de la cubeta transversal después de haberse estabilizado los movimientos, mientras $V_{S(c)}$ es el volumen (m^3/m) justo en el momento del paso del frente por la sección analizada. El volumen de excavación V_c (m^3/m), se

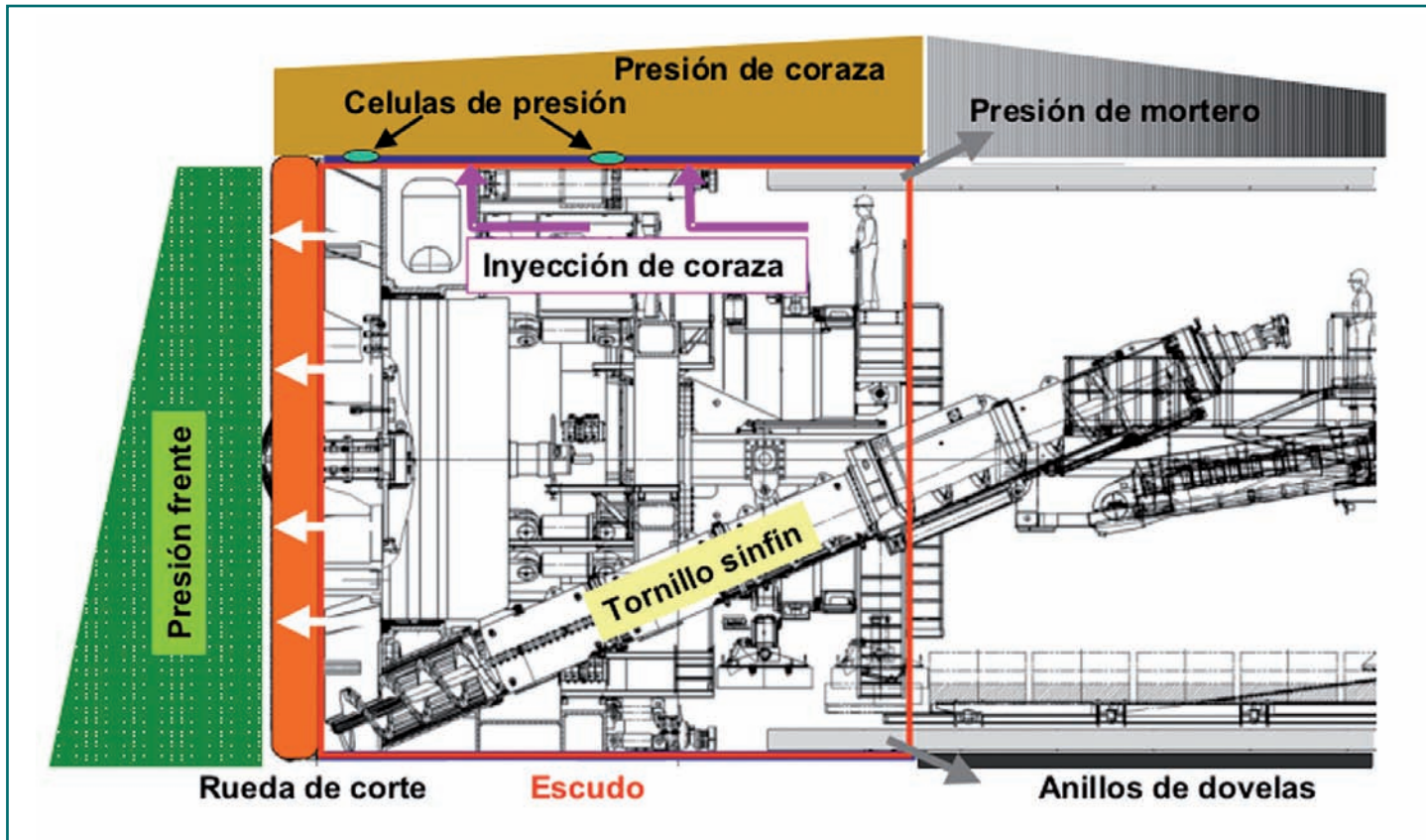


Fig. 6. Eficacia de inyección de mortero.

calcula en base al diámetro de excavación de la rueda de corte y el volumen anular V_t (m^3/m) en base al diámetro exterior del anillo de dovelas.

