

Escudos EPB en terrenos no cohesivos bajo carga de agua: últimas experiencias en la Línea 1 del Metro de Sevilla

EPB shields in non-cohesive terrains with a water load:
recent achievements on Tunnel section of Line 1 of Seville Metro

Felipe Mendaña Saavedra. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SPICC, S.L. Consultor. fms@spicc.e.telefonica.net

Pedro Gómez Escribano. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
DRAGADOS. Metro Sevilla Ing. Jefe de Obra. pgomez@utemetrosevilla.com

José Ignacio Sanz Delgado. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SACYR-CAVOSA. Ing. Jefe de Túnel Metro de Sevilla. jsanz@utemetrosevilla.com

Resumen: Los autores exponen las nuevas experiencias con máquinas EPB en terrenos no cohesivos con carga de agua, derivadas de la construcción de los túneles gemelos de 2,4 Km. de longitud y 6 m. de diámetro de excavación de la Línea 1 del Metro de Sevilla. Se añaden las características idóneas de la rueda de corte construida para el segundo Túnel.

Palabras Clave: Escudo EPB; Aluvial; Carga de agua; Rueda de corte

Abstract: The authors state the new experiences in the use of EPB machines in non-cohesive terrain with a water load arising from the excavation of the twin tunnels, measuring 2.4 km long and 6 m. in diameter, of Line 1 of the Metro of Seville. Features of the rotary wheel, built for the second tunnel are added, with which a dramatic improvement of the advance rates were reached.

Keywords: Alluvial; Water load; Cutting wheel

1. El proyecto del túnel bitubo de la Línea 1 del Metro de Sevilla

1.1. Características generales

La Línea 1 del Metro de Sevilla cruza la ciudad de Oeste a Este, con una longitud total de 20 Km., de los cuales 2,4 Km. se han construido con una tuneladora tipo EPB. Este tramo subterráneo, de diseño bitubo, tiene cinco estaciones: comienza en la Estación Parque de los Príncipes, cruza el río Guadalquivir y sigue bajo gran parte de la zona histórica de la ciudad, para terminar en la Estación de San Bernardo (Figura 1).

El subsuelo del tramo subterráneo corresponde a terrenos cuaternarios del aluvial del río, bajo los cuales se presentan unas margas azules impermeables, típicas de la zona. La aceptación social que han tenido en España los recientes diseños de Metro superficiales motivó la decisión de implantar en el aluvial el proyecto de este tramo, cuyos datos generales son los siguientes:

- Dos túneles gemelos para simple vía, de 6,10 m de diámetro de excavación, separados 11,85 m. entre

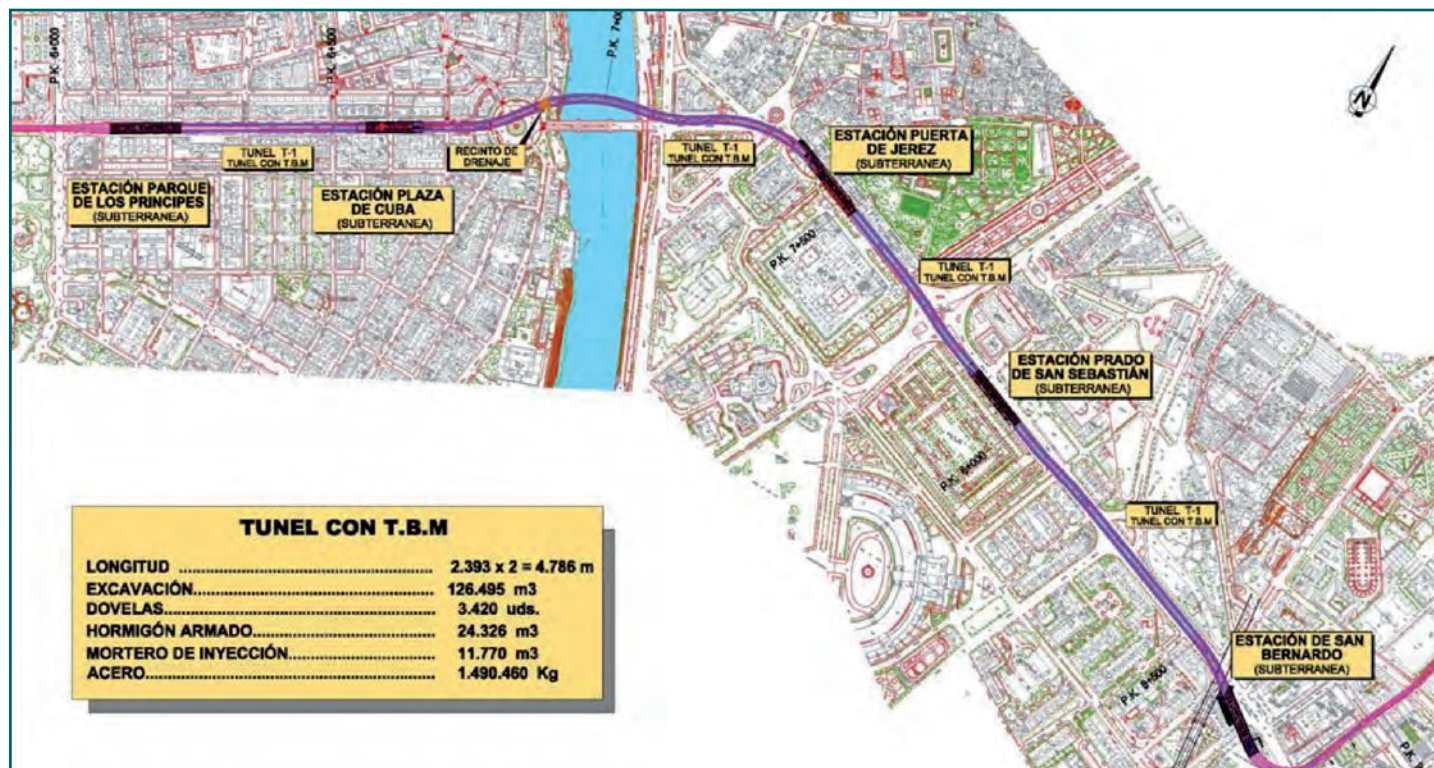
1. The twin tunnel project for line one of metro of Seville

1.1. General characteristics

Line 1 of the Metro of Seville crosses the city from West to East, with a total length of 20 km., 2.4 km of which have been built with an EPB tunnel boring machine This underground section, with a twin tunnel design, has five stations: it starts at Parque de los Principes Station, it crosses the Guadalquivir River and continues beneath a large part of the city's historic area, and ends up at San Bernardo Station (Figure 1).

The underground section's subsoil corresponds to riverbed quaternary terrain under which is blue impervious marl, typical of the area. The social acceptance that the recent surface Metro designs have had in Spain motivated the decision to implement the project in this section in the alluvium. Its general data are as follows:

- *Two twin tunnels for a single track, measuring 6,10 m in excavation diameter, separated 11.85 m between axes, covered with reinforced concrete*



ejes, con revestimiento de anillos prefabricados de hormigón armado, tipo universal, de 1,40 m. de longitud y 0,25 m. de espesor. La sección tipo incorporó protecciones de "jet-grouting" (más micropilotes en algún tramo) para reducir los asentamientos al pasar bajo las calles de la ciudad (Figura 2).

- Las curvas en planta tienen un radio mínimo de 250 m., aunque la tuneladora se diseñó para poder dar curvas de 200 m. de radio. La pendiente máxima del perfil longitudinal es del 4%.
- Estaciones construidas al amparo de recintos de pantallas continuas a través del aluvial, de una profundidad máxima de 30 m, con el fin de ofrecer unas condiciones óptimas de ventilación y vigilancia en la explotación además de la mayor facilidad de acceso.

1.2. Estudio previo de los terrenos

Para el estudio de las características del aluvial se dividió el trazado del túnel en siete tramos.

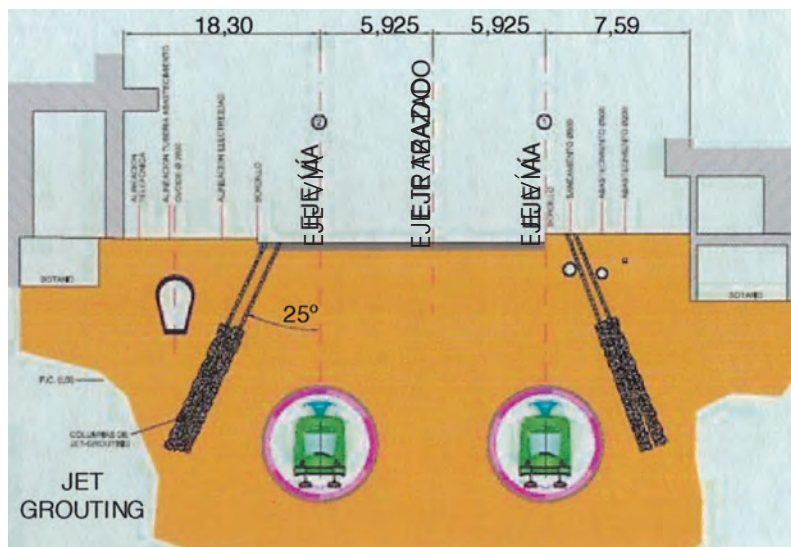
La formación tiene una granulometría muy variable presentando gravas de tamaño centimétrico, a la vez que gravillas y arenas e, incluso, zonas de limos arenosos. Las características generales se resumen en el Cuadro nº 1.

