

El Túnel, clave de las infraestructuras

149 túneles españoles y extranjeros: Métodos y velocidades de construcción

Manuel J. Melis Maynar
Prof. Dr. Ing. de Caminos, M.Sc, MBA
Prof. Titular Ing.Terreno. ETS Caminos Coruña

RESUMEN

Se presentan en este artículo una serie de datos sobre las velocidades de construcción de 149 túneles de varios países. Se comparan los rendimientos obtenidos por los métodos de frente abierto, como el Nuevo Método Austriaco o el Precorte Mecánico con los logrados por los métodos de frente cerrado, las grandes tuneladoras de suelos o de rocas, y se dan algunos datos sobre la importancia del plazo de ejecución de las grandes infraestructuras del transporte. Se dejan al lector las conclusiones sobre la conveniencia de seguir utilizando los métodos de frente abierto en los túneles de las infraestructuras de España.

ABSTRACT

This article presents details of the construction speeds of 149 tunnels in different countries. A comparison is made of the advance rates obtained by open-face methods, such as the New Austrian Tunnelling Method (NATM) or Precutting, with those obtained by closed-face methods (TBM, EPB), and the article goes on to underline the importance of the construction period in large-scale transport infrastructure. Conclusions are left to the reader regarding the wisdom of using open-face methods in Spanish tunnels.

Las distancias del centro de España a las ciudades más alejadas (Coruña, Almería, Cádiz, Gerona) son del orden de los 600 km. Con estas distancias y los trenes de 350 km/h de velocidad (y 400 en muy pocos años), unos trazados adecuados de las nuevas infraestructuras de Alta Velocidad permitirán la conexión en menos de dos horas entre ellas. Por ejemplo, la relación Madrid-Coruña, que actualmente tiene una longitud de vía férrea de 844 km por la vía de Torre del Bierzo, o de 750 por la vía de Zamora, puede reducirse a 582 km, pasando por Santiago, si el trazado se elige adecuadamente. El viaje Madrid-Coruña - hoy 9 horas - será de menos de dos horas si el paso de las montañas se hace bien. Realmente, no

parece adecuado hoy día hablar de 4 horas de viaje de FFCC para esas distancias de 600 km, salvo que por gravísimos motivos presupuestarios haya que hacer una solución provisional que en menos de dos décadas habrá que rehacer. Tengamos en cuenta que muchos técnicos reían cuando, hace siglo y medio, se decía que algún día los trenes circularían a 100 km/h, y que aún hoy ocurre lo mismo - cuando pedimos proyectar las nuevas infraestructuras de FFCC previendo los 400 km/h - pese a que el TGV, padre de nuestro AVE, ya superó los 515 km/h hace más de 10 años, el 18 de Mayo de 1990, y que el nuevo Shinkansen 300X superó también los 443 km/h el 26 de Julio del 96.

Las mismas 2 horas de viaje, y aún menos por ser menores las distancias, se conseguirán entre Madrid y Oviedo, Gijón o Avilés, Santander, Almería, Málaga o Gerona. Esto hará cambiar a España, y sin duda tendrá una influencia positiva y determinante en la solución de algunos terribles problemas que actualmente estamos viviendo. Pero es bien sabido que las comunicaciones entre una y otra zona de España sólo pueden establecerse a través de contados pasos de montaña, los mismos probablemente que ya utilizaron los romanos. Las Portillas, Manzanal y Piedrafita en los accesos a Galicia, el acceso a Asturias por Pajares, y a Cantabria por La Bárcena, El Escudo o La Engaña. El acceso a Valencia sigue hoy huyendo de las montañas dando una enorme vuelta por la vieja y larga ruta de Alcázar, Albacete y Játiva, si bien el nuevo acceso de alta Velocidad decidido recientemente por el Ministerio por Cuenca y Contreras acortará la distancia en 140 km cruzando la zona montañosa entre Motilla y Buñol junto a la reciente autovía. De esta forma, Valencia y Madrid estarán a la distancia a que Dios las puso, 350 km, en lugar de a los 500 en que quedaron tras la decimonónica red de los FFCC privados. Los accesos a Málaga por Gobantes y El Chorro están re proyectándose, resolviendo por tercera vez el cruce de las sierras de Abdalajís, Chimenea, Antequera y Las Cabras, porque los túneles allí construidos en los años 60 y 70 –bien construidos, pero proyectados con criterios de ahorro y sin prever adecuadamente cómo serían los trenes en 20 años – ya no son capaces de adaptarse a los nuevos trenes.

El ahorro en la inversión inicial en los nuevos trazados lleva implícito el peligro de que éstos sean de nuevo inútiles en dos décadas. Esto ha pasado, por ejemplo, con la N-VI en el pk 345, en Manzanal donde ahora encontramos 3 carreteras paralelas, la antigua, la N-VI de los años 70 y la nueva autovía, o como ha pasado también en el pk 458, en Becerreá, donde el viaducto de Cruzal de 1988 ya sido sustituido por otros dos nuevos junto a él. En la autovía de Levante, hasta llegar a la solución actual, se tiene otro ejemplo: queda por desdoblarse el colapsado tramo Ocaña-La Roda, y entonces quedará sin tráfico el Honrubia-La Roda. Parece que en muchos casos un ahorro inicial en la infraestructura, aunque sea muy justificado en el momento de la inversión, lleva a duplicar el coste en dos décadas.

Si en el año 2000 se habla de 4 horas de viaje de FFCC para 600 kilómetros podemos intuir de nuevo que los trazados que se harán serán muy estrictos, que no se irá a las soluciones técnicas óptimas por ser más caras y que en definitiva el gran problema de nuestras infraestructuras de transporte son los pasos de montaña, es decir, los túneles.

El túnel en nuestros Proyectos de FFCC o de autovías es hoy un enemigo. Las prescripciones que se fijan a los Proyectistas huyen del túnel. Se esgrime en contra su coste, su lentitud en construir, el peligro en su construcción y en su explotación, y ello lleva a exigir al Proyectista aumentar las rasantes para que salgan túneles cortos, a hacer túneles de grandes

secciones para meter las dos vías en el mismo túnel en lugar de hacer dos túneles, y a intentar ahorrar dinero en su construcción quitando elementos como la contrabóveda. Ello lleva a su vez a que se proyecten y construyan trazados que hay que corregir a los pocos años. El ejemplo más clásico es el túnel de RENFE Cercanías C-5 en Madrid bajo el río entre Embajadores y Laguna, construido sin contrabóveda hace menos de 12 años y que el próximo verano del 2001 hay que cerrar para reparar y construirle la solera. Lo mismo acaba de ocurrir con el túnel de El Padrún, en Asturias, cuya reparación costará casi lo mismo que su construcción, con el túnel de Fuente la Higuera 1, que desde su puesta en servicio ha obligado a todos los trenes Madrid-Valencia y Valencia-Alicante a circular a 40 km/h por la rotura de la delgada solera con que se construyó, o con el túnel del Cabañal en la relación Valencia-Castellón. Se entiende que hubiera que reparar en los años 80 los de Pajares de hace siglo y medio por estos motivos, pero no que los túneles actuales se hagan igual. Todavía, en los túneles que se proyectan actualmente en todo el mundo, pueden verse muchas secciones sin contrabóveda o solera en las zonas mal llamadas de “roca buena”, que luego resulta no serlo.

Hace ya más de 12 años que el autor tuvo que colaborar en el proyecto, como parte del trazado de la Autovía Madrid-Badajoz, de los túneles gemelos de Miravete. Se proyectaron con el Nuevo Método Austríaco (NATM), única forma aceptada corrientemente por aquel entonces, cuando no podía ni hablarse de las TBM de gran diámetro. El secreto para que el Proyecto fuera aprobado por quien tenía que hacerlo eran dos palabras mágicas: el NATM y el RMR de Bieniawski (hoy se añaden dos más, el PLAXIS para elementos finitos y el FLAC 3D para diferencias), independientemente del macizo rocoso. Diez años antes, durante los años 1976 a 1978 había tenido también la oportunidad de participar en la construcción de los túneles del Canal del Taibilla, en Torre vieja, bajo la dirección de los excelentes Ingenieros y constructores de túneles D. Silvio Requena y D. Juan Torra, de Cubiertas y MZOV, y también utilizando el NATM con rozadoras de ataque puntual. Otros diez años antes, en 1966, al entrar en esa empresa como estudiante de 3er curso, tuvo también la oportunidad de colaborar con los mismos Ingenieros en alguno de los proyectos de los túneles de Gobantes, en el tramo de El Chorro en el Córdoba-Málaga, que estaban en construcción también con frente abierto, voladura y explosivos. El gran frente abierto y la utilización de los explosivos, como en el túnel de Miravete, resulta sumamente peligroso siempre. En los Canales del Taibilla, con grandes deformaciones por la expansividad del terreno, pudo ya comprobar que el frente del túnel y los operarios están totalmente desprotegidos al trabajar sin escudos, y que incluso hastiales y solera están expuestos a derrumbes y colapsos en cuanto el terreno deja de ser el teórico resistente supuesto en el Proyecto o aparece un estrato blando, aún decimétrico, con agua. En ninguno de esos túneles –ni en ningún túnel lo ha habido ni lo habrá– había suficientes datos geotécnicos para ga-

rantizar que las hipótesis del Proyecto se cumplieran en cada avance, lo que a lo largo de los años se ha comprobado que ocurre en todos los túneles –españoles y extranjeros– por la imposibilidad real de hacer una campaña de reconocimiento total (no hay Administración ni presupuesto capaz de pagarlo). Como consecuencia de estos hechos comenzó la reserva del autor contra los métodos de frente abierto en los túneles, si bien poco podía hacer entonces para desterrarlos. Al ir profundizando en el estudio de otros proyectos de túneles y de sus métodos constructivos, estas ideas fueron tomando más fuerza, y el colapso del Metro de Munich de 1994 con 4 muertos, le convenció definitivamente de la maldad y peligrosidad intrínseca de los métodos de frente abierto, que pudo finalmente desterrar en otros proyectos en que la responsabilidad técnica y económica, como Administración, sí era suya. Lo más importante es intentar aprender de los errores que uno va cometiendo en la vida.

Para compartir estas reflexiones con el lector, y sobre todo con los compañeros más jóvenes a quienes corresponderá el diseño de las nuevas infraestructuras de nuestra España, el autor quisiera resumir en el presente artículo algunos datos de construcción de los túneles más conocidos del mundo. La mayoría de estos datos fueron recogidos a lo largo de los años 1995 y 1996, durante los estudios de los métodos constructivos que finalmente aplicó en los túneles de gran diámetro de la ampliación del Metro de Madrid 1995-1999, y se han completado con algunos túneles posteriores. El autor quisiera ofrecer excusas al lector por las inexactitudes que puedan aparecer en las tablas, y espera recibir las eventuales correcciones del lector, así como datos de otros túneles que no ha sido posible incluir en este resumen. La fuente de estos datos corresponde, en los túneles actuales, a datos y publicaciones del Ministerio de Obras Públicas, hoy Fomento, a técnicos y empresas que han intervenido en su construcción, en los túneles antiguos a la bibliografía y revistas, y en bastantes casos de los túneles españoles y alguno extranjero a reuniones y conversaciones con los compañeros y colegas extranjeros que personalmente los construyeron. El autor es responsable sin embargo de cualquier error en la transcripción de estos datos, que se corregiría inmediatamente.

La conclusión de este artículo debe quedar para el lector. Analice el compañero lector Ingeniero de Caminos los datos aquí recogidos. El autor no debería expresar ninguna opinión personal –aunque alguna se haya filtrado–, pero sí admite que estos datos, y el estudio más detallado posible de los correspondientes proyectos, le llevaron a decidir la construcción de más 38 km ya terminados y otros 60 km actualmente en construcción de grandes túneles del Metro bajo Madrid con escudos cerrados de tecnología de equilibrio de presión de tierras (earth pressure balance, EPB) o con el método clásico de Madrid, y a la prohibición absoluta de métodos de frente abierto como el NATM y el Precorte Mecánico. En la construcción de un túnel de gran diámetro hay temas demasiado importantes

en juego: la *seguridad de los operarios* en su construcción, la *seguridad de edificios* y estructuras encima, el *tiempo* en que el dinero de los contribuyentes está inactivo – la infraestructura construyéndose –, el *coste* y la *seguridad en la explotación*.

Tras hojear este resumen, decida el compañero lector una respuesta a las siguientes 12 cuestiones:

1.- Los túneles de frente abierto y gran sección (30 m² o mayores) son, desgraciadamente, una fuente constante de hundimientos y colapsos de frente y contorno, tanto en suelos como en roca. El informe de la HSE (Health & Safety Executive) inglesa [Ref.1], a raíz del hundimiento de los túneles NATM de Londres, incluye más de 39 catástrofes y colapsos, además de otros 71 que no detalla. Uno de los autores de este informe, Mr. John Anderson, ha comunicado al autor que en estos momentos se estudian más de 157 colapsos debidos al trabajo con frente abierto en túneles, tan sólo en rocas blandas. De hecho, en España, importantes Compañías Aseguradoras se han negado ya, el 4 de Agosto de este año 2000, a asegurar varios túneles proyectados con el NATM por el gran número de hundimientos, colapsos y accidentes que acarrearán los métodos de frente abierto. ¿Qué sentido tiene seguir proyectando y construyendo este tipo de muchos y cortos túneles de gran sección? ¿No será más sencillo, barato y rápido proyectar unos túneles mecanizados, más largos y de menor sección para cada vía, y prohibir los peligrosos túneles de gran superficie de frente abierto?

2.- El lector puede ver que en los túneles recientes de los Alpes hay más de 14 túneles construidos con TBM adecuadas de 12 metros de diámetro, con avances de hasta 500 metros/mes (Tabla 13). Otras 5 tuneladoras similares no figuran en la tabla por no disponer aún de los datos o no estar aún terminado el túnel. Alguna de estas tuneladoras ha hecho ya 5 túneles. ¿Por qué en otros países se siguen proyectando y construyendo túneles a 80 o 100 metros al mes, túneles plagados de colapsos y derrumbes, lentos, peligrosos y caros?

