

JORNADA TÉCNICA: TÚNELES CON EPB. SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Barcelona 21 Mayo 2008

EXPERIENCIAS OBTENIDAS EN
TÚNELES CON EPB. MODO DE
OPERACIÓN, MOVIMIENTOS DE LOS
ANILLOS Y ASIENTOS EN SUPERFICIE.



José Manuel Gutiérrez Manjón
Didac Plana Aguilar



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

EXPERIENCIAS OBTENIDAS EN TÚNELES CON EPB. MODO DE
OPERACIÓN, MOVIMIENTOS DE LOS ANILLOS Y ASIENTOS EN SUPERFICIE

ÍNDICE

- ❑ FUNCIONAMIENTO DE LA EPB. FACTORES Y PARÁMETROS.
- ❑ ZONAS CON BAJO RECUBRIMIENTO. EJEMPLOS DE TRATAMIENTOS.
- ❑ PRESIONES EN EL FRENTE. ACONDICIONAMIENTO DEL ESCOMBRO.
- ❑ INYECCIÓN Y ACCIONES SOBRE LOS ANILLOS DE REVESTIMIENTO.
- ❑ ZONAS DE SECCIONES MIXTAS. PROBLEMÁTICA.
- ❑ ASIENTOS EN SUPERFICIE.
- ❑ RESUMEN DE CONCLUSIONES.



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

FUNCIONAMIENTO DE LA EPB

Factores a considerar

- ☐ Trazado y Diámetro del Túnel
- ☐ Condiciones del terreno

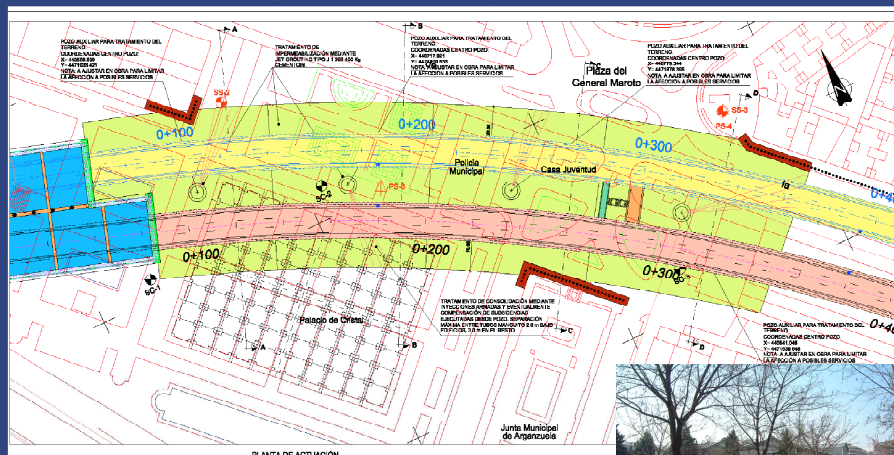
Parámetros de funcionamiento

- ☐ Consistencia y permeabilidad del escombro. Acondicionamiento
- ☐ Régimen de presiones en la cámara de escombro
- ☐ Velocidad de avance y control del material extraído
- ☐ Empuje, Par, R.P.M.
- ☐ Desgaste de herramientas. Labores de mantenimiento
- ☐ Eventuales inyecciones de coraza.
Inyecciones de grasa en cepillos de cola
- ☐ Inyección de los anillos



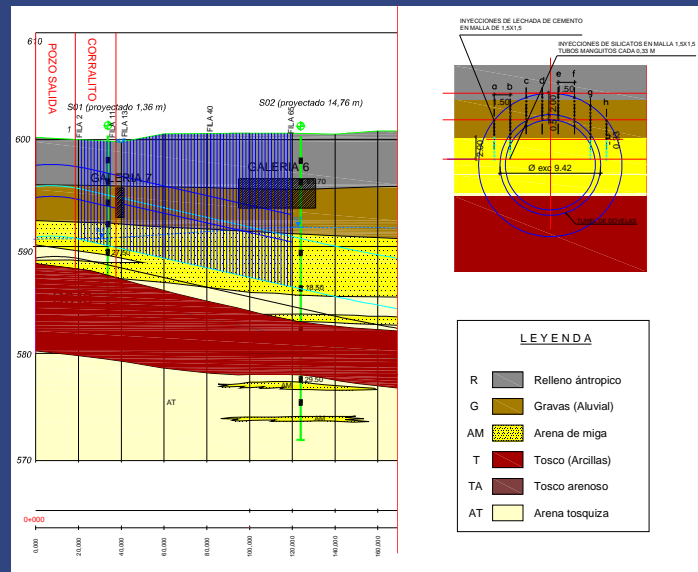
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

M-30 By Pass Sur. Paso bajo Palacio de Cristal



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Aeropuerto de Barajas. Túnel de la CELA



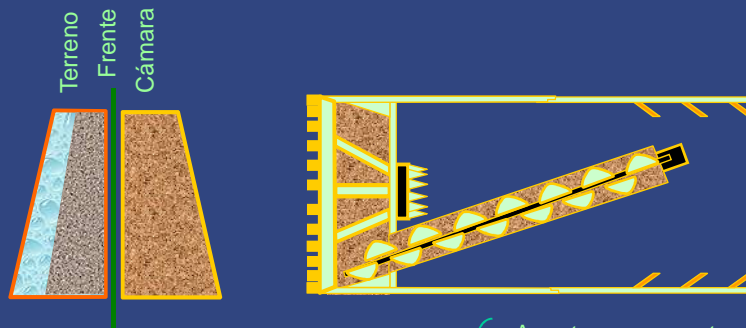
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Aeropuerto de Barajas. Túnel de la CELA



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Presiones en el frente. Acondicionamiento del escombro



