

Innovaciones tecnológicas en la construcción con tuneladoras

Technological innovations in tunnel construction

Ramón Fernández Martínez. Ingeniero Técnico Industrial
Director técnico de SPICC, S.L. Madrid (España). rfm@spicc.e.telefonica.net

Resumen: El autor expone las innovaciones tecnológicas más significativas de los últimos 5 años, relativas a las TBMs, agrupándolas en los apartados siguientes: Mayores tuneladoras actuales; Diseños básicos duales; Sistemas de transporte de escombros; Elección del tipo de escudo de frente en presión; Herramientas actuales de las TBMs; Componentes y Equipos complementarios y auxiliares; Revestimientos prefabricados actuales y tendencias futuras; El PLC como elemento básico de gobierno de la TBM y, finalmente, la Modelización de los estudios y el Control de la producción. Esta Comunicación fue presentada el 10 de Mayo 2011 en la JORNADA SOBRE AVANCES TECNOLÓGICOS EN LA INGENIERÍA DE TÚNELES organizada por la Universidad Politécnica de Madrid y AETOS.

Palabras Clave: Grandes tuneladoras; Diseños duales; Cinta continua; Cortadores de disco; Herramientas tipo scraper y ripper; Reposición de herramientas; Ondas acústicas; Revestimiento; Mortero bicomponente; Anillos armados flexibles; PLC estudios de producción

Abstract: The author explains the most significant technological innovations of the last 5 years with regard to TBM's, grouping them in the following sections: Largest current tunnel boring machines; Basic dual designs; Debris transport systems; Choice of pressure front shield type; Current TBM bits; Complementary and auxiliary components and equipment; Current prefabricated linings and future trends; The PLC as basic control element of the TBM and, finally, Modelling of studies and production control. This communication was presented on 10 May 2011 at the CONFERENCE ON TECHNOLOGICAL ADVANCES IN TUNNEL ENGINEERING organized by the Polytechnic University of Madrid and AETOS.

Keywords: Large TBMs; Dual designs; Continuous conveyor belt; Disc cutters; Scraper and ripper tools; Bits changing; Sound waves; Linig; Bicomponent mortar; Flexible armed segments; PLC, production estimate

1. Introducción

En esta intervención se tratarán los aspectos más representativos de las innovaciones tecnológicas, en cuanto afectan a los Métodos constructivos empleados en la construcción de túneles con máquinas integrales.

Dentro de ese contexto, se incluyen también las innovaciones cuya introducción en la construcción se inició hace algunos años, si bien su aceptación general, por diversas razones, ha tenido lugar en los últimos 5 años.

En todo lo que sigue se facilitan referencias recientes, relacionadas con los aspectos técnicos que se comentan, relativos a las tuneladoras, que constitu-

1. Introduction

In this intervention, we will deal with the most representative aspects of technological innovations to the extent that they affect the construction methods used in tunnel buildings with integrated machines.

In this context, we also include the innovations whose introduction in construction began some years ago, although their general acceptance, for various reasons, has taken place over the last 5 years.

In all that follows, recent references are given, related to the technical aspects mentioned, with regard to the tunnel boring machines that constitute the most widely used technology today in mechanized tunnel building.

yen la tecnología más utilizada hoy día en la construcción mecanizada de túneles.

2. Tipología y características de las TBMs y sus equipos y de las instalaciones básicas para su funcionamiento

2.1. Parámetros y tamaños de las mayores tuneladoras actuales

a) Los valores nominales máximos de los parámetros de los mayores Escudos EPB actuales son los siguientes:

Par. . . $M = \alpha \times D^3_{exc}$	M (kNm) D (m) $\alpha_{act} \approx 20 \dots \alpha_{fut} \rightarrow 25-27$
Empuje $F = 100 \times K \times S_{exc}$	F (kN) S (m ²) $K_{act} \approx 12 \dots K_{fut} \rightarrow 15-17$

Para los Hidroescudos puede considerarse el 80% de estas cifras

b) Los tamaños máximos actuales (Diámetros de excavación) de los diversos tipos de tuneladoras son (7) (8) (10)

- Hidroescudos $\varnothing = 15,45$ m (Shanghai) \rightarrow
 \rightarrow Proyecto $\varnothing 17,7$ m (Moscu)
- Escudos EPB $\varnothing = 15,20$ m (Madrid)
- Doble escudo (roca) $\varnothing = 12,34$ m (Brisbane)
- Topos (roca dura) . . . $\varnothing = 12,40$ m (Jinping-China)

Está en fase de diseño para su fabricación inmediata un:

Escudo EPB $\varnothing = 17,60$ m (Alaska Way Tunnel Seattle) (4) (5) (22)