Fig.1. Planta del tramo en túnel/ Tunnel section plan.

prefabricated rings, universal, 1.40 m long and 0.25 m thick. The model section included jet-grouting protection (plus reinforced concrete piles in some sections) to reduce settling when passing under city streets (Figure 2).

- The curves on the drawing have a minimum radius of 250 m, though the tunnel boring machine was designed to make curves with a

Fig.2. Sección transversal tipo/ Model cross section.



Cuadro nº 1. Datos generales y parámetros de los materiales / Diagram 1. General information and parameters of materials

Tramos / Sections	PK	l (m)	C (t/m ²)	Ø	Sobre clave / Above code (m):	
					Recubrimiento Covering	Nivel freático Groundwater table
Estación P. Príncipes / P. Príncipes station	6+185 6+335	150 m	1	34º	07-11	03-07
P. Príncipes-P. Cuba / Course Príncipes-P. Cuba	6+335 6+560	225 m	0-1	34º-37º	11-15	07-10
P. Cuba-Río / Course Cuba-River	6+560 6+894	334 m	0	37º	16-22	11-13
Paso río Guadalquivir / Guadalquivir River Course	6+894 7+076	182 m	0	37º	06-07	14 *
Río-P. Jerez / River-P. Jerez	7+076 7+494	418 m	0-1	34º-37º	11-21	08-15
P. Jerez-Prados S. S. / Course Jerez-Prados S. S.	7+494 7+865	371 m	0	37º	08	03
Prado S.S.-S. Bernardo / Prado S.S.-S. Bernardo	7+865 8+625	760 m	0	37º	-	-
		2.440 m		* Calado del río / River depth = 7,5 m		

Por otra parte, se hizo un estudio detallado de las presiones de confinamiento, con los resultados que figuran en el Cuadro nº 2. Se calcularon cinco hipótesis diferentes tomando los datos más desfavorables en distintos puntos del trazado, de lo que resultaron los datos incluidos en el Cuadro. A efectos de cálculo se adoptó un valor de 35 t/m² (3,5 bar) para la presión máxima de confinamiento.

No obstante lo anterior, la presión máxima de confinamiento para el diseño de la tuneladora se fijó en 4 Bar.

2. Elección del tipo de tuneladora

Ya se comprende que la tuneladora debía ser un escudo de frente en presión, capaz de trabajar en terrenos saturados con frentes inestables.

La tipología en principio más adecuada era la de los "hidroescudos", tecnología que nació para resolver precisamente la excavación en terrenos no cohesivos.

Sin embargo, las condiciones particulares de la zona de la ciudad donde había de implantarse la obra obligaron a desistir de ello. Principalmente fueron: a) escombreras existentes, ninguna de las cuales admitía materiales con restos de lodos en volúmenes importantes; b) no aprobación de montar plantas de separación en las explanadas colindantes, todas ellas zonas lúdicas emblemáticas de una ciudad de la importancia históri-

200 m radius. The maximum slope of the longitudinal profile is 4%.

- Stations built on areas with continuous screens along the alluvium, with a maximum depth of 30 m, in order to offer optimum ventilation and surveillance conditions for operation as well as easier access.

1.2. Preliminary land study

For the alluvium study, the tunnel drawing was divided into seven sections.

The formation has quite a variable grading. It has centimeter long pebbles as well as gravel and sand, and even areas with sandy silt. The general characteristics are summarized in Diagram 1.

Additionally, a detailed study was conducted on confinement pressures with the results listed in Chart 2. Five different hypotheses were calculated by gathering the data of the most unfavorable ones at different points of the drawing. The data included in the Chart were taken from here. For calculation purposes, a value of 35 t/m² (3,5 bar) has been adopted for the maximum confinement pressure.

Notwithstanding the foregoing, the maximum confinement pressure for the tunnel boring machine design was set at 4 Bar.

Cuadro nº 2. Presiones de confinamiento/ Chart 2 . Confinement pressures

Tramo Section	PP.KK.	P _{TO}	K ₀	K _{A3}	H	hw	P _C (1)	P _C (2)	P _C (3)	P _C (4)	P _C (5)	Presiones de cálculo ⁽¹⁾ Calculation pressures ⁽¹⁾	Presiones propuestas Proposed pressures
1	6+185- 6+400	(1) (2)	0,44 0,44	0,175 0,173	10 14	6 9,5	14,107 19,581	12,870 18,591	8,429 12,677	10,893 15,823	14,528 21,097	14-21 t/m ²	14-19,5 t/m ²
2	6+400- 6+572	(2) (3)	0,44 0,40	0,173 0,160	14 18	9,5 13,5	19,581 24,446	18,591 23,564	12,677 17,078	15,823 20,201	21,097 26,935	21-24,5 t/m ²	19,5-24,5 t/m ²
3	6+640- 6+894	(3) (4)	0,40 0,40	0,160 0,160	18 29,6	13,5 16	24,446 35,117	23,564 35,260	17,078 22,847	20,201 29,805	26,935 39,740	24,5-35 t/m ²	24,5-35 t/m ²
4	6+894- 7+076	(4) (5) (6)	0,40 0,40 0,40	0,160 0,160 0,160	29,6 9 24,5	16 17 16	35,117 22,600 31,098	35,260 21,050 30,735	22,847 17,576 21,240	29,805 18,540 26,188	39,740 24,720 34,918	35-22,5-31 t/m ²	35-22,5-31 t/m ²
5	7+076- 7+410	(6) (7)	0,40 0,42	0,160 0,160	24,5 14,5	16 10,5	31,098 20,220	30,735 19,185	21,240 13,441	26,188 16,398	34,918 21,864	31-19,5 t/m ²	31-19,5 t/m ²
6	7+480- 7+885	(7) (8)	0,42 0,40	0,160 0,160	14,5 14	10,5 6,5	20,220 21,738	19,185 21,393	13,441 11,795	16,398 17,764	21,864 23,686	19,5-21 t/m ²	19,5-21 t/m ²
7	7+955- 8+625	(8) (9)	0,40 0,40	0,160 0,160	14 19	6,5 12	21,738 24,316	21,393 23,606	11,795 16,126	17,764 20,084	23,686 26,779	21-23 t/m ²	21-23 t/m ²

(1) A falta de la comparación con los valores límites por levantamiento/ Due to the lack of comparison with the maximum survey values.

ca y turística de Sevilla y c) alto coste de un eventual transporte complementario hasta alta mar, única alternativa viable.

Por todo lo anterior hubo de estudiarse la posibilidad de utilizar un escudo EPB para lo cual se tuvo en cuenta lo siguiente:

- En el gráfico de la Figura 3 se representan los campos de aplicación específica de ambos tipos.
- Ahora bien, la experiencia en productos aditivos para conformar las mezclas de la cámara de un EPB de modo que se comporten como el producto de alta plasticidad que requiere su tecnología ha hecho posible ampliar el campo de aplicación de estas TBMs, lo que se representa en la zona con flechas del gráfico anterior.

Pues bien, en los túneles del Metro de Sevilla se tuvieron en cuenta los hechos siguientes:

- La existencia de zonas con una proporción significativa de limos arenosos y otras en las que el trazado

2. Selection of tunnel boring machine type

It is now understood that the tunnel boring machine should have been a pressure shield capable of working on saturated terrain with unstable fronts.

The most appropriate typology to begin with entailed "hydroshields", a technology that arose precisely to solve excavation in non-cohesive terrain.

However, the particular conditions of this area of the city where it had to be implemented obligated the team to cease using it. They were mainly: a) existing dumps, none of which admitted materials with sludge remains in major volumes; b) non-approval of setting up separation plants on the neighboring esplanades. All of them were representative recreational areas of Seville: a city of historic and tourist importance and c) high cost of possible complementary transport to the high seas, the only viable alternative.