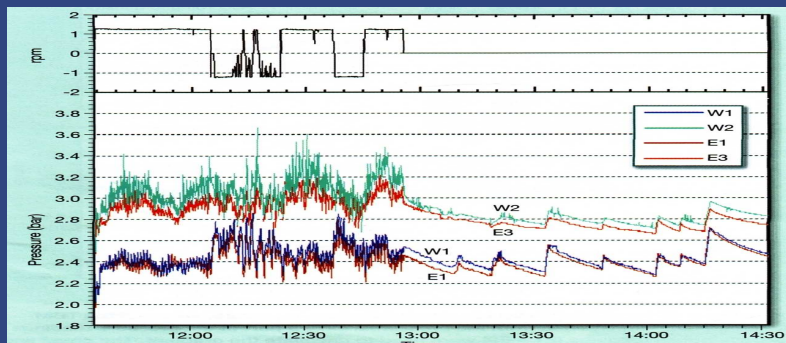
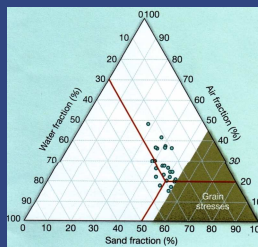
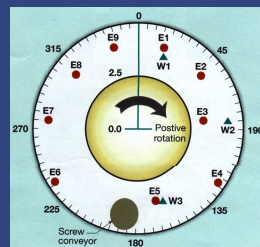
- ☐ Características químicas del terreno
- ☐ Granulometría
- ☐ Cantidad y presión de agua



- Agentes espumantes
- Polímeros
- Aire
- Agua
- Bentonita (eventualmente)
- Finos (eventualmente)



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA



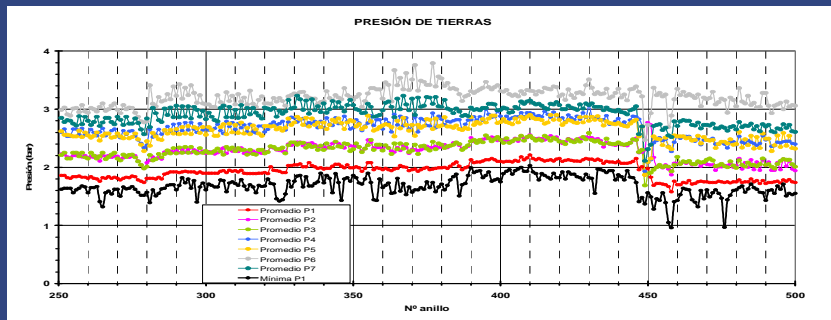
Botlek Tunnel. A Bezuijen. Tunnels & Tunnelling 12/2005



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L-9. Metro de Barcelona. La Fira-Parc Logistic.

Presiones de tierra en la cámara de escombro



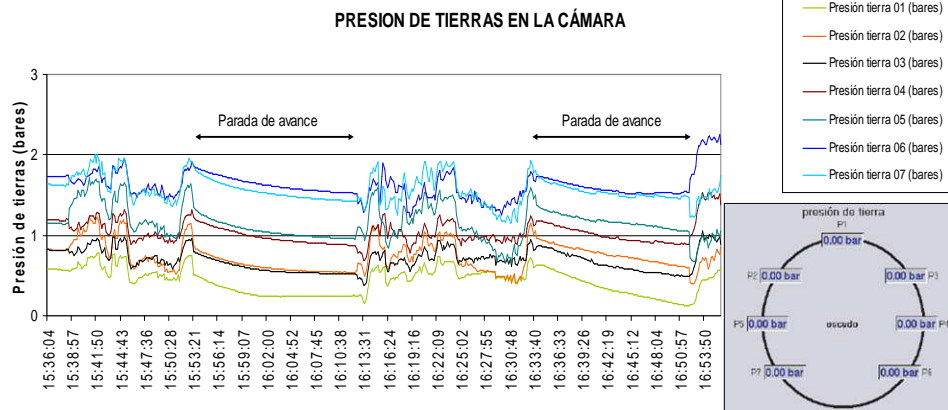
Presiones de trabajo en el frente

- ☐ Métodos numéricos (E.F.)
 - ☐ Métodos de equilibrio límite (Kovari, Leca & Dormieux, Jancsecz.....)
 - ☐ Criterios empíricos
 - ☐ Ensayos AFTES 2001 (Arenas)
- Túneles someros $\rightarrow p \approx \sigma_{H0} + 0,2 \text{ bar}$
- Túneles profundos $\rightarrow \left. \begin{array}{l} \text{- Métodos numéricos} \\ \text{- Métodos de equilibrio límite} \end{array} \right\} + \text{Coef. Seguridad}$



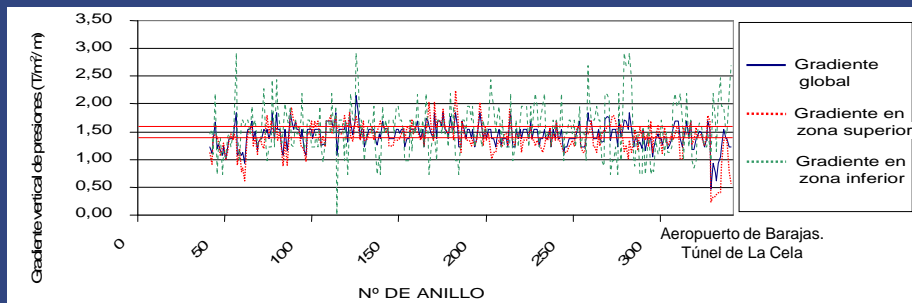
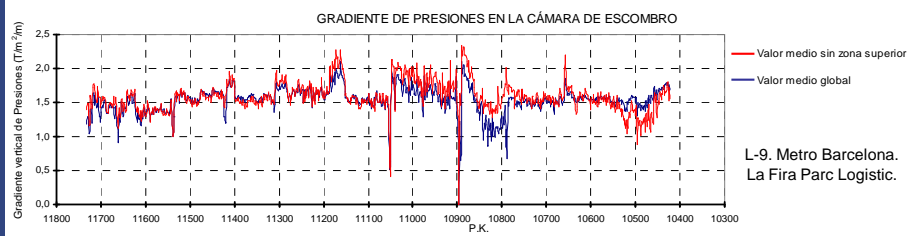
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L-3. Metro Madrid