2.2. Diseños duales de tuneladoras

Los primeros diseños duales de los escudos (1990-98) para trabajar, bien en "modo abierto", o "con frente en presión", tenían como objetivo final reducir los costes del avance. La base de partida era realizar el cambio de sistema según la estabilidad que presentaran los frentes a lo largo del trazado del túnel. Por otra parte, y de manera implícita,

2. Types and characteristics of TBM's and their equipment and of the basic facilities for their operation

2.1. Parameters and sizes of the largest current tunnel boring machines

a) The maximum nominal values of the parameters of the largest current EPB shields are as follows:

Torque. . . $M = \alpha \times D^3_{exc}$	M (kNm) D (m) $\alpha_{act} \approx 20 \dots \alpha_{fut} \rightarrow 25-27$
Thrust $F = 100 \times K \times S_{exc}$	F (kN) S (m ²) $K_{act} \approx 12 \dots K_{fut} \rightarrow 15-17$

For Mixshields, 80% of these figures can be considered

b) The maximum current sizes (excavation diameters) of the various types of tunnel boring machine are (7) (8) (10)

- Mixshields $\varnothing = 15.45$ m (Shanghai) \rightarrow
 \rightarrow Project $\varnothing 17.7$ m (Moscow)
- EPB shields $\varnothing = 15.20$ m (Madrid)
- Double shield (rock) $\varnothing = 12.34$ m (Brisbane)
- Moles (hard rock) . . $\varnothing = 12.40$ m (Jinping - China)

In design phase for immediate manufacture there is an:

EPB shield $\varnothing = 17.60$ m (Alaska Way Tunnel Seattle) (4) (5) (22)

2.2. Dual tunnel boring machine designs

The final aim of the first dual designs of shields (1990-98), to work either in "open mode" or with "pressure front", was to reduce the costs of the advance. The starting point was to make the change of system according to the stability shown by the fronts along the route of the tunnel. On the other hand, and in an implicit way, these designs were intended to be a complement to the insufficient inspection and prior testing of the materials of the route, conducted for the drafting of the tunnel project.

It was soon possible to demonstrate the serious consequences of attempts to change from working in

tales diseños pretendían ser el complemento de los insuficientes reconocimientos y ensayos previos de los materiales del trazado, realizados para la redacción del proyecto del túnel.

Pronto se pudieron comprobar las graves consecuencias de los intentos de pasar del trabajo en “modo abierto” a operar con “frente en presión”: la maniobra requería un tiempo excesivo, y los hundimientos en el frente o de tipo dorsal se multiplicaron. Consecuencia de ello fue la imposición del trabajo “en abierto” utilizando el tornillo del escudo, es decir, en la práctica se proscribió la extracción con cinta del escombros y, por tanto, el diseño dual.

a) Diseños duales más frecuentes

Pues bien, en los últimos 10 años fueron evidentes las mejoras de los estudios previos de los terrenos y con ellas han reaparecido los diseños duales de los escudos, tanto el “Escudo EPB / Escudo abierto”, como el “Hidroescudo” / “Escudo abierto”. La diferencia con la etapa anterior está en que previamente se pueden elegir los tramo/s del túnel que se excava/n de uno u otro modo (11) (16) (20) (21) y, en definitiva, la tendencia actual puede resumirse así.

- La transformación necesaria en el caso “Escudo EPB” / “Escudo abierto” es menos gravosa, ya que la cinta continua a lo largo del túnel sirve de instalación común.
- Por el contrario, en el caso “Hidroescudo” / “Escudo abierto”, hay una duplicación del sistema de transporte (circuito de lodos y cinta continua o trenes), pero cada vez se tiende más a considerar convencionales estos medios auxiliares y, por tanto, de existencia debida en cualquier empresa especializada.
- Otra razón a favor de este tipo de diseños es aprovechar la “configuración en abierto” para el reconocimiento y/o tratamiento del terreno desde el frente.
- Por último, hay que tener en cuenta que el propio diseño de “Escudo abierto” conlleva una reducción del coste de fabricación respecto de otro tipo de solución, pero, de todas formas, en los túneles que se vienen realizando últimamente con diseños duales, siempre se com-

“open mode” to operating with “pressure front”: the manoeuvre required too much time, and subsidence at the front or of a dorsal type increased. A result of this was the imposition of “open” work using the screw of the shield, i.e. in practice, extraction of debris using belts and, therefore, dual design, was banned.

a) Most common dual designs

Anyway, over the last 10 years, improvement in the prior study of land has become evident and, as a result, dual shield designs have reappeared, both in the “EPB shield / open shield”, and the “Hydroshield” / “open shield”. The difference from the previous period is in the fact that the section(s) of tunnel to be excavated in one way or another can be chosen previously (11) (16) (20) (21) and, in short, the current trend can be summed up in this way.