Considerando una cubeta teórica, como por ejemplo una campana de Gauss invertida, es posible calcular el volumen de subsidencia V_s en base al asiento sobre el eje del túnel (8). Las ecuaciones aplicadas se presentan a continuación (2), donde "K" representa las propiedades del terreno, "h" la cobertura como distancia entre superficie y eje del túnel y "s" la profundidad de la subsidencia sobre el eje del túnel.

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot s = \sqrt{2\pi} \cdot K \cdot h \cdot s = P \cdot s \quad (2)$$

Aplicando la relación (2), se puede determinar la eficacia η_R del relleno del espacio anular entre línea de excavación y anillo mediante la fórmula (3). El parámetro $S_{(t)}$ representa el asiento superficial sobre el eje del túnel después de haberse estabilizados los movimientos y $S_{(c)}$ es el asiento justo en el

momento del paso del frente por la sección analizada.

$$\eta_R = 1 - \left(\frac{P \cdot (S_t - S_c)}{V_c - V_t} \right) \quad (3)$$

GISA como empresa pública de gestión de proyectos y obras de infraestructuras promovidas por la Generalitat de Catalunya se ha dotado de unas herramientas propias que se encuentran a disposición de todos los involucrados en el proyecto y en la construcción de las obras, y que consisten en una base de datos geológica-geotécnica, un sistema de control de procesos de las tuneladoras y una evolución del sistema de auscultación y monitoreo hacia una visión de conjunto de todos los parámetros.

5. Inspecciones Técnicas de Edificios (ITE)

Para todos los edificios ubicados en la zona de influencia definida en el proyecto se realizan las co-

respondientes Inspecciones Técnicas de Edificios (ITE). Esta labor es contratada a empresas con técnicos competentes en edificación y patologías. Se llevan a cabo las inspecciones de las zonas comunes así como las de cada unidad de propiedad, sean viviendas, comercios, despachos, etc.

Las actas de las inspecciones se entregan a los propietarios de los inmuebles y se depositan ante notario.

En función de las patologías detectadas se realizan estudios de vulnerabilidad y sensibilidad y, en su caso, recálculos de las estructuras y su posible afectación por la ejecución de las obras subterráneas. De esta forma se pueden tomar las decisiones oportunas.

6. Auscultación

Antes de iniciar una obra subterránea y basándose en el anejo de auscultación del proyecto y la literatura de referencia (9, 10) el Director de las Obras prepara el Plan de Auscultación. En este documento se definen en primera instancia los criterios básicos para el control topográfico y geotécnico de las obras.

Según la metodología establecida para las obras subterráneas gestionadas por GISA un plan de auscultación consta de varios documentos:

- Documento 0: Portada con registro de cambios de acuerdo con la ISO 9001.
- Documento 1: Sistema de mensajes de prevención y su resolución
- Documento 2: Metodología de instalación, lecturas, transmisión de datos y desinstalación. Anejos y Planos de las actuaciones de instrumentación y auscultación
- Documento 3: Fichas técnicas de los dispositivos de auscultación

7. Puntos de Atención al Ciudadano

La realización de obras en un entorno urbano debe contemplar la atención al ciudadano que convive con las obras y con las molestias, como son el polvo, la dificultad de ciertos accesos, los ruidos, etc. que se intentan minimizar en la medida de lo

posible. Para poder atender las posibles preguntas y quejas, GISA instala Puntos de Atención al Ciudadano (PAC) en lugares estratégicos de los barrios afectados por las obras.

Aparte de explicar el proyecto y las fases de construcción, desvíos de tránsito y otras afecciones en reuniones con las asociaciones de vecinos, en estas oficinas el ciudadano tiene acceso a documentación del proyecto y una persona de contacto. La persona en el PAC da la información requerida y recoge las observaciones o quejas de los ciudadanos para tramitarlos con la Dirección de Obra o con el técnico que ha realizado la ITE en caso de lesiones en inmuebles.

8. El Tramo Can Zam - río Besòs

El subtramo Can Zam - río Besòs de la Línea 9 se ubica íntegramente en el municipio de Santa Coloma de Gramenet y tiene su origen (en sentido de avance de la tuneladora) en las cocheras y talleres de Can Zam. A continuación discurre bajo el barrio de Singuerlín, donde se encuentra la estación del mismo nombre. Después de pasar bajo un valle que hoy en día está ocupado por la Avenida Pallaresa y el falso túnel de la autovía urbana B-20 de Barcelona a Montgat, se dirige hacia la estación de Església donde la superficie del terreno vuelve a tener un punto alto. Siguiendo la traza se encuentra posteriormente el barrio de Fondo con la Rambla de San Sebastián, donde la Línea 9 pasa bajo la L-1 del Metro de Barcelona. Con las estaciones de Santa Rosa y de Can Peixauet se da acceso a los barrios correspondientes. El final de este subtramo entronca con el túnel de Gorg - Sagrera, también de la Línea 9.

