

Nuevo modelo Madrid para la estimación de asentos producidos en túneles ejecutados con tuneladoras EPB de gran diámetro



Fernando Díez Rubio

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Departamento Geotecnia en Typsa.

Profesor de la Universidad Complutense de Madrid



Carlos S. Oteo Mazo

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Catedrático de Ingeniería del Terreno

Resumen

El presente artículo resume la tesis doctoral presentada por el primero de los autores en el año 2011 y dirigida por el segundo. La estimación de asentos en las diversas ampliaciones de la red de Metro de Madrid y otras obras singulares en la ciudad de Madrid se realizaba en una primera aproximación con los modelos existentes, principalmente con el modelo Madrid (Oteo et al, 1999). En general, se ha podido comprobar que los asentos medidos durante la ejecución de las obras son inferiores a los estimados. Por tal motivo y, disponiendo de los datos de la auscultación llevada a cabo durante la ejecución de la ampliación de la red de Metro de Madrid (periodo 2003-07, en la que se realizaron 41 km con tuneladora de los 83,5 km totales), se ha desarrollado un modelo empírico que complementa otro previo de 1999. El modelo relaciona el volumen de asentos (independiente del diámetro de la tuneladora) con el recubrimiento resistente relativo (espesor del sustrato terciario por encima de la clave del túnel dividido por el diámetro de la tuneladora). Para poder establecer dicho modelo, se ha llevado a cabo una metodología aplicada en diferentes fases (Fig. 1):

- Estimación del volumen de asentos con los modelos de cálculo habitualmente empleados y se compara con el volumen de asentos deducido con los datos de la instrumentación dispuesta.
- Tras un tratamiento estadístico de los datos, se establece una ley de variación basada en diversos criterios (por unidad geotécnica, presión de la cámara, etc.). Dicha ley se propone en dos tramos: logarítmico y constante, con un intervalo de variación.
- Se comprobó y validó con los datos disponibles de la instrumentación de la ampliación de la red de Metro de Madrid (periodo 2007-11, donde se han ejecutado 10 km de túnel con tuneladora).
- Por último, se establecen unas limitaciones al modelo y unas recomendaciones para minimizar las subsidencias producidas (peso del material excavado, aseguramiento de un gradiente de presiones en la cámara de la tuneladora, etc.).

Palabras clave

Túnel, tuneladora en modo EPB, subsidencias, modelo empírico

Abstract

The article is a summary of the Doctoral Thesis presented by the first of the two authors in 2011 and directed by the latter. The estimation of settlement in the diverse extensions to the Madrid Metro network and other construction works in the city of Madrid was initially based on existing models and primarily the Madrid Model (Oteo et al, 1999). The settlement measured during the execution of these works was generally seen to be less than the estimated figures. For this reason an empirical model, supplementing an earlier model from 1999, has been developed on the basis of monitoring data obtained during the construction of the extension to the Madrid Metro (from 2003-2007 in which 41 km of the total 83.5 km extension were formed by TBMs). The model relates the volume of settlement (regardless of the diameter of the TBM) to the relative load-bearing surface cover (thickness of the tertiary substrata above the tunnel crown divided by the diameter of the TBM). A specific methodology applied to the different stages has been conducted in order to establish this model (Fig. 1):

- *An estimate of the settlement volume was made using standard calculation models and compared with the settlement volume provided by available monitoring data.*
- *Following the statistical processing of the data, a law of variation has been established based on a series of criteria (geotechnical unit, chamber pressure, etc.). The law is proposed for both logarithmic and constant variance, with a variation interval.*
- *The model was checked and validated against data provided by monitoring equipment during the extension to the Madrid Metro network (2007-2011, in which 10 km of tunnel were build by TBM).*
- *The limitations of the model have been duly established and a series of recommendations provided to minimize subsidence (weight of excavated material, control of pressure gradient in the tunnel chamber, etc.).*

Keywords

Tunnel, EPB tunnel boring machine, subsidence, empirical model

1. Introducción

En un intervalo de tiempo relativamente corto, se realizaron numerosas infraestructuras subterráneas, especialmente líneas de metro, lo que conlleva a una reordenación del terreno en superficie y un nuevo uso del subsuelo.

La ejecución de infraestructuras implica la existencia de ciertas incertidumbres, sobre todo, cuando el volumen de obra a ejecutar es elevado. Dichas incertidumbres hacen referencia al sistema constructivo empleado, al perfil del terreno (litología y propiedades geotécnicas), a la respuesta del terreno ante el nuevo estado generado por la excavación del túnel y al comportamiento de las diferentes infraestructuras o edificaciones afectadas. Existe también incertidumbre referente a la forma de prever dicha respuesta, cómo poderla cuantificar y a la necesidad de reducir o minimizar la afección producida.

Los métodos constructivos empleados en las diversas ampliaciones del Metro de Madrid han sido principalmente tres: ‘cut and cover’ (pantallas o pilotes), método tradicional de Madrid y tuneladora de presión de tierras. Son los dos primeros los que mayores incertidumbres pueden presentar en lo que hace referencia a la subsidencia generada por la excavación del túnel.

Los modelos existentes, fundamentalmente el modelo Madrid (Oteo et al, 1999) están basados en los datos de la ampliación de la red de Metro de Madrid hasta el momento de su desarrollo (1999), pero no tienen en cuenta las infraestructuras realizadas posteriormente, 1999-2007, con la ejecución de 86,3 km de túnel con tuneladora en modo EPB.

La metodología llevada a cabo para el establecimiento del nuevo modelo se resume en el esquema de la figura 1.

2. Breve geotécnica de los suelos de Madrid

Dentro de la provincia de Madrid se reconocen –además de los depósitos cuaternarios y rellenos antrópicos– cuatro grandes series sedimentarias o facies (las líneas de Metro se ubican en las tres primeras), cuya distribución geográfica y tipos de terrenos son (figura 2):

- Facies Madrid: arena de miga y tosco y sus variables intermedias.
- Facies de transición: peñuelas reblandecidas (arcillas marrones, verdes y grisáceas de moderadamente firmes a

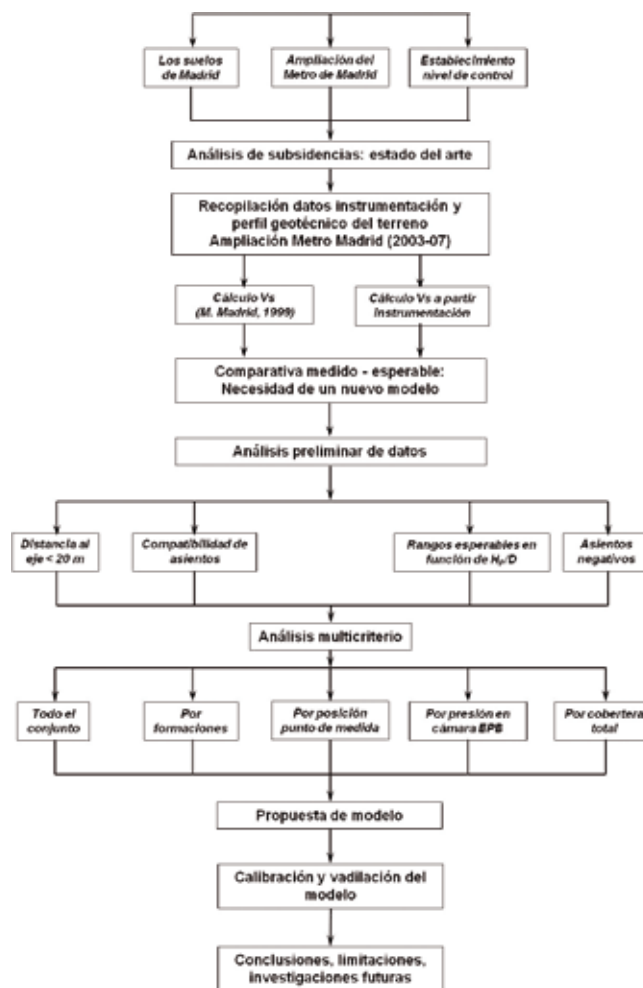


Fig. 1. Metodología aplicada para la implantación del modelo

firmes), peñuelas (arcillas carbonatadas marrones, verdes y grisáceas, duras), arenal y limos micáceos marrones y grisáceos y arcillas sepiolíticas blancas y rosáceas.