- *The transformation required in the “EPB shield / open shield” case is less burdensome, since the continuous belt along the whole of the tunnel is used as a common installation.*
- *On the other hand, in the “Hydroshield” / “open shield” case, there is a duplication of the transport system (mud circuit and continuous belt or trains), but there is an increasing trend to consider these auxiliary media conventional and, therefore, of necessary existence in any specialized company.*
- *Another reason in favour of this type of design is to make use of the “open configuration” for the inspection and/or treatment of the land from the front.*
- *Finally, it should be taken into account that the “open shield” design itself involves a reduction in manufacturing cost with regard to other types of solution, but, in any case, in the tunnels being made recently with dual designs, it is always verified previously that the decision in favour of dual design results in a lower final cost of the tunnel than that of any possible alternative.*

b) Less common dual designs

In those cases where it is necessary to work with pressure front throughout the route of the tunnel, it is the characteristics of the terrain that raise the possible appropriateness of a dual design, “Hydroshield” / “EPB shield”.

prueba previamente que la decisión a favor del diseño dual se traduce en un coste final del túnel más reducido que el de cualquier posible alternativa.

b) Diseños duales menos frecuentes

En los casos de obligado trabajo con frente en presión a lo largo de todo el trazado del túnel, son las características de los terrenos las que plantean la posible conveniencia de un diseño dual “Hidroescudo” / “Escudo EPB”.

- Un proyecto de obligada referencia a este respecto fue el del Túnel de la Autopista A-86 Paris, del Periférico oeste (zona de Versailles), de 10,5 km de longitud y 11,56 m de \varnothing_{exc} con dos calzadas superpuestas para sendos sentidos de tráfico de vehículos ligeros.
- Se decidió un diseño dual “Hidroescudo” / “Escudo EPB”, proyectado y construido por HERRENKNECHT, para trabajar respectivamente en terrenos granulares no cohesivos (arenisca blanda y arenas) o en terrenos cohesivos (arcillas plásticas). La consecuencia fue la necesaria duplicación de las instalaciones de transporte de escombros, así como de los medios auxiliares del escudo.
- El diseño presentó la característica de que los cambios a realizar en la TBM se diseñaron para poderlos realizar en obra en un periodo de unas 3 semanas, lo que, unido a que solo fue necesario hacer una transformación a lo largo de los 10,5 km de longitud, permitió asegurar un plazo mínimo de ejecución, con reducción del coste final, comparado con el de otras alternativas estudiadas.

No obstante todo lo anterior, el interés que este diseño dual tiene en la actualidad se ha visto también limitado por la posibilidad, que se comenta más adelante, de ampliación del campo de utilización de los tipos básicos de escudos de frente en presión.

2.3. El sistema de transporte de escombros

Los incrementos del tamaño, y, por tanto, de la capacidad de producción de las tuneladoras, están íntimamente ligados al Transporte de escombros

- A project of obligatory reference in this respect was that of the A-86 Paris motorway tunnel, west loop (Versailles area), of 10.5 km in length and 11.56 m. in \varnothing_{exc} , with two superimposed roadways for two different directions of light vehicle traffic.
- It was decided to use a dual design, “Hydroshield” / “EPB shield”, offered and built by HERRENKNECHT, to work respectively in granular, non-cohesive terrain (soft sandstone and sand) or in cohesive terrain (plastic clays). The result was the necessary duplication of the debris transport facilities as well as the auxiliary media of the shield.
- The design had the feature that the changes to be made in the TBM were designed in order to be carried out on site in a period of about 3 weeks, which, combined with the fact that it was only necessary to make one transformation over the 10.5 km of length, made it possible to ensure a minimum period of implementation, with reduction in the final cost, compared with that of other alternatives studied.

Notwithstanding the foregoing, the interest of this dual design at the present time is also limited by the possibility, discussed below, of increasing the field of use of the basic types of pressure front shields.

2.3. Debris transport system

The increases in size and, therefore, production capacity of tunnel boring machines are closely linked to debris transport which, except in the case of mixshields, has just three alternatives:

Wagon train, dumper or conveyor belt

a) Wagon Trains and Dumpers

With the usual rate of advance in today's tunnel boring machines, whether they be hard rock tunnel boring machines or open or EPB type shields:

- The application of today's most powerful construction locomotives is limited to tunnel boring machines with an excavation diameter of around 9.0 m.
- In any case, the use of trains has the drawback of the waste of time caused by ordinary manoeuvres

que, aparte del caso de los Hidroescudos, sólo tiene 3 alternativas:

Trenes de vagones, Dumpers o Cinta continua

a) Trenes de vagones y Dumpers

Con la velocidad de avance usual hoy día en las tuneladoras, tanto si son de roca dura, como si se trata de escudos abiertos o de tipo EPB:

- Las más potentes locomotoras actuales de construcción tienen su límite de aplicación a las tuneladoras de un diámetro de excavación del orden de 9,0 m.
- En todo caso, el empleo de trenes tiene los inconvenientes de las pérdidas de tiempo derivadas de las maniobras ordinarias o de los incidentes que suelen ocurrir (averías, descarrilamientos, etc)
- El empleo de dumpers sobre ruedas para las grandes secciones crea problemas de posicionamiento a la carga y de cruce de las unidades y, sobre todo, de ventilación del túnel, todo lo cual afecta al rendimiento de la TBM.

b) Cinta continua a lo largo del túnel (3)(18)

Por todo lo anterior, la opinión actual más generalizada es la siguiente:

- La solución por cinta ofrece capacidades muy sobradas para el transporte de escombros en túneles de gran sección ($\varnothing_{exc} > 9$ m) aunque la TBM esté avanzando al ritmo máximo.
- La ventilación del túnel se mejora notablemente, al reducir a un mínimo el número de locomotoras u otros vehículos de transporte con motores de explosión.
- La cinta continua no tiene pérdidas de tiempo por maniobras o averías frecuentes y las paradas para su prolongación pueden programarse.
- La cinta es imprescindible para mantener los rendimientos en túneles largos. La banda construida con armadura de cable puede alcanzar longitudes de túnel de hasta 20 km.
- Aún en longitudes de túnel de unos 2 km muchos especialistas consideran que la cinta es la solución óptima para TBMs de gran tamaño.

or the incidents that generally occur (breakdowns, derailments, etc.)

- *The use of dumpers on wheels for the large sections creates problems of load positioning and the crossing of units and, above all, tunnel ventilation, all of which affects the performance of the TBM.*

b) Conveyor belt along the tunnel (3)(18)

For all these reasons, the most widespread current view is as follows:

- *The belt solution offers ample capacity for debris transport in tunnels with a large cross-section ($\varnothing_{exc} > 9$ m) even if the TBM is advancing at maximum rate.*
- *Tunnel ventilation improves notably, by minimizing the number of locomotives or other vehicles with combustion engines.*
- *With the conveyor belt there is no time-wasting due to manoeuvres or frequent breakdowns, and stops for its extension can be scheduled.*
- *The belt is indispensable for maintaining yields in long tunnels. The belt built with cable armour can reach tunnel lengths of up to 20 km.*
- *Even in tunnel lengths of about 2 km., many experts consider the belt to be the optimum solution for large TBM's.*

2.4. Choice of earth pressure balance shield type

a) Criteria based on the grain size of the terrain

- *The graph summarizing these criteria should be considered as purely indicative. (See Figure 1)*
- *Even in case of the terrain falling within one of the "fields" of application indicated, it is necessary to choose the appropriate additives with prior laboratory testing of samples of the terrain (12).*
In other words, the choice and rate of application of the additives to achieve optimum conditioning of the terrain must be determined by laboratory tests, because this decision does not only depend on the grain size of the terrain (17).
- *For instance, with regard to the workability of the mix, a particular type of treatment can be improved by simply varying the FIR of a foam*