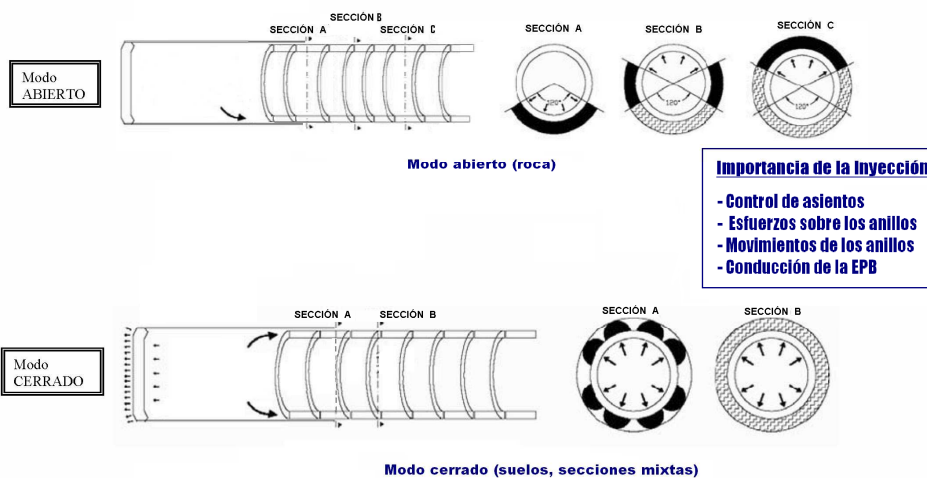
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Gradiente de Presiones Verticales en la Cámara de Escombro



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Sistemas de Inyección de los Anillos



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Inyección de los Anillos

DOSIFICACIONES BÁSICAS L-9 TRAMO IV Y OTROS TÚNELES (A FALTA DE ADITIVOS)

	L-9 Tramo IV (Kg/m ³)	Otros túneles (Kg/m ³)
Cemento	250	50 – 100
Cenizas	-	0 – 280
Arena + Filler	1.680	1.450 – 1.560
Filler	240	0 - 340
Agua	280 – 300	270 – 350
Bentonita	-	0 – 20
Resistencia 28 días	≈ 100 Kg/cm ²	10 – 20 Kg/cm ²

CONTROLES Y OBJETIVOS

- ☐ Controles de volumen y presión en cada línea de inyección.
- ☐ Rechazo por presión. Superando volumen mínimo.
- ☐ $P_{\text{inyección}} \approx P_{\text{cámara}} + 0,5 - 1,5 \text{ bar}$.
- ☐ Sincronización con el avance de la EPB.
- ☐ Volúmenes homogéneos y gradientes de presión razonables entre líneas de inyección.
- ☐ Líneas operativas. Limpieza esmerada.



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Nueva Estación de Sol. Espesores de mortero en el trasdós de las dovelas

ESFUERZOS Y MOVIMIENTOS EN EL ANILLO

- ☐ Empuje de gatos. Excentricidad (Curvas, contrarrotación, etc.)
- ☐ Presiones de la inyección y del terreno.
- ☐ Ovalización.
- ☐ Posibles coacciones puntuales a la salida del escudo.
- ☐ Flotabilidad.

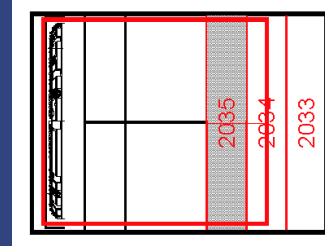


TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L-3 Metro Madrid. Tramo de prueba. Instrumentación de anillos

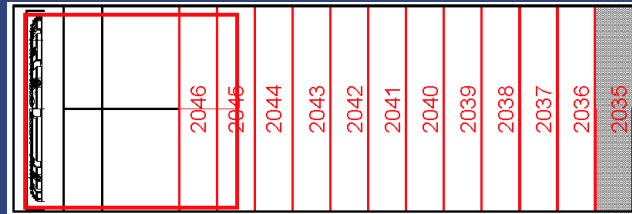


AVANCE TUNELADORA



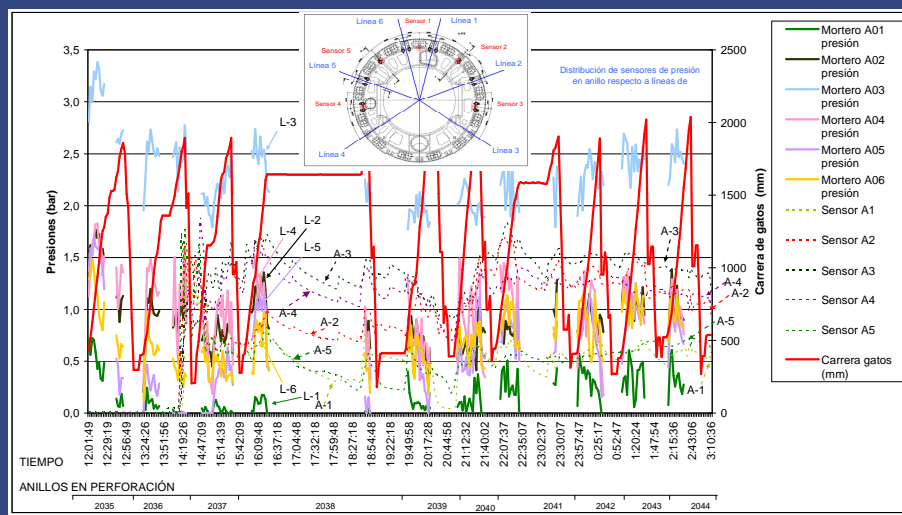
□ Captadores de presión en el trasdós
(anillo 2035)