3.- Se dice que la tuneladora sólo es rentable para túneles “largos”, y que los túneles que se proyectan en general son “cortos”. ¿Por qué se proyectan tantos túneles cortos, de algunos centenares de metros? El emboquille y arranque es lo más caro, peligroso y lento de un túnel bien construido. ¿No será mejor bajar algo la rasante, ir a túneles más largos, evitar los altísimos viaductos entre túneles, y mejorar la seguridad, el plazo y el coste de las obras? ¿No debería hacerse así, ahora, en los tramos de Orense, de Pajares, de Torrelavega, de Gobantes en Málaga y de Buñol en Valencia? ¿Cómo se están proyectando esos trazados? ¿Qué especificaciones se dictan? ¿Es posible que se estén haciendo otros Pajares ferroviarios en el año 2000? ¿Es lógico lo que se pretende hacer en el tramo Puebla de Sanabria-Orense, duplicar la tortuosa vía actual, quitar alguna

curva y meter en este trazado la nueva vía, circulando con trenes que cambien de ancho? ¿Se ha estudiado lo que está ocurriendo con los costes del trazado de alta velocidad Florencia-Bolonia en Italia en los 70 km de cruce de los Apeninos? ¿Se han pedido datos al Banco Europeo de Inversiones del coste real y de su evolución por ir a túneles de gran sección y frente abierto, y no utilizar grandes tuneladoras como en los Alpes?

4.- Una tuneladora tarda unos 10 ó 12 meses en fabricarse, ya que se fabrican bajo pedido. Este es uno de los motivos más esgrimidos en contra de su utilización. Pero los hechos son tozudos. En las tablas que siguen el lector puede ver que los túneles del orden de 5 km están tardando con los métodos de frente abierto, es decir, sin escudos TBM cerrados, del orden de los 40 meses. Con una TBM adecuada se tardaría del orden de 13 meses (7 meses se ha tardado para 5.6 km en el Metro de Madrid, atravesando estaciones y compensando asientos, con 2 EPB). Daría tiempo casi a hacer dos veces el túnel con TBM. ¿Es razonable seguir obligando a construir los túneles por métodos de frente abierto por este motivo?

5.- Por otra parte, si un tren rompe una rueda dentro del túnel o tiene otro tipo de problema, como pasó al ICE alemán el 8 de Junio de 1998 en Eschede, podría ocurrir un grave accidente en el túnel de doble vía si entra el otro tren a 300 km/h. ¿No parece más seguro meter una vía en cada túnel para la Alta Velocidad?

6.- En las páginas que siguen pueden verse los datos más importantes de los recientes túneles de gran sección del Metro de Madrid, construidos con tuneladoras de presión de tierras. El coste de estos túneles ha sido inferior a los 1.500 Millones de Pta por km en ejecución material. ¿Cuál es el verdadero coste que está resultando en los túneles construidos con frente abierto por el NATM, teniendo en cuenta el coste de los derrumbes, accidentes, colapsos y reparaciones? ¿Se contrastan adecuadamente estos datos antes de seguir proyectando túneles con frente abierto? La influencia de las escuelas austríaca y suiza es profunda, y tal vez no sea adecuado seguirla más.

7.- La Geotecnia *no tiene hoy ninguna solución* para garantizar la estabilidad del frente en un túnel abierto. En suelos y rocas blandas seguimos con el modelo de Broms y Bennermark [Ref. 3] de 1967 y sus derivados, que –el autor puede decirlo por haber pasado muchos días y noches en sus túneles intentando obtener algo útil del modelo Broms– no tienen ninguna utilidad práctica. El método ADECO del Prof. Lunardi [Ref. 4], como gran novedad, va clavando en el frente –rocas blandas– varillas de fibra de vidrio para aumentar su resistencia. Pone como ejemplo el Túnel de Tartaiguille del TGV Lyon-Marsella (nº 17). ¿Es éste un ejemplo adecuado? El enorme coste y el enorme retraso de este túnel aún no se han publicado. Si la Geotecnia no da solución para garantizar la estabilidad del frente, ¿puede firmar

un Ingeniero de Caminos el proyecto de un túnel en suelos o rocas blandas por métodos abiertos?. En el Metro de Madrid el autor ha prohibido secciones abiertas de más de 3 m², en las que cualquier problema puede resolverse inmediatamente –de hecho ha ocurrido el 30 de Mayo de 1997 en la calle Almagro, bajo el Colegio–. ¿Qué se hace en un túnel abierto de 100 ó 150 m² de frente? ¿Cómo se resuelve una venida de agua súbita y grande en una capa arenosa arriba, a 6 m de altura?

8.- Constantemente se nos bombardea en los Proyectos de túneles en roca con los índices de calidad tales como el RMR y el Q del Norwegian Geotechnical Institute. Pero la experiencia ha demostrado que ninguno de ellos es adecuado para la estimación de la verdadera resistencia de un macizo rocoso. Los propios Prof. Hoek y Brown han revisado varias veces su criterio de resistencia, han analizado sus limitaciones y han dado guías para su adecuado uso [Ref. 6]. El Prof. Brady indica textualmente que ninguno de estos criterios refleja adecuadamente la resistencia de un macizo rocoso [Ref. 5] ¿Por qué seguimos utilizando estos índices y proyectando túneles en base a ellos?. En la reciente caída de un bloque de roca de más de 500 t en un conocido túnel, ¿por qué cayó ese bloque? ¿es seguro el método utilizado? Si no se dispone, porque es imposible tenerlo, del esquema completo de diaclasas en cada avance ni de las características del material de relleno, ni de la apertura de juntas o de la rugosidad de paredes, ni de ningún otro dato cierto de la estructura del macizo en ese punto ¿quién puede juzgar la estabilidad de ese bloque? ¿el encargado del relevo, que es el único que está dentro del túnel cuando el bloque cae y que sólo puede ver las líneas de corte del bloque con el perímetro de la excavación, y ello sólo antes de gunitar? ¿Por qué se permite utilizar estos métodos de Proyecto, que harían necesario uno o varios sondeos cada 5 o menos metros de túnel, sondeos que no se hacen jamás? Estúdiense los rendimientos reales de los túneles en roca con frente abierto. No figuran en las tablas los accidentes y derrumbes. ¿Es lícito meter un relevo de 10 ó 15 hombres a trabajar en esas condiciones? ¿No es mejor que trabajen bajo un sólido escudo de acero de 10 cm de espesor?

9.- Si no hay solución técnica para la estabilidad del frente en los suelos o rocas blandas, la única forma segura de construir un túnel es adosar al frente del túnel una sólida pared de acero. Este es el concepto de las tuneladoras de frente cerrado. ¿Hay algún motivo para utilizar métodos menos seguros para la gente o para el túnel? ¿Debe un Ingeniero de Caminos utilizar métodos menos seguros? Si se tiene un presupuesto limitado ¿debe construirse un túnel por métodos menos seguros que otros existentes y probados?

10.- De la misma forma, si no hay solución técnica para la estabilidad de bóveda y hastiales en los macizos de roca

TABLA 1. TÚNELES MÁS LARGOS DEL MUNDO

Nº	Túnel	País	Uso	Año	Long.km
I	Seikan	Japón	FFCC	1988	53.9
II	Canal Mancha	Inglaterra-Francia	FFCC	1994	2 x 50.0
III	Dishimizu	Japón	FFCC	1982	22.2
IV	Simplón 2	Italia-Suiza	FFCC	1922	19.8
V	Simplón 1	Italia-Suiza	FFCC	1906	19.8
VI	Vereina	Suiza	FFCC	1999	19.0
VII	Shin-Kanmon	Japón	FFCC	1975	18.7
VIII	Apeninos	Italia	FFCC	1934	18.5
IX	San Gotardo	Suiza	C	1980	16.3
X	Rokko	Japón	FFCC	1971	16.3
XI	Henderson	USA	FFCC	1975	15.8
XII	Haruna	Japón	FFCC	1982	15.4
XIII	Furka	Suiza	FFCC	1981	15.3
XIV	San Gotardo	Suiza	FFCC	1882	15.0
XV	Nakayama	Japón	FFCC	1982	14.9
XVI	Loetschberg	Suiza	FFCC	1913	14.6
XVII	Mount MacDonald	Canadá	FFCC	1988	14.6
XVIII	Ta-yao Shan	China	FFCC	1988	14.3
XIX	Arlberg	Austria	C	1978	14.0
XX	Hokuriku	Japón	FFCC	1962	13.9
XXI	Mont Cenis	Francia-Italia	FFCC	1871	13.7
XXII	Shin-Shimizu	Japón	FFCC	1967	13.5
XXIII	Aki	Japón	FFCC	1973	13.0
XXIV	Frejus	Francia-Italia	C	1980	12.9
XXV	Cascade	USA	FFCC	1929	12.5
XXVI	Flathead	USA	FFCC	1970	12.5
XXVII	Kita-Kyushu	Japón	FFCC	1975	11.7
XXVIII	Mont Blanc	Francia-Italia	C	1965	11.7

dura, la única forma segura de excavar el túnel es bajo un escudo cerrado de acero. ¿Hay algún motivo para utilizar métodos menos seguros para la gente o para el túnel?. Insistimos, ¿Debemos los Ingenieros de Caminos, en las empresas Projectistas o Consultoras, en la Administración o en la Contrata, utilizar métodos menos seguros?

11.- En consecuencia, ¿deben proyectarse los túneles -suelos o rocas- por los métodos clásicos, como el NATM, o deben proyectarse con tuneladoras adecuadas?

12.- Las nuevas infraestructuras de autovías y alta velocidad exigen trazados, especialmente en los AVE, prácticamente rectos y horizontales. Mientras que en toda Europa las nuevas infraestructuras con los grandes túneles de base avanzan a gran velocidad (La Mancha, San Gotardo, Loetschberg, Lyon-Turín, etc), en España la experiencia existente con la construcción de los túneles de frente abierto ha hecho ya perder 4 años en túneles como el Base de Guadarrama, clave del acceso al norte. Finalmente se ha conseguido el túnel de base, pero en estos 4 años transcurridos ya podría estar construido y en servicio, como demuestran los túneles nº 69 a 92, 122, 123 y 144 en

las tablas que siguen. España es el país grande más montañoso de Europa, ¿cómo deben proyectarse los trazados de montaña?

LOS MAYORES TÚNELES DEL MUNDO

Los túneles de gran sección más largos del mundo se han construido para las líneas de ferrocarril y para las carreteras. En general los túneles hidráulicos, aunque pueden ser también muy largos, son de sección mucho menor. En la tabla siguiente 1 se resumen los mayores túneles del mundo, incluyendo el de Vereina que se ha puesto en servicio el 19 de Noviembre de 1999. Se indica con FFCC el túnel de ferrocarril y con C el túnel carretero.

Prácticamente todos los túneles de esta tabla se han construido con perforación y voladura, salvo los del Canal de la Mancha, en que se utilizaron 11 tuneladoras, y el de Vereina, en el que 10.4 kilómetros se han construido con una TBM Wirth de 7.6 metros de diámetro.

Desde la terminación del enorme túnel de Seikan en Japón -probablemente debido a los graves problemas que se encon-

TABLA 2. RENDIMIENTOS DE TÚNELES CON FRENTE ABIERTO

TÚNEL	Sección m ²	Diam. m	Long.m	Comienzo	Fin	Metros/mes
1	Mont Cenís (1870)	75	12.233	dic-57	dic-70	78
2	S.Gotardo 1 (1882)	60	14.900	ago-72	jun-82	127
3	Arlberg (1884)		10.400	80	84	244
4	Simplón 1 (1905)		19.800	nov-98	feb-05	262
5	Loetschberg 1		14.500	jun-06	mar-13	179
6	Apenino		18.400	1920	1934	118
7	Simplón 2		19.800	jun-12	jun-21	183
8	MontBlanc	80	11.600	may-59	ago-62	301
9	Frejus		12.870	oct-74	abr-79	239
10	S.Gotardo Carretera	65	16.900	jun-70	jun-80	141
11	Seelisberg (2*9.3)		18.600	jun-70	jun-80	155
12	Furka		15.400	jun-73	jun-82	143
13	Seikan	100	53.850	jun-64	jun-88	187
14	Puymorens	86	4.820	jun-90	oct-94	92
15	Somport Francia	75	2.865	ene-94	ago-96	94
16	Pennes-Mirabeau TGV	95	1.530	feb-96	ago-97	127
17	Tartaiguille TGV	180	2.338	oct-95	jul-98	70
18	Marsella TGV	93	5.414	ago-95	jul-98	153

traron en su construcción con la perforación y voladura- ha tenido lugar un cambio en la forma de concebir la construcción de estos grandes túneles. En estos momentos, finales del 2000, los grandes túneles en construcción en todo el mundo se proyectan a base de la utilización de los grandes equipos mecanizados. El nuevo San Gotardo (2x57 km), el nuevo Loetschberg (2x45 km), el Guadarrama (2x30 km), el nuevo Mont Cenís Lyon-Turín (2x45 km), y otros grandes túneles de FFCC, los grandes túneles de base de las nuevas líneas de alta velocidad, todos serán construídos en su mayor parte por medio de TBM.

1.- Túneles con frente abierto.- NATM, perforación y explosivos

En la Tabla 2 se resumen los datos de los túneles más conocidos ejecutados a frente abierto, en general con perforación y voladura.