La situación orográfica se puede describir de ondulada a montañosa, con los puntos altos del terreno en Singuerlín y cerca de la iglesia mayor de Santa Coloma. Los puntos bajos están marcados por el parque de Can Zam en la llanura del río Besòs, el valle de la Riera de Can Zam, el barrio de Fondo y la llanura del río Besòs hacia el final del tramo.

Salvo el parque de Can Zam y el tramo final entre Can Peixauet y la conexión con el tramo Gorg - Sagrera, el territorio está plenamente urbanizado con una densidad de población muy elevada. Además cabe resaltar la presencia de grandes infraestructuras subterráneas existentes como son un

tramo de falso túnel de la autovía urbana B-20 y la Línea 1 del Metro de Barcelona con su estación final de Fondo y la cola de maniobras correspondiente.

Los materiales de este tramo son:

- Cuaternario del Besòs
- Cuaternario de riera
- "Sauló" (granito meteorizado)
- Granodiorita
- Cornubianitas
- Conglomerado del mioceno
- Brecha de falla
- Diques de pórfido

Para la excavación del túnel se empleó una tuneladora convertible de tuneladora de roca (TBM) a tuneladora de equilibrio de presión de tierras (EPB) del fabricante NFM Wirth. La rueda de corte tiene un diámetro nominal del 11,95m e inicialmente un grado de apertura de 22% de la superficie. La rueda de corte empleada para este tramo es dual. Para la excavación de roca en "modo abierto" la rueda dispone, en el interior de la cámara de excavación, de cangilones que suben el material excavado y lo vierten a una cinta transportadora en el centro del escudo. Para la conversión en "modo presurizado" o "modo EPB" se pueden desmontar los cangilones, se retrae la cinta y se cierra su compuerta; esto permite adelantar el tornillo sinfín en la base del escudo y extraer el material mediante éste.

La presencia de roca fracturada (cornubianitas) combinada con la ratio y tamaño de las aberturas, indujo la entrada de bloques en la cámara de excavación. La caída de bloques del frente generó varios problemas, como son el mayor desgaste de los discos de corte al golpear el frente no homogéneo, daños en el interior de la cámara de excavación, riesgos en el transporte por cinta a la propia cinta y por caída de bloques desde la cinta hacia el túnel excavado. Esta situación obligó a reducir las aperturas de la rueda de corte mediante barras.

La excavación en granodioritas tuvo menos problemas. En tramos de poca fracturación, la perforación de la roca era lenta y por lo tanto los rendimientos de la TBM eran bajos. Desde el entorno de la estación de Santa Rosa hasta Can Peixauet la traza se acerca al contacto entre el batolito granítico y los conglomerados del Mioceno. En esta zona la

roca estaba más cizallada que fracturada y este debilitamiento del macizo permitió una producción máxima en 24h de 22 anillos/día. La sucesión de diques de pórfido duros pero fracturados y las alteraciones del macizo en su entorno dificultaba para el avance de la tuneladora.

La teoría de la excavación en roca (11, 12) explica el fenómeno según el cual los discos forman ranuras en la roca y las tensiones introducidas por la presión ejercida por éstos hace que se desprendan pequeñas lascas entre las huellas de dos discos consecutivos. Así se aprecia en roca sana y asimismo quedó validado en esta obra. El escombros o "chips" es de forma lascosa y de tamaño bastante uniforme.

En caso de roca muy fracturada, la rotura ya no se produce tanto por el efecto entre discos sino por la descompresión de la roca, generando así la caída de bloques e incrementando considerablemente el desgaste de las herramientas.