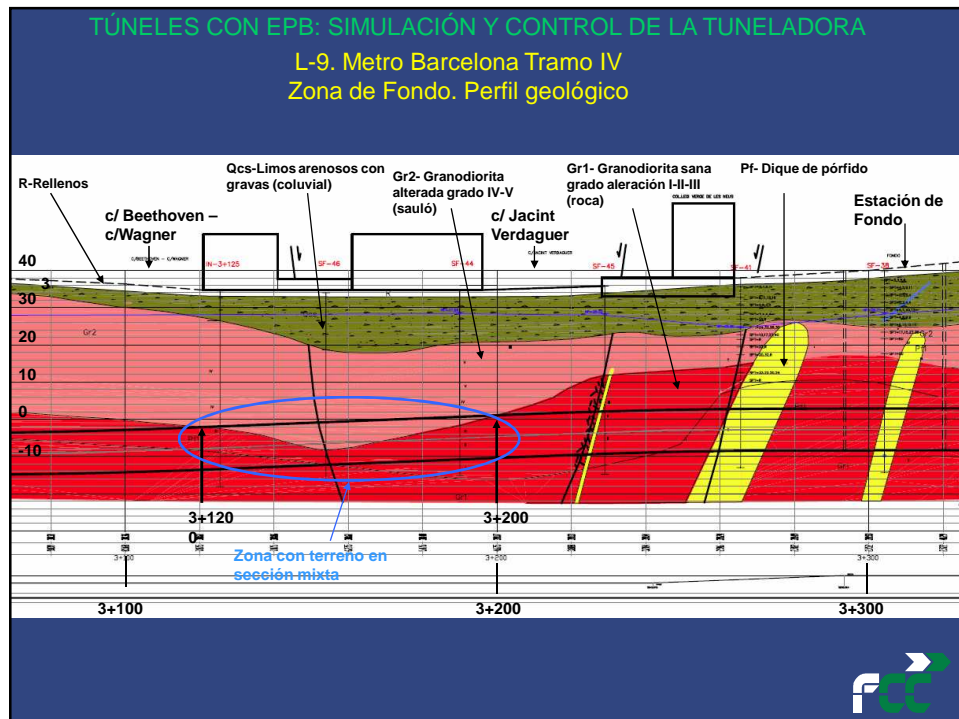
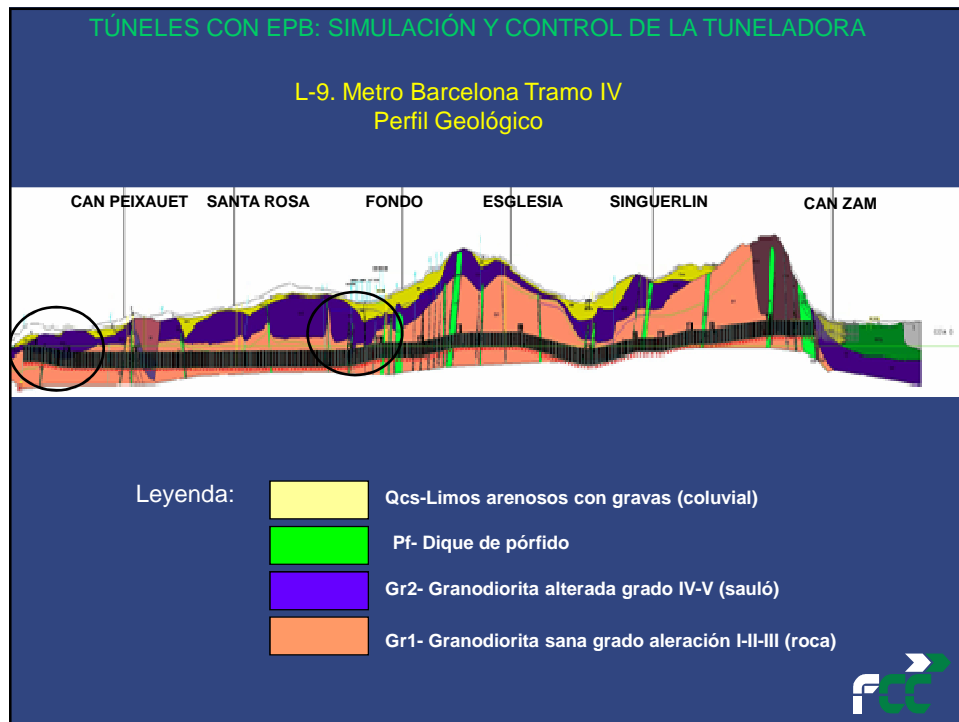
□ Medida de resaltos en las juntas



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

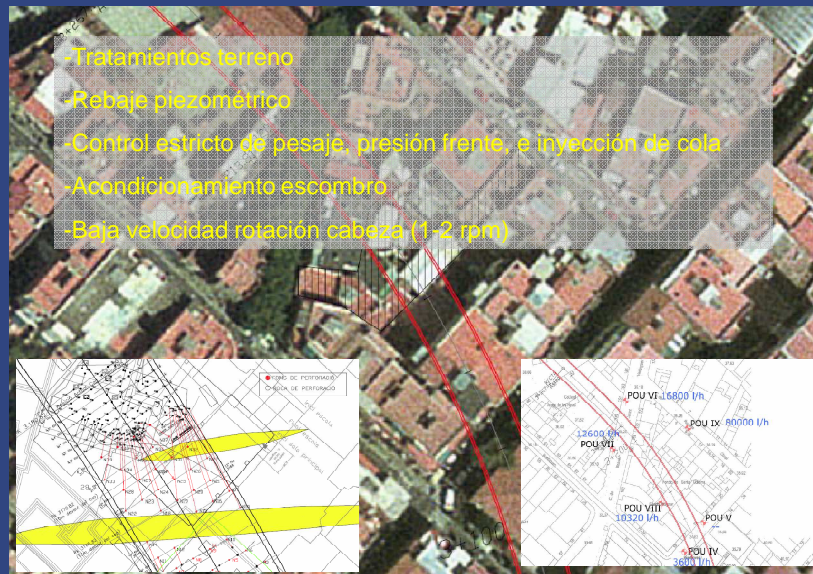
Línea 3. Metro Madrid. Tramo de prueba Instrumentación de Anillos