Due to all of the above information, it was necessary to study the possibility of using an EPB shield for which the following was taken into account:

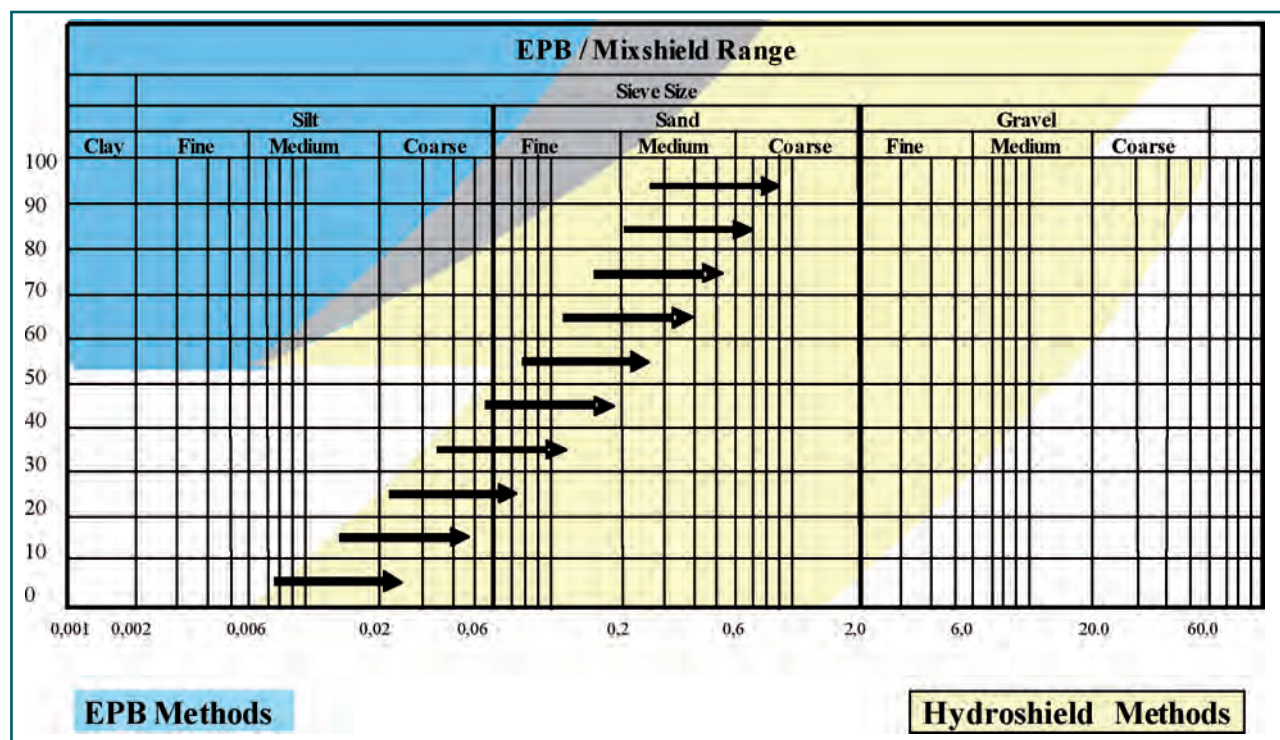


Fig. 3. Campo de aplicación de los escudos de frente en presión / Field of application of the front pressure shields.

cortaba la parte superior de la formación de margas arcillosas.

- Los polímeros ligantes existentes que, añadidos al frente junto con las espumas, facilitan la entrada del material excavado a la cámara, así como la formación con las arenas finas y lomos (tamaños < 1,2 mm) de un gel extraíble con tornillo.
- Los actuales polímeros reductores de agua que, añadidos a la cámara, favorecen el proceso físico-químico anterior.
- Como medidas complementarias se decidió dotar al escudo de un depósito de lodo bentonítico de 8 m³ para preparar la cámara a fin de realizar actuaciones hiperbáricas para revisión cambio de herramientas.
- Al depósito anterior se añadieron depósitos de lodo presurizados para el mantenimiento automático de la presión en la cámara durante las paradas.

Con todo ello se creyó posible trabajar en el campo señalado en la Figura anterior y sin excluir el tener que llegar a la adición de finos de préstamos, pese a lo complejo de la operación.

En definitiva se fijaron las características siguientes de la máquina: Escudo EPB de Ø: 6064 mm (Ø_{corte}: 6.104 mm)/30% aberturas de la rueda de corte/ 40.000 kN de empuje máximo /6.000 kNxm de par máxi-

- The graph in Figure 3 represents the specific fields of application of both types.
- Now, the experience in additives to shape the mixtures of an EPB chamber so that they behave like a product with high plasticity that requires its technology has made it possible to expand these TBM's field of application. This is represented in the area with arrows from the previous graph.

Now, in the tunnels of the Metro of Seville, the following matters were considered:

- The existence of areas with a significant proportion of sandy silt and others in which the route cut through the upper part of the clay-marl formation.
- The existing bonding polymers that, added to the front together with the foam, facilitate entry of the excavated material into the chamber, as well as the formation of a removable gel with a screw with fine sand and silts (sizes < 1.2 mm)
- The current water reducing polymers that, once added to the chamber, favor the previous physical-chemical process.
- As complementary measures, it was decided to equip the shield with a bentonitic mud deposit measuring 8 m³ to prepare the chamber in order to make hyperbaric actions to check the tool change.



Figura 4 – Escudo EPB LOVAT Øexc 6,500 mm construcción del túnel nº 1/EPB LOVAT Shield Øexc 6,500 mm.

mo/Herramientas no recambiables desde el interior (“scrapers”) en los bordes de las aberturas y “rippers” cambiables y sustituibles por cortadores de disco (para el paso de pantallas)/Presión máxima de 4 Bar en la cámara con 4 niveles de sensores/Aditivos: 6 puntos en la rueda de corte /1 en la cámara y 2 en el tornillo / Inyección de agua en la cámara/Tornillo Ø 700 mm y 300 m³/h.

La tuneladora seleccionada fue una LOVAT (Figura 4) de 4 radios en los que se montaron las herramientas pesadas (“rippers”) y de aberturas variables.

3. Construcción del Túnel nº 1

3.1. Problemas del periodo inicial

La construcción del Túnel nº 1 (o Túnel Norte) comenzó a mediados de Agosto 2005 atravesando las pantallas de la Estación del Parque de los Príncipes e iniciando el avance bajo la Avda. República Argentina a primeros de Septiembre.

A finales de Septiembre se apreciaron dos hechos importantes, junto con un incremento notable del Par de giro:

- Síntomas de averías en los sellos Merkel del sistema interior del cojinete principal.
- Inutilización de 4 de las 6 líneas de aditivos al frente.

Las reparaciones en una situación similar pueden efectuarse sin mayor problema si no hay una carga permanente de agua. En este caso, con una carga de en-

- Pressurized mud deposits are added to the previous deposit for automatic maintenance of pressure in the chamber during interruptions.

With all of these measures, the specialists thought it was possible to work in the field indicated in the preceding figure, and without excluding having to resort to adding fine sands from loans, in spite of how complex the operation is.

In short, the following machine characteristics were set: EPB Shield/Ø_{exc}: 6.064 mm / 30% rotary cutter openings/40.000 kN of maximum thrust/6.000 kNxm of maximum par/non rechargeable tools from the inside (scrapers) on the edges of the openings and changeable rippers, replaceable for disk cutters (for penetrating screens)/Maximum pressure of 4 Bar in the chamber with 4 levels of sensors/Additives: 6 points on the rotary cutter/1 in the chamber and 2 on the screw/Injection of water in the chamber/a Ø 700 mm, 300 m³/h. screw.

The selected tunnel boring machine was a 4 radius LOVAT (Figure 4) onto which the heavy tools were mounted (rippers) and variable openings.

3. Tunnel 1 construction

3.1. Problems in initial period

Construction of Tunnel 1 (or North Tunnel) began in mid August 2005, by piercing the screens of Parque de los Príncipes Station and commencing work under Avda. República Argentina in early September.

At the end of September, two important events were observed, together with a noticeable increase in the rotary couple:

- Symptoms of damage to the main bearing's inner system of Merkel seals.
- Standby status of 4 out of 6 lines of additives to the front.

Repairs in a similar situation may be made without major problems if there is no permanent water load. In this case, with a load between 1.8-2.5 Bar until the arrival at the area of the next station (Plaza de Cuba), specialists had to advance with the following exceptional preventive measures:

tre 1,8-2,5 Bar hasta la llegada al recinto de la siguiente estación (Plaza de Cuba) hubo que avanzar con las siguientes medidas excepcionales de prevención:

- Aplicación de la mejor combinación de los fluidos de cierre de los sellos averiados. En este caso con 3 recintos (R.1: grasa / R.2 y R.3 aceite denso) se aplicó grasa a R.1 y R.2 y aire comprimido al cojinete.
- Control del desgaste de herramientas (posible causa del aumento de Par) manteniendo el Par en valores compatibles con la insuficiencia de aditivos (<40% Par máximo).
- Controlar y corregir de inmediato los posibles asientos, por pasar muy cerca de los edificios.

