Presión del frente de tuneladoras EPB para el control de subsidencias en túneles urbanos. Aplicación a las obras del colector de Abroñigales (Madrid) y línea 9 (Barcelona)

GABRIEL BONA LÓPEZ (*)

RESUMEN En tres túneles excavados con tuneladoras EPB, uno situado en Madrid correspondiente al Nuevo Colector de Abroñigales y los otros dos, situados en Barcelona correspondientes a dos tramos de la línea 9 del metro de Barcelona, se han analizado los datos geológicos-geotécnicos de los terrenos excavados, los resultados de la instrumentación colocada en superficie y los datos propios de las tuneladoras, con el fin de proponer correlaciones con la magnitud de los asientos.

TUNNEL BORING MACHINE (EPB) FACE PRESSURE IN THE CONTROL OF SETTLEMENTS OF URBAN TUNNELS – APLICATIONS TO THE PROJECTS OF THE ABROÑIGALES SEWAGE (MADRID) AND LINE 9 OF THE BARCELONA UNDERGROUND

ABSTRACT *In three tunnels excavated with tunnel boring machines (EPB), one located in Madrid corresponding to the New Collector of Abroñigales and the other two located in Barcelona corresponding to two sections of line 9 of the Barcelona underground, the geologic-geotechnical data of the excavation materials has been analyzed, the results of the instrumentation placed at ground level and the data characteristic of the TBM, with the purpose of proposing correlations with the magnitude of the settlements.*

Palabras clave: Túnel, TBM, Asientos, Pérdida de suelo, Presión en el frente.

Keywords: Túnel, TBM, Settlements, Ground loss, Earth pressure.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se analizan los datos geológicos-geotécnicos de la traza de varios túneles, los resultados de la instrumentación colocada en superficie y los datos operativos de las distintas maquinas tuneladoras. Con el objetivo de evaluar los mecanismos de producción de asientos en superficie a la vista de los valores obtenidos en los datos analizados y proponer correlaciones con la magnitud de los asientos (cuantificados por la pérdida de suelo definida como el área encerrada por la cubeta de asientos).

2. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS

Las obras recogidas en esta comunicación consisten en la ejecución de tres túneles, uno hidráulico y dos ferroviarios.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Proyectos del Dpto. de Geotecnia II. D.T. de Ferrovial-Agromán, S.A.

Los túneles se han excavado o se están excavando con tuneladoras EPB (Earth Pressure Balance). El modo de excavación de estas tuneladoras con equilibrio de presión de tierras suministra un soporte permanente del frente de excavación equilibrando la presión en la cámara de tierras con la presión que el terreno ejerce contra el frente de la maquina.

Uno de los túneles, cuya excavación se encuentra finalizada, se sitúa en la zona sur de Madrid, y corresponde al Nuevo Colector de By-Pass de Abroñigales.

Los otros dos túneles pertenecen a la línea 9 del Metropolitano de Barcelona, que se encuentra en estos momentos en construcción. Uno de los túneles es el correspondiente al tramo 6A1 entre el P.K. 4+500 y la terminal entre pistas, denominado L9-6A1 en la figura 2. Mientras que el otro tramo, corresponde al acceso al triangulo ferroviario y en este túnel nos referiremos solo a los subtramos comprendidos entre el P.K. 1+173 y el P.K. 1+707 y el comprendido entre el P.K. 1+863 y la estación de Sagrera/Meridiana, denominado L9T en la figura 2.

FIGURA 1. Planta situación túnel colector de Abroñigales.

2.1. TÚNEL NUEVO COLECTOR DE BY-PASS DE ABROÑIGALES

Su inicio se sitúa en la M-30, al oeste del puente de los tres ojos (puente del ferrocarril) en el barrio del Puente de Vallecas. El trazado discurre en túnel hasta alcanzar la zona donde se ha ubicado el estanque de tormentas de Abroñigales, situado al sur de Mercamadrid y próximo a la E.R.A.R. de la Gavia, donde finaliza, con una longitud de 4.800 m.

La excavación de la tuneladora se ha realizado con un diámetro de 7,66 m.

2.2. TÚNEL LÍNEA 9 DEL METRO DE BARCELONA TRAMO: P.K. 1+173 Y P.K. 1+707

Tiene su origen en el pozo de Treball en Vía Trajana y finaliza en el inicio del pozo de Crenament, con una longitud de 530 m.

La tuneladora tiene un diámetro de excavación de 11,95 m.