Otra gran dificultad en la ejecución del túnel de la Línea 9 en granito con intrusiones de pórfidos fue la presencia de aguas termales. La complejidad geológica viene marcada por un batolito de granodiorita con intrusiones de diques de pórfido en las zonas de falla o fallas asociadas. Los pórfidos son más friables y presentan una mayor fracturación que el granito. La descompresión del macizo rocoso a la llegada de la tuneladora comportó una apertura de las fracturas y fisuras. Al no ser planas, éstas se convirtieron en canales de paso de agua. El equilibrio de presiones hidrostáticas se vio distorsionado al entrar el frente en esta zona, atrayendo así aguas desde debajo del nivel de excavación. Una vez reestablecidas las condiciones hidrostáticas cesa la aportación de aguas termales hacia el túnel y el efecto térmico es poco o nada apreciable desde el interior del túnel.

La excavación de los pozos circulares de las estaciones se realizó en el tramo superior de suelos y granito meteorizado, entre pantallas y con un anillado interior. El avance en profundidad se realizó con voladuras y anillado de hormigón armado.

9. Consideraciones finales

Los proyectos y la construcción de la nueva infraestructura de transporte de la Línea 9 del Metro de

Barcelona se basan en las metodologías habituales para obras subterráneas y en metodologías propias de GISA, incorporando los conocimientos de proyectistas, asesores, directores de obra, contratistas, empresas de auscultación, técnicos de control de edificios etc. Se está llevando a cabo un proceso de mejora continua, donde prima la metodología, el rigor, el control, el desarrollo y la innovación. En este sentido GISA participa en los proyectos europeos del 6º programa marco de la Unión Europea TUNCONSTRUCT "Technology in underground construction" y en el proyecto S@NY, "Sensors Anywhere".

El diseño de gran parte de la Línea 9 como túnel a dos niveles es novedoso para sistemas de Metro y responde a una serie de condicionantes específicos como son la densidad de población y las variables urbanísticas del entorno atravesado por dicha infraestructura.

Consideramos que una metodología rigurosa y adecuada a los condicionantes de cada tramo, junto con la retroalimentación de experiencias anteriores son la base para conseguir una buena ejecución de las obras. Las condiciones de trabajo y los efectos de la excavación sobre el terreno y los edificios del área de influencia son y deben ser ajustados permanentemente a partir de los resultados y el análisis del terreno excavado, del control de procesos, de la auscultación y del contraste con los modelos numéricos.

La comunicación con la ciudadanía y con las diferentes entidades y organismos mediante reuniones informativas, de seguimiento y disponiendo de Puntos de Atención al Ciudadano son básicas e imprescindibles para lograr el objetivo que nos proponemos. ♦

Referencias:

- (1) Pla Director d'Infraestructures PDI 2001 - 2010.
- (2) Exadactylos, G.; Stavropoulou, M.: A specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability: Analytical relations and computational scheme. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 45 (2008) 1102-1125.
- (3) EUROCÓDIGO 7 Proyecto Geotécnico EN 1997.
- (4) Boone, S.: Evaluating Risk of Construction-Induced Building Damage for Large Underground Construction Projects. *Jornada Técnica de Movimientos de Edificios Inducidos por Excavaciones*. Barcelona 2008: 95-122.

- (5) Ruse, N. (2004). *Räumliche Betrachtung der Standsicherheit der Ortsbrust beim Tunnelvortrieb*. Informe N° 51 (tesis doctoral), Departamento de Ingeniería Geotécnica y Túneles, Universidad de Stuttgart, Alemania.
- (6) ECIA PLP-38 (2006). GISA - Plec de prescripcions per a la redacció d'estudis constructius d'instrumentació i auscultació en fase de projecte obra civil.
- (7) Schwarz, H. (2009). Línea 9 Metro Barcelona Excavación con Tuneladoras de Gran Diámetro. *Jornada Técnica sobre: Singularidades constructivas en los túneles de los Metros de Barcelona*, Madrid y Sevilla. Barcelona 2009.
- (8) Peck, R.B.: Deep excavations & tunnelling in soft ground. *Proc. 7th Int. Conf.*

- On Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Mexico 1969, Vol. IV (State of the Art): 225-290.
- (9) Dunicliff, J. (1988). "Geotechnical Instrumentations for Monitoring Field Performance"
- (10) M. Soferas, C. Ema, H. Schwarz "Instrumentación y Auscultación durante la Construcción de Túneles y Estaciones de la Futura Línea 9 de metro de Barcelona" *IngeoPres*, n° 143, Noviembre 2005
- (11) Rastami J., Ozdemir L., "A new Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs", *RETIC Proceedings*, 1993.
- (12) ITA Working Group n° 14 - Mechanized Tunnelling - International Tunnelling Association, "Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)"