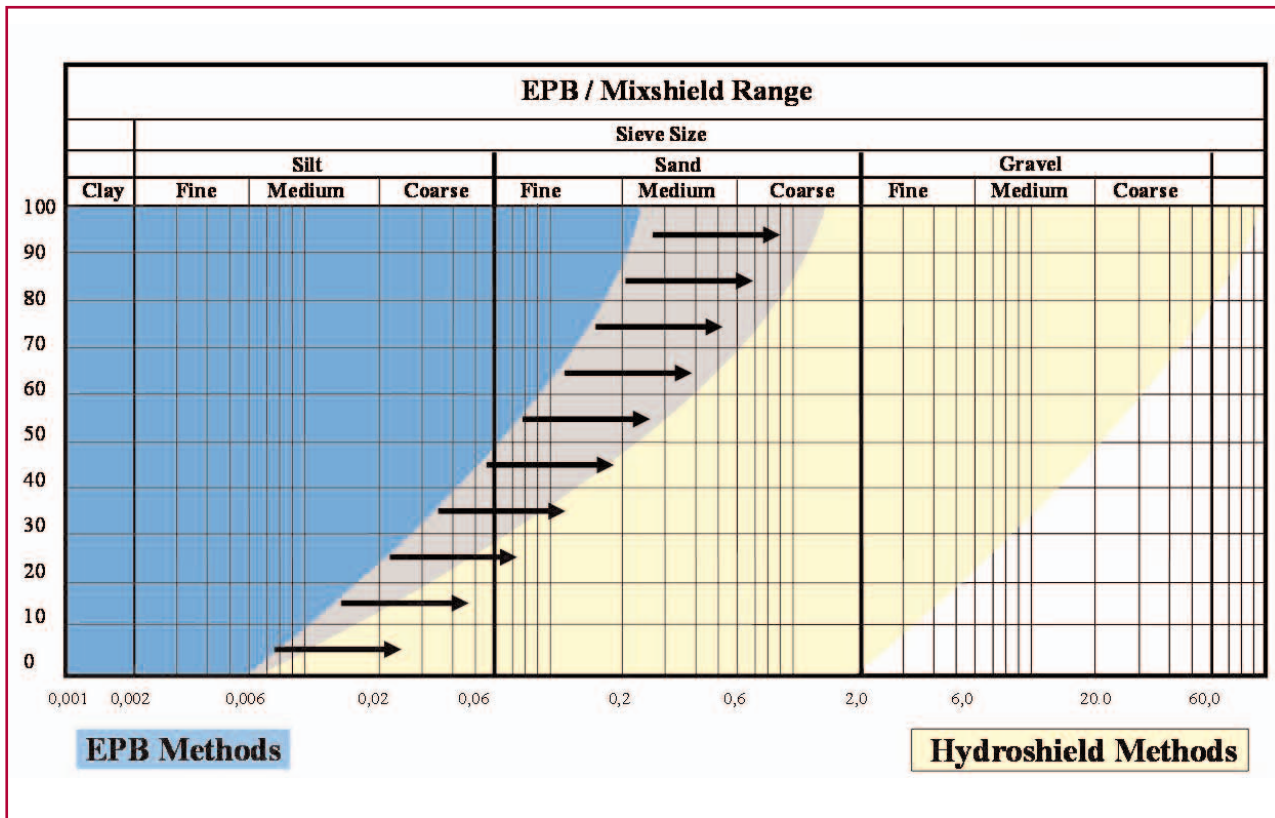


Fig. 1. Campos de empleo de los escudos de frente en presión/EPB and Mixshield Ranger.

2.4. La elección del tipo de escudo de frente en presión

a) Criterios basados en la granulometría de los terrenos

- El gráfico que resume estos criterios debe considerarse como simplemente orientativo. (Ver Figura 1)
- Aún en el caso de que el terreno corresponda a uno de los “campos” de aplicación señalados, es necesario elegir los aditivos adecuados con ensayos previos sobre muestras del terreno en laboratorio (12).
 Dicho de otro modo, la elección y la tasa de aplicación de los aditivos para lograr un acondicionamiento óptimo del terreno deben determinarse por ensayos en laboratorio, porque esa decisión no depende sólo de la granulometría del terreno (17).
- Por ejemplo, en cuanto a la trabajabilidad de la mezcla, un determinado tipo de tratamiento puede mejorarse simplemente variando el FIR de un espumante y manteniendo estable el resto de valores de los otros aditivos.

additive and keeping the values of the other additives stable.

— *It is worth mentioning the progress achieved with destructuring polymers to avoid the effects of high tack clays (13) (14).*

b) Use of EPB shields in sections of non-cohesive terrain appearing along the route. Acceptable performance can be achieved with the following measures:

- *Adding fine particles to the chamber, in addition to the chemical additives, by the pumping of:*
 - *Dense clayey muds prepared with loaned clayey materials in proportions ranging from 15% to 30% of total material in the chamber, or*
 - *Suspensions in water of other types of material, such as calcium carbonate powder obtained by grinding (currently at the experimental stage) (1).*

(1) *Both procedures have been tested successfully for the future TUNNELS UNDER THE GUADALQUIVIR of the SE-40, in Coria del Río (Seville), to the built with an EPB NFM shield.*