La falta de medidas de seguridad en los túneles de fines del siglo XIX y principio del siglo XX hace que sus velocidades de avance no puedan ser consideradas hoy como representativas, ya que podría pensarse que la seguridad actual haga naturalmente ir a métodos más cuidadosos y lentos. En el túnel de Mont Cenís murieron 28 hombres, en el S. Gotardo 1 la cifra de muertos oscila según las fuentes entre 177 (Maristany, 1890 [Ref. 7]) y 310 (Juncá, 1988, Ref. [21]), con 877 inválidos o heridos graves. En el Simplón 1 ya comenzaron las medidas de seguridad e higiene, aunque murieron 39 hombres. En el Loetschberg murieron 37 hombres, 12 por un desprendimiento de una ladera, en el Gran Apenino 97 hombres y en el San Gotardo carretero, 19 hombres. Los túnelés actuales son mucho

más seguros, incluso trabajando con frente abierto como en los casos de las Tablas 2 y 3. Sigue habiendo muertos en los túneles de frente abierto, pero los accidentes mortales en los túneles de tuneladora cerrada son casi inexistentes.

El túnel de mejor construcción con frente abierto, según los datos del autor, es el nº 8, el Mont Blanc, que tuvo un rendimiento total medio de 300 metros/mes. Este rendimiento no ha vuelto a obtenerse en ningún túnel manual. En la Figura 1 puede verse que sólo los nº 4 y 3, el Simplón 1 y el Arlberg, se le acercan con 262 y 244 metros al mes. Actualmente las velocidades de avance de estos túneles de frente abierto son muy bajas. Incluso en el reciente de Tartaiguille, del TGV Lyon-Marsella, que se pone como ejemplo de alguno de los métodos de frente abierto, los rendimientos han sido inaceptablemente bajos. Obtener 70 metros al mes de avance no es de recibo en esta época. Este túnel de Tartaiguille, en el TGV Lyon-Marsella, probablemente ha sido el origen de muchos problemas en los túneles españoles. Al ver que los franceses meten las dos vías dentro, y llegan a enormes secciones trabajando con frente abierto, parece que nos tranquilizamos y hacemos lo mismo. Pues en opinión del autor, este túnel - y los del resto de la línea - es un error. Deberían haberse construído dos túneles más pequeños, uno por vía. Los extranjeros también cometen errores, como puede comprobarse en muchos proyectos, y Francia no es España. Francia es llana. Desde el Canal de La Mancha a Marsella, pasando por París, no hay más de 20 túneles, y cortos. Francia es un país de excelente ingeniería y excelentes ingenieros. Copiemos de Francia lo bien hecho, como el Canal de La Mancha.

En España se han construído todos los túneles de ferrocarril y autovía por el NATM y métodos similares de frente abier-

Figura 1.

**VELOCIDAD DE CONSTRUCCIÓN
TÚNELES EN ROCA**
DESDE EL PRIMER AVANCE AL FIN DEL REVESTIMIENTO

AVANCE MEDIO, METROS / MES

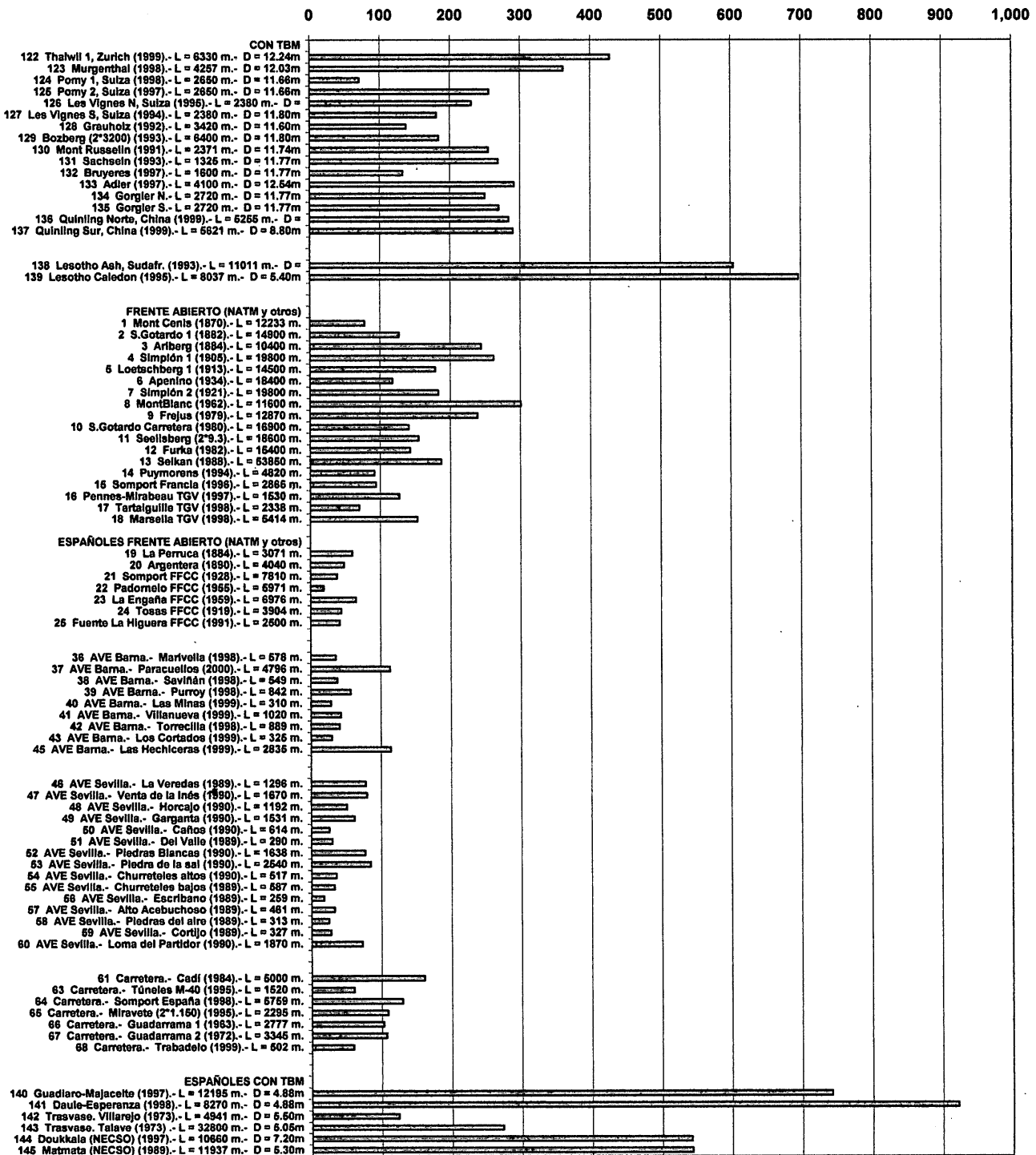


TABLA 3. RENDIMIENTOS DE TÚNELES CON FRENTE ABIERTO EN ESPAÑA

TÚNEL		Sección m ²	Long. m	Comienzo Excavación	Fin Revestimiento	Metros/mes
TÚNELES RENFE						
19	La Perruca (1884)		3.071	mar-80	jun-84	60
20	Argentera (1890)	35	4.040	nov-83	nov-90	48
21	Somport		7,810	jun-11	jul-28	38
22	Padornelo		5.971	1929	1955	19
23	La Engaña		6,976	sep-50	abr-59	65
24	Tosas		3.904	oct-11	feb-19	44
25	Fuente La Higuera		2,500	Dic-86	jun-91	42
26	Tudela-Veguín. Grandota		3.756		Sin datos	
27	La Canda		1.994		Sin datos	
28	Corno		2.491		Sin datos	
29	Fojo del Cabrito		2.606		Sin datos	
30	Gobantes 3 y 4		5.967		Sin datos	
31	Palancares		2.302		Sin datos	
32	Villanueva Sal		3.499		Sin datos	
33	Onzurza		2.955		Sin datos	
34	Valdealgorfa		2.136		Sin datos	
35	Guadarrama		2.380		Sin datos	
TÚNELES AVE MADRID-BARCELONA						
36	Marivella	135	578	abr-97	ago-98	36
37	Paracuellos	75	4.796	mar-97	sep-00	113
38	Saviñán	110	549	mar-97	may-98	38
39	Purroy	110	842	jun-97	sep-98	57
40	Las Minas	95	310	jun-98	may-99	29
41	Villanueva	100	1.020	abr-97	abr-99	43
42	Torreçilla	110	889	feb-97	nov-98	41
43	Los Cortados	95	325	feb-98	ene-99	30
44	Las Caleras	95	120		Sin datos	
45	Las Hechiceras	100	2.835	may-97	jun-99	114
TÚNELES AVE MADRID-SEVILLA						
46	La Veredas	aprox. 100	1.296	jul-88	dic-89	78
47	Venta de la Inés	" 100	1.670	jun-88	feb-90	80
48	Horcajo	" 100	1.192	abr-88	mar-90	51
49	Garganta	" 100	1.531	abr-88	abr-90	62
50	Caños	" 100	614	jul-88	jul-90	26
51	Del Valle	" 100	290	dic-88	oct-89	30
52	Piedras Blancas	" 100	1.638	jun-88	mar-90	77
53	Piedra de la sal	" 100	2.540	Feb-88	ago-90	85
54	Churreteles altos	" 100	517	may-89	jul-90	36
55	Churreteles bajos	" 100	587	ene-88	jul-89	33
56	Escribano	" 100	259	feb-88	abr-89	18
57	Alto Acebuchoso	" 100	461	sep-88	nov-89	33
58	Piedras del aire	" 100	313	sep-88	sep-89	25
59	Cortijo	" 100	327	mar-88	mar-89	28
60	Loma del Partidor	" 100	1.870	feb-88	abr-90	73
CARRETERA Y AUTOVÍA						
61	Cadí	80	5,000	ene-82	ago-84	161
62	Viella		5,133		1948	
63	Túneles M-40	203	1.520	ago-93	sep-95	61
64	Somport España	90	5,759	jun-94	feb-98	130
65	Miravete (2*1.150)	96	2,295	nov-93	ago-95	109
66	Guadarrama 1	80	2,777	feb-61	may-63	103
67	Guadarrama 2	105	3,345	oct-69	may-72	107
68	Trabadelo		502	nov-98	jul-99	60

TABLA 4

TUNELES POR METODO CLASICO EN METRO DE MADRID					
	UNION LINEAS 8-10	UNION LINEAS 7-8	LINEA 7 (2)	LINEA 10 P.PIO - P.I.ESPA	LINEA 1 VALLECAS
	METODO CLÁSICO	METODO CLÁSICO	METODO CLÁSICO	METODO CLÁSICO	METODO CLÁSICO
	FCC	NECSO-FERROVIAL	NECSO-FERROVIAL	NECSO	AGROMAN-AUXINI
MES	METROS	METROS	METROS	METROS	METROS
Jul 95				10,0	
Ago 95				46,0	
Sep 95				54,0	
Oct 95				45,0	
Nov 95				53,0	
Dic 95				37,0	
Ene 96				58,0	
Feb 96				32,0	
Mar 96				60,0	
Abr 96				75,0	
May 96				143,0	
Jun 96				196,0	
Jul 96				132,0	
Ago 96				60,0	
Sep 96	15,0			53,0	
Oct 96	33,0			40,0	
Nov 96	28,0				
Dic 96	45,4				
Ene 97	14,5		107,0		
Feb 97	26,1				
Mar 97	88,5				
Abr 97	124,1	188,0			
May 97	111,6	165,0			
Jun 97	92,2	47,0			182
Jul 97	149,8	305,0			20
Ago 97	124,2	120,0			188
Sep 97	92,5	195,0			50
Oct 97	85,8	30,0			50
Nov 97	2,5				15
Dic 97					35
Ene 98			62,0		115
Feb 98			89,0		135
Mar 98			155,0		150
Abr 98			150,0		120
May 98			149,0		150
Jun 98			126,0		171
Jul 98			142,0		121
Ago 98					133
Sep 98					80
TOTAL METROS	1.033	1.050	980	1.094	1.715

to, con rendimientos sumamente bajos y gran cantidad de incidentes. En la Tabla 3 se resumen algunos de éstos túneles españoles construídos por métodos de frente abierto.

En el caso del túnel nº 64 (Somport España), el Ministerio de Obras Públicas, con Entrecanales, utilizó un excelente jumbo Tamrock computerizado de 3 brazos. Se utilizó además una pequeña TBM abierta para el avance de otro de los ataques a partir del viejo túnel de FFCC, cuyo ensanche posterior se hizo por voladura. En el túnel nº 37 (Paracuellos, AVE Barcelona, licitado el 22 Febrero 1996) se utilizó la misma pequeña TBM, aunque el ensanche se hizo con ensanchadora mecánica abierta. Pese a que en ambos túneles las empresas constructoras y consultoras fueron de las mejores de España, y la experiencia y competencia de la Dirección de Obra por parte de la Adminis-

tración eran también extraordinarias, los avances medios reales (comienzo de excavación a fin del revestimiento definitivo) fueron muy bajos. Realmente los rendimientos obtenidos son los mismos del túnel de S. Gotardo de 1882 (pese a que en éste las barrenas eran de 1 m y en Somport hasta de 15 pies), y la mitad del Simplón 1 de 1905. Y ello se debe probablemente a que en ambos casos se decidió no utilizar la nueva tuneladora cerrada que se había propuesto, sin duda porque no figuraba en los Proyectos correspondientes.

Probablemente el mejor túnel español construido con frente abierto es el nº 61, el túnel del Cadí, con un rendimiento medio total de 161 metros al mes.