- Facies central: arcillas negras con yesos y yesos con aspecto masivo, cristalino y fibroso con niveles centimétricos de arcillas negras.
- Facies Guadalajara.

Es corriente encontrarse en el área de Madrid rellenos, constituidos en muchos casos por los mismos materiales detríticos y arcillosos citados diferenciándose de los mismos por su diferente compacidad.

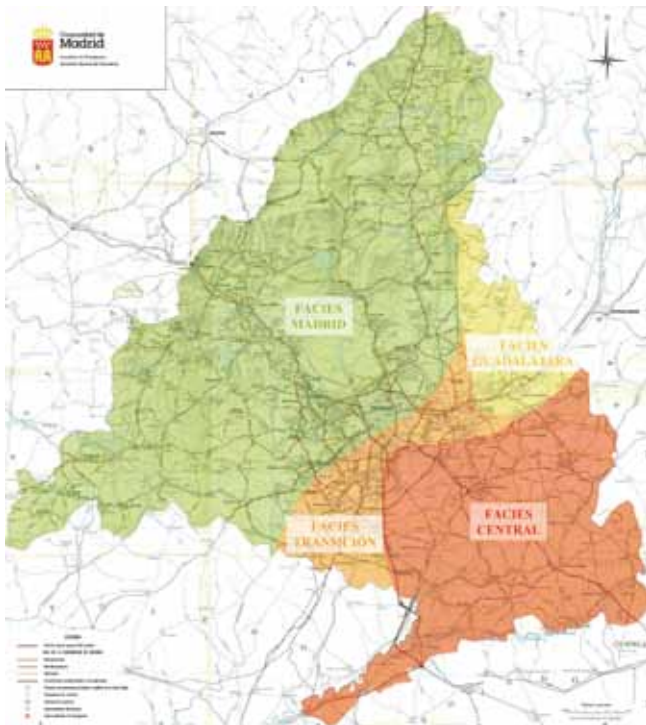


Fig. 2. Distribución geográfica de las facies en la provincia de Madrid

2.1. Propiedades geotécnicas

Las múltiples campañas geotécnicas llevadas a cabo y de la observación de los datos reales, se ha podido establecer unos parámetros diseño, recogidos en la tabla 1.

3. Las ampliaciones del Metro de Madrid

En la evolución de la longitud de la red de Metro de Madrid (figura 3) se observa un cambio de tendencia a partir del año 1995. Hasta dicho año, la media de ejecución anual era de unos 1,27 km/año. A partir de dicho año, con las ampliaciones de Metro de Madrid en los diversos periodos legislativos, (1995-1999, 1999-2003, 2003-2007 y 2007-2011) se pasa a una red de 330 km de extensión con 327 estaciones, aunque es en el intervalo 1995-2007 donde es mayor la ampliación, con una media de 16,4 km/año (triplicando prácticamente su extensión: de 110 a 319 km y de 120 a 318 estaciones).

El estado de la red de Metro de Madrid en el año 2003 era de 238 estaciones y 235 km de línea y al final del año 2011, de 327 estaciones y 330 km de línea.

Material	C' (KPa)	(ϕ)	Módulo deformación (MPa)		Módulo balasto (t/m ³)
			Carga	Descarga	
Rellenos antrópicos	0,0	25 - 28	4 - 6	8-10	2.000
Aluviales	0 -10	27 - 30	7 - 15	8 - 20	5.000
Arenas cuaternarias	0 - 5	34		30 - 60	8.000
Arena de miga	5 - 10	33 - 38	50 -120	55 - 180	15.000
Arena Tosquiza	10 - 15	32 - 35	60 -150	80 - 250	15.000
Tosco arenoso	20 - 25	30 - 34	60 - 180	120 - 350	25.000
Tosco	30 - 40	28 - 32	100 - 225	150 - 550	30.000
Peñuelas verdes y grises	50 - 60	28		200	35.000
Peñuelas reblandecidas	0 -10	28		10	5.000
Yesos	70 - 100	28		400	60.000

Tabla 1. Principales parámetros geotécnicos de los suelos de Madrid (recopilación de varias publicaciones; Rodríguez Ortiz, 2000; Oteo, Rodríguez Ortiz y Mendaña, 2003; Oteo y Rodríguez Ortiz, 2008)