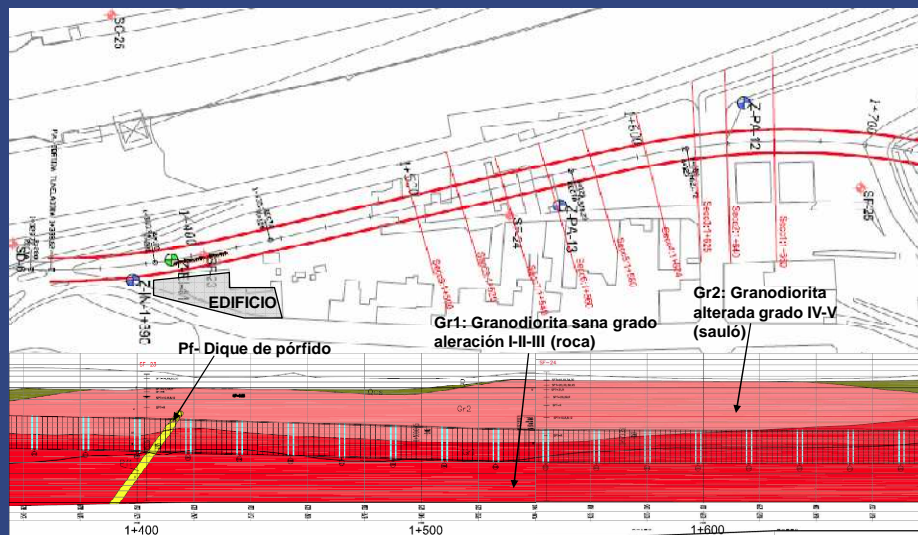
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L-9. Metro Barcelona Tramo IV. Zona de Fondo. Tratamientos del terreno



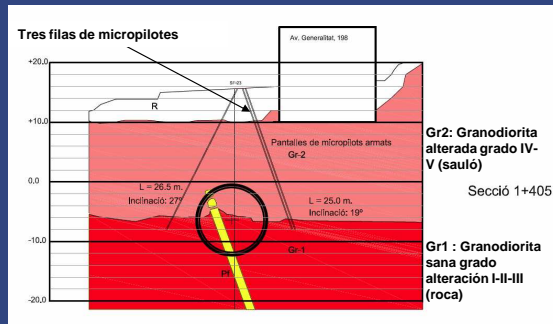
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L-9. Metro Barcelona Tramo IV. Zona de Peixauet. Perfil geológico



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L-9. Metro Barcelona Tramo IV. Zona de Peixauet. Tratamientos en PK1+400

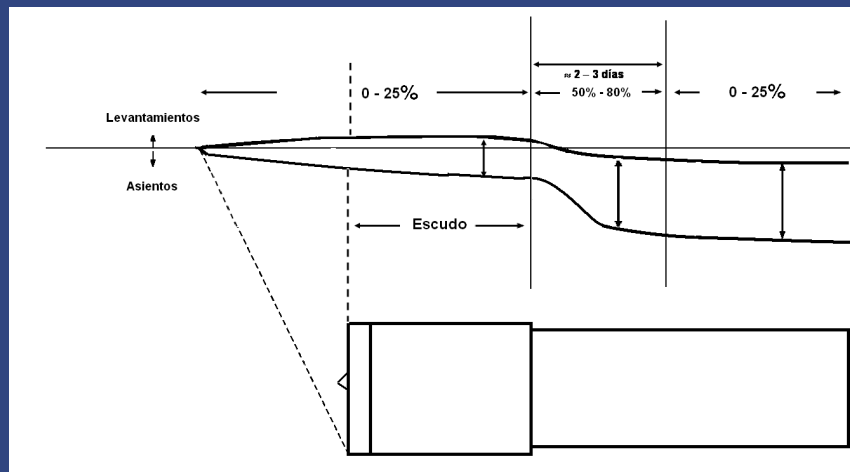


- Protecciones edificio
- Control estricto de pesaje, presión frente, e inyección de cola
- Acondicionamiento escombro
- Baja velocidad rotación cabeza (1-2 rpm)
- Velocidad avance 8 m/día



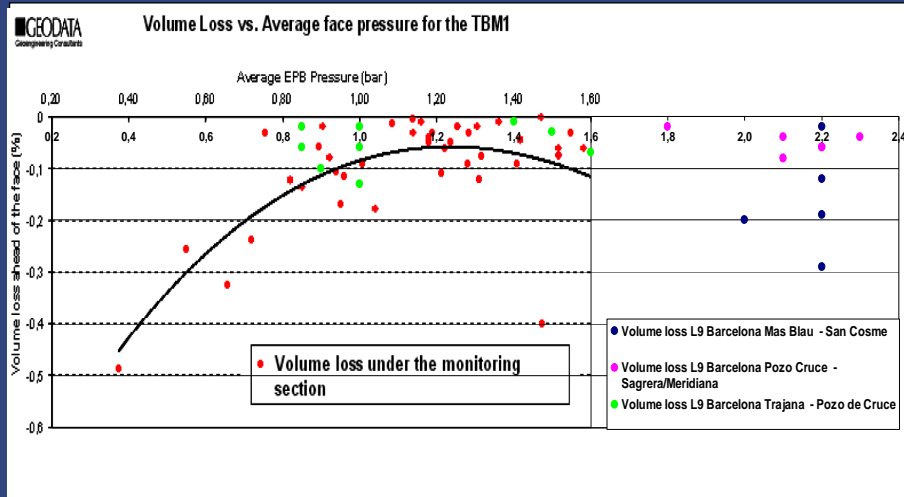
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Rango aproximado de la distribución de la distribución porcentual del asiento medido en varios túneles al paso de la EPB