El túnel español de mayor sección es el nº 63, los enormes túneles de la M-40 en Madrid bajo el Monte del Pardo. En es-

TABLA 5. TÚNELES POR MÉTODO CLÁSICO DEL METRO DE MADRID

Túnel	Longitud m	Ataques	Meses	Rendimiento medio	Avance máximo
Unión Líneas 8-10	1.033	4	15	69	150
Unión Líneas 7-10	1.050	2	7	150	305
Línea 7 Cea Bermúdez	980	4	7	140	155
Línea 10 P.Pío-Pl.España	1.094	2	16	68	196
Línea 1 Vallecas	1.715	6	16	107	171

tos túneles se han utilizado los dos métodos (Nuevo Método Austríaco o NATM y Precorte Mecánico o Premill) prohibidos expresamente por el autor en la construcción del Metro de Madrid, lo que demuestra que cada responsable efectivamente toma sus propias decisiones en base a sus estudios, sus reflexiones y su experiencia. En estos túneles no ha habido accidentes importantes. Pero sin embargo el Precorte ocasionó el terrible colapso de Tolón el 15 de Marzo de 1996, y en un terreno similar, en los túneles de Sinesio Delgado, muy cerca de la M-40, el NATM y el frente abierto había ocasionado un grave hundimiento con un muerto. El autor de este artículo puede asegurar que nunca hubiera autorizado estos métodos y que el proyecto sin duda se hubiese cambiado.

**Ejemplo: Túnel 25.
Fuente La Higuera 1**

Como ejemplo de lo que puede ocurrir en un túnel ejecutado con gran sección de frente abierto, se resumen las fechas más significativas de este pequeño túnel. Debía tener una longitud de 2.500 metros, pero los hundimientos de las grandes trincheras de entrada y salida en los emboquilles dejaron una longitud de 2.200 metros. Con una sección total de 90 m² se construyó por el Nuevo Método Austríaco, excavando la bóveda con rozadora, y la destroza con retroexcavadora.

TUNEL 1 DE FUENTE LA HIGUERA

Inicio perforación en boca Norte	1-Dic-1986
Parada perforación boca Norte	18-Sep-1987
Reanudación avance boca Norte	14-Jun-1988
Inicio perforación boca Sur	22-Sep-1987
Hundimiento boca Sur	19-Nov-1987
Recuperación de la rozadora	21-Abr-1988
Reanudación avance boca Sur	15-Mar-1989
Cale del avance del túnel	15-Nov-1989
Fin de la destroza	15-May-1990
Fin de los batches	20-May-1990
Fin del revestimiento definitivo	15-Jun-1991

El túnel se construyó sin una sólida contrabóveda, y el tramo se puso en servicio a principios de 1997. La falta de solera y la zanja central construída en ella llevaron a que al poco tiempo de ponerse en servicio el agua se infiltrara, levantando la vía. Las reparaciones han terminado a mediados del año 2000, y durante los 4 años transcurridos los trenes han tenido que circular con limitaciones de velocidad de hasta 40 km/h en una vía y 50 km/h en la otra. No hemos podido saber aún el coste final del túnel, para valorar las consecuencias de aquél ahorro en el proyecto. La pasarela sobre la trinchera a la entrada de este túnel es los fines de semana un punto de encuentro de aficionados a trenes y túneles (como la estación de Puente Los Fierros en Asturias o Torre del Bierzo, en la Rampa de Brañuelas, en León), y al ver las luces del Euromed o del Arco que baja de Valencia a Alicante, parado en el túnel esperando que el Alaris o los regionales de Almansa a Játiva cizallen la vía para entrar en él a 40 km/h, muchas veces hemos comentado la enorme importancia de los túneles en España.

No disponemos aún, desgraciadamente, de los datos exactos de construcción de muchos de los túneles de RENFE en las zonas de Asturias y Galicia. Tan sólo figura en la relación el túnel nº 19, La Perruca, que se construyó a 60 metros/mes. El nº 20, Argentera, está excelentemente descrito en los 6 tomos de D.Eduardo Maristany (el original, que no podía más que consultarse en la biblioteca del Colegio, tiene ahora una copia que hemos entregado a Biblioteca para que los Colegiados la puedan consultar y estudiar en casa). En el túnel de Argentera realmente no se trabajó durante todo el año 1885 por problemas contractuales, de forma que su rendimiento real es de unos 57 metros/mes en lugar de 48. Del túnel de Padornele (nº 22, 5.971 m), el más largo de FFCC hoy en servicio, hemos podido conseguir muy pocos datos, los años de comienzo y fin, pero no los días. Del de La Engaña, el más largo de la red (nº 23, 6.976 m) pero que nunca entró en servicio, tampoco hemos podido conseguir muchos datos, así como del Gobantes 3 y 4 (nº 30, 5.967 m).

No se han indicado en la Tabla 3 los túneles de Metro de Madrid construídos por el Método Clásico. Este método, como se sabe, consiste en la construcción de una pequeña galería de avance de unos 3 m² de sección, que posteriormente se va ensanchando. Hormigonada la bóveda, se va construyendo poco a poco la destroza, hastiales y contrabóveda hasta cerrar por completo el anillo. La descripción detallada del método

TABLA 6. TÚNELES DEL CANAL DE LA MANCHA

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros / mes	
69	T8 Mar Tren N. Ingl.	8.36	17,651	TBM Robbins-Markham	27-feb-89	22-abr-91	685
70	T9 Mar Tren S. Ingl.	8.36	18,803	TBM Robbins-Markham	16-jun-89	17-may-91	817
71	T12 Tierra Tren N. Ingl.	8.70	7,911	TBM Howden	02-ago-89	11-sep-90	594
72	T11 Tierra Tren S. Ingl.	8.70	7,859	TBM Howden	20-nov-89	20-nov-90	655
73	T7 Mar Servicio Ingl.	5.38	21,770	TBM Howden	04-ene-88	30-oct-90	643
74	T10 Tierra Servicio Ingl.	5.76	7,930	TBM Howden	30-sep-88	09-nov-89	596
75	T2 Mar Tren N. Francia	8.78	20,009	EPB Kawasaki-Robbins	28-nov-88	26-may-91	670
76	T3 Mar Tren S. Francia	8.78	18,860	EPB Kawasaki-Robbins	27-mar-89	28-jun-91	697
77	T5 Tierra Tren N. Francia	8.64	3,265	EPB Mitsubishi	30-ene-89	18-dic-89	308
78	T6 Tierra Tren S. Francia	8.64	3,265	EPB Mitsubishi	23-feb-90	29-nov-90	356
79	T1 Mar Servicio Francia	5.77	15,618	EPB Robbins	02-mar-88	31-oct-92	279
80	T4 Tierra Servicio Francia	5.61	3,162	EPB Mitsubishi	28-jun-88	27-abr-89	318

puede verse en diversos autores [Ref. 8]. Los avances obtenidos por este método, lento pero muy seguro, se indican en la Tabla 4. Un resumen es el dado en la Tabla 5.

**TÚNELES DEL ALTA VELOCIDAD
BOLONIA - FLORENCIA**

Túnel	Longitud m	Ataques	Comienzo
Pianoro	10.293	6	14-abr-97
Camerone	418	2	
Sadurano	3.767	2	28-nov-96
M. Bibebe	9.101	4	25-nov-96
Raticosa	10.367	6	19-dic-96
Scheggianico	3.535	6	24-abr-97
Camerone P.M.	734	2	
Firenzuola	14.327	10	3-jun-97
Borgo Rinzelli	455	2	27-ago-97
Morticine	274	2	22-oct-97
Vaglia	18.345	10	27-jun-96

Finalmente, aunque no figuran numerados por estar aún en construcción, se resumen en la siguiente tabla los 11 túneles del Alta Velocidad Bolonia-Florenca, todos en construcción con frente abierto por el método ADECO-RS del Prof. Luardi. El tramo tiene una longitud total de 84 km, de los que 71.6 km son en túnel

2. Túneles mecanizados en suelos o rocas blandas

En las Tablas 6 a 12 se resumen los datos de los túneles más conocidos ejecutados por métodos mecanizados.

A. Canal de la Mancha

Aunque hubo 10 muertos, y no hay justificación para ello, en la opinión personal del autor éste enorme túnel es el túnel mejor construido del mundo, y es el ejemplo a seguir en cualquier proyecto de túneles actual

En la Tabla 6 se resumen los 12 túneles del Canal de la Mancha. El Canal, como se sabe, está formado por 3 túneles, los de tren de unos 9 m de diámetro de excavación y el de servicio, entre los dos anteriores, de unos 6 m de diámetro. Cada uno de estos túneles se dividió para su construcción en dos partes, la inglesa y la francesa. Y cada una de estas dos partes se dividió a su vez en otras dos, la del lado mar, de unos 20 km de longitud, y la de tierra, de 8 km de longitud en Inglaterra y 3 km en Francia. De esta forma el proyecto se construyó en 12 partes. Sólo se utilizaron 11 tuneladoras, sin embargo, ya que los túneles de tren tierra lado Francia (T5 y T6 en la Tabla) pudieron hacerse con la misma máquina.

Las tuneladoras del lado inglés fueron abiertas, apoyando por grippers, mientras que las francesas fueron cerradas, tipo EPB. Los rendimientos medios, como puede verse, llegaron a superar los 800 metros/mes en las inglesas, y llegaron a 700 m/mes en las francesas.

Naturalmente, como sabe el lector, la tuneladora abierta es más rápida que la EPB porque no tiene que esperar a colocar el anillo de revestimiento para seguir perforando, ya que al terminar cada avance, apoyando con los pequeños grippers de cabeza adelanta el escudo, retrae los gatos principales de empuje y continua excavando mientras coloca el anillo. Por ello su rendimiento teórico es mucho mayor que la tuneladora cerrada, que precisa colocar el anillo de revestimiento para continuar excavado apoyando los gatos sobre él.

El Canal de la Mancha es un ejemplo de cómo deben construirse los túneles, y un orgullo de la Ingeniería de túneles

Figura 2.

VELOCIDAD DE CONSTRUCCIÓN TÚNELES EN SUELOS y ROCAS BLANDAS DESDE EL PRIMER AVANCE AL FIN DEL REVESTIMIENTO

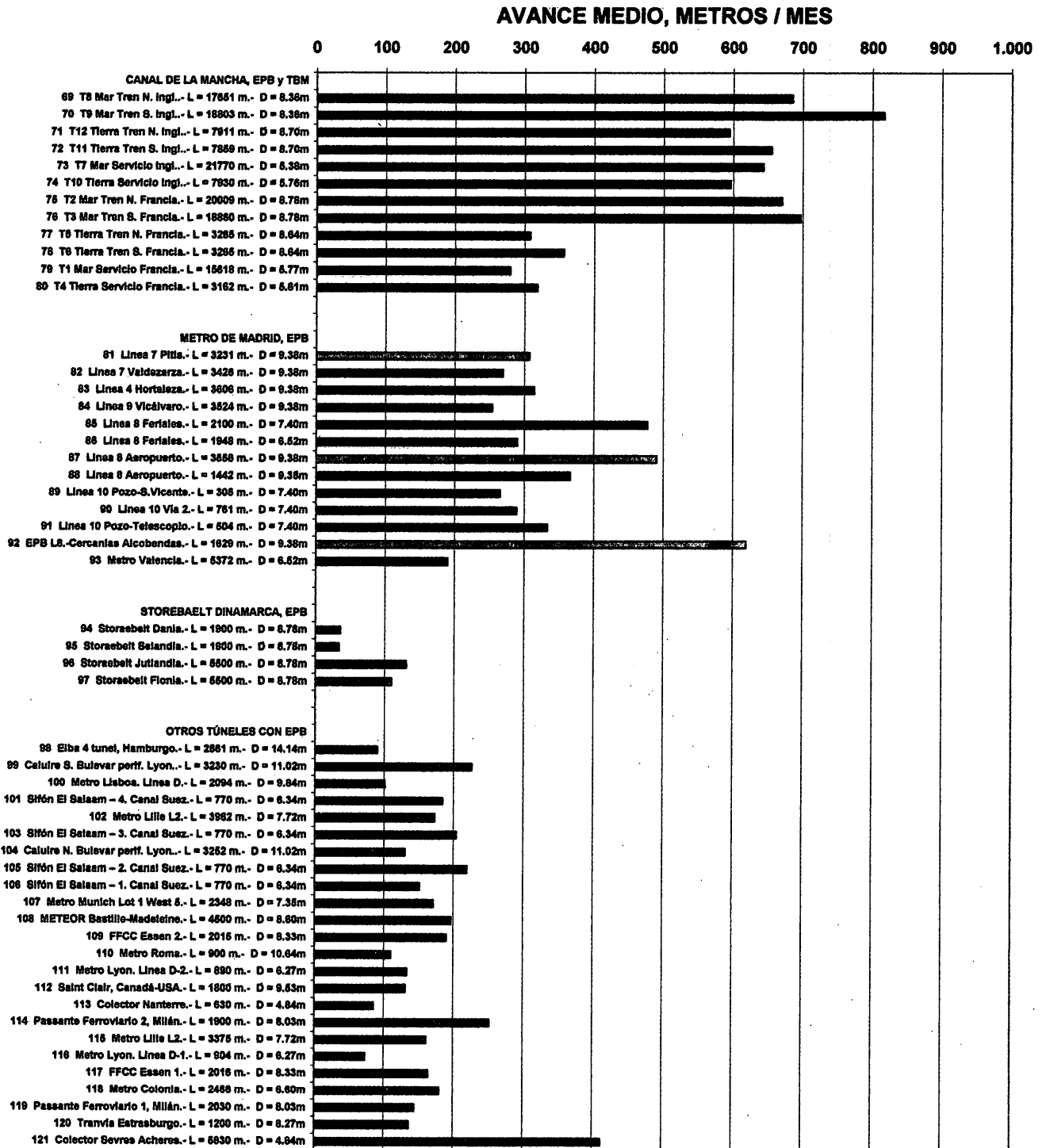


TABLA 7. TÚNELES DEL METRO DE MADRID

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros / mes
81 Línea 7 Pitis	9.38	3.234	EPB Mitsubishi	23-abr-97	09-mar-98	307
82 Línea 7 Valdezarza	9.38	3.443	EPB Herrenknecht	23-ago-97	15-sep-98	269
83 Línea 4 Hortaleza	9.38	3.608	EPB Mitsubishi	25-may-97	09-may-98	314
84 Línea 9 Vicálvaro	9.38	3.545	EPB Herrenknecht	17-jun-97	13-ago-98	254
85 Línea 8 Feriales	7.40	2.108	EPB Lovat	22-jul-97	03-dic-97	477
86 Línea 8 Feriales	6.52	1.958	EPB Herrenknecht	18-ago-97	10-mar-98	290
87 Línea 8 Aeropuerto	9.38	3.567	EPB Mitsubishi	17-jul-98	23-feb-99	490
88 Línea 8 Aeropuerto	9.38	1.442	EPB Mitsubishi	13-oct-98	10-feb-99	366
89 Línea 10 Pozo-S.Vicente	7.40	305	EPB Lovat	06-ago-96	10-sep-96	265
90 Línea 10 Vía 2	7.40	761	EPB Lovat	02-abr-96	21-jun-96	289
91 Línea 10 Pozo-Telescopio	7.40	504	EPB Lovat	15-ene-96	01-mar-96	333
92 Cercanías Alcobendas	9.38	1.629	EPB Mitsubishi	08-jun-99	27-ago-99	619
93 Metro Valencia	6.52	5.372	EPB Herrenknecht	29-oct-94	06-mar-97	190