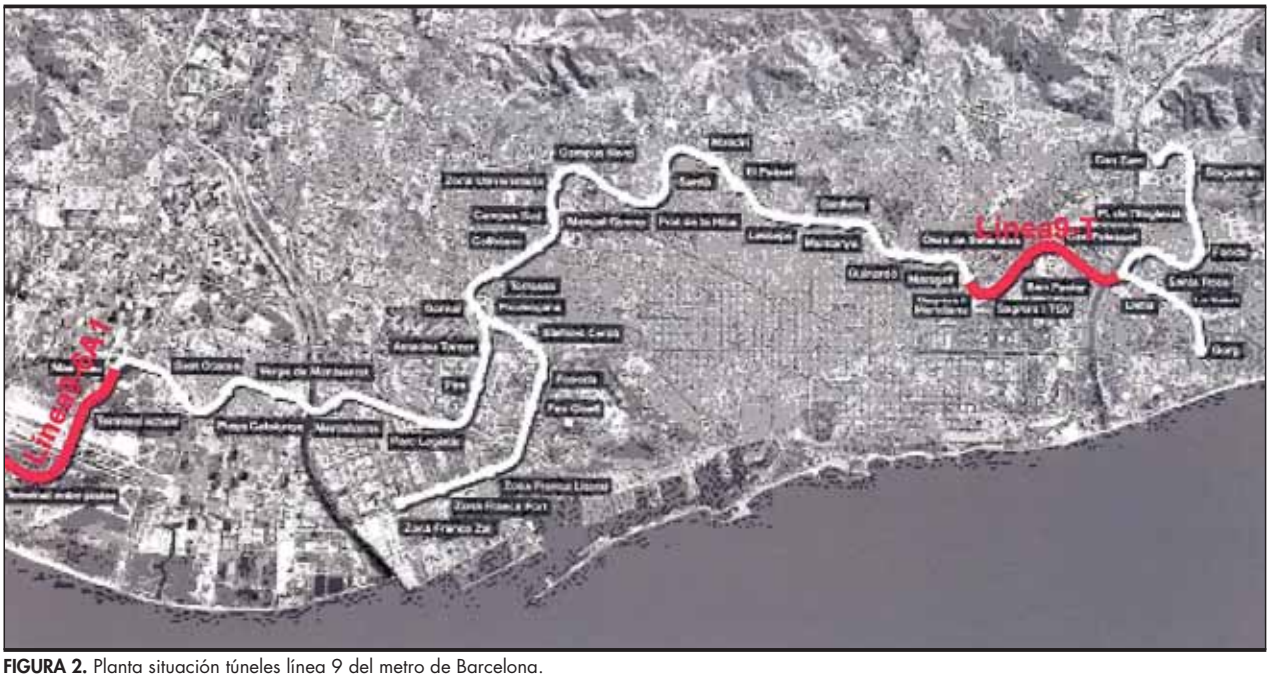

FIGURA 2. Planta situación túneles línea 9 del metro de Barcelona.

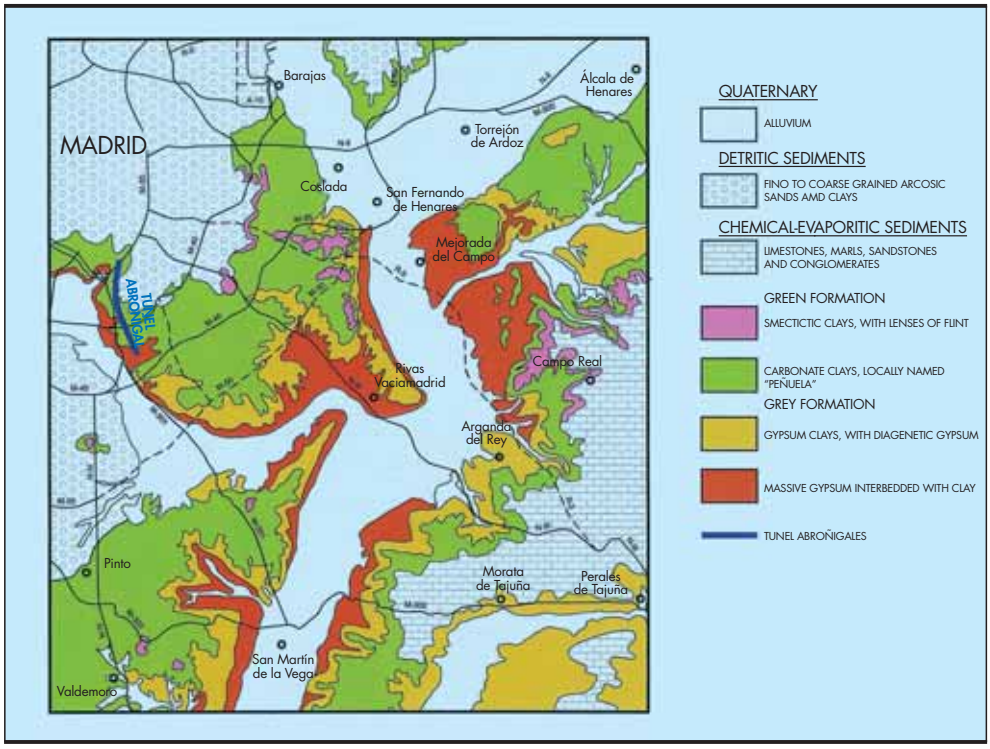

FIGURA 3. Planta geológica de la facies químico–evaporítica de Madrid.

2.3. TÚNEL LÍNEA 9 DEL METRO DE BARCELONA TRAMO: P.K. 1+800 Y ESTACIÓN DE SAGRERA/MERIDIANA

Tiene su origen en P.K. 1+863, en el pozo de extracción de tierras y finaliza en la estación de Sagrera/Meridiana, con una longitud de 1100 metros.

La tuneladora tiene un diámetro de excavación de 11,95 m.

2.4. TÚNEL LÍNEA 9 DEL METRO DE BARCELONA TRAMO 6A1

Tiene su origen en la estación terminal entre pistas y finaliza en el P.K. 4+500, con una longitud de 4500 metros.

La tuneladora tiene un diámetro de excavación de 9,4 m.

3. GEOLOGÍA

La zona de estudio del túnel del colector de Abroñigales (véase la figura 3) se encuadra en el sector central de la Cuenca Terciaria del Tajo, que constituye una amplia cubeta sedimentaria en cuyo interior se desarrolla un sistema deposicional de tipo lacustre con predominio de una sedimentación de tipo química. Esta dinámica ha condicionado (junto con otros factores como el clima, alteraciones en el basamento y naturaleza del área madre) los sedimentos, así como la composición y distribución de las distintas unidades sedimentarias que rellenan la cuenca dentro de las que se producen numerosos y variados cambios de facies.

Dentro de la ciudad de Madrid, y más particularmente en la zona donde se han desarrollado las obras en cuestión, las formaciones que se encuentran han sido peñuelas y yesos. No hay contactos netos entre estas formaciones sino que son cambios más o menos graduales de facies, lo que se traduce en zonas en las que los diferentes materiales están intercalados.

Las formaciones terciarias están parcialmente recubiertas por depósitos cuaternarios, formados por materiales de diferentes orígenes: coluviales, conos de deyección y aluviales.

Sobre todos estos materiales existen zonas con rellenos contemporáneos (antrópicos).

No se ha definido un nivel freático general y continuo, dada la naturaleza variable tanto en profundidad como en extensión, en que se presentan los diferentes niveles acuíferos a lo largo de todo el trazado, generalmente aislados. Esta situación es típica de los suelos de Madrid.

La traza en estudio de la línea 9 del metro de Barcelona (véase figura 4) se sitúa en el área existente entre la desembocadura del río Llobregat y la llanura litoral situada al noreste de la desembocadura del río Besòs y al noroeste de la Cordillera Litoral. Una parte del recorrido discurre por el contacto entre el llano de Barcelona y los materiales paleozoicos de la Cordillera de Collserola.

Dentro de la ciudad de Barcelona, y más particularmente en las zonas donde se han desarrollado las obras en cuestión, las formaciones geológicas presentes corresponden a materiales de edad Pliocena y Cuaternaria.