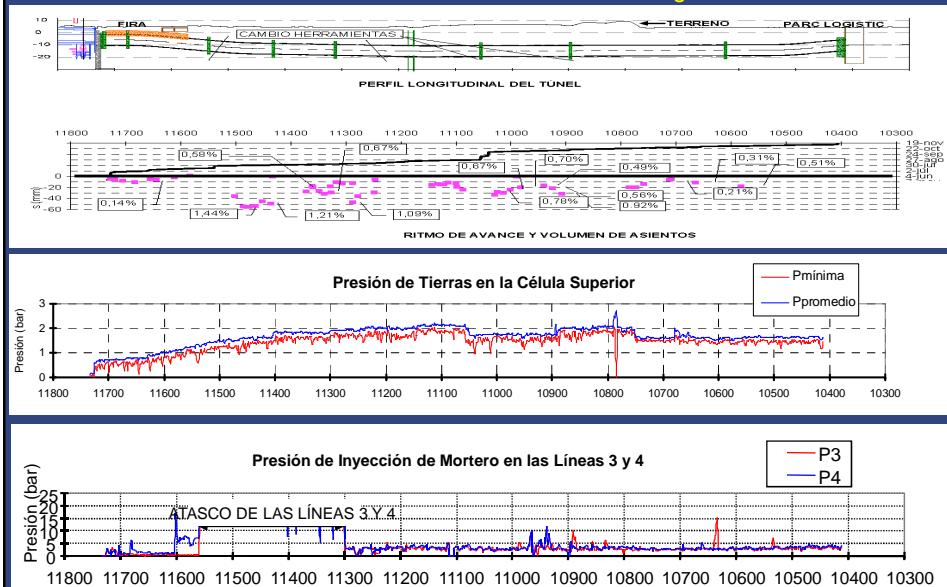
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

The experience of the "Nodo de Bologna" Tunnel Construction.
Piergiorgio Grosso, 2008



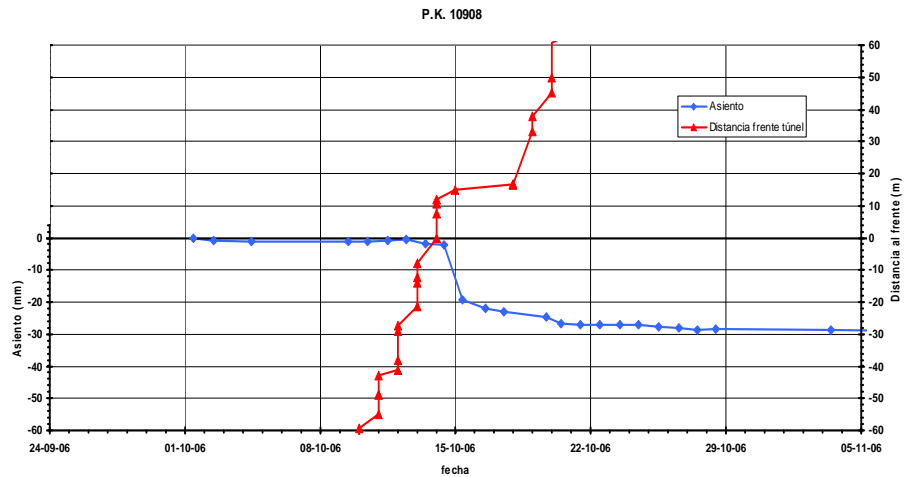
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L-9. Metro Barcelona. La Fira – Parc Logistic



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L-9. Metro Barcelona. La Fira – Parc Logistic



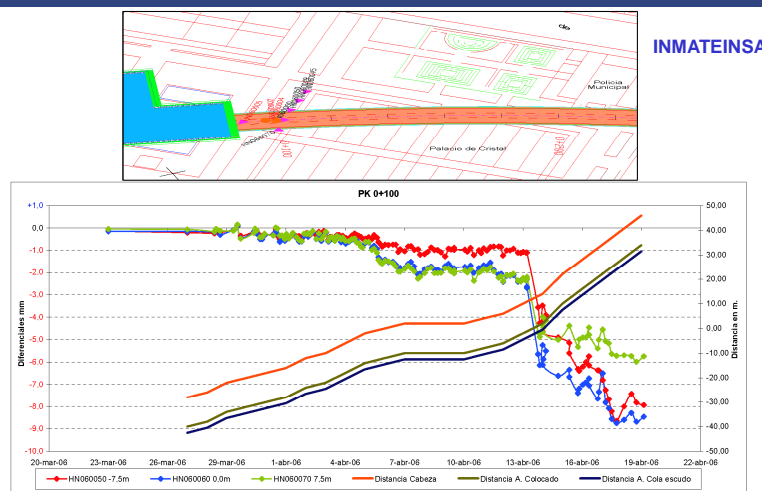
Evolución de asientos en el P.K. 10+908 en función de la posición relativa del frente de la EPB