mundial. El autor sólo encuentra un defecto: ¿Por qué los ingleses eligieron tuneladoras abiertas? Efectivamente, son más rápidas, como se ve. Pero ¿y si hubiera habido una penetración de agua del océano, como pasó en el Storebaelt? En el Storebaelt las EPB fueron cerradas, y pese al fallo de no poder cerrar la esclusa, las tuneladoras inundadas por el Báltico pudieron recuperarse, pero en La Mancha no hubiera habido solución si ocurre un problema similar. El autor no hubiera aceptado el riesgo de tuneladoras abiertas. Curiosamente, los ingleses autorizaron también 3 tuneladoras abiertas en la ampliación reciente de la línea Jubilee del Metro de Londres, aunque en los tramos en que se usaron estas tuneladoras hubo que hacer tantos tratamientos e inyecciones de compensación de asientos (realizados en gran parte por la empresa española Geocisa) que éstas compensaciones y mejoras del terreno costaron más que 10 máquinas cerradas. Recientemente también se han utilizado dos tuneladoras abiertas en el Metro de Atenas, donde los derrumbes y colapsos han sido constantes, y se ha tardado más de 10 años en construir 12 km de Metro a un coste 5 veces superior al de Madrid. Es más, en la ampliación del Metro de Madrid se intentó con fuerza convencer al autor de la conveniencia de utilizar tuneladoras abiertas, más baratas que las EPB. Pero la tuneladora abierta es un riesgo enorme, y en un túnel no se debe correr ningún riesgo. Muchas veces el autor ha pensado que en el túnel deben evitarse: el ver el terreno (es decir, el frente abierto), la geostadística y el Método Observacional [Ref. 9 y 10]. En el Canal de la Mancha se utilizó también el NATM en las dos grandes cavernas de cruce, y en opinión del autor no debía haberse hecho así, sino, dadas las características del terreno, utilizando el método alemán, construyendo primero los hastiales, luego la bóveda por costillas y finalmente la contrabóveda. El reciente colapso de la estación de Olivares, en el Metro de Lisboa, es un ejemplo

de la terrible catástrofe que podía haber ocurrido con el NATM en La Mancha, con estas grandes luces y bajo el océano.

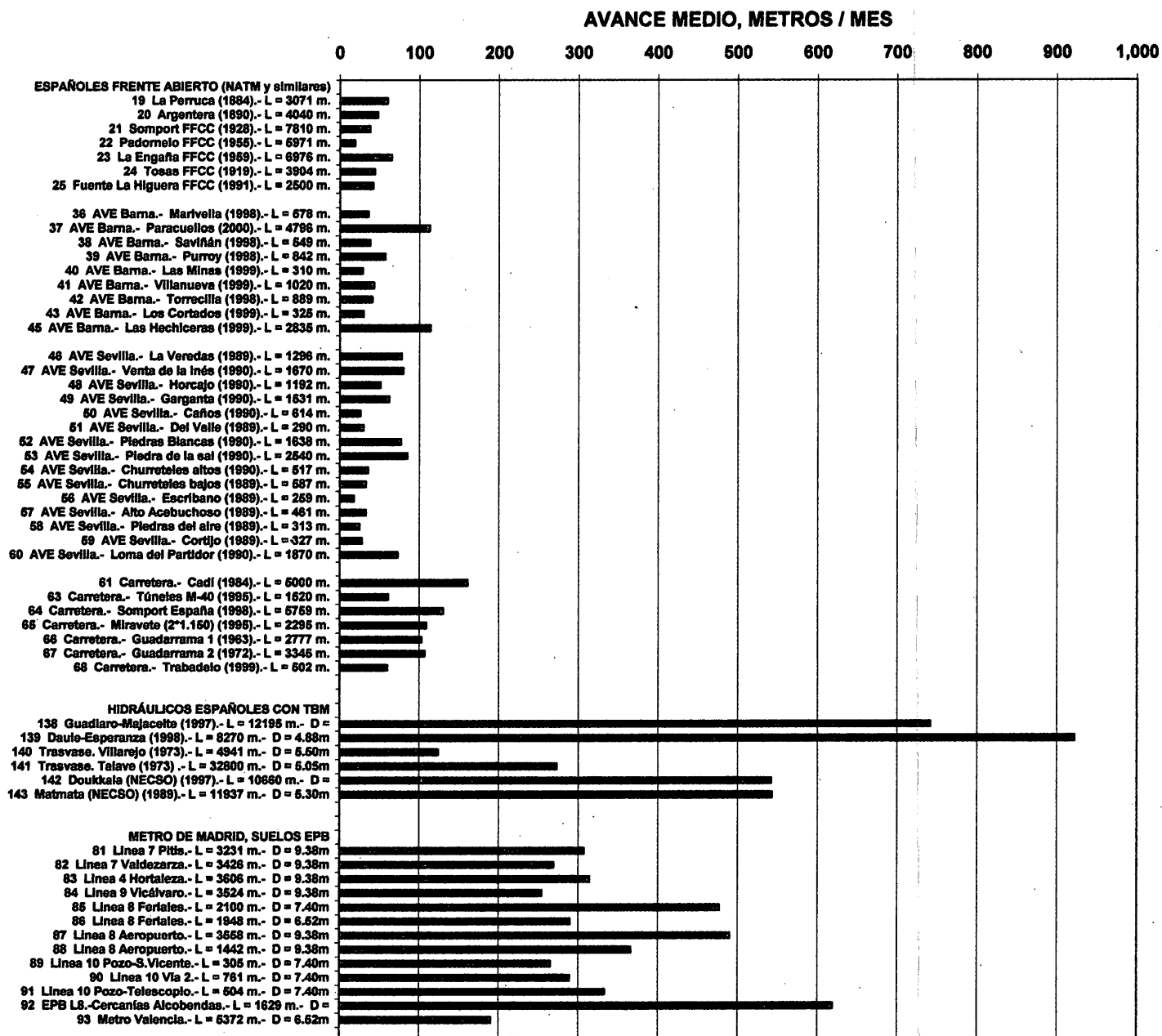
B. Ampliación de Metro de Madrid

En la Tabla 7 se resumen los 11 túneles de la Ampliación del Metro de Madrid construidos con tuneladoras EPB. Se incluye también el túnel de Alcobendas, que el Ministerio construyó con la EPB Mitsubishi que acababa de terminar la Línea 8 tras hacer el tramo de Pitis de Línea 7. Se incluye también el tramo de Metro de Valencia que había construido la misma Herrenknecht que trajimos a Madrid para construir el tramo de Feriales de Línea 8. El diámetro de esta última máquina era muy estricto, y se tuvo que reducir el espesor de dovela en 5 cm para obtener el gálibo. Los gatos apoyaban mal, descen-trados, y no se volvió a usar.

Como se ha dicho antes, el autor debe confesar al lector que los rendimientos del Canal de la Mancha son los que pretendía haber obtenido al diseñar los métodos constructivos de la ampliación de Metro de Madrid. En la Figura 2 puede verse que no se llegó a ellos; el cuidado en las subsidencias y el paso de estaciones lo impidieron. De todas maneras – siempre hay un consuelo – en los túneles de Metro de Madrid que no han atravesado estaciones (nº 85 de 2.1 km y nº 87 de 3.6 km) se han obtenido avances de hasta 619 metros/mes, con avances de más de 800 metros en 31 días. En la Figura 2 pueden verse señalados en rojo los túneles nº 81 (3.2 km), nº 87 (3.6 km) y nº 92 (1.6 km). Estos tres túneles fueron construidos por la misma máquina “Adelantada”, una Mitsubishi-NFM de FCC, uno a continuación del otro, y el tercer túnel construido, el nº 92, que lo fue para el Ministerio, llegó ya a los 619 metros a los 10 km de túnel total y por tanto con los equipos ya bastante experimentados tras dos montajes y desmontajes. En La Man-

Figura 3.

VELOCIDAD DE CONSTRUCCIÓN ALGUNOS TÚNELES ESPAÑOLES 1884 a 2000 DESDE EL PRIMER AVANCE AL FIN DEL REVESTIMIENTO



cha, las tuneladoras cerradas francesas, las grandes nº 75 y 76, hicieron 670 y 697 metros/mes de media, y las grandes nº 77 y 78 del lado tierra hicieron 308 y 356, de forma que en la práctica casi se ha igualado a las del lado mar, y se ha superado a las del lado tierra.

Los avances máximos han sido los que se detallan en la Tabla 8. En 31 días calendario los avances máximos han superado los 500 metros, excepto la EPB pequeña que vino del Metro de Valencia. Las tuneladoras grandes han superado todas los 600 metros en 31 días (582 en el caso de Vicálvaro), y

TABLA 8. AVANCES MÁXIMOS DE LAS EPB DE MADRID

Línea	EPB	Diámetro	Longitud	Empresa	Avance máximo, m		
					1 día	7 días	31 días
4 Hortaleza	Mitsubishi	9.38	3.608	Dragados	37.5	256.5	558.0
7 Pitis	Mitsubishi	9.38	3.234	FCC	31.5	180.0	609.0
9 Vicálvaro	Herrenknecht	9.38	3.545	NECSO-Ferrovial-ACS	31.5	172.5	582.0
7 Valdezarza	Herrenknecht	9.38	3.443	NECSO-Ferrovial	27.0	187.5	618.0
8 Feriales	Lövat	7.40	2.108	Dragados	37.2	204.0	728.4
8 Feriales	Herrenknecht	6.52	1.958	NECSO-ACS	37.2	153.5	438.0
8 Barajas	Mitsubishi	9.38	3.567	FCC	39.0	229.5	792.0
8 Barajas	Mitsubishi	9.38	1.442	Dragados	34.5	225.0	621.0
RENFE Alcobendas	Mitsubishi	9.38	1.629	FCC	42.0	232.5	852.0

han llegado a los 852 en el caso del tercer túnel de la tuneladora "Adelantada".

Esta tuneladora "Adelantada", de FCC, es un ejemplo excelente de cómo va mejorando el rendimiento conforme el equipo va haciendo más túnel. La Tabla 9 indica los rendimientos obtenidos en los tres túneles sucesivos de esta máquina con el mismo equipo. Es un ejemplo además de la importancia del método constructivo. El tramo de RENFE de Alcobendas (6.8 km en superficie, con tres pequeños túneles de 150, 1.400 y 1.629 m) se licitó el 17 de Julio de 1995 y se espera ponerlo en servicio a finales del 2000. Se utilizó para el túnel 2 (aprox. 1.4 km) una entibadora de lanzas de sección completa y frente abierto, máquina similar a las que ya en 1974 habían dejado de utilizarse en el Metro de Madrid por su peligrosidad. Naturalmente hubo que desmontar la máquina y terminar más de 1.000 metros de túnel por el método clásico. Para el tercer túnel (nº 92) se utilizó la tuneladora EPB y el equipo humano de FCC que la Comunidad de Madrid acababa de utilizar para los túneles nº 81 y 87, y el túnel se construyó en tres meses.

En la Tabla 10 pueden verse los datos más detallados de estos túneles, con las fechas de pedido y llegada de las EPB y los avances mes a mes.

En la figura 3 pueden verse los túneles españoles descritos en este artículo. Las tuneladoras del Metro de Madrid sólo son superadas en rendimiento por tuneladoras de roca, con grippers, de menores diámetros. La tuneladora "Isabel", de FCC-

Dragados, utilizada en el túnel del Trasvase Guadiaro-Majaceite (túnel nº 140), en Cádiz de 4.88 m, es un excelente doble escudo telescópico, que puede trabajar tanto como TBM de roca (sin parar de excavar) como una EPB de suelos. La máquina llegó a hacer 1.335 metros en Noviembre de 1996, y su rendimiento medio llegó a 742 metros/mes. Más aún, al terminar este túnel la máquina pasó al túnel Daule-Esperanza, de Ecuador, donde en un mes superó los 1.605 metros, y su rendimiento medio fue de 922 metros/mes (túnel nº 141). En estos momentos está en el proyecto hidráulico de Lesotho, en Sudáfrica, donde en Julio 1999 comenzó a construir la mitad del túnel de Mohale (32 km), aunque en Diciembre pasado ha tenido que pararse para cambiar la cabeza cortadora por rotura. Lamentablemente, esta tuneladora podía haberse utilizado en primavera de 1997 para hacer las galerías de los túneles de Guadarrama, Pajares y Vignemale en lugar de permitir que saliera de España hacia Ecuador.

Para entender la diferencia entre el funcionamiento de una tuneladora que excava apoyando sobre el anillo de dovelas que acaba de construir, tipo EPB o Slurry, y las tuneladoras de roca tipo TBM que apoyan por grippers, se detallan en el cuadro adjunto algunos ciclos de trabajo típicos.