Los materiales de edad Pliocénica, corresponden a argilitas y limolitas grises, en la parte superior se tornan más arenosas y de color verde. También se han presentado, en zonas muy localizadas, por debajo de los materiales Pliocénicos granodioritas meteorizadas.

En los materiales cuaternarios podemos distinguir varios niveles, y en orden de edad, del más antiguo al más moderno podemos encontrar: Un primer nivel, formado por gravas en matriz arenosa o arcillosa. El siguiente nivel es esta constituido por arcillas con algunas gravas y un último nivel, formado por limos con gravas dispersas de origen coluvial.

Sobre todos estos materiales existen zonas con rellenos contemporáneos (antrópicos).

El nivel freático se sitúa en general entre los 3 y los 5 metros de profundidad, por lo que toda la excavación de los túneles se realizara bajo el nivel freático.

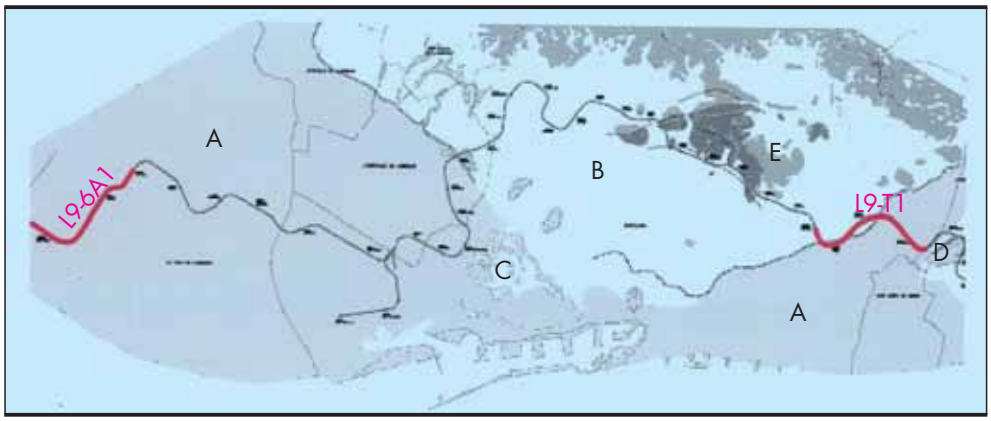

FIGURA 4. Planta geológica Línea 9 Metropolitano de Barcelona, A: Llanuras deltaicas del río Besós y Llobregat (Holoceno), B: Llano de Barcelona (Pleistoceno), C: Colinas de Montjuic (Plioceno), D: Colina de Llefia (Mioceno), E: Colinas de Monterols (Paleozoico).

4. DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA DE LA TRAZA

El túnel del colector de Abroñigales se ha excavado en peñuela hasta el P.K. 1+280. A partir de aquí hasta el P.K. 2+260 los materiales de la excavación han sido peñuela y yesos. Y desde este último punto hasta el final del túnel, la excavación se ha realizado solo en la formación yesífera. El recubrimiento de terreno sobre la clave ha estado comprendido entre 4 m. y 44 m.

El túnel de la línea 9 correspondiente al tramo Pou de Treball hasta el Pou de Crenament, se sitúa entre el P.K. 1+173 hasta el P.K. 1+460 en limos arenosos, arenas limosas y gravas, y en los últimos 100 metros la contrabóveda se sitúa en las granodioritas meteorizadas. Desde el anterior P.K. hasta el P.K. 1+707, el túnel se sitúa en gravas, limolitas y argilitas, excepto en los primeros 70 metros, donde la contrabóveda se excava en la granodiorita meteorizada. El recubrimiento de terreno sobre la clave varía entre 5 m. y 23 m.

El túnel de la línea 9 comprendido entre el P.K. 1+865 y la estación de Sagrera/Meridiana, discurre entre el P.K. 1+860 hasta el P.K. 2+3700 por arcillas, limos y gravas. Y desde este P.K. hasta el final del tramo, el túnel se sitúa en gravas, limolitas y argilitas. El recubrimiento de terreno sobre la clave varía entre 11 m. y 36 m.

5. ESTIMACIÓN DE LA PERDIDA DE SUELO Y COMPARACIÓN CON LA PRESIÓN EN EL FRENTE DEL ESCUDO

La perdida de suelo real correspondiente al paso de los diversos túneles recogidos en este artículo, se ha estimado a partir de los resultados obtenidos en el retroanálisis realizado a las cubetas de asientos que se deducen de las mediciones realizadas en la instrumentación colocada en estos túneles. La definición de estas curvas de asientos, se ha realizado mediante un procedimiento iterativo, mediante el cual se ajusta una curva de Gauss a los valores de asientos obtenidos en la instrumentación. Esta curva queda totalmente definida a través del parámetro i y de la perdida de suelo V_S. Por tanto, variando estos parámetros se varía la curva hasta obtener la mejor adaptación a los valores reales obtenidos en la instrumentación.

A título de ejemplo, en la figura 5 se recoge una de las distintas curvas de asiento obtenidas a partir de los resultados de la instrumentación.

En la figura 6, se recoge la evolución de la presión de tierras en el frente antes, cuando cruza y después de pasar por una de las secciones de instrumentación colocadas en el trazado.