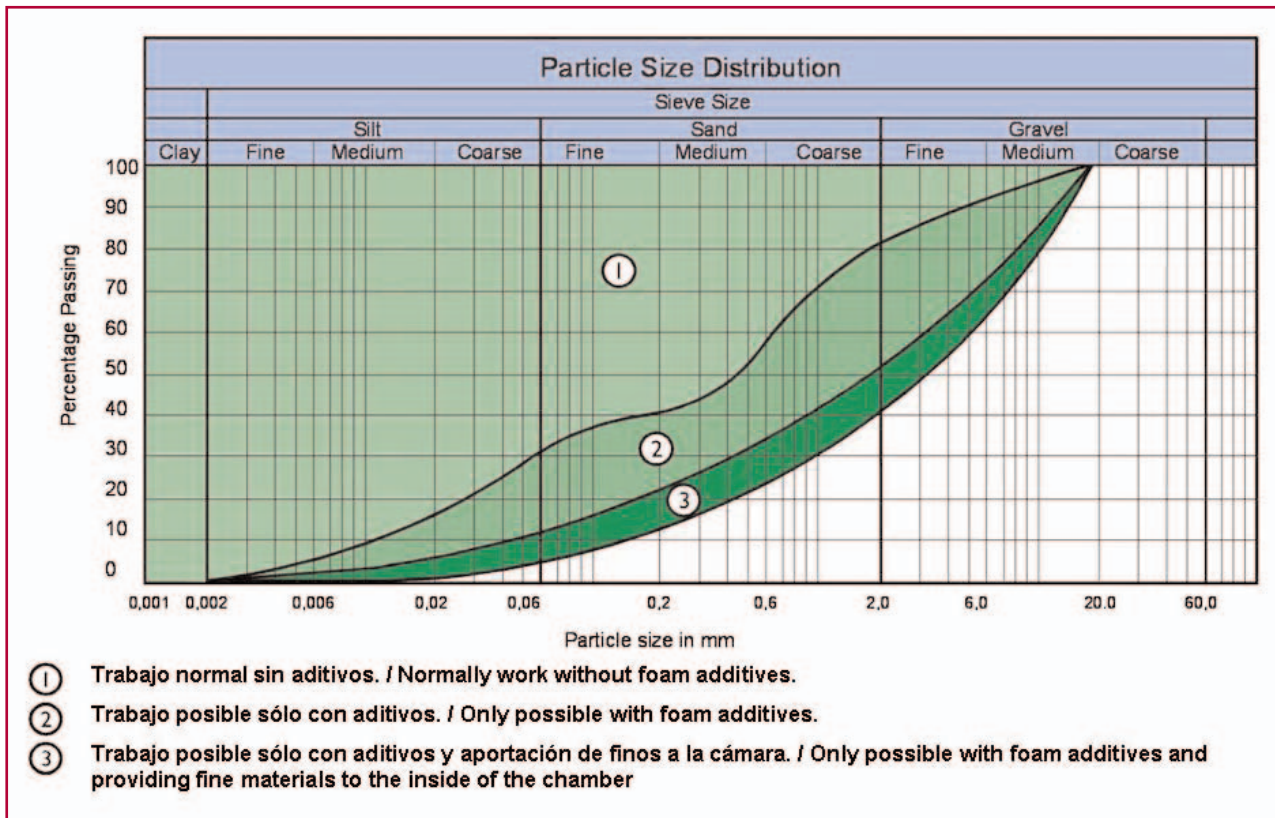


Fig. 2. Ampliación del campo de empleo de los Escudos EPB/ EPB Range enlargement.

— Debe destacarse el avance logrado con los polímeros desestructurantes, para evitar los efectos de las arcillas de alta pegajosidad (13) (14).

b) Empleo de Escudos EPB en tramos de terrenos no cohesivos, que se pueden presentar en el trazado. Puede lograrse un comportamiento aceptable con las medidas siguientes:

— Incorporando finos a la cámara, además de los aditivos químicos, por bombeo de:

- Lodos arcillosos densos preparados con materiales arcillosos de préstamos en proporciones que pueden variar entre el 15% y el 30% del total del material en la cámara, o bien
- Suspensiones en agua de otro tipo de materiales, como puede ser el polvo de carbonato cálcico, obtenido por molienda (actualmente en experimentación) (1).

(1) Ambos procedimientos los hemos ensayado con éxito para los futuros TÚNELES BAJO EL GUADALQUIVIR de la SE-40, en Coria del Río (Sevilla), a construir con un escudo EPB de NFM.

— Using additives suitable for certain types of non-cohesive terrain, such as: fine sands and sandy loams with the addition of foams and water-reducing polymers.

c) Use of mixshields in sections of cohesive terrain

Cohesive terrains can be excavated with mixshields with substantial loss of bentonite, which could be admitted when, for instance, it is possible to make a direct discharge into the sea. Apart from this:

- Modern separation plants have undergone marked improvement, such that the debris obtained from the separation of bentonite slurry, which forms part of the chamber mix, does not require a long drying period and can be loaded and transported to landfill sites by conventional means.
- On the other hand, there are prototypes of plants for the separation of bentonite slurry from a clay debris with bentonite loss of less than 5% but at the expense of increasing the power of the plant to as yet uneconomic levels.

- Utilizando los aditivos adecuados a ciertos tipos de terrenos no cohesivos como pueden ser: arenas finas y limos arenosos con adición de espumas y polímeros reductores de agua.

c) Empleo de Hidroescudos en tramos de terrenos cohesivos

Se pueden excavar terrenos cohesivos con Hidroescudos con pérdidas importantes de bentonita, lo que podría asumirse cuando, por ejemplo, es posible hacer un vertido directamente al mar. Aparte de ello:

- Las plantas de separación modernas han tenido un notable perfeccionamiento, de manera que el escombros que se obtiene de la separación del lodo bentonítico, que forma parte de la mezcla de la cámara, no necesita una larga fase de desecación y puede ser cargado y transportado a vertedero con medios convencionales.
- Por otra parte, se han logrado prototipos de plantas que permiten separar el lodo bentonítico de un escombros arcilloso con pérdidas de bentonita inferiores al 5% pero a costa de incrementar la potencia de la planta a cifras, de momento, antieconómicas.
- En conclusión, puede decirse que, en contra de lo que sucede con los escudos EPB en terrenos no cohesivos, y salvo circunstancias especiales, el uso de Hidroescudos en terrenos cohesivos no es, por ahora, económicamente viable.

d) El problema de la presencia de bolos

Con alguna frecuencia, generalmente en terrenos del Cuaternario, suelen presentarse tramos del trazado constituidos por masas de gravas de gran tamaño, que conocemos como "bolos", que pueden plantear uno de los problemas más graves para el avance de un escudo de frente en presión.