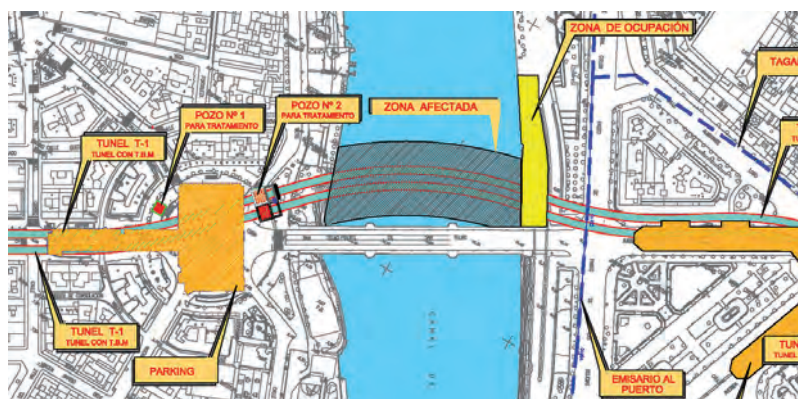
Gracias al esfuerzo coordinado de la organización de obra desde el 1 de Octubre al 6 de Diciembre de 2005 en que se llegó a la estación siguiente fue posible avanzar haciendo dos intervenciones hiperbáricas para controlar las herramientas y realizando una verificación y limpieza frecuentes de los filtros de los fluidos, lo que recomendó a concluir con el uso exclusivo de la grasa HBW en los 3 recintos teniendo que reforzar el sistema de bombeo de este fluido.

Una vez situado el escudo en el recinto de la Estación de Plaza de Cuba se desmontó la rueda de corte y se revisaron y repusieron todos los elementos afectados. El fallo de los sellos se achacó a un defecto de montaje en fábrica. Se montaron sellos nuevos, pues las señales en las pistas eran sensibles, pero dentro de tolerancias admisibles. Las operaciones terminaron a finales de Enero de 2006 con los Certificados de Calidad correspondientes.

3.2. Periodo intermedio. Paso del río Guadalquivir

En la segunda semana de Febrero 2006 se reanudó el período intermedio de la construcción del Túnel, que

Fig.5. Planta del paso bajo el río Guadalquivir/ Plan of tunnel under Guadalquivir river.



- Application of the best combination of closing fluids of the damaged seals. In this case, with three areas (A. 1: grease/A. 2 and A. 3 dense oil) grease was applied to A. 1 and A. 2 and compressed air to the bearing.
- Control of tool wear (possible cause of Par increase) maintaining the Par at values that are compatible with the insufficiency of additives (<40% Par maximum).
- Immediately control and correct possible settling because it passes very close to buildings.

Thanks to the coordinated effort of the project's organization from October 1 to December 6, 2005 when the next station was reached, it was possible to advance by making two hyperbaric interventions to control the tools and by making constant verifications and cleaning the fluid filters. This recommended specialists to conclude with the exclusive use of HBW grease in the 3 areas. They had to reinforce the this fluid's pumping system.

Once the shield was situated in the Plaza de Cuba Station, the rotary cutter was disassembled and all affected elements were checked and replaced. Failure of seals was attributed to a factory assembly defect. It was verified that some perceptible signals exist on the tracks, but within admissible tolerances, so only new seals were installed. Operations ended at the end of January 2006 with the corresponding Quality Certificates.

3.2. Interim period. Tunnel under Guadalquivir River

In the second week of February 2006, the intermediate period of tunnel construction resumed. It lasted 5 months and its most worrying operation was the tunnel under the Guadalquivir River.

The route had to be modified in order to solve problems of affected terrain and services, which forced the team to make curves with radii between 200 and 240 m.

In the study of the measures to ensure the tunnel under the river, specialists had to resign themselves to the measures that affected the river's environmental conditions or the operation of the Port of Seville (screens, prior consolidation of the alluvium, etc.). The decision was to place a weighted watertight textile cover, refilled with microconcrete, with a layer of concrete covering a triple width of the band occupied by the two tunnels (roughly 65 m) along the route from one margin to the opposite one. With this screen, that stuck out approximately 18 m on each side of the tunnels, we expected a sensitive

duró 5 meses y cuya operación más preocupante era el paso bajo el río Guadalquivir.

El trazado hubo de modificarse para resolver problemas de terrenos y servicios afectados lo que obligó a dar curvas de radios entre 200 y 240 m.

En el estudio de las medidas para asegurar el paso de río hubo de renunciarse a las que afectaban las condiciones medioambientales del río o a la explotación del Puerto de Sevilla (pantallas, consolidación previa del aluvial, etc.). La decisión fue colocar una manta de geotextiles rellena de microhormigón, lastrada con una capa de hormigón y cubriendo una anchura triple de la banda ocupada por los dos túneles (unos 65 m) a lo largo del trazado y desde una margen hasta la opuesta. Con esta pantalla, que sobresalía unos 18 m. a cada lado de los túneles, se esperaba una disminución sensible de la permeabilidad efectiva del aluvial que rodeaba las secciones, lo que supondría también una reducción de entre 1/5 y 1/4 de la presión sobre el frente.

Se tomaron, además, las siguientes precauciones: a) revisión previa de herramientas en un pozo estanco construido en la margen de entrada; b) cuidado máximo en la colocación de los anillos y especialmente de sus "gaskets" de impermeabilización; presión adecuada en el relleno de su trasdós con mortero; c) control topográfico diario desde las márgenes, de las cotas de puntos de referencia de la pantalla, con un sistema de miras colocadas por los buzos para detectar posibles asentos y d) mantenimiento de la presión de confinamiento estudiada para las mezclas de la cámara.

El paso del río, de una longitud de 199 m (142 anillos) se hizo desde el 18 de Septiembre hasta el 1 de Octubre de 2006, marcando una de las etapas de mejor rendimiento mantenido de toda la obra. Debe señalarse también la circunstancia favorable de que la parte inferior de la excavación coincidió con una capa de margas de 0,60 a 1,50 m. de espesor, lo que supone del orden de un 5% como mínimo de arcilla en la sección total.

Este tramo intermedio, que se iniciaba a la salida de la Estación de Plaza de Cuba estaba previsto que finalizara a los 612 m. en la Estación de Puerta de Jerez, donde se había programado un plazo de 15 días para la revisión y cambio de herramientas.

La realidad fue muy diferente porque la ubicación de la Estación de Plaza de Jerez se demoró hasta después del paso del escudo y la revisión hubo de hacerse al amparo de un recinto entre bloques de terreno tratado con "jet-grouting" bajo un aparcamiento existente.

decrease of the permeability of the alluvium that surrounded the sections. This would also mean a reduction of between 1/5 and 1/4 of the pressure on the front.

Furthermore, the following precautions were taken: a) prior revision of tools in a watertight pool built at the margin of the entry; b) maximum care in placing the rings, and especially their watertight gaskets; proper pressure in the filling of their extrados with mortar; c) topographical daily control from the margins, of the levels of the screen's reference points, with a system of sights installed by divers to detect possible settling and d) maintenance of the confinement pressure studied for the camera's mixtures.

The tunnel under the river, with a length of 199 m (142 rings) was made from September 18 until October 1, 2006, thus marking one of the stages with the highest amount of performance maintained throughout the project. Also worthy of mention is the favorable circumstance that the lower part of the excavation coincided with a layer of marl measuring from 0.60 to 1.50 thick. This means something in the neighborhood of 5% clay at the very least in the total section.

This intermediate section, that began at the exit of the Plaza de Cubas Station was planned to end at 935 m at the Puerta de Jerez Stations, where a 2 week period had been programmed to check and change tools.

The reality was very different because the location of Plaza de Jerez Station took longer than the installation of the shield, and the revision had to be done in an area between blocks of terrain treated with jet-grouting under an existing parking area. Preparation of the area was very laborious and extraordinarily slow due to the priority that had to be given to development of the parking area. In short, the tunnel excavation could not be resumed until November 29, 2006, the intermediate period's end date.

3.3. Final period

It began at the beginning of December of 2006 at 998 m from the source (ring 713) and it ended on May 26, 2007 with a duration of almost 6 months to build the last 1,300 m of Tunnel 1.

It was the period with the greatest overall regularity in progress, if we subtract the periods for some mandatory interruptions in order to not affect existing construction work and services. Out of these, the precise location was pending.

La preparación del recinto fue muy penosa y extraordinariamente lenta por la prioridad que hubo que dar a la explotación del aparcamiento. En resumen, la excavación del túnel no pudo reanudarse hasta el 29 de Noviembre de 2006 fecha final del periodo intermedio.