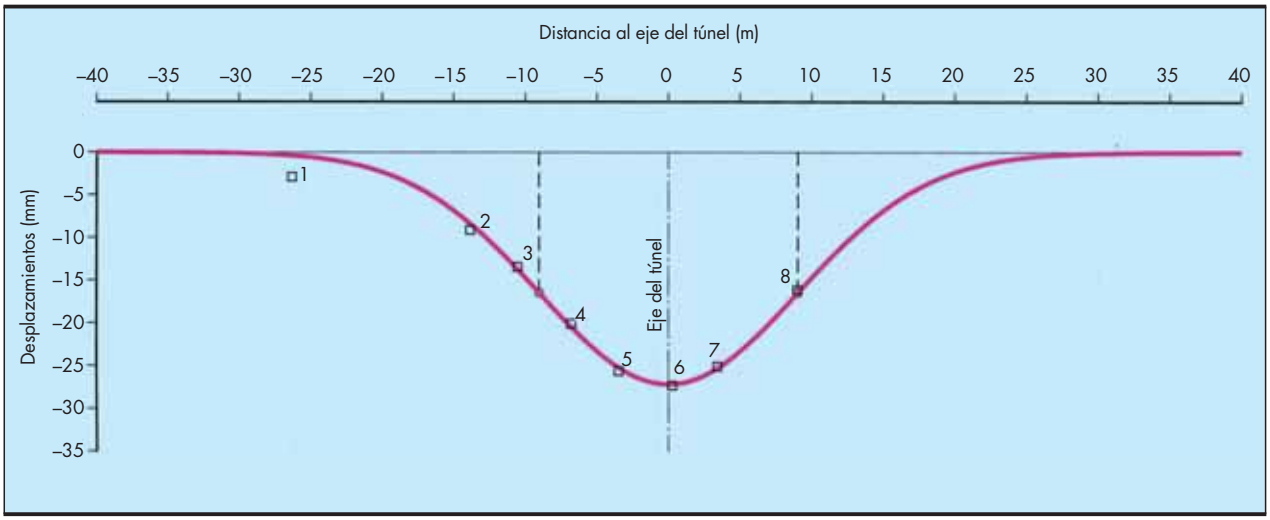

FIGURA 5. Ejemplo de subsidencias medidas y ajuste a curva de Gauss de una sección excavada con tuneladora EPB.

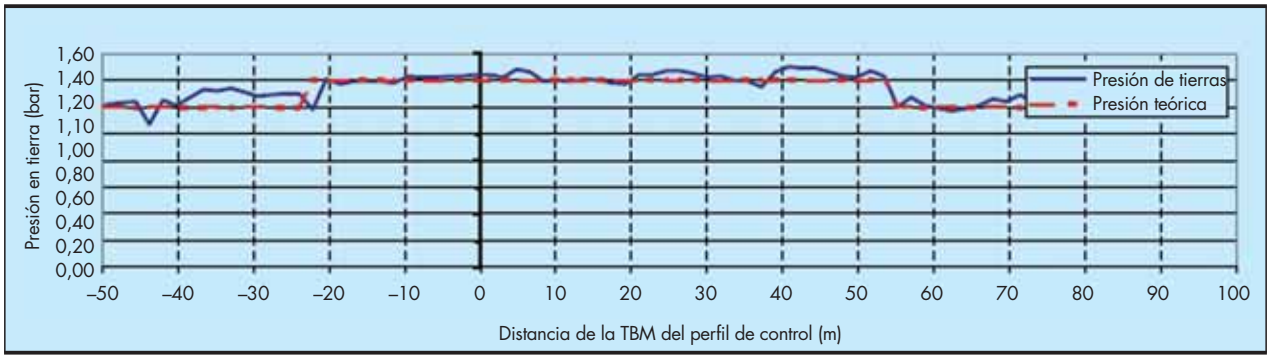

FIGURA 6. Medidas presión de tierras en el frente en una sección de instrumentación.

En las tablas 1 y 2, se recogen los resultados del retroanálisis realizado. En esta tabla también se indica la presión en el frente del escudo y los materiales excavados.

De estas tablas se desprende, que se produce una reducción en los valores de la perdida de suelo a medida que aumenta la profundidad del túnel. Mientras que si compara-

Prof. Eje Túnel (m)	Perdida Suelo V_s (%)	K	Presión Frente (bar)	Materiales Excavados
23,62	0,404	0,650	0,30	Peñuelas
31,37	0,275	0,293	0,35	Peñuelas
31,69	0,270	0,384	0,37	Peñuelas
20,50	0,059	0,439	0,20	Formación Yesífera
20,90	0,055	0,497	0,22	Formación Yesífera
25,50	0,026	0,411	0,27	Formación Yesífera

TABLA 1. Túnel Colector Abroñigales. Perdidas de Suelo y Presión en el Frente.

Prof. Eje Túnel (m)	Perdida Suelo V_s (%)	K	Presión Frente (bar)	Materiales Excavados
15,6	0,556	0,535	1,11	Limos y Arenas
17,3	0,225	0,329	1,42	Limos y Arenas
18,0	0,152	0,412	1,51	Limos y Arenas
26,0	0,092	0,297	0,62	Arenas, Limolitas y Argilitas
27,1	0,083	0,202	0,79	Arenas, Limolitas y Argilitas
27,7	0,073	0,242	0,86	Arenas, Limolitas y Argilitas
18,0	0,042	0,350	1,25	Arcillas, Limos y Gravas
18,5	0,038	0,689	1,39	Arcillas, Limos y Gravas
19,0	0,027	0,285	1,44	Arcillas, Limos y Gravas
25,3	0,101	0,870	1,35	Gravas, Limolitas y Argilitas
29,9	0,091	0,361	1,66	Gravas, Limolitas y Argilitas
33,7	0,082	0,402	1,73	Gravas, Limolitas y Argilitas
37,8	0,285	0,784	2,09	Limolitas y Argilitas
39,7	0,205	0,642	2,20	Limolitas y Argilitas
41,4	0,162	0,618	2,26	Limolitas y Argilitas

TABLA 2. Túnel Línea 9. Perdidas de Suelo y Presión en el Frente.