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

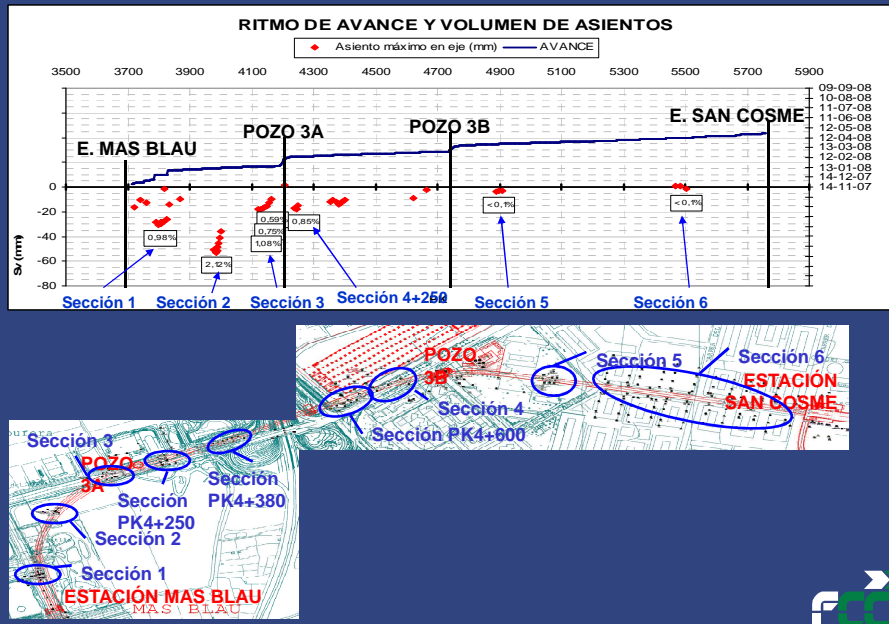
M-30 By-pass Sur. Túnel Sur

Hitos de Nivelación situados entre el Pozo de Ataque y Palacio de Cristal



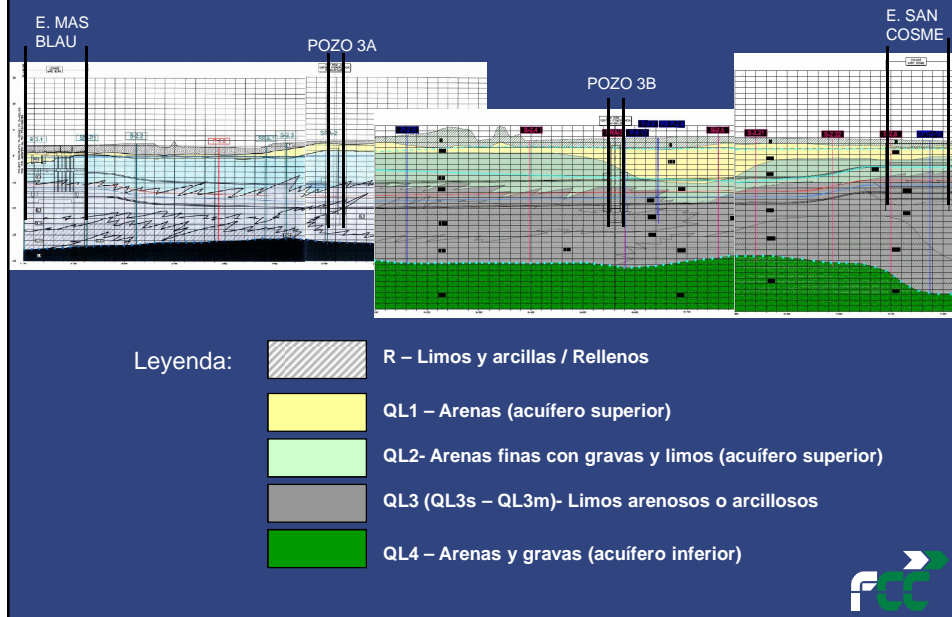
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L9. Metro Barcelona. Tramo I. Estación Mas Blau - San Cosme (El Prat de Llobregat)



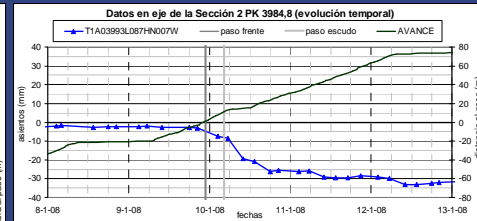
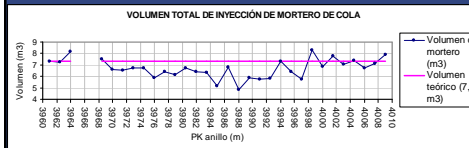
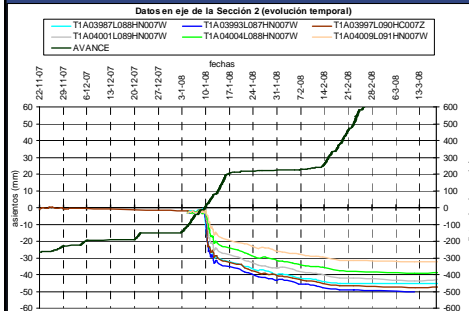
TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L9. Metro Barcelona. Tramo I. Estación Mas Blau - San Cosme (El Prat de Llobregat)



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L9. Metro Barcelona. Tramo I. Estación Mas Blau - San Cosme (El Prat de Llobregat)

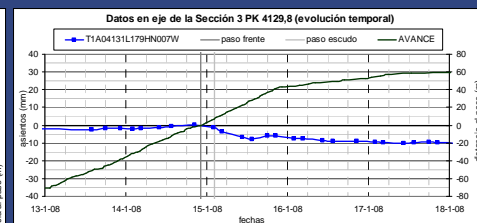
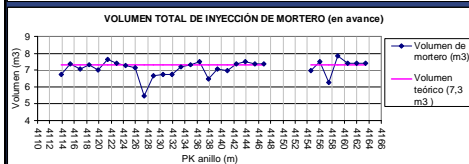
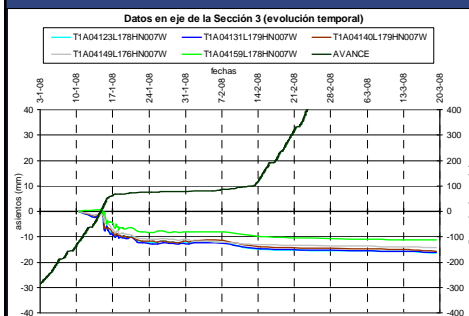


- Asiento total: 51 mm
- Pérdida de volumen (V_L): 2,12%
- Asiento al paso cabeza+escudo: 8 mm (porcentaje parcial 15%)
- Asiento al paso cola: 34 mm (porcentaje parcial 52%)
- Asiento final/diferido: 51 mm (porcentaje parcial 32%)



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L9. Metro Barcelona. Tramo I. Estación Mas Blau - San Cosme (El Prat de Llobregat)