3.3. Período final

Se inició a principios de Diciembre de 2006 a 998 m. del origen (anillo 713) y se terminó el 26 de Mayo de 2007, con una duración de casi 6 meses para construir los 1.300 m. finales de este Túnel nº 1.

Fue el periodo de mayor regularidad global de los avances, si se restan los plazos de algunas paradas obligadas para no afectar a obras y servicios existentes de alguno de los cuales estaba pendiente la exacta localización.

Merece especial mención el hecho de que pese a las dificultades de las autorizaciones oficiales en una ciudad de alto valor histórico como es Sevilla, se hicieron sondeos a distancias cortas sensiblemente iguales a lo largo de trazado para disponer de curvas granulométricas del terreno y evaluar la presencia de limos arenosos o arcillosos y de margas inferiores en la sección de excavación, con el fin de adoptar la dotación de aditivos más conveniente y hacer un seguimiento adecuado del desgaste esperable de las herramientas de corte.

Debe citarse también la ejecución sistemática de actuaciones hiperbáricas en las que se llegó a una alta profesionalidad de los especialistas, lo que permitió la comprobación de los desgastes estimados y la reposición de las herramientas en el momento conveniente.

3.4. El desgaste de herramientas

Uno de los frutos de la experiencia de las revisiones sistemáticas efectuadas desde el principio fue el poder prevenir a tiempo los grandes desgastes sufridos, tanto por las herramientas, como por sus soportes y, lo que es más grave, por la estructura metálica de la rueda de corte.

El estado de la rueda obligó a su reparación total, extrayéndola en uno de los recintos estancos (Pozo nº 2), antes del paso del río, pese al incremento de plazo que suponía.

La causa principal de tales deterioros se atribuyó a la naturaleza silíceo de los materiales del aluvial del Guadalquivir procedentes del curso alto del río. Los des-

Of special note is the fact that in spite of the difficulties of the official authorizations in a city with a high historic value like Seville, they drilled at sensitively equal short distances along the route to have graded curves of terrain and evaluate the presence of inferior sandy or clayed silt and marl in the excavation section. The purpose for this was to adopt most suitable additives and perform a proper follow-up on the expected wear on the cutting tools.

We should also mention the systematic execution of hyperbaric actions in which the specialists attained a high level of professionalism. This enabled verification of estimated wear and the replacement of the tools at the proper time.

3.4. Wear on tools

One of the products of the experience of systematic revisions performed since the beginning was the power to prevent the large scale wear suffered in time. This applied to tools as well as their supports, and, which is more serious, the rotary cutter's metal structure.

The cutter's condition forced it to be completely repaired in one of the watertight areas (shaft nr.2) before the tunnel under the river despite the extension of the deadline that this entailed.

The main cause of this deterioration was attributed to the flinty nature of the materials of the Guadalquivir alluvium coming from the river's high course. Wear was greater in the sections of both river margins, where there was an abundance of formations of gravel of small size, intermediate size and practically without, sandy silts or fine sands (< 1,2 mm).

However, it was also presumable that a design with only four radii to mount heavy tools (rippers) and the variable opening system had much to do with the enormous wear suffered. Due to the above circumstances, at the end of the Tunnel 1 intermediate period, the decision was made to conduct a study of a new design to manufacture a second rotary cutter for building Tunnel 2.

4. Tunnel 2 construction

4.1. The new rotary cutter

The design of a new rotary cutter was based on the following decisions, the result of previous experiences:

gastes fueron mayores en los tramos de ambas márgenes del río, en los que abundaron las formaciones de gravas con escasos tamaños intermedios y prácticamente sin limos o arenas finas (Tamaños <1,2 mm).

Pero también era presumible que un diseño con sólo cuatro radios para montar herramientas pesadas ("rippers") y el sistema de aberturas variables tenían mucho que ver con el enorme desgaste sufrido. Por todo ello, al final del período intermedio del Túnel nº 1 se tomó la decisión de hacer el estudio de un nuevo diseño para fabricar una segunda rueda de corte, destinada a la construcción del Túnel nº 2.

4. Construcción del Túnel nº 2

4.1. La nueva rueda de corte

El diseño de una nueva rueda de corte se basó en las siguientes decisiones, fruto de las experiencias anteriores:

- Abandonar el diseño de aberturas variables, quizás interesante para terrenos cohesivos, pero no para el caso presente, porque se reduce la posibilidad de implantar herramientas pesadas, además de ofrecer una superficie no utilizada que aumenta notablemente el rozamiento.
- Disponer del número máximo posible de herramientas pesadas (tipo "ripper") para asegurar el arranque de las gravas no cohesivas de alta abrasividad con desgastes mínimos.
- Montar en cualquier caso herramientas menores (del tipo "scraper") a lo largo de los bordes de las aberturas para encauzar la entrada de materiales de tamaño menor a la cámara, evitando a la vez el desgaste de dichos bordes.
- Cuidar el diseño de una herramienta central robusta con aberturas adecuadas a la cámara.
- En todo caso, aprobar o modificar el número y posición de las herramientas una vez excavado el primer tramo entre estaciones.

La fabricación de una nueva rueda de corte se complementó con las siguientes mejoras:

- Aumentar el número de puntos de inyección de aditivos con una séptima línea de espumas en el frente de la rueda; 2 grupos de 3 puertos (6 posibles líneas)



Fig. 6. Vista general de la nueva rueda de corte/ General view of the new rotary cutter.

- To abandon designing variable openings, perhaps interesting for cohesive terrain, but not in this case. This is because the possibility of implementing heavy tools is reduced. In addition, it offers an unused surface that noticeably increases friction.
- Provide the maximum number of heavy tools (rippers) to ensure the high abrasiveness non-cohesive gravel is ripped out.
- In any event, assemble smaller tools (scrapers) along the edges of the openings to channel the entry of smaller materials into the chamber, and at the same time avoiding wear of said edges.
- Take care to design a robust central tool with openings that fit the chamber.
- In any event, approve or modify the number and position of the tools once the first section between stations has been excavated.

Manufacturing a new rotary cutter was complemented with the following improvements:

- Increase the number of additive injection points to 7 on the front part of the wheel; 2 groups of ports (upto 6 possible lines) on the screw and some larger ports (3" - 4" diameter) on the bulkhead, to inject high pressure water, or bentonite slurry inside the chamber.
- Design the onsite mechanization of the cutter coupling to restore the initial exact tolerances, to avoid the risk of using the old ones.
- Provide an additional support to the outside seal of the bearing.

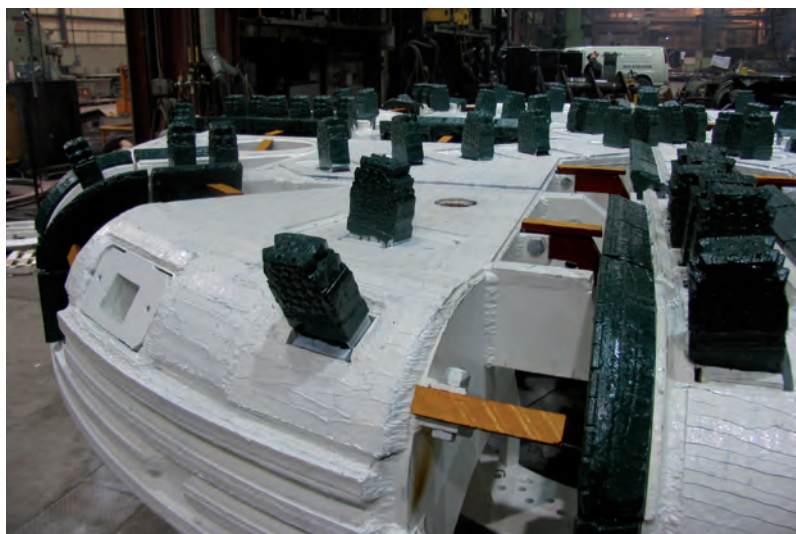


Fig. 7. Nueva rueda de corte.
Detalle/New rotary cutter. Detail.

en el tornillo y puertos mayores de 3" a 4" practicados en el mamparo para añadir agua a alta presión, bentonita, etc.

- Diseñar la mecanización "in situ" de las pistas que alojan los sellos Merkel para restablecer las tolerancias exactas de fabricación, evitando el riesgo de usar pistas marcadas.
- Mejorar el apoyo del sello exterior del cojinete.