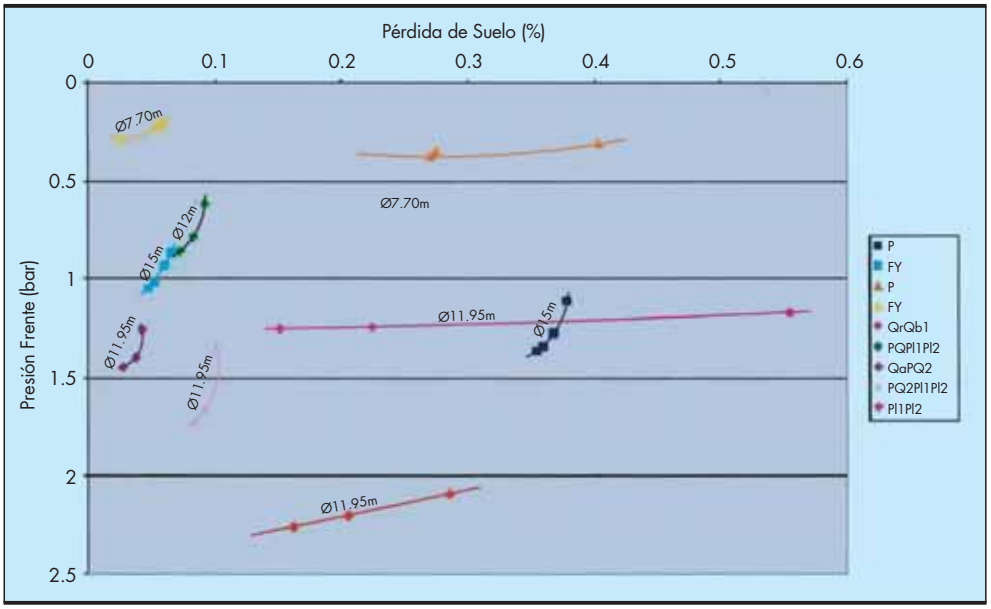

FIGURA 7. Perdida de suelo medidas en función de la presión del frente, el diámetro del túnel y el terreno de excavación. P: Peñuelas; FY: Formación yesífera; Qr Qb1: Limos y arenas; PQ, Pl1, Pl2: Arenas, limolitas y argilitas; Qa PQ2: Arcillas, limos y gravas; PQ2, Pl1, Pl2: Gravas, limolitas y argilitas y Pl1, Pl2: Limolitas y argilitas.

mos la profundidad del túnel y con la presión en el frente, esta aumenta al aumentar la profundidad del túnel.

En la figura 7, se recoge la evolución de la perdida de suelo con la presión en el frente del escudo. En esta figura, también se han superpuesto los valores de la perdida de suelo y presión en el frente obtenidos en la excavación del túnel norte del by-pass sur de la M-30 (Bona et al., 2007).

En esta figura se observa, que las distintas curvas muestran una reducción de la perdida de suelo al aumentar la presión en el frente. Este hecho era de prever, ya que uno de los factores que influye en los valores de la perdida de suelo, además de la naturaleza del terreno y la posición del nivel freático, es la presión en el frente del escudo.

6. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESTABILIDAD DEL FRENTE

Para evaluar la estabilidad del frente de excavación de un túnel circular se ha empleado el método numérico de las fajas de Jambu, en el que se determina la seguridad a la estabilidad del frente suponiendo líneas de rotura cónicas que pasan por la contrabóveda.

Se ha realizado un cálculo en 3D, considerándose los cálculos para una faja de un metro de anchura. El proceso de cálculo es similar al desarrollado para el cálculo de la estabilidad de taludes, con la salvedad de considerar la acción del terreno situado en la parte frontal y por encima de la clave del túnel y la existencia de una presión en el frente.

En las tablas 3 y 4 se recogen los resultados de la evaluación del factor de estabilidad del frente (F) realizados para todas las secciones recogidas en las tablas 1 y 2.

Del análisis de las tablas se puede observar que el valor de la perdida de suelo disminuye a medida que aumenta el factor de estabilidad del frente. Y en el caso de la presión del frente, esta aumenta a la vez que aumenta el valor del factor de estabilidad del frente.

7. MODELO NÚMERICO TRIDIMENSIONAL DEL EFECTO DE LA PRESIÓN DEL FRENTE EN LAS SUBSIDENCIAS

Para determinar la correspondencia entre el asiento en superficie y el coeficiente de seguridad a la estabilidad del frente del túnel, se ha realizado una simulación numérica tridimensional de la construcción de un túnel mediante tuneladora EPB (Simic, 2008).

En este apartado se describen los cálculos realizados que permitirán evaluar la relación existente entre la presión en el frente de excavación de la tuneladora y la distribución de asientos en superficie que produce el paso de la misma. Para ello, se utiliza el caso real correspondiente al P.K. 3+300 del

Prof. Eje Túnel (m)	Perdida Suelo V_s (%)	Presión Frente (bar)	F	Materiales Excavados
23,62	0,404	0,30	1,749	Peñuelas
31,37	0,275	0,35	1,790	Peñuelas
31,69	0,270	0,37	1,795	Peñuelas
20,50	0,059	0,20	2,096	Formación Yesífera
20,90	0,055	0,22	2,124	Formación Yesífera
25,50	0,026	0,27	2,194	Formación Yesífera

TABLA 3. Túnel Colector Abroñigales. Comparación Parámetros Excavación Túnel.

Prof. Eje Túnel (m)	Perdida Suelo V_s (%)	Presión Frente (bar)	F	Materiales Excavados
15,6	0,556	1,11	1,093	Limos y Arenas
17,3	0,225	1,42	1,128	Limos y Arenas
18,0	0,152	1,51	1,158	Limos y Arenas
26,0	0,092	0,62	1,184	Arenas, Limolitas y Argilitas
27,1	0,083	0,79	1,206	Arenas, Limolitas y Argilitas
27,7	0,073	0,86	1,234	Arenas, Limolitas y Argilitas
18,0	0,042	1,25	1,118	Arcillas, Limos y Gravas
18,5	0,038	1,39	1,144	Arcillas, Limos y Gravas
19,0	0,027	1,44	1,159	Arcillas, Limos y Gravas
25,3	0,101	1,35	1,276	Gravas, Limolitas y Argilitas
29,9	0,091	1,66	1,283	Gravas, Limolitas y Argilitas
33,7	0,082	1,73	1,322	Gravas, Limolitas y Argilitas
37,8	0,285	2,09	1,455	Limolitas y Argilitas
39,7	0,205	2,20	1,478	Limolitas y Argilitas
41,4	0,162	2,26	1,499	Limolitas y Argilitas

TABLA 4. Túnel Línea 9. Comparación Parámetros Excavación Túnel.

trazado del tramo 6A1 de la Línea 9 de Metro de Barcelona.

Los cálculos se han realizado mediante un modelo de diferencias finitas tridimensional implementado a través del programa comercial FLAC^{3D}, de HCItasca.

El perfil del terreno se recoge en la figura 8. En esta figura, también se define la profundidad del túnel, que tendrá un diámetro de excavación de 9,40 m.