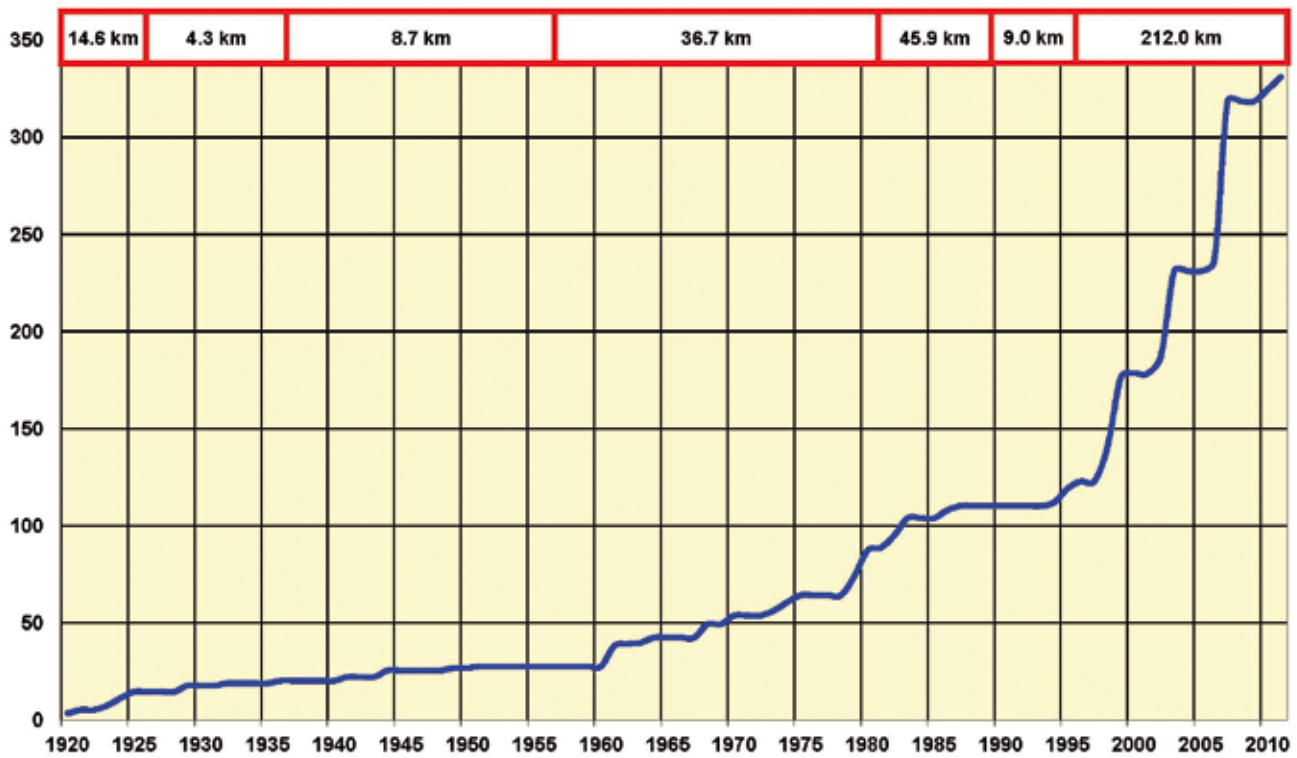


Fig. 3. Evolución de la longitud de la red de Metro de Madrid

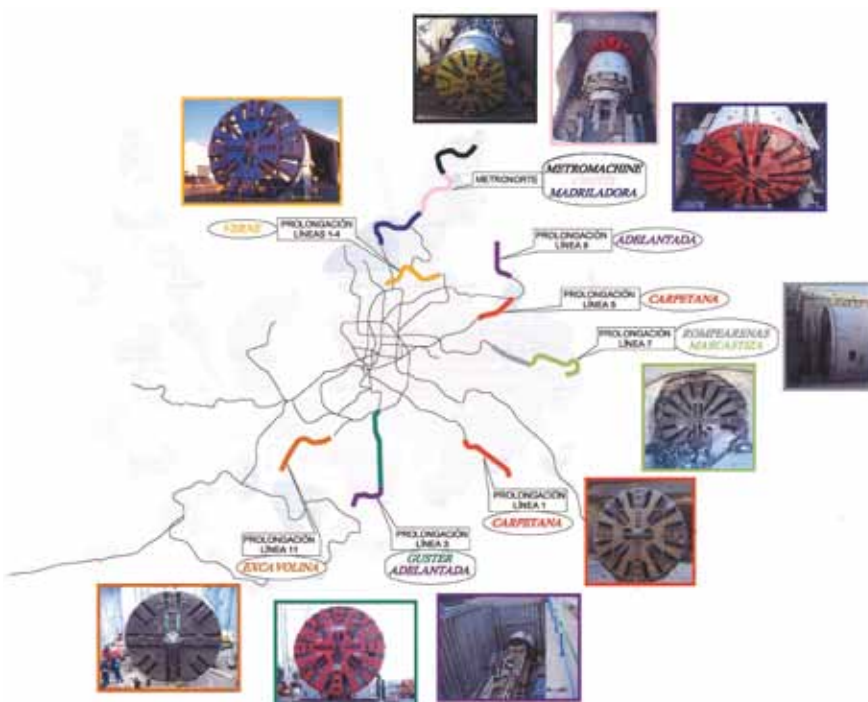


Fig. 4. Tuneladoras empleadas en la ampliación del Metro de Madrid 2003-2007

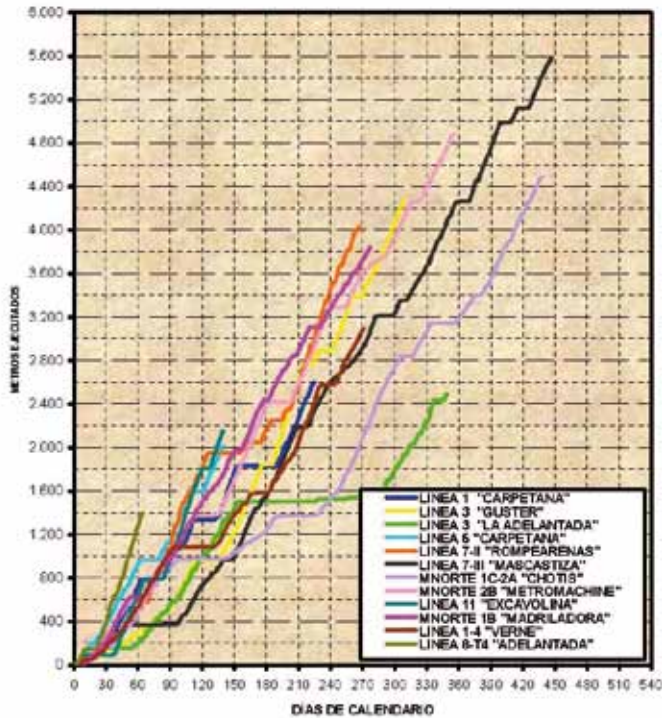


Fig. 5. Rendimientos de las tuneladoras utilizadas en la ampliación del Metro de Madrid 2003 – 2007

Ampliación 2003-2007

Durante este periodo se pusieron en servicio de 82,9 kilómetros de nueva red de Metro, de la cual 64,7 kilómetros eran subterráneos.

En este periodo se emplearon 10 tuneladoras EPB, nueve de ellas de vía doble y una de vía simple (figura 4).

Las principales dificultades que surgieron con estas tuneladoras durante la excavación estaban relacionadas con el terreno:

- En los terrenos detríticos, el mayor problema era el desgaste de las herramientas como consecuencia de la abrasividad, principalmente de la arena de miga.
- La problemática de los yesos, es su dureza excesiva para una máquina con herramientas de suelos blandos.

Los rendimientos acumulados a origen de las diferentes tuneladoras se adjuntan en la figura 5.

Ampliación 2007-2011

La ampliación de la red de Metro de Madrid en este periodo contemplaba cuatro actuaciones; en tres de ellas se utili-

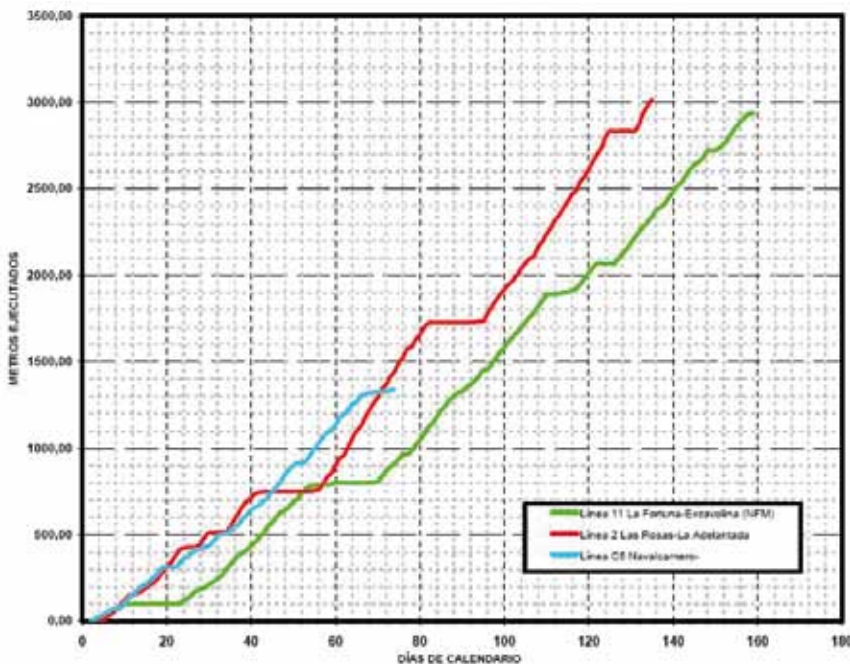


Fig. 6. Rendimientos de las tuneladoras utilizadas en la ampliación del Metro de Madrid 2007 – 2011

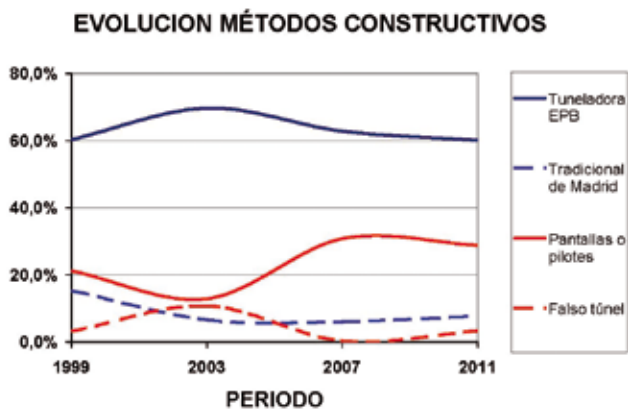


Fig. 7. Evolución de los métodos constructivos empleados desde 1995

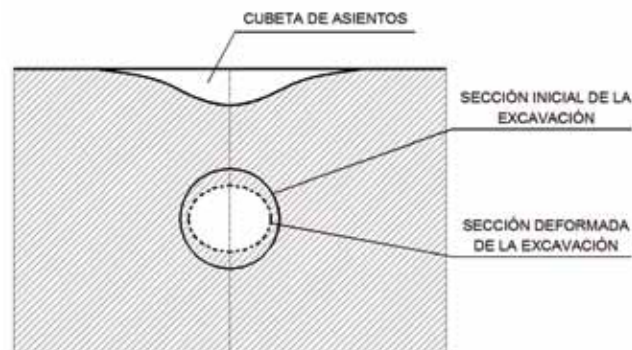


Fig. 8. Pérdida de sección y volumen de asientos

zó tuneladora trabajando en modo EPB, dos de 9,40 m de diámetro (Línea 2 y Línea 11) y la tercera (Línea Ferroviaria a Navalcarnero) de 10,40 m de diámetro.