El avance máximo que se cita de las EPB son los 28 anillos (L=1,5 m) colocados el 10 de Julio del 99 en el túnel nº 92, los 27 colocados en varias ocasiones en el túnel nº 87 en Metro de Madrid, los 31 (L=1,2 m) colocados el 16 de Octubre del 97 en el túnel nº 85 y en las TBM son los 60 anillos (L=1,3 m) co-

TABLA 9. MEJORA DE LOS RENDIMIENTOS CON LA LONGITUD DEL TÚNEL

Túnel	Long. M	Estaciones atravesadas	Total días calendario	Metros /día cal.	Metros/mes Media total	Máximo, metros en		
						1 día	7 días	31 días
7 Pitis	3.234	4	317	10.2	307	31.5	180.0	609.0
8 Barajas	3.567	0	221	15.1	490	39.0	229.5	792.0
RENFE Alcobendas	1,629	0	76	21.4	619	42.0	232.5	852.0

TABLA 10

		AVANCES Y RENDIMIENTOS DE LAS TUNELADORAS EPB DE LA AMPLIACION DE METRO DE MADRID				AVANCES Y RENDIMIENTOS DE LAS TUNELADORAS EPB DE LA AMPLIACION DE METRO DE MADRID					
MES	METROS	LA CHATA LINEA 4 HORTALEZA MITSUBISHI 9.50 m DRAGADOS	ALMUDENA LINEA 3 VICALVARO HERRENKNECHT 9.5 m MECSO-ACS	PALOMA LINEA 7 PALOMA HERRENKNECHT 9.5 m MECSO-FERROVAL	CIBELES LINEA 10 LAGO LOVAT 7.1 m DRAGADOS	PUERTA SOL LINEA 8 FERIALES HERRENK-6.42 m DRAGADOS-HECRO-ACS	LA CHATA (2) LINEA 8 AEROP MITSUBISHI 9.50 m DRAGADOS	ADELANTADA (2) LINEA 8 AEROP MITSUBISHI 9.50 m DRAGADOS	ADELANTADA (3) CERCANIAS ALCOBENDAS MITSUBISHI 9.50 m FCC		
Jul 95											
Ago 95											
Sep 95											
Oct 95											
Nov 95											
Dic 95											
Ene 96					196.0						
Feb 96					397.4						
Mar 96					TRASLADO						
Abr 96					293.3						
May 96					242.4						
Jun 96					282.0						
Jul 96					TRASLADO						
Ago 96					73.2						
Sep 96					241.2						
Oct 96											
Nov 96											
Dic 96											
Ene 97											
Feb 97											
Mar 97											
Abr 97											
May 97											
Jun 97											
Jul 97											
Ago 97											
Sep 97											
Oct 97											
Nov 97											
Dic 97											
Ene 98											
Feb 98											
Mar 98											
Abr 98											
May 98											
Jun 98											
Jul 98											
Ago 98											
Sep 98											
Oct 98											
Nov 98											
Dic 98											
Ene 99											
Feb 99											
Mar 99											
Abr 99											
May 99											
Jun 99											
Jul 99											
Ago 99											
Sep 99											
TOTAL METROS	3.608		3.545		1.004		2.102	1.958	3.597	1.436	1.829
COMIENZO TUNEL	28-may-1997	24-Jun-1997	30-sep-1997	20-sep-1997	24-Jul-1997	25-sep-1997	24-Jul-1997	17-Jul-1998	16-oct-1998	12-Jun-1999	
FIN TUNEL	09-may-1998	13-sep-1998	15-sep-1998	15-sep-1998	03-dic-1997	10-mar-1998	03-dic-1997	23-feb-1999	10-feb-1999	27-sep-1999	
DIAS CALENDARIO	346	415	381	381	132	197	132	197	211	117	70
METROSDIA (MEDIA)	10.4	9.5	9.0	9.0	10.0	9.9	10.0	9.9	16.1	12.2	21.4
AVANCES MAXIMOS											
METROS EN 1 DIA	37.5	31.5	27.0	27.0	37.2	37.2	37.2	39.0	34.5	42.0	
METROS EN 7 DIAS	256.3	180.0	172.5	172.5	204.0	153.6	204.0	153.6	229.5	225.0	232.5
METROS EN 31 DIAS	558.0	609.0	582.0	582.0	728.4	438.0	728.4	438.0	792.0	621.0	852.0

TABLA 11. TÚNELES DEL STOREBAELT

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros / mes	
94	Storaebelt Dania	8.78	1,900	EPB Howden	14-nov-90	01-abr-95	36
95	Storaebelt Selandia	8.78	1,900	EPB Howden	23-ago-90	01-abr-95	34
96	Storaebelt Jutlandia	8.78	5,500	EPB Howden	19-nov-90	17-may-94	131
97	Storaebelt Fionia	8.78	5,500	EPB Howden	30-ene-91	01-abr-95	110

locados el 23 Octubre 96 en el túnel nº 140, trasvase Guadiaro Majaceite.

Naturalmente, el tiempo de excavación depende del suelo o de la roca. Pero con los cortadores de disco adecuados, la máquinas de roca, a igualdad de diámetros, empujes y potencias, tardarán siempre menos. Las de suelos tienen que mezclar lo excavado con la espuma o el polímero, amasar e ir extrayendo el suelo de la cámara por el tornillo a velocidad controlada, manteniendo las presiones en cámara y tornillo dentro de su rango. El desgaste de discos cortadores en las rocas duras no será superior al desgaste de picas, rastrillos y discos en el Metro de Madrid, donde se ha llegado a cambiar todas las 190 picas de alguna EPB en sólo 40 m de túnel por la abrasividad de la sílice. Como puede verse, la velocidad de excavación de una buena tuneladora en roca puede ser casi del orden del doble que en el caso de las EPB o Slurry de suelos, donde todo el tiempo empleado en colocar el revestimiento no se aprovecha para avanzar. Aún así, las tuneladoras del Metro de Madrid han llegado a los 852 metros en 31 días.

C. Storebaelt. Túnel de unión del continente con Copenhague

Este es un ejemplo, ya clásico, de un proyecto realizado con EPB pero cuya gestión fué mala, tanto en la selección y especificaciones de las 4 tuneladoras EPB como en la ejecución de la obra. En la Tabla 11 se resumen los avances de los túneles.

La historia de este proyecto debe leerse y estudiarse con detalle. Ha habido roturas de las máquinas, inundaciones, islas artificiales, congelación del terreno del fondo del Báltico y hasta incendios en las EPB. Puede verse que los ren-

dimientos totales finales fueron inaceptablemente bajos, parecidos a los de los túneles sin mecanizar construídos por el NATM o el Premill.

D. Otros proyectos de túneles mecanizados en suelos o rocas blandas

En la Tabla 12 se resumen otros proyectos de túneles mecanizados construídos con frente cerrado, tuneladoras EPB o de lodos (slurry). En general en países como Alemania y Holanda, de suelos extraordinariamente blandos, se prefiere la tecnología de slurry a la de presión de tierras o EPB.

La máquina mayor del mundo es la del túnel nº 98, el 4º túnel bajo el Elba en Hamburgo. Esta máquina, al terminar su trabajo, ha pasado a Moscú donde comenzará en breve la construcción de un periférico carretero en la ciudad.

Realmente hay 8 máquinas mayores, las EPB que construyeron el túnel bajo la bahía de Tokio, pero todavía ha sido imposible al autor conseguir los datos de los rendimientos de estos túneles. En Japón las máquinas, incluso las enormes como éstas, se amortizan en un solo proyecto y es muy raro que se reutilicen.

En Septiembre del 2000 se ha anunciado la construcción de otra máquina de slurry aún mayor, de 15 m de diámetro. Esta máquina Mitsubishi-NFM será utilizada para el tren de al-

COMPARACIÓN DE AVANCES DE EPB Y TBM

Operación	EPB - SLURRY Minutos	TBM ROCA Minutos
Excavación	25	20
Grippers cabeza, avance escudo	No	5
Colocación de anillo	22	Durante excavación
Ajuste de gatos	2	0
Ciclo total, minutos	49	25
Avances teóricos en 24 hrs	29	58
Longitud de dovela, m	1,5	1,5
Avance teórico en metros / mes (teórico máximo sin paradas, averías ni mantenimientos)	1.305	2.610
Avances reales máximos en 24 hrs	28 anillos	60 anillos

TABLA 12. OTROS TÚNELES MECANIZADOS EN SUELOS

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros / mes	
98	Elba 4 tunel, Hamburgo	14.14	2,561	Slurry Herrenk	15-oct-97	02-mar-00	90
99	Caluire S. Bulevar perif. Lyon.	11.02	3,230	EPB NFM	17-mar-97	26-may-98	226
100	Metro Lisboa. Linea D	9.84	2,094	EPB Lovat	19-mar-96	10-dic-97	101
101	Sifón El Salaam - 4. Canal Suez	6.34	770	Slurry Herrenk	21-ene-97	28-may-97	184
102	Metro Lille L2	7.72	3,962	EPB FCB	02-may-95	27-mar-97	173
103	Sifón El Salaam - 3. Canal Suez	6.34	770	Slurry Herrenk	27-jul-96	19-nov-96	204
104	Caluire N. Bulevar perif. Lyon.	11.02	3,252	EPB NFM	16-sep-94	18-oct-96	130
105	Sifón El Salaam - 2. Canal Suez	6.34	770	Slurry Herrenk	17-feb-96	03-jun-96	219
106	Sifón El Salaam - 1. Canal Suez	6.34	770	Slurry Herrenk	29-jun-95	01-dic-95	151
107	Metro Munich Lot 1 West 5	7.35	2,348	Slurry Herrenk.	08-sep-94	30-oct-95	171
108	METEOR Bastille-Madeleine	8.60	4,500	Slurry HDW	15-sep-93	10-ago-95	197
109	FFCC Essen 2	8.33	2,015	Slurry Herrenk.	01-ago-94	20-jun-95	190
110	Metro Roma	10.64	900	Alpine westfalia	13-jul-94	20-mar-95	110
111	Metro Lyon. Linea D-2	6.27	890	Slurry Herrenk.	16-ago-94	07-mar-95	133
112	Saint Clair, Canadá-USA	9.53	1,800	EPB Lovat	15-oct-93	08-dic-94	131
113	Colector Nanterre	4.84	630	EPB Lovat	09-feb-94	22-sep-94	85
114	Passante Ferroviario 2, Milán	8.03	1,900	EPBMitsub-NFM	24-ene-94	10-sep-94	252
115	Metro Lille L2	7.72	3,375	EPB FCB	13-oct-92	12-jul-94	161
116	Metro Lyon. Linea D-1	6.27	904	Slurry Herrenk.	14-jun-93	24-jun-94	73
117	FFCC Essen 1	8.33	2,016	Slurry Herrenk.	10-feb-93	20-feb-94	164
118	Metro Colonia	6.60	2,466	Slurry Herrenk.	10-dic-92	30-ene-94	180
119	Passante Ferroviario 1, Milán	8.03	2,030	EPB Mitsub-NFM	03-sep-92	07-nov-93	144
120	Tranvía Estrasburgo	8.27	1,200	Slurry Herrenk	30-jun-92	26-mar-93	136
121	Colector Sevres Acheres	4.84	5,830	EPB Lovat	23-nov-90	27-ene-92	412

ta velocidad de Bélgica a Holanda, con las dos vías dentro separadas por una pared interior.

Puede verse en la Figura 2 que los rendimientos de estos túneles en suelos y rocas blandas son bajos. Solamente los pequeños diámetros superan los 300 metros de avance mensual. Y naturalmente, a menor diámetro, menos minutos se tarda en la excavación y en la colocación del revestimiento a igualdad de otros factores.

3. Túneles mecanizados en roca dura.

En la Tabla 13 se resumen los datos de los túneles más conocidos ejecutados por métodos mecanizados en roca dura. Toda Europa está hoy ocupada construyendo o proyectando los grandes túneles alpinos de base antes citados. Puede verse que en los últimos 10 años ha habido una verdadera explosión en la construcción de túneles con equipos de frente cerrado. En dicha tabla figuran 14 grandes túneles europeos con diámetros de tuneladora superiores a los 11 metros, y hay más de otros cinco terminados o en construcción que no se han incluido.

Se ha utilizado todo tipo de tecnologías en estos túneles, siempre con escudo. Desde escudos abiertos con aire compri-

mido (nº 132) hasta escudos TBM típicos que pueden transformarse en escudos slurry en pocas horas. La mejor forma de profundizar en la tecnología conveniente para cada nuevo túnel es el estudio de cada uno de estos recientes proyectos y las reuniones con fabricantes de equipos y con los ingenieros, tanto de la contrata como del Cliente, que los han construido. Y siempre con el espíritu muy crítico y sin hacer caso a los "expertos". Recuérdese que en el Metro de Munich se ha venido utilizando el NATM desde las olimpiadas de 1972 para la construcción de túneles, y han tenido al menos 7 grandes colapsos y hundimientos. El último conocido es el citado de 1994, donde cayó un autobús al túnel colapsado por el NATM, con 4 muertos. Recuérdese también que en el Metro de Madrid nos ofrecían en 1996 tuneladoras EPB con muy bajo par motor en la cabeza de corte, unos 1.500 mt, y muy pequeño empuje, unas 6.000 t en total, el tipo de tuneladoras que se estaban construyendo esos años para diámetros similares de 9.5 metros, como las de Lisboa o El Cairo. El autor exigió 2.000 mt de par de desbloqueo y 10.000 t de empuje, ante la estupefacción y las críticas de los fabricantes (NFM y Martin Herrenknecht), y terminados los túneles se reconoció por los fabricantes que estos parámetros incluso podían haberse aumentado. Así se ha hecho en la última tuneladora Herrenknecht de la

Ampliación de Metro de Madrid, que en lugar de 14 motores lleva 17, con un par de desbloqueo de 3.000 mt.