El modelo elegido es una representación del entorno de túnel hasta la superficie de forma paralepipédica, que aprovecha la simetría espacial existente. En este caso el modelo consta de unos 46400 elementos, y sus medidas son de 105x100x38 m. La construcción secuencial se simula en avances de 1 m de longitud, una vez pasada la zona inicial necesaria para eliminar los efectos del borde Y=0. En la fi-

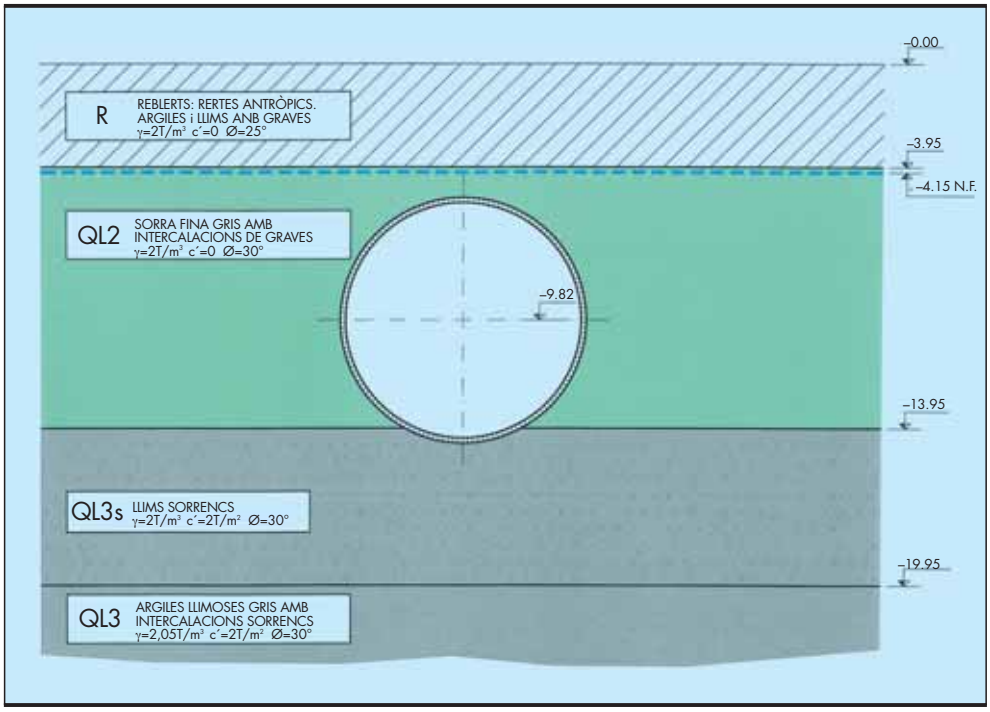

FIGURA 8. Perfil del terreno.

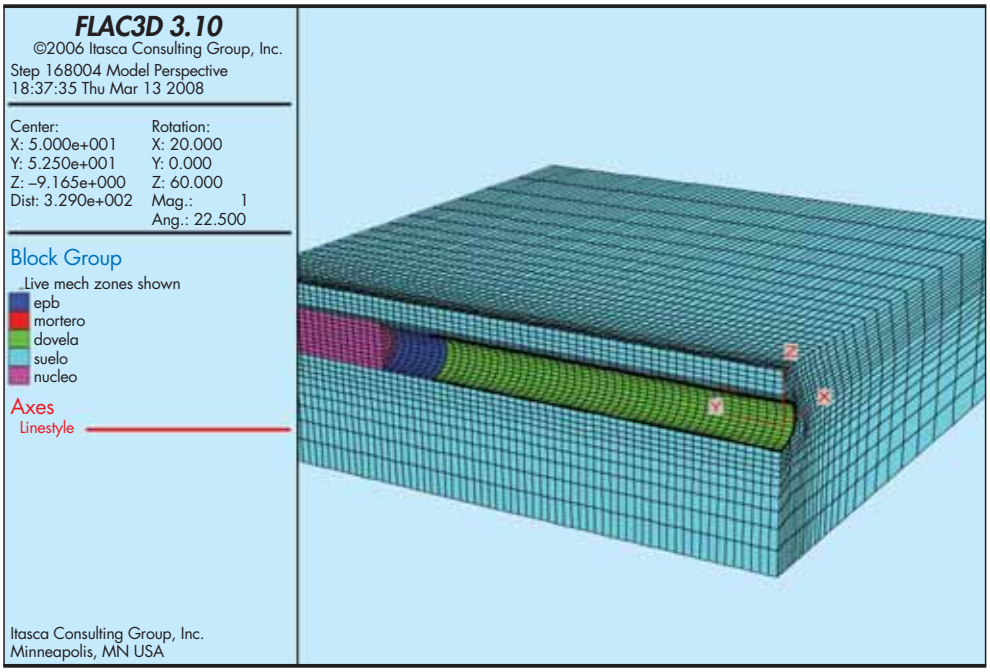

FIGURA 9. Modelo 3D de excavación mediante EPB.

gura 9, se recoge el aspecto general del modelo, una vez atravesada la longitud suficiente para conocer la cubeta alejada del frente, que es el estado final de cada cálculo realizado.

Se han analizado 6 situaciones distintas, cada una de ellas con una distinta presión en cabeza de la tuneladora. Y en cada una de estas situaciones, se ha obtenido la cubeta de asientos –a distancia infinita del frente de excavación– en función de dicha presión en el frente.

En la figura 10, se recogen las cubetas de asientos obtenidas en cada uno de las hipótesis de cálculo consideradas.

El siguiente paso, consiste en realizar un ajuste de cada una de las cubetas de asientos obtenidas en los cálculos realizados, siguiendo el método propuesto por Peck (1969) para estimar la perdida de suelo en cada caso. En la figura 11, se recoge a titulo de ejemplo una de las cubetas obtenida en el ajuste realizado y se superpone con la cubeta de asientos obtenida en los cálculos de FLAC.