Los rendimientos acumulados a origen son los indicados en la figura 6. El avance medio diario a origen varía entre los 17 a 23 metros/día (se contabilizan todos los días desde el inicio de la excavación, incluyendo los días de parada).

3.1. Métodos constructivos

Han sido varios los métodos constructivos empleados desde el origen entre los que podemos citar: Método Tradicional de Madrid, Nuevo Método Austriaco NATM, Método Alemán, precorte mecánico, tuneladoras EPB y el método 'cut and cover'.

Por diferentes circunstancias, relacionadas con la seguridad de los trabajadores en el interior del túnel y el requerimiento de un frente estable, se abandonaron desde el año 1995 el método austriaco y el precorte mecánico.

El empleo del resto de los métodos desde el año 1995 es el que se recoge en la figura 7, realizando con tuneladora un 60 %-70 % de la longitud total, unos 110 km.

4. Análisis de la subsidencia en túneles

La convergencia radial es debida a la sobreexcavación que se produce en el frente, la conicidad de la propia máquina y a la deformabilidad de su propia estructura.

La holgura radial o *gap*, para tuneladoras de 9,40 m de diámetro exterior, se puede considerar como la suma de una

conicidad radial (0,03 m), espesor de la chapa del escudo (0,07 m) y espesor de los cepillos (0,05 m). Dichos valores son para el radio.

El movimiento longitudinal se debe a fenómenos de compensación de presiones entre la presión total horizontal del terreno y la de la cámara de la tuneladora.

4.1. Pérdida de sección y pérdida de suelo

El volumen de suelo descomprimido que se introduce en la excavación original, expresado en términos de unidad de longitud del túnel, se denomina 'pérdida de sección', V_0 (diferencia entre el área excavada y deformada) y se suele expresar como un porcentaje de la sección total excavada (A).

El reajuste tensional asociado a la pérdida de sección, dará lugar, en un plano a cota z, a un cuenco de subsidencia (cubeta de asientos, en la figura 8). El volumen comprendido entre la cubeta correspondiente a dicho plano y la superficie original sin deformar se denomina 'pérdida de suelo' o volumen de asientos, $V_s(z)$.

Oteo (1980) propone adoptar para suelos: $V_s = 0,65$ a $0,75 V_0$.

4.2. Métodos para la estimación de la subsidencia

El movimiento de un punto en la superficie de un túnel se inicia, generalmente, varios metros antes de llegar el frente de excavación a la vertical de dicho punto. Dicho movimiento continúa, de forma que cuando el frente llega al punto de observación, se ha producido entre el 10 % y el 50 % del asiento máximo. Éste se alcanza con posterioridad a sobrepasar el frente la vertical de dicho punto.

La estimación teórica del asiento máximo y su evolución es complicada debido al gran número de variables que intervienen, acentuada por tratarse de un fenómeno tridimensional y dependiente del tiempo.

Los principales métodos que se emplean para la estimación de asientos pueden ser analíticos, semiempíricos y numéricos.

Se expone de forma breve la formulación utilizada en el trabajo llevado a cabo.

4.3. Movimientos verticales en superficie

Ley de asientos

De acuerdo con Peck (1969), el asiento a una distancia x del eje del túnel, $\delta(x)$, se asimila a una campana de Gauss invertida, definida por dos parámetros: asiento máximo en el eje, $\delta_{\text{máx}}$, y la distancia al punto de inflexión desde el eje del túnel, i , de acuerdo a la expresión:

$$\delta(x) = \delta_{\text{máx}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

Ambos parámetros están relacionados con el volumen de asientos, V_s , por:

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \approx \frac{V_s}{2,5 \cdot i}$$

Asiento máximo

Oteo y Sagaseta (1981) proponen para el asiento máximo:

$$\delta_{\text{máx}} = \Psi (0,85 - \nu) \gamma D^2 / E$$

E : módulo de deformación en descompresión; ν : coeficiente de Poisson; γ : densidad aparente del terreno y Ψ , "factor de subsidencia", que depende del procedimiento constructivo, tipo de terreno, del sostenimiento, la velocidad de avance, etc.

Situación del punto de inflexión

Oteo y Sagaseta (1974) proponen la ley:

$$i/D = \eta (0,52 H/D - 0,21)$$

D y H : diámetro del túnel y profundidad del eje, η : parámetro que tiene en cuenta el tipo de terreno, variando de 0,75 (cuaternario) a 1,25 (peñuelas y yesos).

Volumen de asientos

El volumen de asientos, V_s (m^3/m), entendido como un porcentaje del área de excavación, A ,

$$V_s (\text{m}^3/\text{m}) = A (\text{m}^2) \cdot V_s (\%) / 100,$$

se estima a partir del modelo Madrid (Oteo et al., 1999), teniendo en cuenta el recubrimiento terciario relativo, (HP/D) a partir de un esquema (figura 9) del tipo:

- Nivel 1: capa superficial de rellenos y/o suelos cuaternarios flojos, con un módulo de deformación en descarga de 5 a 10 MPa.

- Nivel 2: niveles más rígidos del terciario, con un módulo en descarga variable de 50 MPa (arena de miga) a 225 MPa (tosco duro).

Teniendo en cuenta dicho recubrimiento de terreno resistente y la profundidad del eje del túnel, se estima el volumen de asientos a partir del ábaco de la figura 9.

Oteo (2001) observó que dicho volumen era superior al observado, proponiendo el coeficiente corrector de la tabla 2.

4.4. Subsidiencias en profundidad

Para deducir la ley de asientos a una cota determinada (z) a partir de la superficial se propone el procedimiento indicado en la figura 10.

5. Estimación del volumen de asientos: metodología

La estimación del volumen se realiza a partir de los modelos indicados y teniendo en cuenta la instrumentación colocada

Coefficiente corrector	Hp/D	Hp/(Hp+Hr)
0,50	> 1,50	> 0,75
0,70	> 0,50	0,50-0,75
1,00	< 0,50	0,25-0,50

Tabla 2. Coeficiente corrector del volumen de asientos del modelo Madrid (Oteo, 2001)