La dificultad proviene de dos características que hay que procurar conocer cuanto antes, a partir de los trabajos de reconocimiento del trazado: su dimensión media, por una parte, y la muy baja cohesión del material de relleno, por otra.

- Por lo que se refiere a la dimensión media de los bolos:
 - En primer lugar, suele definirse como "bolo" toda unidad que no pueda pasar por una malla cuadrada de 300 mm de luz libre.

- In conclusion, it can be said that, contrary to the case of EPB shields in non-cohesive terrains and, except under special circumstances, the use of mixshields in cohesive terrains is not, as yet, economically viable.

d) The problem of the presence of boulders

With some frequency, generally in Quaternary terrains, there are sections of the route consisting of masses of loose gravel of a large size, known as "boulders", which can pose one of the most serious problems for the advance of an EPB shield.

The difficulty arises from two characteristics which it is necessary to find out as soon as possible from the reconnaissance work of the route: their average size, on the one hand, and the lack of cohesion in the matrix material, on the other.

- With regard to the average size of the boulders:
 - Firstly, the usual definition of "boulder" is any unit unable to pass through a square mesh with a clear span of 300 mm.
 - In EPB shields with a diameter of over 13 m. the maximum size that can pass through the screw is around 300 mm, but in smaller machines extraction by screw can be impossible from figures of around 200 mm⁽²⁾.
 - Ribbon type screw designs admit 20% larger sizes than those of standard design.
 - In any case, if there is not a significant proportion (around 25%) of materials smaller than these maximums, the screw cannot maintain the pressure making the work of the EPB shield impossible.
- In the case of a hydroshield, it is necessary to break the boulders to reduce them to a maximum pumpable size of around 4" in diameter (about 100 mm).
- As a result of the above:
 - The mixshields that have to work in this type of terrain have to install a crusher ahead of the main pump intake.

(2) Normally, we have investigated sizes by digging several shafts with drivers with a diameter of at least 1,800 mm, and assessing the % of sizes above said figures. Lack of cohesion is checked visually on the samples from the investigation.

- En los Escudos EPB de diámetro mayor de 13 m. el tamaño máximo que puede pasar por el tornillo es del orden de los 300 mm, pero en máquinas de menor tamaño puede ser imposible la extracción por tornillo a partir de cifras del orden de los 200 mm⁽²⁾.
- Los diseños del tipo tornillo sin eje ("ribbon type screw") admiten tamaños un 20% superiores a los del diseño estándar.
- En todo caso, si no hay una proporción significativa (del orden del 25%) de materiales menores de dichos máximos, el tornillo no puede mantener la presión siendo imposible el trabajo del Escudo EPB.
- En el caso de un Hidroescudo, es necesario romper los bolos para reducirlos a un tamaño máximo bombeable, del orden de 4" de diámetro (unos 100 mm).

Como consecuencia de todo lo anterior:

- Los Hidroescudos que han de trabajar en este tipo de terrenos, han de montar una machacadora por delante de la admisión de la bomba principal.
- En el caso de Escudos E.P.B. no es posible una solución similar, por lo que hay que recurrir a consolidar previamente la masa a atravesar, para darle la cohesión que permita inmovilizar los bolos para romperlos con las herramientas de la Rueda de Corte (solución que, por supuesto, también es aplicable a un Hidroescudo).
- La consolidación de las capas de bolos puede hacerse bien con un "bosque" de pilotes de mortero en masa (o elementos de pantallas) o bien con inyecciones de masa o tratamientos con "jet grouting". En todo caso, como puede suponerse, estos trabajos representan un incremento importante de plazo y de coste⁽³⁾.

(2) Normalmente, hemos hecho la investigación de tamaños, excavando varios pozos con pilotadoras de diámetro 1.800 m como mínimo y evaluando el % de los tamaños superiores a dichas cifras. La falta de cohesión se comprueba visualmente sobre las catas del reconocimiento.

(3) En la LINIA 9 de Barcelona la solución aplicada consistió en un "bloque de jet grouting" que aglomera las gravas. En nuestra opinión, el "jet grouting" presenta una alta probabilidad de irregularidades, en comparación con el "bosque" de pilotes de mortero, por lo que el resultado final ha supuesto un plazo y coste bastante mayor que lo conseguido en otros casos con los pilotes, y la causa fueron las reiteradas correcciones que hubieron de realizarse en el "bloque" para corregir dichas irregularidades.