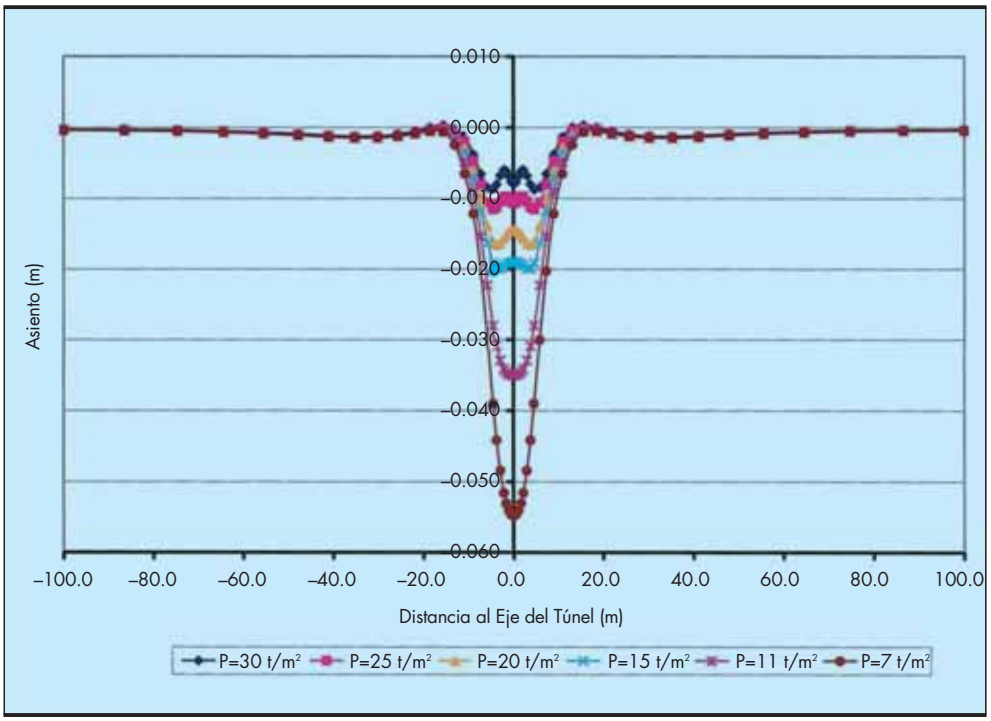

FIGURA 10. Cubetas de asientos.

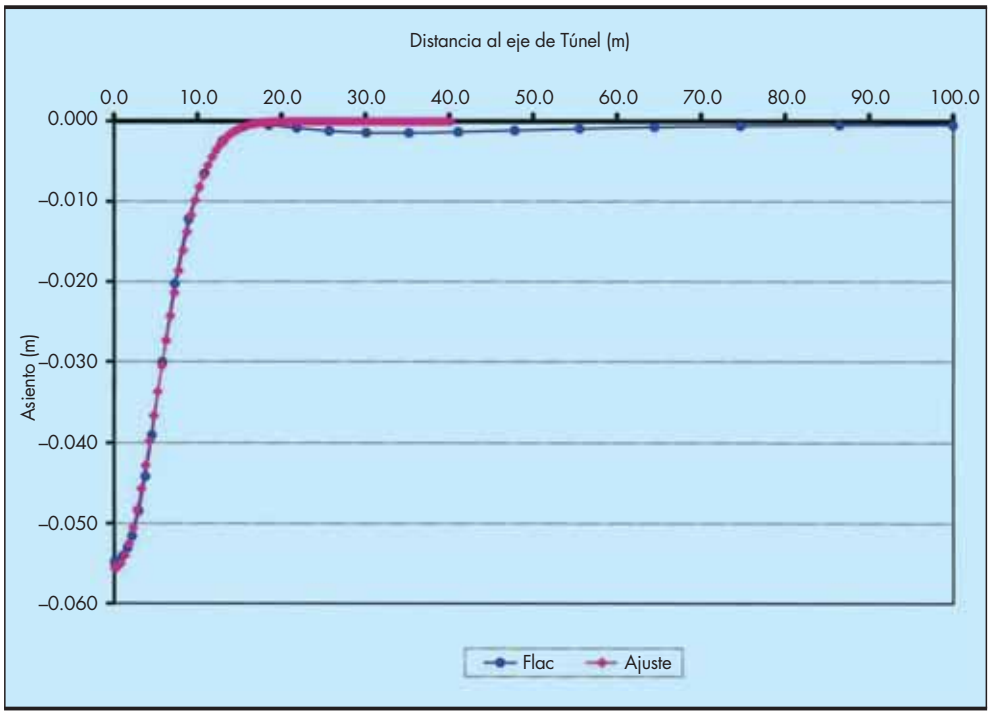

FIGURA 11. Comparación de las cubetas de asientos obtenidas por el ajuste con el método de Peck y la obtenida en los cálculos de FLAC.

Los resultados del ajuste realizado, se resumen en la tabla 5. También en esta tabla se adjuntan los valores de los coeficientes de estabilidad del frente.

De los resultados recogidos en la tabla 5, se pone de manifiesto que a medida que aumenta la presión en el frente del túnel, disminuye la perdida de suelo. Mientras que, al aumentar la presión en el frente también aumenta el valor del coeficiente de estabilidad del frente. Este hecho esta en consonancia con los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

8. CONCLUSIONES

En las obras descritas, que cubren un amplio rango de comportamiento geotécnico (gravas, arenas, arcillas y yesos), de diámetros de la máquina (7,6 m.; 9,4 m.; 11,95 m. y 15 m.) y de profundidades de los túneles, se ha analizado el mecanismo de producción de los asientos en función de las características geotécnicas del terreno y la presión del frente, llegando a la conclusión de que tanto el coeficiente de seguridad de la estabilidad del frente como la presión en el frente presentan una buena correlación con la perdida de suelo, como se recoge en las figuras siguientes.

Presión Frente (T/m²)	Perdida de Suelo (%)	Coeficiente de Estabilidad
30	0.272	1,519
25	0.323	1,392
20	0.445	1,274
15	0.530	1,165
11	0.694	1,083
7	1.049	1,006

TABLA 5. Modelo FLAC 3D. Valores de la Perdida de Suelo y del Coeficiente de Estabilidad del Frente.

En la figura 12 puede verse la correlación entre la perdida de suelo y el coeficiente de estabilidad del frente. Y en la figura 13, se muestra la correlación obtenida entre la presión en el frente y la perdida de suelo. También se han superpuesto en estas figuras, la, correspondencia, obtenida, en el modelo numérico descrito en el apartado anterior. Como cabía de esperar, las distintas curvas muestran una reducción de la perdida de suelo al aumentar tanto el valor del coeficiente de estabilidad del frente como el valor de la presión en el frente. Los datos correspondientes a túneles excavados en arcillas duras y margas yesíferas ponen de manifiesto menores asientos y una reducción más fuerte de la perdida de suelo con el factor de seguridad del frente o con la presión en el frente respecto de los datos de los túneles excavados en suelos blandos.