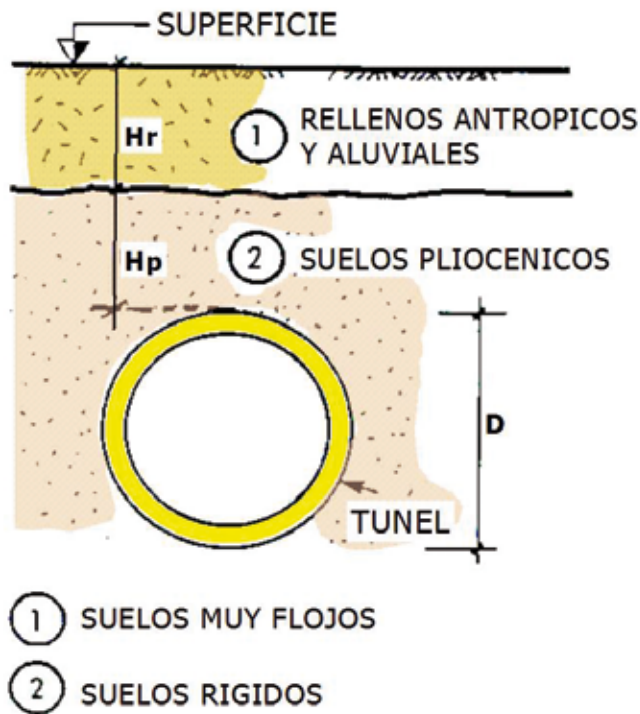


Fig. 9. Modelo Madrid (Oteo et al, 1999), perfil esquemático y ábaco

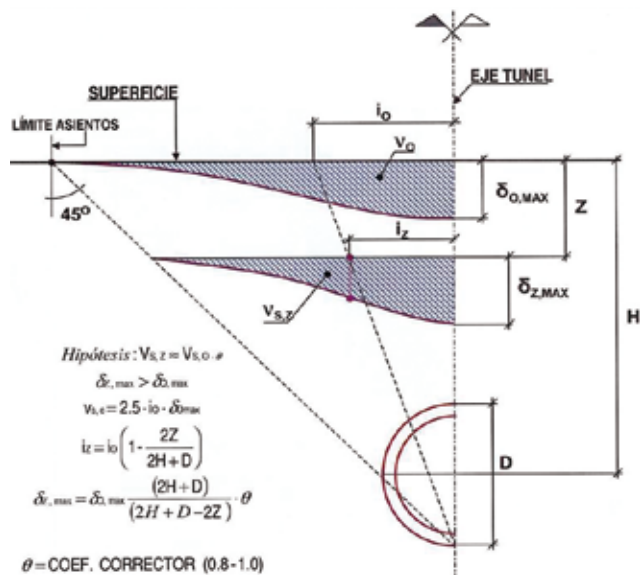
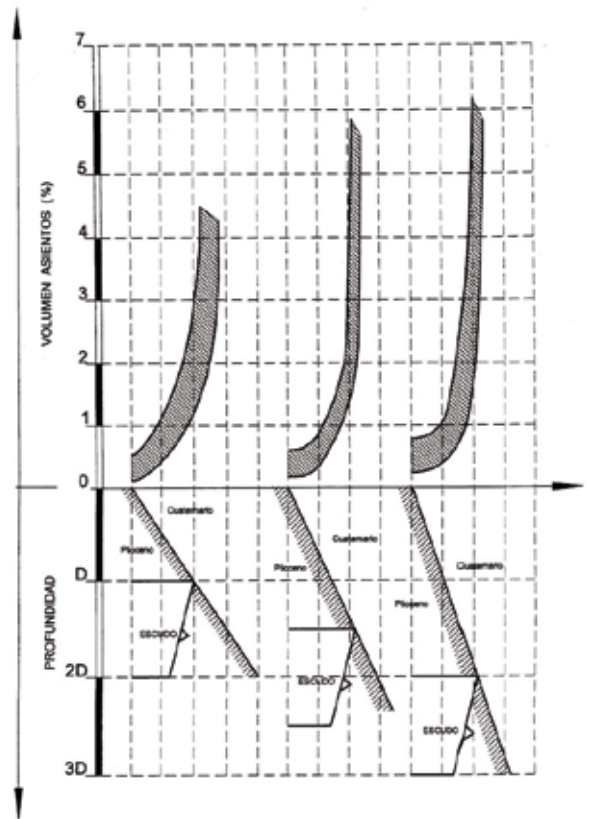


Fig. 10. Deducción de la ley de asientos a cota "z" (Oteo, 2003)

(hitos de nivelación o extensómetros de varillas). Los cálculos se realizaron en una hoja Excel:

- Introduciendo como datos: terreno sobre la clave del túnel (espesor y parámetros geotécnicos, tabla 3) y parámetros geométricos (D: diámetro de la excavación).

- Se obtiene:

- Espesores relativos adimensionales (H/D y H_p/D) (espesores cuaternarios (H_c) y pliocenos (H_p) sobre clave del túnel) y recubrimientos totales y profundidad del eje.

- Situación del punto de inflexión "i" y del ancho de la cubeta de asientos.

- Cálculo del asiento en el eje y del volumen de asientos (asiento o volumen de asiento "estimado") a partir del perfil del terreno y de los parámetros geométricos, aplicando el método semiempírico clásico y el modelo Madrid):

TERRENO	γ	η	Ψ	E (Mpa)
RELLENO (R)	1.80	0.6	1.0	5
ALUVIAL (A)	2.00	0.6	1.0	10
ARENA DE MIGA (AM)	2.00	1.3	0.5	55
ARENA TOSQUIZA (AT)	2.05	1.3	0.5	80
TOSCO ARENOSO (TA)	2.08	1.3	0.5	120
TOSCO (T)	2.10	1.3	0.5	150
P ALTERADA (Pa)	2.00	1.30	0.5	30
PENUELA SANA (P)	2.05	1.60	0.4	200
PENUELA/SEPIOLITA (P _s)	1.60	1.60	0.4	300
PENUELA/CALICHE (P _c)	2.05	1.60	0.4	600
YESO ALTERADO (Y _{ma})	2.10	1.60	0.4	25
P CON YESOS (P _v)	2.10	1.60	0.4	250
P REBLANDECIDA CON YESO (P _{ry})	2.00	1.3	0.5	25
ARCILLA CON YESOS (A _v) < 70%	2.10	1.6	0.4	250
YESOS CON ARCILLA (Ya) > 70%	2.30	1.6	0.4	400

Tabla 3. Parámetros geotécnicos utilizados

• Cálculo del asiento en el eje y del volumen de asientos partir de la instrumentación dispuesta (asiento o volumen de asiento “medido”):

- En los hitos de nivelación, a partir de la posición del punto de inflexión (i) y asiento del hito (δ) a una distancia (x) del eje se estima: el asiento máximo en el eje y el volumen de asientos en m³/m y en %.

- En los extensómetros de varillas, a partir de la posición del punto de inflexión (i) y medida del extensómetro $\delta_{z,x}$ situado a una distancia x del eje y anclado a una profundidad z, se estima la posición del punto de inflexión a la profundidad z: i_z , el asiento máximo en el eje a esa profundidad $\delta_{z,max}$, el asiento máximo en superficie, $\delta_{o,max}$ y el volumen de asientos en m³/m y en %.

6. Análisis previos

6.1. Instrumentación

En la ampliación de la red de Metro de Madrid, periodo 2003-07, en los tramos ejecutados con tuneladora se instalaron 4.422 dispositivos (3.791 HN y 631 Exv). No teniendo en cuenta la información de los dispositivos colocados en la zona en que se ha realizado tratamiento del terreno, tal cantidad se ve reducida a 3.016 instrumentos ‘disponibles’ (2.533 HN y 483 Exv).

Para obtener datos que pudieran considerarse como “posibles”, se aplicaron cuatro criterios:

- Eliminar los datos de los dispositivos situados a más de 20 m del eje del túnel.

- Eliminar aquellos datos que presentaban levantamientos o cuando el volumen de asientos resultante es prácticamente nulo.

- En secciones formadas por varios hitos o por varios extensómetros de varillas, cuando no hay compatibilidad de movimientos entre ellos.

Atendiendo a dichos criterios, se consideraron válidos, “instrumentos posibles”, 1.918 (1.505 HN y 413 Exv), lo que supone un 43 % de los instalados y un 64 % de los disponibles (tabla 4).

6.2. Análisis comparativo

Se realizó un análisis comparativo entre el volumen de asientos estimado y el medido, teniendo en cuenta: la envolvente máxima y mínima del modelo Madrid (1999); la influencia del espesor resistente relativo sobre la clave del túnel (HP/D) y la facies considerada (detrítica, yesífera o transición).

Las conclusiones obtenidas de dicha comparación se resumen en:

- En la mayoría de los casos el volumen de asientos medidos es inferior al mínimo de los estimados: un 74 % de los valores medidos es menor a la envolvente mínima del modelo Madrid y tan solo un 5 % es superior a la envolvente máxima.