4.2. Período inicial

Al término de la construcción del túnel 1, se llevó a cabo el desmontaje y traslado de la tuneladora, desde el Pozo de extracción anexo a la Estación San Bernardo, hasta el Pozo de ataque de la Estación Parque de los Príncipes, siguiendo dos líneas de actuación:

1) Desmontaje, montaje y operaciones complementarias:

- La tuneladora: se sacó con grúas del Pozo de extracción y se trasladó por piezas con camiones góndola. Esta operación se inició el 4 de junio de 2007 llegando todos los componentes de la máquina al Pozo de ataque el día 12. El día 13 de junio de 2007 empezaron los trabajos de montaje.
- El "back-up" no se desmontó, sino que se trasladó entero a través del túnel construido, montado sobre 14 chasis de vagones tirados todo ello por una locomotora Schöma 350 con tandem. Esta operación que se llevó a cabo en tres días, evitó la ocupación de vías en la zona de extracción de la tuneladora.

Fig. 8. Nueva rueda de corte.
Detalle/New rotary cutter. Detail.

4.2. Initial period

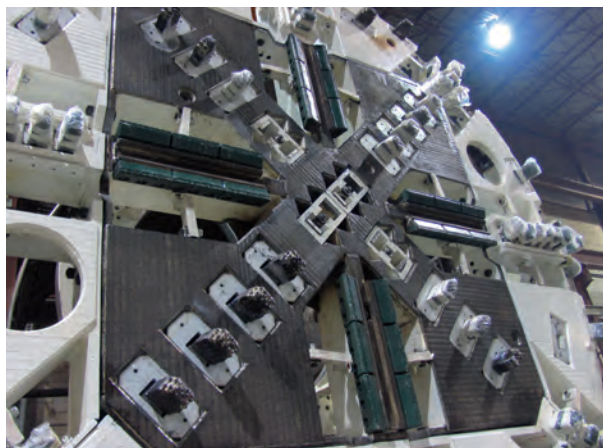
At the end of tunnel 1 construction, the tunnel boring machine was dismantled and transferred from the extraction pit adjoining San Bernardo Station to the Parque de los Príncipes Station working shaft by following two courses of action

1) Dismantling, erection and complementary operations:

- The tunnel boring machine was removed from the extraction shaft with cranes and transferred in pieces with flatbed trucks. This operation began on June 4, 2007. All of the machine's components arrived at the working shaft on June 12. The erection work began on June 13, 2007.
- The "backup" was not dismantled, rather it was moved whole via the tunnel built, mounted on 14 car chassis all pulled by a Schöma 350 locomotive with tandem. This operation, which took place in three days, avoided use of track in the tunnel boring machine extraction area.

Assembly of the tunnel boring machine system ended on September 3, 2007, thus covering a period of three months. During this time, in addition to dismantling, moving and re-erection, other maintenance operations and minor repairs to the machine were carried out.

One of these operations consisted of the aforementioned mechanization of the housing tracks of the main bearing seals that was performed onsite between July 31 and August 2, 2007. A lathe head was used to carry out this operation. It was coupled to the rotary cutter anchor plate and driven by one of the machine's own rotary gear motors.



El montaje del conjunto de la tuneladora se terminó el día 3 de septiembre de 2.007, cubriendo un período de tres meses, en los cuales, además del desmontaje, traslado y nuevo montaje se realizaron diversas operaciones de mantenimiento y reparaciones menores de la máquina.

Una de esas operaciones consistió en la mecanización ya mencionada de las pistas de alojamiento de los sellos del cojinete principal, que se realizó en la obra entre los días 31 de julio y 2 de agosto de 2.007. Para llevar a cabo esta operación se utilizó un cabezal de torno que se acopló al plato de anclaje de la rueda de corte, accionada por uno de los motorreductores de giro de la propia máquina.

2) Conformación definitiva de las nuevas herramientas de corte:

Al reanudar los trabajos de excavación de este segundo túnel con la nueva rueda de corte se observó un comportamiento distinto al obtenido en el primer túnel trabajando en tramos con similar disposición geológica. Este comportamiento se traducía en un composición del par de giro y del empuje de la máquina, disminuyendo a su vez la velocidad de avance. Se concluyó que la distribución de las aberturas y de las herramientas en la nueva rueda de corte justificaba este comportamiento.

La distribución de las aberturas representaba aproximadamente la misma superficie que en la rueda antigua, pero son aberturas más pequeñas, y por tanto más propensas a obstruirse con el material, sobre todo si tiene % sensibles de finos. Ello obligó a redimensionar en repetidas ocasiones el acondicionamiento del terreno y cuando se llegó al siguiente recinto estanco (Estación Plaza de Cuba) se optó por reducir el número de herramientas pesadas o "rippers" (hasta 14 de ellas) en el tercio periférico de la rueda con una distribución adecuada y dejando la zona central con todas las herramientas tipo "scraper". Con estas modificaciones la nueva rueda de corte seguía teniendo, a pesar de la reducción, mayor número de herramientas y mejor distribuidas que la rueda primera, por lo que se mejoraron sustancialmente los parámetros de excavación.

4.3. Período intermedio. Segundo paso del río

En la última semana de octubre de 2.007 se reanudó el período intermedio de la construcción de este segun-

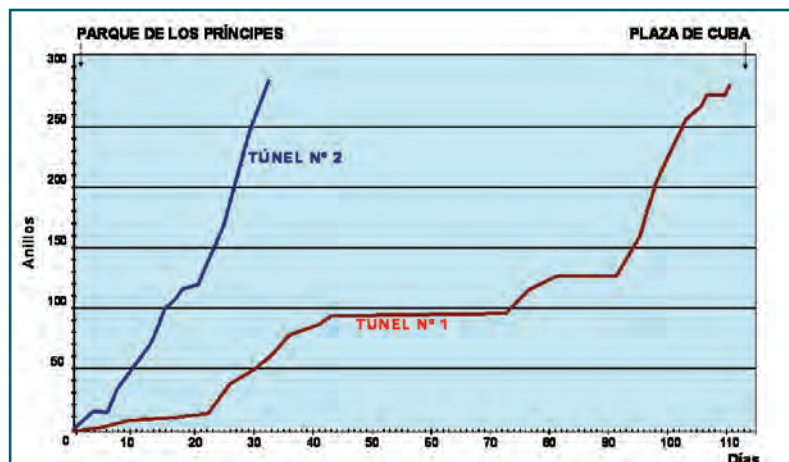


Fig. 9. Avances en ambos túneles (período inicial)/ Progress in both tunnels (initial period).

2) Final structure of the new cutting tools:

Upon resuming excavation work of this second tunnel with the new rotary cutter, behavior that was different from the behavior obtained with the first one was observed. This was while working on sections with a similar geological composition. This behavior translated into an increase of the machine's rotary torque and thrust, thus decreasing its forward speed. It was concluded that the distribution of openings and tools in the new rotary cutter justified this behavior.

The distribution of openings represented approximately the same area as in the old cutter. However, they are smaller openings and therefore more prone to being obstructed with the material, especially if it has a sensitive percentage of fine particles. That forced us to reshape, on several occasions, the land's conditioning.

Furthermore, when the next watertight area was reached (Plaza de Cuba station), the professionals chose to reduce the number of heavy tools or "rippers" (up to 14 of them) in the cutter's most outlying third with a proper distribution, and by leaving the central area with the type scraper tools. With these modifications, the new rotary cutter still had, despite the reduction, a greater number of tools and better distributed ones than the first cutter. Therefore, the excavation parameters were substantially improved.

4.3. Intermediate period. Second river tunnel.

During last week of October of 2007, the intermediate period of construction of this second tunnel was resumed. It took fewer than two months to execute it. This was fundamentally due to two factors: a) the accumulated experience from the first tunnel from the machine

do túnel. Su ejecución tuvo un plazo inferior a dos meses, debido fundamentalmente a dos factores: a) la experiencia acumulada del primer túnel desde el punto de vista de operación de la máquina y b) las experiencias de las medidas de seguridad y defensas realizadas, que se había construido para los dos túneles con carácter previo a la ejecución del paso en el primero de ellos.

El paso del río propiamente dicho se realizó en este segundo túnel entre los días 19 y 30 de noviembre de 2.007, (tres días menos que el primer paso), y de nuevo se alcanzaron buenos rendimientos (24 anillos o 33,6 metros en el mejor día), favorecidos también en este caso por la presencia de una capa de margas en la parte inferior de la sección de excavación.

Sin embargo, tras el paso del río, la sección de excavación comprendía en su totalidad un estrato de gravas sin apenas matriz arenosa, produciendo incidencias que obligaron a reacondicionar el material con adición directa de polímeros al tornillo sinfín y lodo bentonítico aditivado con polímero reductor de agua en la cámara de excavación (en un 7,5% aproximadamente) para mantener uniforme la presión en la cámara. Este reacondicionamiento del material implicó oscilación en los parámetros de excavación con variaciones en el par de giro y velocidad de avance, lo que supuso una merma notable del rendimiento.