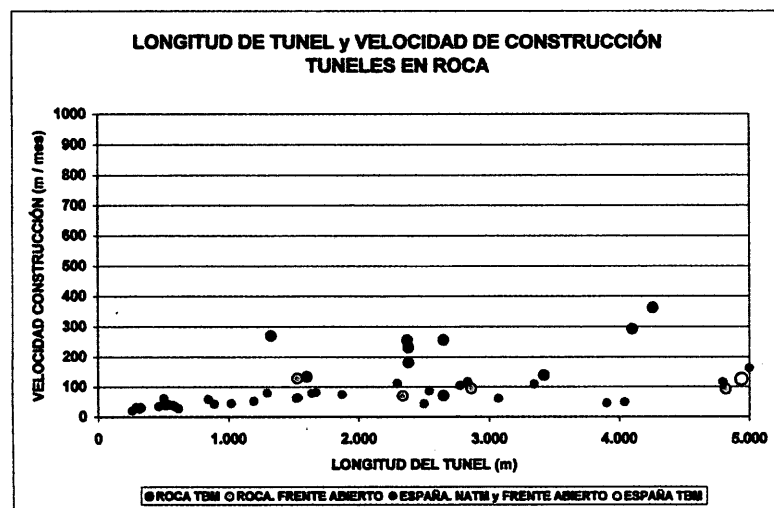
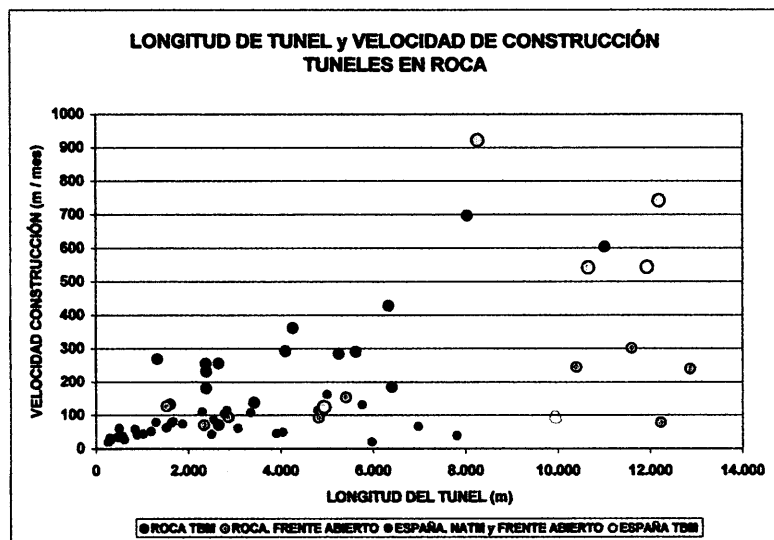
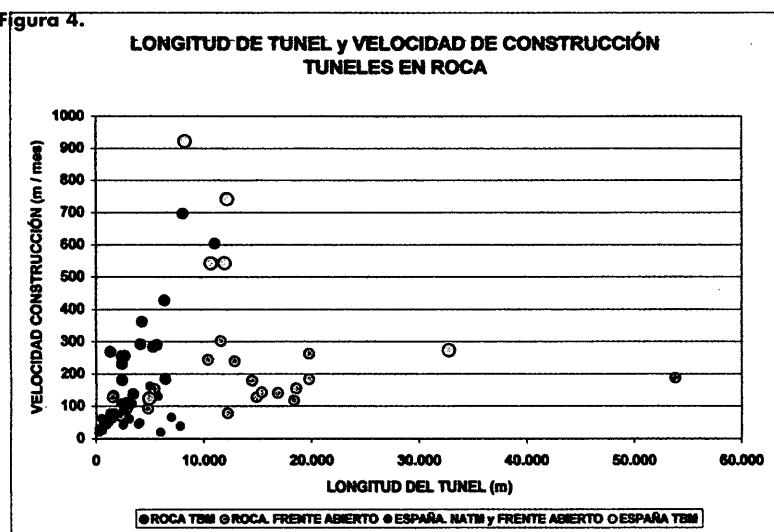
Las tuneladoras deben seleccionarse con sumo cuidado, y esta decisión no debe dejarse sólo en manos de los contratistas o de los fabricantes, aunque realmente éstos sean los que más saben por su enorme experiencia, tanto unos como otros. Pero es responsabilidad de la Administración la selección del mejor equipo posible para su túnel. De otra forma aparecerán los problemas contractuales. Como ejemplo se cita el mayor desastre de los túneles mecanizados en roca dura, que es sin duda el de los famosos túneles de Pinglin, en Taiwan. Estos dos túneles gemelos son los más largos de la autovía entre

Taipei al oeste e Ilan, al este de la isla. La historia de este famoso proyecto debe estudiarse también con detalle, escuchando a fabricantes y contratistas, porque, como se indica, es el desastre mayor de los conocidos por el autor en los túneles mecanizados. Se construyó con frente abierto, para ver el macizo rocoso, un túnel piloto de 4.8 m de diámetro entre los dos grandes túneles, que debía servir como avance de datos para éstos y que no sirvió porque finalmente las TBM le alcanzaron. Las 2 tuneladoras TBM compradas llegaron a la obra en Abril y Julio de 1995, fueron las mejores en que se puede pensar, dos excelentes equipos WIRTH de 12 m de diámetro, dobles escudos telescópicos capaces de trabajar en roca dura y

TABLA 13. TÚNELES MECANIZADOS EN ROCA DURA

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros / mes
EUROPA. TUNELES ALPINOS						
122 Thalwil 1, Zurich	12.24	6,330	TBM Herrenknecht	15-sep-98	09-dic-99	428
123 Murgenthal	12.03	4,257	TBM Herrenknecht	01-oct-97	24-sep-98	362
124 Pomy 1, Suiza	11.66	2,650	TBM Herrenknecht	06-feb-95	18-mar-98	71
125 Pomy 2, Suiza	11.66	2,650	TBM Herrenknecht	24-jun-96	05-may-97	256
126 Les Vignes Norte, Suiza	11.80	2,380	TBM Herr. abierta	26-oct-94	04-sep-95	231
127 Les Vignes Sur, Suiza	11.80	2,380	TBM Herr. abierta	05-ago-93	09-sep-94	181
128 Grauholz	11.60	3,420	TBM Herrenknecht	15-ene-90	10-feb-92	138
129 Bozberg (2*3200)	11.80	6,400	TBM Herrenknecht	jul-90	jun-93	184
130 Mont Russelin	11.74	2,371	TBM Herrenknecht	feb-91	nov-91	255
131 Sachseln	11.77	1,325	TBM Herrenknecht	feb-93	jul-93	269
132 Bruyeres	11.77	1,600	TBM Herrenknecht a.c.	nov-96	nov-97	133
133 Adler	12.54	4,100	TBM Herrenknecht	nov-95	ene-97	292
134 Gorgier N	11.77	2,720	TBM Herrenknecht	Jul-98	Jul-99	250
135 Gorgier S	11.77	2,720	TBM Herrenknecht	sep-99	jun-00	270
136 Quinling Norte, China	8.80	5,255	TBM Wirth	15-feb-98	31-ago-99	284
137 Quinling Sur, China	8.80	5,621	TBM Wirth	10-ene-98	22-ago-99	290
Sin nº Pinglin N, Taiwan	11.90	12.900	TBM doble escudo WIRTH	15-abr-95	DESASTRE	0
Sin nº Pinglin S, Taiwan	11.90	12.900	TBM doble escudo WIRTH	12-jul-95	DESASTRE	0
TUNELES HIDRÁULICOS						
138 Lesotho Ash, Sudafrica	5.40	11,011		01-may-92	07-nov-93	604
139 Lesotho Caledon	5.40	8,037		15-mar-94	01-mar-95	697
140 Guadiaro-Majaceite	4.88	12.195	NFM doble esc telesc	20-sep-95	01-feb-97	742
141 Daule-Esperanza	4.88	8.270	NFM doble esc telesc	20-ago-97	20-may-98	922
142 Trásvase. Villarejo	5.50	4.941	TBM Robbins abierta	ago-70	ago-73	124
143 Trásvase. Talave	5.05	32.800	5 TBM abiertas	jun-70	jun-80	273
144 Doukkala (NECSO)	7.20	10.660	TBM abierta	abr-96	dic-97	542
145 Matmata (NECSO)	5.30	11.937	TBM abierta	feb-88	dic-89	543
146 Evinos-Mornos 1, Grecia	4.20	8,090	TBM + NATM	22-ene-93	6-jun-94	492
147 Evinos-Mornos 2, Lepanto	4.04	9,697	TBM EPB doble escudo	28-jul-93	4-sep-94	732
148 Evinos-Mornos 3, Lepanto	4.04	7,421	TBM EPB doble escudo	28-ago-93	4-feb-95	430
149 Evinos-Mornos 4; Lepanto	4.20	4,185	TBM + NATM	31-ago-93	12-jul-94	404

Figura 4.



como EPB al atravesar fallas o zonas blandas. Pues bien, el túnel es un desastre, se ha rescindido el contrato con el primer contratista principal, ha habido problemas técnicos y contractuales de todo tipo y hoy esas dos magníficas tuneladoras – que tan bien nos vendrían en nuestros túneles de Guadarrama, de Pajares, del Padornelo o del acceso a Francia Biescas-Lourdes por Vignemale – tienen la cabeza desmontada y se están utilizando solamente como medio de extracción de los escombros de excavación, que se está haciendo con perforación y voladura. No pueden darse aquí detalles de las discusiones contractuales que ha habido, pero sí puede indicarse que todo el problema parece haber comenzado por una discusión entre Contratista y Cliente, a través del Project Manager, sobre si la inyección de gravilla y mortero en el trasdós y otros tratamientos del terreno estaban o no incluidos en los precios y si debían o no pagarse aparte. El resultado es que el túnel, que debía estar en servicio en 1999, está aún a un 20% de ejecución, y que el funcionario que pretendía hacer méritos personales consiguiendo un ahorro ha sido responsable de un desastre económico de proporciones enormes para su país. Tenga en cuenta el lector que intentar contratar un túnel a precio fijo, como si fuera comprar una barra de pan, es desconocer totalmente lo que es un túnel, lo que es la Geotecnia y lo que debe hacer una buena Administración Pública. Lamentablemente, en muchas ocasiones ello ocurre también en otras partes del mundo.

RESUMEN

De la observación de las Tablas anteriores junto con las Figuras 1 a 8 parece deducirse que el peor rendimiento de los grandes túneles con tuneladora es mejor que el mejor rendimiento de los túneles sin mecanizar construídos por el Nuevo Método Austríaco o métodos similares.

De la Figura 1, túneles en roca dura, parece deducirse que el mejor rendimiento de los túneles construídos por los métodos abiertos es el de 301 metros al mes en el túnel del Mont Blanc, y que el medio está en el orden de los 150 metros al mes, bajando a unos 50 metros/mes en casi todos los túneles españoles. Este rendimiento es la séptima parte de los que se están obteniendo actualmente con tuneladoras adecuadas, como en el caso del recientemente terminado túnel de Tahlwil (nº 122), en Zurich, al norte del San Gotardo, con un rendimiento medio de 428 metros al mes. Como curiosidad dire-

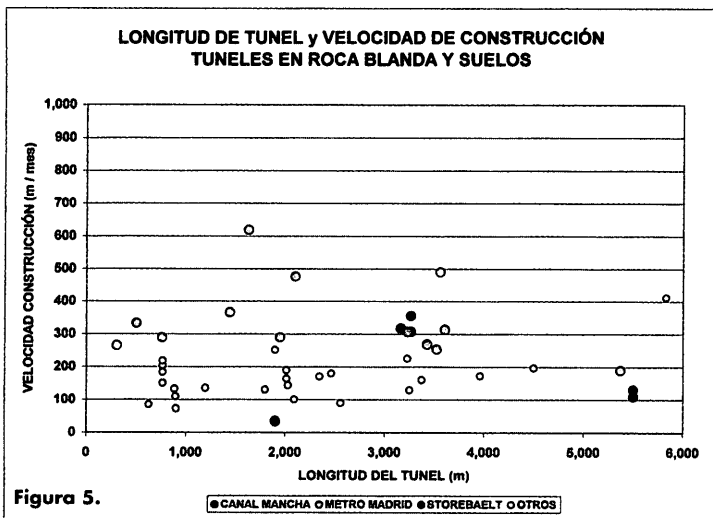
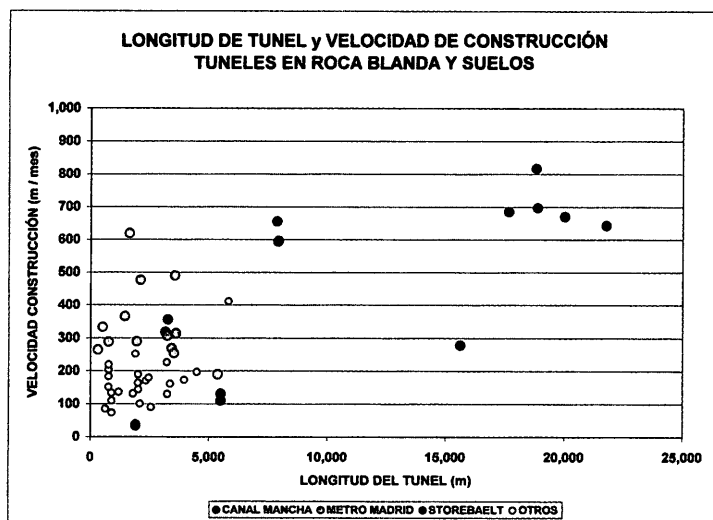


Figura 5.