- Cuanto mayor es el espesor resistente relativo, mayor es el porcentaje de casos menores al mínimo: para $H_p/D < 2$, en un 71 % de los casos se cumple que $V_{s,medido} < V_{s,mínimo}$. Tal proporción aumenta al 85 % cuando $H_p/D > 2$.

	Instrumentos						
	Instalados		Disponibles		Posibles		
	HN	Ext	HN	Ext	HN	Ext	Total
MN1B	298	75	207	65	157	56	213
MN1C-2A	543	69	465	60	240	43	283
MN2B	448	42	346	32	196	30	226
L8 a T-4	78	21	63	16	56	15	71
L1-4	171	42	135	33	82	31	113
L11	366	33	117	20	82	11	93
L5	197	40	157	38	111	34	145
L1	114	81	111	81	58	69	127
L7.3	709	83	388	45	186	38	224
L3.1	641	127	392	75	226	68	294
L3.2	226	18	152	18	111	18	129
TOTAL	3791	631	2533	483	1505	413	1918
	4422		3016		1918		

Tabla 4. Distribución por líneas de los instrumentos instalados, disponibles y posibles

- Por facies, los valores en las detríticas son muy similares a los comentados. Para la facies de transición, en un 43 % de valores medidos es inferior al mínimo de los estimados. En las yesíferas están en un término intermedio a los indicados.

- Se puede indicar que el modelo Madrid (1999) resulta conservador en el sentido en que los asientos estimados son superiores a los reales.

7. Análisis de los datos

La comparativa anterior indicaba que el volumen de asientos estimado a partir de las mediciones reales estaba influido por la naturaleza de la formación geotécnica y por el parámetro H_p/D . Además se pretendía analizar la influencia de otros factores como: posición del punto de medida respecto a la posición del punto de inflexión, presión en la cámara de la tuneladora y la cobertera total.

La metodología aplicada a la totalidad de los datos es la que se comenta en las líneas siguientes.

Se observó que la mayoría de los datos están en el intervalo de variación de H_p/D entre 0,5 y 2. Un volumen de asientos inferior al 0,2 % se presenta en el 67,3 % del total y por el contrario, tan solo un 2,8 % presentan un $V_s > 1$ %. Realizando análisis similares, se adoptó como rango de variación de los datos el indicado en la tabla 5.

De los 1.918 datos posibles y, teniendo en cuenta los criterios de variación indicados, quedaron reducidos a 1.204 casos, distribuidos por formaciones y por H_p/D como se indica en la tabla 6.

H_p/D	V_s (%)
< 0,50	0,50 – 2,00
0,50 – 1,00	0,20 – 2,00
1,00 – 1,50	0,10 – 0,60
> 1,50	< 0,20

Tabla 5. Variación de V_s con H_p/D

Formación	Análisis (H_p/D)					
	Posibles			Reales		
	$H_p/D < 2$	$H_p/D > 2$	Total	$H_p/D < 2$	$H_p/D > 2$	Total
Detritica	688	331	999	382	310	692
Transición	272	0	272	106		106
Yesifera	580	67	647	376	30	406
Total	1520	398	1918	864	340	1204

Tabla 6. Casos del volumen de asientos adoptados para el análisis

Se comprobó que el comportamiento de dichos datos era diferente según el recubrimiento resistente relativo fuese mayor o menor de 2, adoptándose leyes de variación diferentes:

- Para $H_p/D < 2$: V_s (%) decrece a medida que aumenta (H_p/D) por lo que se adoptó una ley del tipo logarítmico.

- Para $H_p/D > 2$: la totalidad de los valores son inferiores al 0,2 %, adoptándose en este caso un valor medio.

Teniendo en cuenta dichas particularidades, para el conjunto de todos los datos se adoptó una ley del tipo:

- Para $H_p/D < 1,89$: V_s (%) = - 0,4296 Ln (H_p/D) + 0,3432

- Para $H_p/D > 1,89$: V_s (%) = 0,07 ± 0,046

El valor de 1,89 se obtiene de igualar la ley logarítmica al valor constante.

Realizando un análisis similar a los diversos criterios dispuestos, se obtuvieron un total de 12 leyes, resumidas en la tabla 7 y representadas en la figura 11, junto con la envolvente máxima y mínima del modelo Madrid. En dicha tabla se indica:

- Criterio utilizado y muestra analizada (nombre y nº de casos).

Criterio	Muestra	n _{Total}	Ley logarítmica				Constante			
			H _p /D ≤	n _i	Ecuación	R ²	H _p /D ≥	n ₂	Media	Des. St
Global	Todas	1204	1,89	864	V _s = -0,4296 Ln(H _p /D) + 0,3432	0,5110	1,89	340	0,070	0,046
Por formaciones	Detriticas	692	1,83	382	V _s = -0,4089 Ln(H _p /D) + 0,3160	0,4977	1,83	310	0,069	0,046
	Transición	106	2,00	106	V _s = -0,3811 Ln(H _p /D) + 0,4264	0,3083	2,00		0,162	
	Yesíferas	406	1,89	376	V _s = -0,3849 Ln(H _p /D) + 0,3262	0,4161	1,89	30	0,082	0,049
Por posición punto de medida	x < i/2	668	1,90	445	V _s = -0,3587 Ln(H _p /D) + 0,3004	0,4871	1,90	223	0,071	0,046
	i/2 < x < 15	402	1,87	319	V _s = -0,4280 Ln(H _p /D) + 0,3482	0,5126	1,87	83	0,080	0,045
	x > 15	133	1,83	99	V _s = -0,6560 Ln(H _p /D) + 0,4727	0,6870	1,83	34	0,076	0,047
Por presión en cámara EPB	P _{EPB} > 0,2γH	215	1,99	202	V _s = -0,4314 Ln(H _p /D) + 0,3491	0,3578	1,99	13	0,052	0,032
	0,1γH < P _{EPB} < 0,2γH	596	1,85	465	V _s = -0,4417 Ln(H _p /D) + 0,3509	0,4798	1,85	131	0,080	0,048
	P _{EPB} < 0,1γH	233	1,90	90	V _s = -0,5545 Ln(H _p /D) + 0,4192	0,6112	1,90	143	0,063	0,042
Por recubrimiento total	H _t /D < 2 (H _p /D < 2)	897	1,89	557	V _s = -0,4307 Ln(H _p /D) + 0,3450	0,4286	1,89	340	0,071	0,046
	H _t /D > 2 (H _p /D < 2)	647	1,89	307	V _s = -0,3914 Ln(H _p /D) + 0,3202	0,4538				

Tabla 7. Leyes de variación de V_{s,medido} en función de H_p/D según los criterios analizados

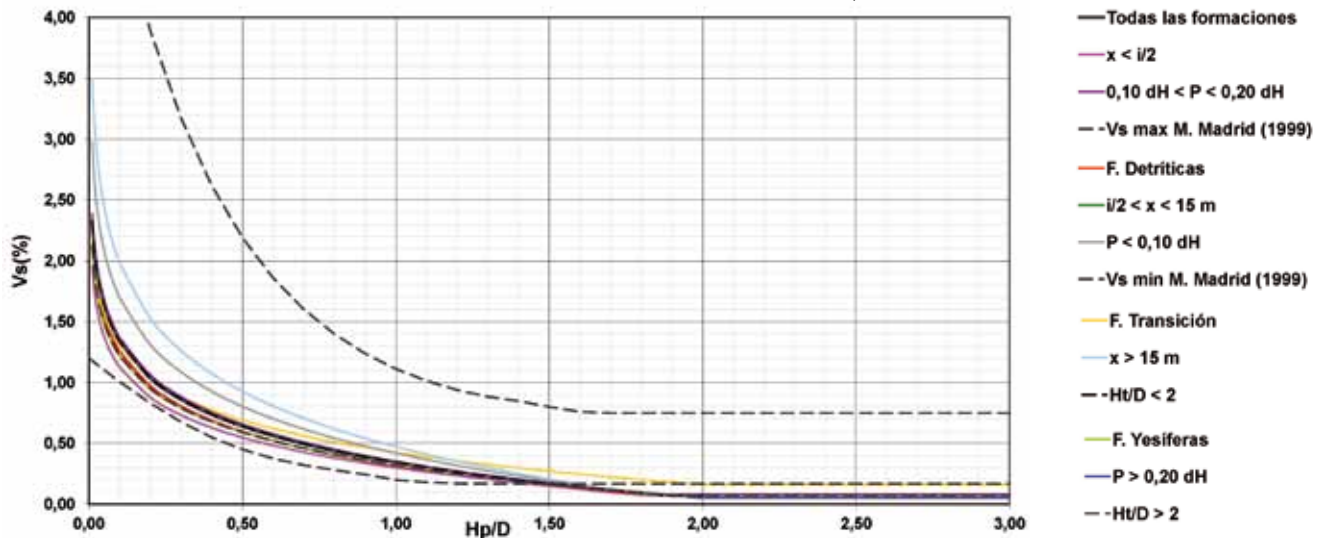


Fig. 11. Leyes de variación del V_{s,medido} en función de H_p/D en todos los criterios analizados