Salvo en tramo antes señalado, con la conformación anteriormente comentada (más herramientas y mejor distribuidas) y la experiencia obtenida en el túnel 1, se pudo reducir el número de revisión de herramientas y mantener uniformes los parámetros de excavación uniformes.

Se debe destacar, sin embargo, que en los avances sin incidencias reseñables el par de giro con esta nueva rueda ha sido superior al obtenido con la anterior (de 150 – 200 t x m en el túnel 1 se paso a 250 – 300 t x m en el túnel 2), debido, al diseño de la misma. No obstante se mantuvo por el bajo del 50% del Par nominal.

4.4. Período final

Iniciado a mediados de diciembre de 2.007, en el subsuelo de la plaza (y futura estación) Puerta de Jerez, se produjo un incidente por atasco del tornillo y otro por rotura de un anillo mal colocado, lo que paralizó el avance durante un total de unos 25 días, alcanzando a la estación Prado de San Sebastián en la primera semana de febrero de 2.008 y completando la construcción

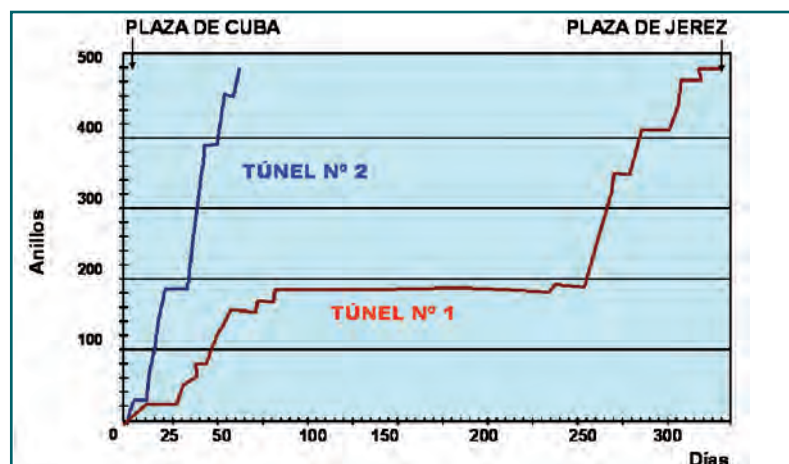


Fig.10. Avances en ambos túneles (período intermedio)/Progres in both tunnels (intermediate period).

operation point of view and b) the experiences from safety measures and defense made, that they were built for both tunnels before execution of the first river tunnel section.

The river tunnel as such was performed in this second tunnel between November 19 and 30, 2007 (three days less than the first tunnel), and good performance was reached once a gain (24 rings or 33.6 meters on the best day). In this case, they were also favored by the presence of a layer of marl in the lower part of the excavation section.

Nevertheless, after the river tunnel, the entire excavation section comprised a stratum of gravel without even a sandy matrix. This caused mechanical incidences that forced builders to recondition the excavation material with a direct addition of polymers to the screw and additivized bentonitic mud with water reducing polymers in the excavation chamber (by approximately 8%) to keep the chamber pressure uniform. This reconditioning of material implied an oscillation of the excavation parameters with variations in the rotary torque and forward speed. This meant a decrease in production and therefore in performance as well.

Except for the before referred gravel sections, with the aforementioned conditioning (plus tools and better distributed ones), and by maximizing the experience obtained in tunnel 1, builders have managed to reduce the number of tool checks and have maintained the excavation parameters quite uniform.

We must mention, however, that the rotary torque with this new cutter has always been greater than the one obtained with the previous one (150 – 200 t x m in tunnel 1 at 250 – 300 t x m in tunnel 2) due, in our opinion, to its design. Nevertheless it ever was above 50% of the nominal a torque value.

(Estación San Bernardo) el día 20 del mes de abril de 2.008, con una reducción de plazo de 2 meses respecto al del túnel anterior.

4.5. Rendimientos comparados

En los gráficos anteriores (Figuras 9, 10 y 11) se reflejan los rendimientos obtenidos en ambos túneles.

Los rendimientos por día de trabajo son similares en los períodos intermedios y final, si bien, al considerar los días de calendario difieren notablemente. Las razones fundamentales son dos: el número de intervenciones para revisar las herramientas, que se ha reducido considerablemente en este segundo túnel, a lo que hay que sumar el hecho de que los pasos de estación se han producido con mucha mayor rapidez como se ve en la Fig. 11 (estación intermedia de Prado de S. Sebastián). Estos son los motivos principales por los cuales se produjo el ahorro de plazo del túnel 2.

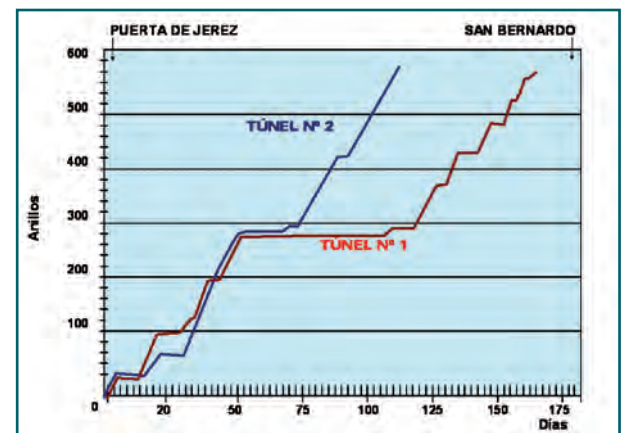
Ahora bien, aparte de los retrasos debidos a averías o incidencias, la influencia de las dificultades generales debidas al las obras y servicios existentes en esta zona histórica de la ciudad, afectaron negativamente los rendimientos en ambos túneles, lo que se debe tener en cuenta junto con los de las estaciones al examinar los plazos globales de la obra.

5. Conclusiones

La construcción del tramo en túnel de la Línea nº 1 del Metro de Sevilla presentó los aspectos principales siguientes:

- 1) Empleo obligado de un escudo EPB fuera de su campo clásico de actuación, invadiendo el de los hidroescudos.
- 2) Excavación en materiales no cohesivos del aluvial del río Guadalquivir, pobres en finos y con una carga de agua importante (3 Bar).
- 3) En este tipo de terrenos, es fundamental un diseño de las ruedas de corte con herramientas pesadas (tipo "rippers") que aseguren la excavabilidad de las gravas sin prescindir de las herramientas ligeras (tipo "scrapers") a lo largo de las aberturas de entrada a la cámara.
- 4) Se confirmó la validez del esquema general de la figura 12, con las posibles mejoras de la actuación con carga de agua (zona 3) que permiten los aditi-

Fig.11. Avances en ambos túneles (período final) / Progress in both tunnels (final period).



4.4. Final period

Begun in mid December of 2007, in the square's subsoil (and future station) Puerta Jerez, builders reached the Prado de San Sebastián Station in the first week of February of 2008. The construction of this tunnel (S. Bernardo station) was completed on April 20, 2008 with a reduction of the construction period by 2 months with regard to the previous tunnel.

4.5. Compared performance

The previous graphs (Figures 9, 10 and 11) reflect the performance obtained in both tunnels.

Performance per workday is similar in the intermediate and final periods, even though, when considering calendar days, they differ noticeably. There are two basic reasons: the number of interventions to check the tools, that has diminished considerably in this second tunnel, to what we must add the fact that the machine crossings through the stations were made much faster. These are the main reasons why it took less time to build tunnel 2 as shows the Figure 11 on the Prado S. Sebastián station crossing.

Now, the influence of these general difficulties due to the works and services existing in this city's historic area negatively affected performance in both tunnels. This must be borne in mind when examining overall deadlines for this project.