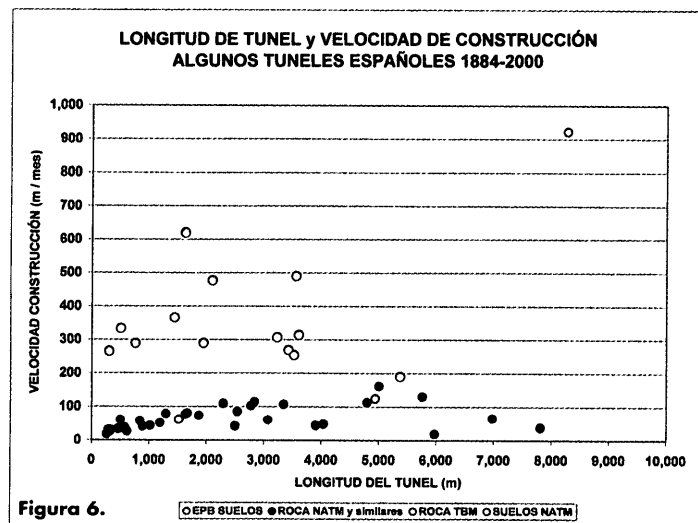


Figura 6.

mos que los túneles de Grauholz (nº 128), Pomy 1 y 2 (nº 124 y 125) y los dos de Gorgier (nº 134 y 135) han sido construidos por la misma máquina.

En la Figura 2 aparecen los rendimientos medios totales de túneles en rocas blandas y suelos. Los mejores son los del Canal de la Mancha, seguidos por la ampliación de Metro de Madrid. En diámetros similares (6 a 9 metros), el resto de los proyectos tienen rendimientos mitad.

En la figura 3 se han reunido todos los túneles españoles resumidos en este artículo. Los mecanizados de pequeño diámetro (5 m) son extraordinariamente eficaces incluso en rocas de pésima calidad como fué el caso del trasvase Guadiaro-Majaceite en la Penibética, hasta con 900 m/mes. En los diámetros grandes (7 a 9 m) los más eficaces son los de Metro de Madrid en suelos y rocas blandas, pese al cruce de estaciones y a los estrictos controles de asentamientos y subsidencias. En rocas duras sólo se han construido con escudos los dos grandes túneles hidráulicos de Marruecos, los de Doukkala y Matmata, ambos por NECSO, con rendimientos de más de 500 m/mes. El resto, túneles de NATM o frente abierto, tienen rendimientos del orden de 100 metros/mes, y menores de este valor la mayoría. Prácticamente ninguno de los túneles de las líneas de alta velocidad (nº 36 a 60) supera los 100 metros al mes, y en los carreteros el de mayor rendimiento ha sido el de Cádiz (nº 61), con 161 metros al mes.

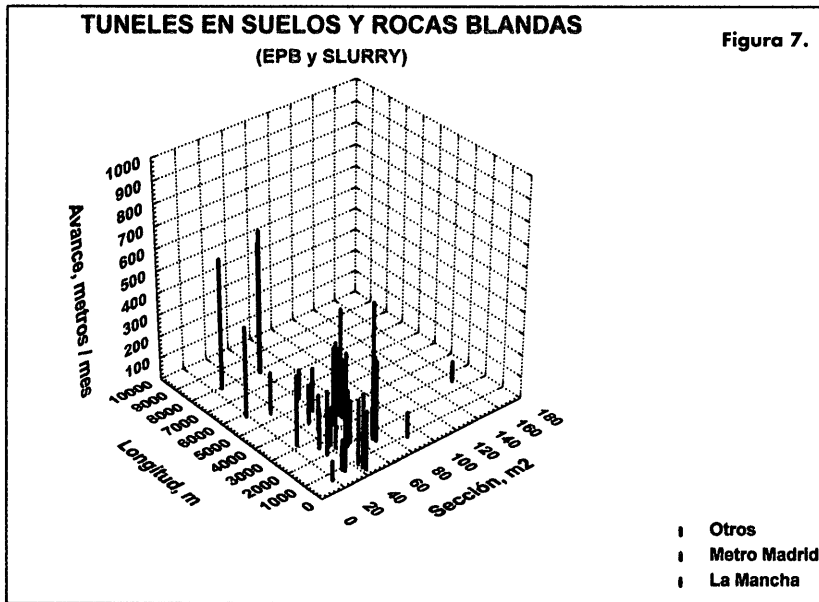
Las figuras 4 a 6 indican la velocidad de avance frente a la longitud del túnel, para roca dura con distintos niveles de detalle (Fig. 4), para rocas blandas y suelos (Fig. 5) y para los túneles españoles (Fig. 6). Parece haber una lógica tendencia a mayor rendimiento con mayor longitud del túnel, tendencia estropeada por el túnel de Seikan no mecanizado.

La tercera variable importante, además de longitud y velocidad de avance, es la sección del túnel. La influencia de la sección del túnel en su velocidad de construcción puede verse en las figuras 7 y 8. La figura 7 recoge los túneles en suelos y rocas blandas, y la 8, con la misma escala vertical, los túneles en roca con frente abierto.

Utilidad de los métodos de frente abierto

Es evidente que siempre habrá que utilizar estos métodos, pero deben reservarse para las secciones muy pequeñas donde el peligro es casi nulo. Por ejemplo, las galerías de interconexión de los grandes túneles de base, sin duda deberán hacerse con frente abierto hasta dentro de algunos años en que tengamos métodos mecanizados que aún no existen más que en prototipos.

Se dice que para túneles muy cortos, los métodos de frente abierto son los únicos utilizables. Pero el lector observará que en general los túneles muy cortos son consecuencia de un mal proyecto. En casi todos los casos el



proyecto puede y debe modificarse bien prescindiendo del túnel o bien yendo a túneles mucho más largos, como ocurre en el caso de la nueva red de Alta Velocidad española o del tramo Bolonia-Florenca de la italiana, entre otros.

La importancia del plazo en las infraestructuras de transporte

Podría algún lector pensar que el plazo en estas obras tal vez no tenga tanta importancia como parece desprenderse de todo lo anterior, pero no es así. El plazo de una infraestructura pesada de transporte debe ser el mínimo

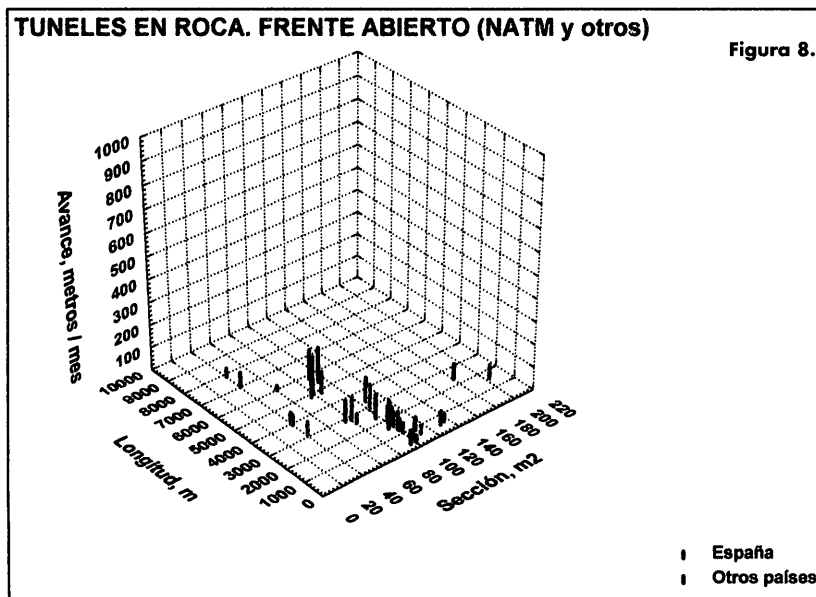
posible. El tiempo en que el dinero de los contribuyentes, una vez comprometido para un Proyecto, está inactivo sin la obra en servicio es una gran pérdida económica y social.

Como ejemplo, se dan algunos detalles de la Ampliación de Metro de Madrid 1995-1999. Esta ampliación, con 35 nuevas estaciones y 38 nuevos km de grandes túneles, ha hecho que el número de usuarios de Metrò pase de 358 millones al año en 1995 hasta 480 millones al año en 1999. Para estos nuevos 122 millones de usuarios, el disponer de la infraestructura supone, según los datos del Consorcio Regional de Transportes de la Comunidad de Madrid, un ahorro de tiempo medio de 7 minutos por usuario, tiempo que empleaban antes en otros modos de transporte más lentos. Por otra parte, personas que ya utilizaban el Metro pero que llegaban a la estación mas cercana por otro medio de transporte como el autobús, utilizan la ampliación haciendo viajes más largos en la red,

sin que figuren como nuevos usuarios. Se estima en el Consorcio (a esperas de la nueva encuesta) que al menos un 5% de los 358 millones de usuarios de 1995 se han visto beneficiados de ese modo por la ampliación, con un ahorro medio de tiempo de también unos 7 minutos. En total, el ahorro de tiempo que supone la ampliación es de 24.4 millones de horas cada año.

Para el estudio de la red de transporte y sus alternativas y ampliaciones, el Consorcio Regional de Transportes valora el coste medio de la hora de usuario en 1.000 Pta (la RATP de París la valora como media a unas 2.500 Pta). El ahorro total que la Ampliación de Metro ha supuesto para los usuarios de la Comunidad de Madrid puede valorarse por lo tanto en 24.400 Mpta cada año, y ello sin contar los ahorros de otro tipo que supone el utilizar un medio de transporte no contaminante y que además elimina el vehículo privado en superficie, ahorros que con seguridad suponen un coste al menos igual al anterior.

La importancia del plazo en las infraestructuras de transporte, como vemos, es enorme. Y las infraestructuras, y especialmente los túneles, pueden hacerse bien y además deprisa, y además a un coste bajo si se utilizan los métodos constructivos adecuados, como se deduce de las tablas y gráficos anteriores. Los túneles nº 87 y 88, que suman 5.4 km (contando las estaciones atravesadas que no figuran en las tablas), se han construido en tan sólo 7 meses, con una tuneladora por cada extremo. Compárense estos plazos con los túneles nº 37 a 68 y podrá verse la importancia de un proyecto y un proceso constructivo adecuados.



La influencia del tipo de roca o suelo

En un reciente coloquio, el Catedrático D. Clemente Sáez preguntaba al autor el por qué no citaba la influencia del tipo de roca o suelo en los avances de los túneles. Realmente, el problema en los suelos y rocas blandas es el desgaste de picas, y en rocas duras es el desgaste de los cortadores de disco. Es difícil pensar en una roca o un suelo que no puedan ser perforados rápida y fácilmente por estos métodos de escudos cerrados, y la gran ventaja de éstos es precisamente que la construcción del túnel se independiza de la naturaleza del macizo, que es sin embargo crítica en los métodos de frente

abierto. El gran problema en los túneles profundos es el empuje lateral, el apriete de la roca al escudo, que creemos que se resuelve con los cortadores de gálbo extensibles adecuados y no permitiendo jamás que la máquina pare. El éxito de los túneles depende cada vez menos de la geotecnia y del macizo rocoso y cada vez más de los avances en las tecnologías de picas, cortadores y rodamientos.

CONCLUSIONES

Se dejan al lector. ■

REFERENCIAS

- 1.- "Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels". HSE, 1996
- 2.- "Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground". ICE, 1996
- 3.- Broms, B. & Bennermark, H. (1967). "Stability of clay at vertical openings". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 93, N° SM1, 71-95.
- 4.- Lunardi, P. (2000). "Design & Constructing Tunnels – ADECO-RS approach". Tunnels and Tunnelling International, May 2000.
- 5.- "Rock Mechanics", B.Brady & E. Brown. Chapman, 1993
- 6.- "Underground excavations in rock". E.Hoek & E.Brown. Chapman, 1997
- 7.- Maristany, E "El túnel de Argentera. Tratado de construcción de túneles". Henrich y Cía. Barcelona 1892
- 8.- "Reflexiones sobre la construcción de los túneles del Metro de Madrid". Manuel Melis. ROP Nov 1996.
- 9.- "The observational method in geotechnical engineering". ICE. T.Telford, 1996
- 10.- "Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics". R.B.Peck, 9th Rankine Lecture. Geotechnique 19, n° 2, 1969
- 11.- "La Ampliación del Metro de Madrid". Manuel Melis. ROP Dic 1997
- 12.- "Los túneles españoles y la Ingeniería de Caminos". Manuel Melis N° extraordinario R.O.P. año 2000.
- 13.- "La Ingeniería Civil en el Siglo XXI". M. Melis. III Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Barcelona, Noviembre 1999
- 14.- "Planificación General de la Ampliación del Metro de Madrid". Primeras jornadas Técnicas sobre la Ampliación del Metro de Madrid 1995-1999. Manuel Melis. Junio 1997
- 15.- "Selección y Características de las tuneladoras EPB de la Ampliación del Metro de Madrid". Primeras jornadas Técnicas sobre la Ampliación del Metro de Madrid 1995-1999. Manuel Melis Junio 1997
- 16.- "The performance of EPB machines in the construction of the Madrid Metro Extension". I.T.A. World Tunnel Symposium. Oslo, Manuel Melis et al Junio 1999
- 17.- "The Madrid Metro extension. Client Viewpoint". Tunnels and Tunnelling International, Londres, Manuel Melis Marzo 1999
- 18.- "The Madrid Metro extension. EPBM performance". Tunnels and Tunnelling International, Londres, Manuel Melis Marzo 1999
- 19.- "Madrid Metro Extension: 38 km of tunnel and 35 stations designed and built in 40 months". AITES-ITA 2000 World Tunnel Congress, Durban, South Africa, Manuel Melis et al. May 2000.
- 20.- "Estrategia geotécnica aplicada a la ampliación del Metro de Madrid". Libro homenaje al Prof. José A. Jiménez Salas, Prof. Emérito de Geotecnia. Madrid, Manuel Melis Abril 2000.
- 21.- "Historia y estética de los Túneles". José A. Juncá Ubierna. Tesis Doctoral, Abril 1988.