- Ley logarítmica, indicando el intervalo de aplicación (valor máximo de H_p/D), número de datos considerados y ecuación con el coeficiente de regresión.

- Valor constante, indicando el intervalo de aplicación (valor de H_p/D a partir del cual se aplica), número de datos considerados, valor medio y desviación estándar.

Del análisis anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Todas las leyes son inferiores a la envolvente máxima del modelo Madrid (1999). Para H_p/D > 1,5 todas las leyes son inferiores a la envolvente mínima.

- Todas presentan valores similares para H_p/D > 1,90.

- De las once leyes obtenidas sin considerar la global, sólo en tres de ellas (formación de transición, posición del punto de medida a más de 15 m del eje del túnel y presión en la cámara inferior al 10 % de la vertical) el volumen de asientos es superior al obtenido para el conjunto de todos los valores.

8. Propuesta de modelo

Con lo anteriormente expuesto, no parece lógico diferenciar una ley para cada uno de los criterios aplicados sino adoptar una única ley, proponiendo (figura 12):

- Para H_p/D < 1,90: V_s (%) = - 0,4296 Ln (H_p/D) + 0,3432

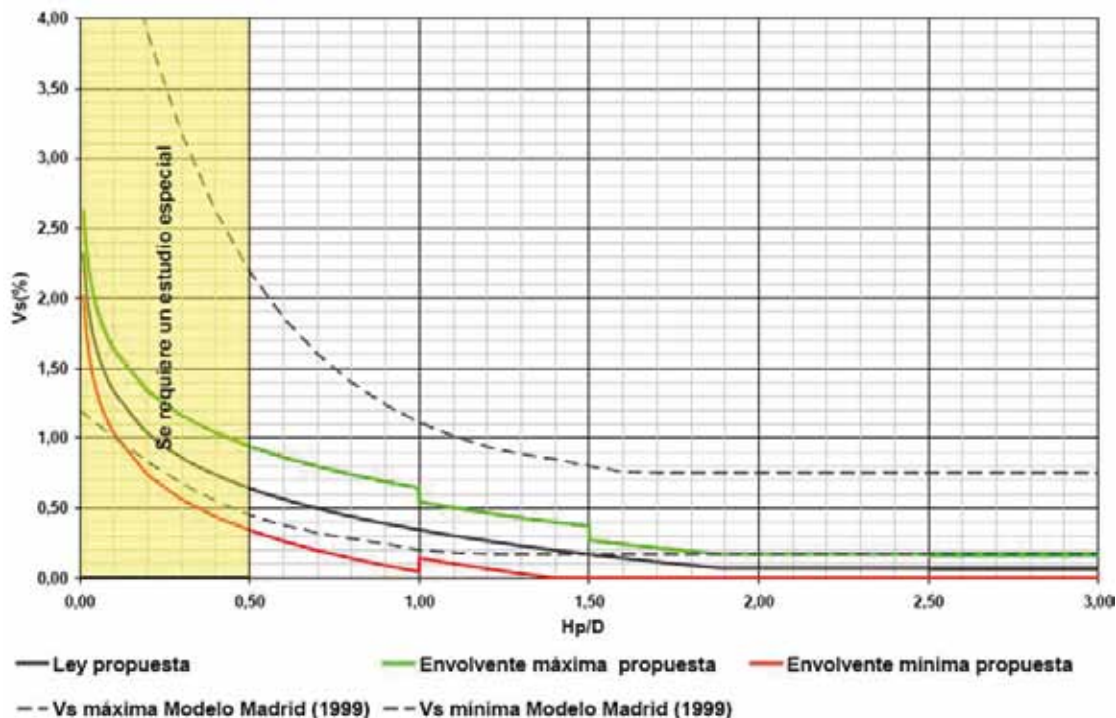


Fig. 12. Ley de variación del volumen de asientos en función de H_p/D

- Para $H_p/D > 1,90$: $V_s (%) = 0,10$

Con el intervalo de variación siguiente:

- Para $H_p/D < 1,00$: $V_s (%) 0,30$

- Para $1,00 < H_p/D < 1,50$: $V_s (%) 0,20$

- Para $H_p/D > 1,50$: $V_s (%) 0,10$

Para $H_p/D < 0,50$ se requiere un estudio especial.

9. Validación del modelo

Se pretendía analizar la ‘bondad’ del modelo propuesto con los asientos medidos en tres obras ejecutadas en la legislatura siguiente (2007-2011, Línea 2 y Línea 11 y Línea ferroviaria Móstoles-Navalcarnero).

Aplicando la misma metodología que para el establecimiento del modelo, de los 660 elementos disponibles se consideraron 366 datos ‘reales’ o válidos (tabla 8).

El volumen de asientos deducido de las medidas de los 366 instrumentos se representó junto a la ley deducida (figura 13),

constatando que en 112 casos (31 %) los valores medidos eran inferiores a la envolvente mínima propuesta, en 15 casos (4 %) eran superiores a la envolvente máxima y en el 65 % restante (239 casos) los valores estaban comprendidos entre la envolvente máxima y mínima.

Esto permite indicar:

- El modelo deducido es adecuado, aunque podría considerarse algo conservador, pues presenta valores inferiores a la envolvente mínima propuesta.

- No se obtienen valores superiores a la envolvente máxima cuando se lleva un control exhaustivo de la presión en la cámara, no del valor en clave, sino del gradiente de presiones (caso de Línea 2).

- Los valores medidos superiores a la envolvente máxima propuesta se debe a la presencia de rellenos importantes, aún con coberteras resistentes importantes (Línea 11).

10. Conclusiones, limitaciones e investigaciones futuras

Las principales conclusiones obtenidas del estudio llevado a cabo son:

	Instrumentos						
	Disponibles		Posibles		Reales		
	HN	Ext	HN	Ext	HN	Ext	Total
Mostoles- Navalcarnero	59	21	20	15	18	15	33
Línea 2 a Las Rosas	294	33	180	31	178	31	209
línea 11 a La Fortuna	211	42	113	35	91	33	124
TOTAL	564	96	313	81	287	79	366
	660		394		366		