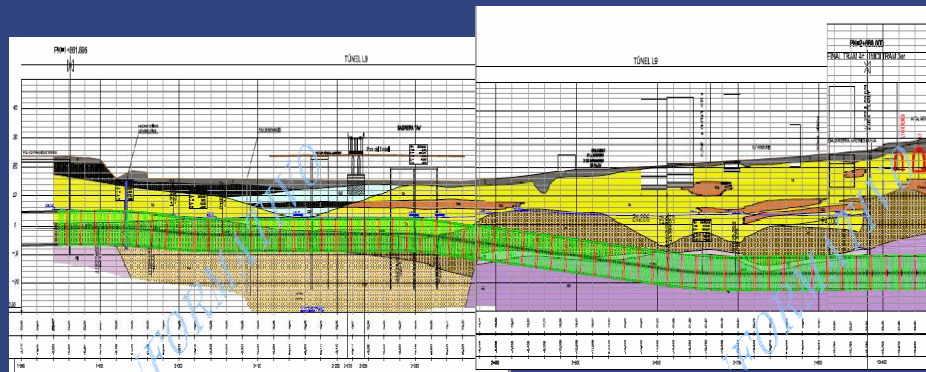


- Asiento total: 18 mm
- Pérdida de volumen (V_L): 1,08%
- Asiento al paso cabeza+escudo: 1 mm (porcentaje parcial 6%)
- Asiento al paso cola: 11 mm (porcentaje parcial 52%)
- Asiento final/diferido: 18 mm (porcentaje parcial 37%)



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L9. Metro Barcelona. Tramo 4c. Pozo de Cruce – Sagrera / Meridiana



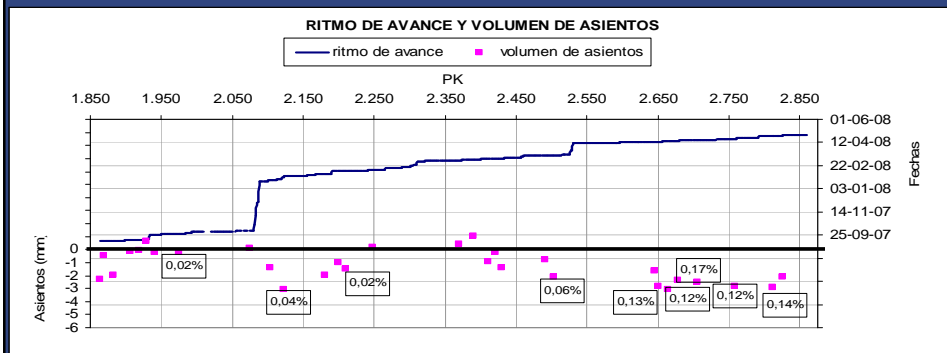
Legenda:

	Qcb/Qb2-Gravas, arenas i limos (coluvial/aluvial del Besós)
	Qa/Qag- Arcillas, limos y gravas con arcillas (Triciclo)
	PQ2/PQ- Arenas con arcillas/ gravas con arenas y arcillas (Pretriccio)
	PI- Arcillitas y limolitas (Plioceno)



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

L9. Metro Barcelona. Tramo 4c. Pozo de Cruce – Sagrera / Meridiana



	<u>Volúmenes de asientos</u>
Zona de Peñuelas y yesos. L-3 Metro Madrid	< 0,5 %
Zona de toscos y arenas de miga en túnel de La Cella	< 0,2 %
Zona de Peñuelas y yesos. M-30 By Pass Sur	< 0,2 %
Zona del Prat de Llobregat. L-9. Metro de Barcelona	< 1 %
Zona de Triciclo y Plioceno. L-9 Metro de Barcelona (Trajana – Habaneras)	< 0,2 %



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Resumen y conclusiones

- **Factores que intervienen en la generación de asientos de subsidencia:**
 - Condiciones geotécnicas del terreno
 - Diámetro del túnel y trazado
 - Características de la máquina
 - Parámetros de funcionamiento de la EPB
- **Factores que intervienen en el movimiento de los anillos:**
 - Características geométricas de las dovelas y de sus conexiones
 - + los factores anteriores.
- **Situaciones especiales: Bajo Recubrimiento y Secciones Mixtas**
 - Mayor riesgo de sobreexcavaciones.
 - Posibilidad de tratamientos previos de mejora del terreno / protecciones.
 - Posibilidad de rebajes piezométricos
 - Funcionamiento de la EPB:
 - ☐ Evitar fluctuaciones de las presiones de trabajo en la cámara.
 - ☐ Evitar fluctuaciones del volumen de escombros por el tornillo.
 - ☐ Trabajar con revoluciones bajas en la cabeza de corte.
- **Determinación de la presión de trabajo:**
 - Próxima a la presión de reposo en túneles poco profundos y en terrenos poco consolidados
 - Inferior a la presión de reposo en túneles más profundos y en terrenos más competentes.



TÚNELES CON EPB: SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA TUNELADORA

Resumen y conclusiones

- **Medida de asientos**
 - Los asientos medidos al paso del escudo representan hasta un 25% del total.
 - Según las secciones analizadas, el mayor incremento de asiento es el que se produce en la vertical de la cola del escudo: entre 50% - 80% del total.
 - Los asientos diferidos pueden representar hasta el 25% del total (incluso superior en materiales aluviales limoso-arcillosos)
- **Medida de Volúmenes de Asientos (V_L)**
 - <0.5% en terrenos consolidados (Mioceno de Madrid, Plioceno y Tricicle de Barcelona)
 - <1.0% en terrenos poco consolidados del Prat de Llobregat
 - si >1.0% coincide en zonas con bajo recubrimientos, con rellenos antrópicos, o zonas donde se produjeron incidencias puntuales.
- **Inyección trasdós del anillo:**
 - Gran incidencia en la magnitud de los asientos en superficie generados
 - Gran incidencia en los movimientos que experimenta el anillo hasta situarse a una distancia de unos 7 – 8 metros por detrás de la cola.
 - ⇒ Asegurar la limpieza del sistema para mantener operativas todas las líneas de inyección
 - ⇒ Programación y sincronización entre suministro de mortero y avance de la excavación.