Como conclusión podemos decir, que un aspecto muy importante de las operaciones de las tuneladoras de frente cerrado es el control del frente de excavación con el fin de minimizar las afecciones en el terreno circundante debidas a los asientos.

9. AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a todas las entidades que han permitido disponer de los datos y publicar estas conclusiones de las distintas obras recogida en este artículo.

De modo particular deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ayuntamiento de Madrid en lo que concierne al colector de Abroñigales y a GISA en lo que se refiere a la Línea 9 del Metro de Barcelona.

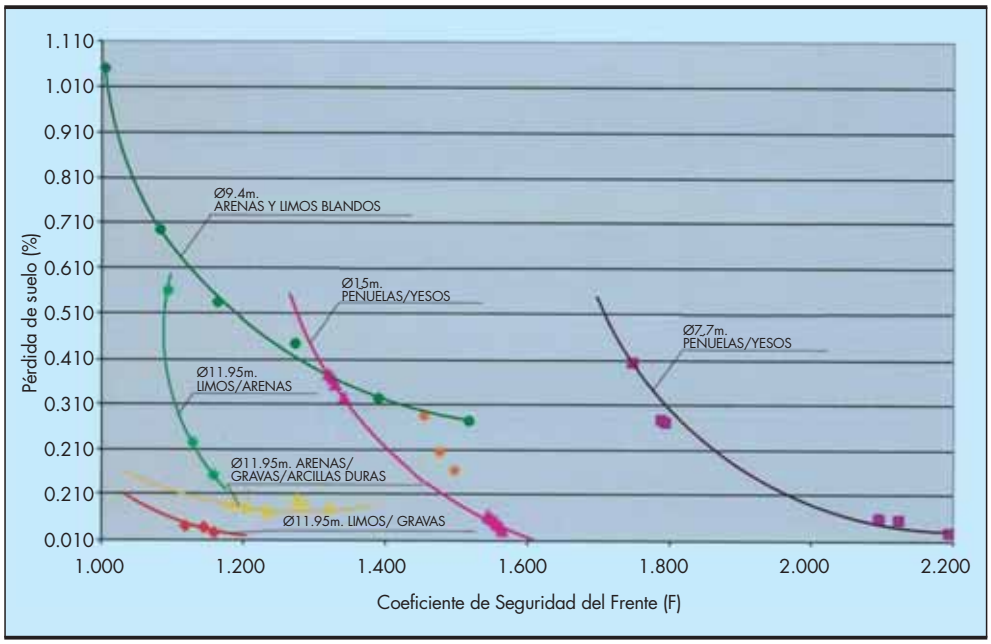

FIGURA 12. Perdida de suelo de cubetas de asientos medidas en casos reales, en función del coeficiente de seguridad del frente y las características del túnel (Simic, 2008).

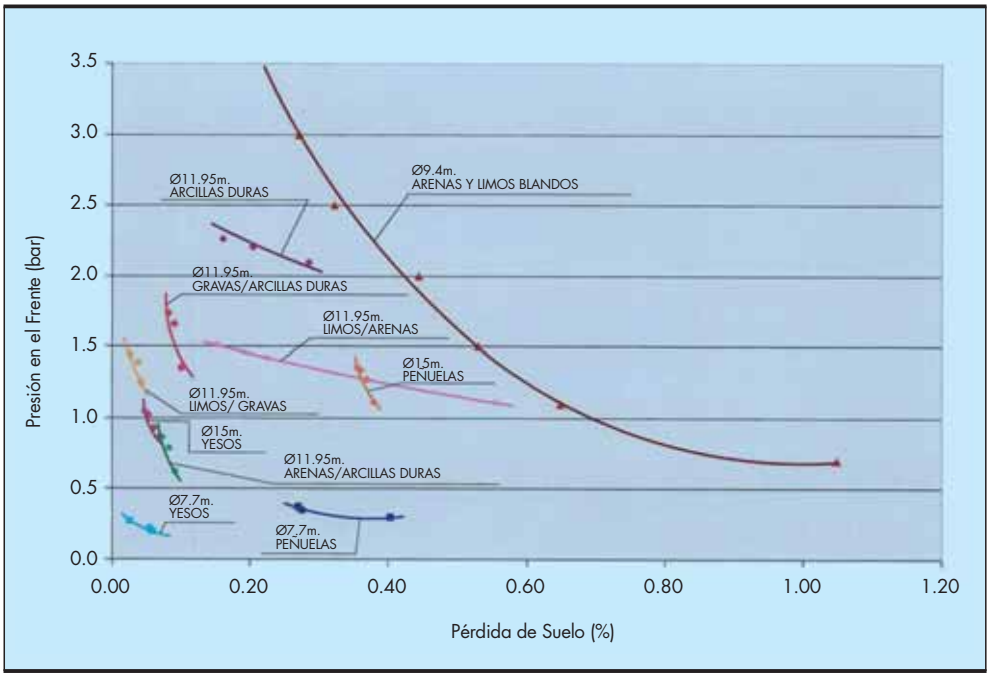

FIGURA 13. Perdida de suelo de cubetas de asientos medidas en casos reales, en función de la presión en el frente de excavación y las características del túnel (Simic, 2008).

10. REFERENCIAS

1. Bona, G; Simic, D (2007). Asientos provocados por tuneladoras de presión de tierras en las facies químico-evaporíticas del sur de Madrid. Congreso Internacional AETOS 2007. Madrid
2. Buxó, P. (2003). L9, Nueva línea de Metro de Barcelona. Aspectos geotécnicos del trazado. II Jornadas del CRECIT, Barcelona.
3. Melis, M. (2006). Túneles en rocas blandas sobreconsolidadas. El problema de la estabilidad del frente. ROP, Madrid.
4. Oteo, C. (1982). Subsidencia debida a túneles. Curso sobre túneles. CEDEX. Madrid
5. Peck, R.B. (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. And Found Eng.* Mexico.
6. Simic, D. (2008). Tuneladoras de frente cerrado. Presiones en el frente y asientos inducidos. Jornada Técnica de Túneles con EPB. Simulación y control de la tuneladora. UPC, Barcelona.