**Tabla 8. Resumen
 instrumentos utilizados
 para la calibración del
 modelo**

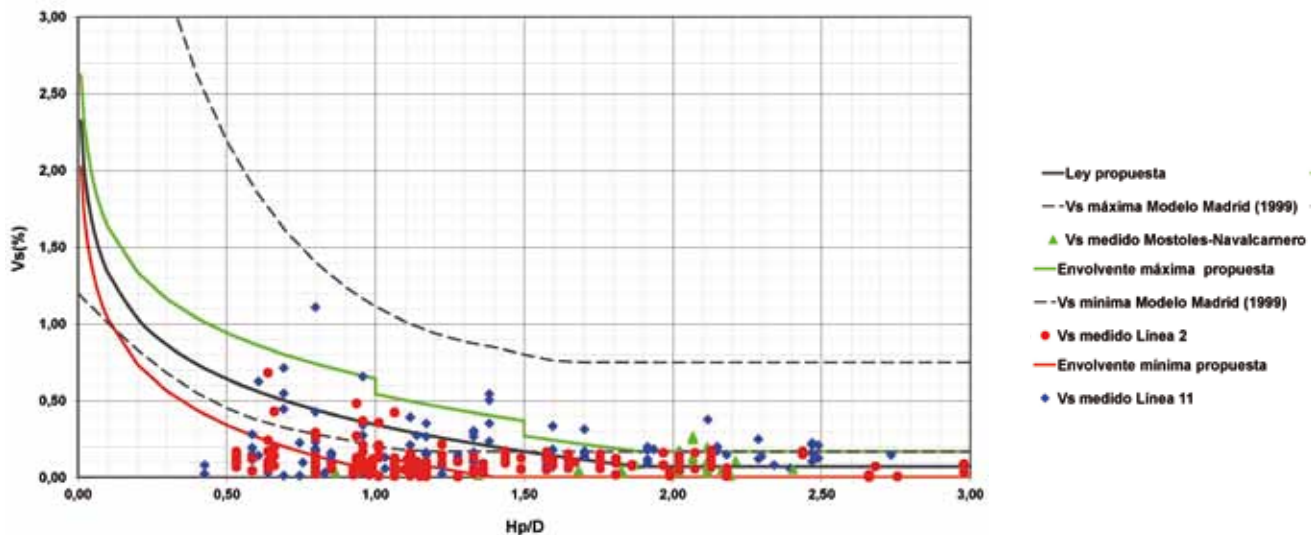


Fig. 13. Validación del modelo: valores de V_s en las obras ejecutadas en periodo 2007-2011

- El modelo Madrid (1999) resultaba conservador (la mayor parte del volumen de asientos obtenidos a partir de los datos de la instrumentación dispuesta era inferior al volumen de asientos deducido de dicha ley, para el caso de tuneladoras EPB).

- Se debe establecer un nuevo modelo.

- Dicho modelo se establece teniendo en cuenta la cubeta de asientos se asemeja a una campana invertida de Gauss, la posición del punto de inflexión se establece acorde a los modelos existentes (Oteo y Sagaset) y es un modelo en "campo libre".

- Dicho modelo permite comparar el recubrimiento terciario (resistente) relativo y el volumen de asientos (adimensional e independiente del diámetro).

- El modelo adoptado presenta un tramo logarítmico y otro constante, con un intervalo de variación (establecimiento de una envolvente máxima y mínima).

- Dicho modelo se ha validado y existe concordancia entre los valores estimados y los obtenidos a partir de la instrumentación dispuesta.

Las principales limitaciones que presenta el modelo son:

- Se establece para un túnel sin tener en cuenta la posibilidad de las subsidencias generadas por un túnel gemelo realizado en las proximidades.

- La validez del modelo se ha probado para $H_p/D > 0,5$.

- Se ha probado para los terrenos del área de Madrid: niveles terciarios resistentes (englobados todos ellos en una misma

categoría geotécnica) sobre los que se sitúan depósitos cuaternarios sin ninguna resistencia.

- La estimación del volumen de asientos debe tomarse como un valor orientativo.

La diferencia entre el modelo establecido en el año 1999 (hasta ese momento las tuneladoras de Madrid iban casi sin presión frontal) y el resultado de la tesis doctoral presentada se debe fundamentalmente a que se lleva un control mayor en los parámetros de excavación de la tuneladora. Por lo tanto, las investigaciones futuras se deben orientar al modo de limitar la subsidencia por la ejecución de una obra subterránea mediante tuneladora, proponiendo:

- Disponer un plan de avance de la tuneladora, que contemple aspectos tales como: perfil geotécnico del terreno, presión en clave en la cámara, peso de excavación esperable por avance, etc.

- Control de la presión en la cámara de tierras, disponiendo varias células a diferentes alturas en la cámara de presión, de forma que aseguren la existencia de un gradiente de presiones y que el grado de llenado de la cámara sea el máximo compatible con el funcionamiento deseado.

- Relleno adecuado del *gap*: durante el proceso de excavación, si se comprueba la inestabilidad del terreno excavado, mediante la utilización de bentonita inyectada a través del escudo o bien en el proceso de inyección del trasdós de las dovelas, asegurándose que el volumen inyectado es similar al teórico.

- Control del volumen (peso) excavado, indicando en cada anillo (teniendo en cuenta los próximos) su relación con el teórico, para conocer la posibilidad de sobreexcavación o la presencia de huecos y actuar en consecuencia.

- Tratamiento preventivo del terreno en las zonas en donde se prevea subsidencias elevadas. **ROP**

Referencias

- Arnáiz, M. (1993): "Sistemas constructivos en obras en ejecución para la ampliación del Metro de Madrid". La ampliación del Metro de Madrid. AETOS. Madrid.

- Attewell, P.B. y Yeates, J. (1984): "Tunnelling in soil" en el libro "Ground movements and their effects on structures". Surrey University Press.

- De la Fuente, P. y Oteo, C (1996): "Theoretical research on the subsidence originated by underground construction in urban areas".

- Díez Rubio, F. (2007): "Establecimiento del nivel de control de las actuaciones geotécnicas en las obras subterráneas urbanas". Trabajo de Suficiencia Investigadora del Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid.

- Díez, F.: "Nuevo modelo Madrid para la estimación de asientos producidos en túneles con tuneladoras EPB de gran diámetro". Tesis Doctoral dirigida por el Prof. Oteo. Calificación: Sobresaliente Cum Laude. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P. Madrid. Enero 2011.

- González, A. y Trabada, J. (2000): "Tramos VII, VIII y IX (Getafe) de Metrosur". ROP nº 3.405.

- Medina Rodríguez, L. (1999): "Estudio de los movimientos originados por la excavación de túneles con escudo de presión de tierras en los suelos tosquizos de Madrid". Tesis Doctoral. Universidad de La Coruña.

- Melis, M. (2007): "Underground excavations in soils and soft rocks. Insight in the case of Madrid". XIV ECSMFE. Madrid.

-Oteo, C y Sagasetta, C (1997): "Subsidencia producida por los túneles". Capítulo 20 del libro: "Manual de túneles y obras subterráneas". Editor Calor López Jimeno.

- Oteo, C (1980) "Subsidencia originada por la excavación de túneles". Capítulo en "Geotecnia y Cimientos III", dirigido por J.A. Jiménez Salas. Ed. Rueda. Madrid.

- Oteo, C. (2001): Trabajo de Investigación: "Prevención de daños inducidos por la excavación de túneles en estructuras próximas". Presentada en la U.P.M.

- Oteo, C. y Rodríguez Ortiz (1997): "Subsidencia y auscultación en los túneles del Metro de Madrid". ROP nº 3.369.

- Oteo, C., Arnáiz, M., Trabada, J. y Melis, M. (1999): "The Madrid Model: a semi-empirical method for subsidence estimating". World Tunnell Congres. Oslo.

- Peck, R.B. (1969): "Deep excavations and tunnelling in soft ground". 7th ICSMFE, Mexico.

- Rodríguez Ortiz, J.M. (1993): "Subsidencia y auscultación". La ampliación del Metro de Madrid. AETOS. Madrid.

- Rodríguez Ortiz, JM. (2007): "Ground deformations associated with urban tunnels". XIV ECSMFE. Madrid.

- Sagasetta, C. y Oteo, C. (1974a): "Análisis de la subsidencia originada por la excavación de túneles". 1er Simposio Nacional de Túneles. Madrid.

- Trabada, J., González, A.; Díaz, J.M., Herrera, M y Díez F. (2007): "Control y seguimiento geotécnico de los diversos planes de ampliación del Metro de Madrid". Capítulo 13. Ingeotúneles nº 12. Editor: Carlos López Jimeno.