Conclusions

Construction of the tunnel section of Line 1 of the Metro of Sevilla presented the following main aspects:

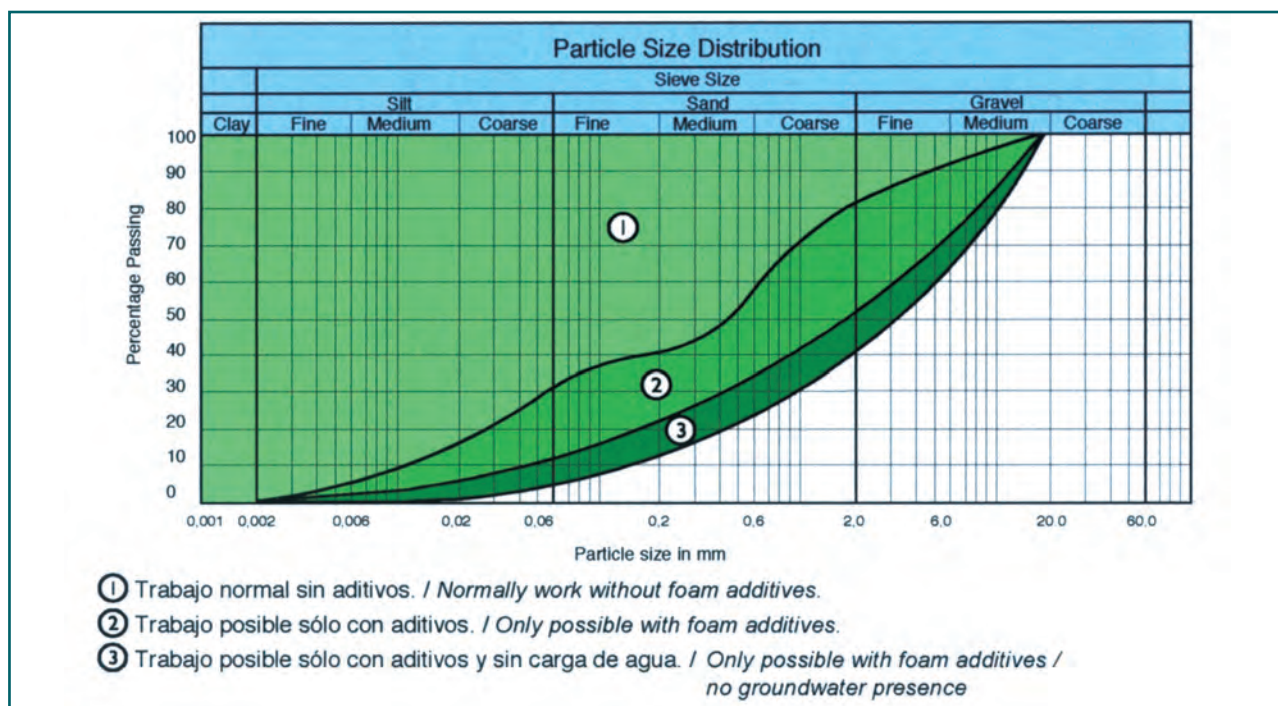


Fig. 12. Posible empleo de escudos EPB/Possible use of EPB shields.

vos modernos; si bien se comprobó la importancia del análisis previo de la granulometría de los terrenos para poder definir las mezclas más adecuadas del material de la cámara.

5) En este sentido se trabajó en Sevilla sobre todo en el tramo final del Túnel nº 1 y en toda ejecución del Túnel nº 2. De las múltiples granulometrías ensayadas pueden adelantarse algunas conclusiones de aplicación general:

- Gravas gruesas (<70 mm) en matrices escasas de finos (0% - 6%). Se detectan oscilaciones de par y taponazos en el tornillo, con pérdida de presión. Se ha conseguido trabajar con cierta normalidad adicionando a la cámara bentonita aditivada con polímero reductor de agua. El lodo bentonítico se fabricó con dotaciones de 150 kg/m³ y, una vez aditivado, se aplicó a base de un 7,5% del volumen excavado (3 m³ de lodo por 40 m³ de terreno en perfil) lo que supone un escaso incremento de finos, entre un 0,4% - 0,8%. Sin embargo, utilizando la bentonita como vía de transporte del polímero con 50 - 60 litros por avance, se consiguieron ciclos de producción prácticamente continuos.
- Gravas gruesas con finos limosos y arcillosos (7% - 11%). No ha sido necesario emplear bentonita sien-

- 1) Compulsory use of an EPB shield outside its classic field of action, thus invading the hydroshields' field.
- 2) Excavation of non-cohesive materials of the Guadalquivir River alluvium, poor in fine gravel and with a major water load (3 Bar).
- 3) In this type of terrain, a cutter design with heavy tools (rippers) is fundamental. These tools must ensure the excavability of the gravel without doing away with the light tools (scrapers) along the chamber's entrance openings.
- 4) The validity of the general diagram in figure 12 was confirmed with the possible improvements of the action with groundwater in area 3 that allow modern additives; even though that the importance of a preliminary analysis and grading of the land was confirmed. This was in order to be able to define the most appropriate mixes of material for the chamber.
- 5) This is how work was performed in Sevilla, especially in the final section of Tunnel 1 and the entire execution of Tunnel 2. Some general conclusions may be anticipated from the multiple grading tested:

- Coarse gravel (<70 mm) in low fine particle matrices (0% - 6%). Torque oscillations and pops have been detected in the screw with loss of pressure. Professionals have managed to work with certain normality by adding bentonite and additives with

do suficiente las espumas aplicadas en el frente para acondicionar la mezcla.

- Gravas en proporción menor, en una matriz de granulometría continua (finos limosos y materiales arcillosos > 11%). Se acondiciona la mezcla solo con espumas al frente logrando los mejores avances

La experiencia de Sevilla ha abierto la posibilidad de ampliar el empleo de los escudos EPB en la zona 3 del gráfico. No obstante, hemos de advertir que la inmediata extrapolación de las experiencias de Sevilla a máquinas más grandes habría de calificarse de peligrosa imprudencia, con posibles consecuencias muy graves, porque es ineludible ampliar las investigaciones para resolver aspectos todavía sin una solución clara.

En esta labor es imprescindible la firme participación de los fabricantes de aditivos químicos y de tuneladoras, con sus laboratorios colaboradores, a fin de realizar las investigaciones necesarias para el logro de objetivos aún sin conseguir, de los que, sin pretender ser exhaustivos, señalamos:

- Nuevos aditivos químicos, adaptados a la problemática de los terrenos no cohesivos, excavados con escudos EPB.
- Mejora, y aumento de su capacidad, de los sistemas para la aplicación de aditivos en la rueda, en la cámara y en el tornillo.
- Diseños de mezclas y equipos adecuados para la aportación de finos a la cámara (como pueden ser los tanques con agitador para lodos bentoníticos de alta densidad), en cantidades superiores al 6% de finos arcillosos en el total a excavar. ♦

Referencias/References:

- Braach, O. et al (2003). WESTERHELDE TUNNEL RETC Proceedings.
- Chapman, D. et al (2005). BWARI TUNNELLING UNDERWAY RETC Proceedings.
- Corcoran J. (2005). CONSTRUCTING THE AIRSIDE ROAD TUNNEL HEATHROW AIRPORT RETC Proceedings.
- Francis M et al (2005). ASSESSMENT OF SETTLEMENT DUE TO EPBM TUNNELING IN LONDON, UK, ON CTRL CONTRACT 240 RETC Proceedings.
- Grandori, R et al (2005). CONSTRUCTION OF THE TURIN METRO LINE 1 TUNNEL BY N.3 EPB -TBMS RETC Proceedings.
- Herrenknecht M et al (1999). THE NEW GENERATION OF SOFT GROUND TUNNELLING MACHINES RETC Proceedings.
- Maidl B. et al MECHANISED SHIELD TUNNELING Erns & Sohn 1997.
- Maidl U. (2003). GEOTECHNICAL AND MECHANICAL INTERACTIONS USING THE EARTH PRESSURE BALANCE SHIELD TECHNOLOGY IN DIFFICULT MIXED FACE CONDITIONS RETC Proceedings.

water reducing polymers to the chamber. The bentonitic mud was produced with 150 kg/m³ of water and, once added, it was applied based on 7.5% of the excavated volume (3 m³ of mud per 40 m³ of land in profile). This means a low increase of fine particles, between 0.4% - 0.8%.

However, by using bentonite only as a means of transporting polymers with 50 - 60 liters per advance, practically continuous production cycles were attained.

- *Course gravel with silty and clay particles (7% - 11%). It has not been necessary to use bentonite, as the foams applied to the front are sufficient for preparing the mix.*
Professionals will test by adding bentonite to the route's final section to see whether results improve.
- *Gravel in a lesser proportion, in a continuous grading matrix (fine, silty and clay particles > 11%) the mix is prepared only with foam on the front, thus achieving the best progress*

The Seville experience has opened up the possibility of expanding EPBs use in area 3 of the graph. However, we have to warn that the direct extrapolation of the experiences from Seville to the great diameter machines would have to be qualified as a dangerous imprudence, due to its possible very serious consequences, because it is unavoidable to extend the investigations to solve some aspects without a clear solution up the now.

For this work the firm participation of the manufacturers of chemical additives as well as of the TBMs builders is essential, with their collaborating laboratories, in order to still carry out the necessary investigations to achieve the pending aims. About these, and without trying to be exhaustive, we indicate the following ones:

- *New chemical additives, adapted to the problems of noncohesive terrains, which are to be excavated by EPS shields.*
- *The improvement, and the increasing of its capability, of the systems for the application of additives to the wheel, the chamber and the screw of the machines.*
- *New design of mixtures and equipments adapted for the contribution of fine particles to the chamber (as they can be the tanks with agitator for bentonitic HD muds) in such proportions that ensure figures above 6% of fine clayed materials inside the chamber. ♦*