- *In the case of E.P.B. shields, a similar solution is not possible, so it is necessary to resort to the prior consolidation of the mass to be tunnelled through, to give it the necessary cohesion to immobilize the boulders in order to break them with the cutting wheel bits (a solution which, of course, is also applicable to a hydroshield).*
- *The consolidation of the layers of boulders can either be done with a "forest" of mass mortar piles (or screen elements) or injections of mass or "jet grouting" treatments. In all cases, as can be imagined, this work represents a considerable increase in time and cost⁽³⁾.*

2.5. Current developments in TBM tools

a) Hard rock TBM's (24):

— *Disc cutter type.* Although $\varnothing_{exc} = 17"$ cutters are the most commonly used, in some cases they have once again installed

- *$\varnothing 19"$ disc cutters (extra hard rocks).*

— *Bit wear control.*

- *Hydraulic wear detectors*

Usually the hydraulic wear detection consists of simple measuring points installed in the metal structure of the cutting wheel, occupying the position of cutting tools at a distance from the edge of the structure equal to the maximum admissible wear. Thus, when the wear reaches the measuring point, the hydraulic circuit empties, with total loss of pressure, transmitting an alarm to the TBM operating screens.

- *Sensors installed on the edge of some cutters*

The idea is to obtain signals of the actual wear of the cutter. Some prototypes having been developed with good results, their commercial application can be expected soon.

b) Soil and soft rock TBM's:

- *"Ripper" type bits for rocks of up to medium hardness. Usually interchangeable with the disc*

(3) On LINE 9 in Barcelona, the solution applied consisted of a "jet grouting block" to agglomerate the gravel. In our opinion, "jet grouting" presents a high probability of irregularities compared with the "forest" of mortar piles, such that the final result has meant a good deal greater time and cost than those achieved with piles, and the cause was the repeated corrections that had to be made to the "block" to rectify these irregularities.

2.5. Novedades actuales en las herramientas de las tuneladoras

a) TBMs de roca dura (24):

— Tipo de cortadores de disco. Aunque lo más frecuente es usar cortadores de $\varnothing_{exc} = 17"$ en algunos casos se han vuelto a montar

- Cortadores de disco de $\varnothing 19"$ (rocas extraduras).

— Control de desgaste de herramientas.

- Detectores hidráulicos del desgaste

La detección hidráulica del desgaste se compone usualmente de puntos de medición sencillos que se instalan en la estructura metálica de la rueda de corte, ocupando posiciones de herramientas de corte a una distancia del extremo de la estructura igual al desgaste máximo admisible. Así, cuando el desgaste alcanza el punto de medición, el circuito hidráulico se vacía, con pérdida total de presión, transmitiéndose una alarma a las pantallas de operación de la TBM.

- Sensores montados en el filo de algunos cortadores

Se trata de obtener señales del desgaste real del cortador. Desarrollados algunos prototipos con buenos resultados, es de esperar una pronta aplicación comercial.

b) TBMs de suelos y rocas blandas:

- Herramientas tipo "ripper" para rocas hasta dureza media. Suelen ser intercambiables con los cortadores de disco que puede llevar la Rueda. Ver figura 3.
- Herramientas sencillas con filos de metal duro. Son ya de uso generalizado diseños de los tipos de la Figura 4.

2.6. Cambio de herramientas desde el interior de los escudos de frente en presión

Hoy día, puede decirse que en todas las TBM modernas no presurizadas se pueden cambiar las herramientas desde el interior de la cámara.

cutters which can be carried by the wheel. See figure 3.

- *Simple bits with carbide blades. Designs of the types shown in Figure 4 are now of widespread use.*

2.6. Changing bits from inside earth pressure balance shields

Nowadays, it can be said that in all modern non-pressurized TBM's the bits can be changed from inside the chamber.

As for most earth pressure balance shields, the change of bits, when the machine is working as such, requires a hyperbaric intervention, which gets at least 2 or 3 shifts on. However:

- *About 10 years ago, in large diameter mixshields, hollow radial arms were designed, these being maintained at atmospheric pressure and isolated from the rest of the chamber, which can be accessed via the rotating joint to replace the bits attached to them, working at atmospheric pressure.*
- *Currently there are similar Japanese applications in design phase to provide this possibility in E.P.B. type shields (4). Their actual behaviour will be known shortly (Figure 5).*
- *Of course, in all cases it is always possible to resort to hyperbaric intervention, either to replace the tools not accessible from the inside of the arms, or to resolve failures in the operating system for replacement at atmospheric pressure.*

2.7. Current additional equipment for TBM's

a) Reconnaissance of the terrain by drilling from the machine.

— *For more than 5 years we have been using rotopercussion drills installed on the machine to make inclined drill holes (10° to 12°) outside the excavation section, in order to detect: the presence of water; hollows ("karst"); changes of terrain, etc.*

It is not recommendable to try to use them for treating the terrain due to the limited available

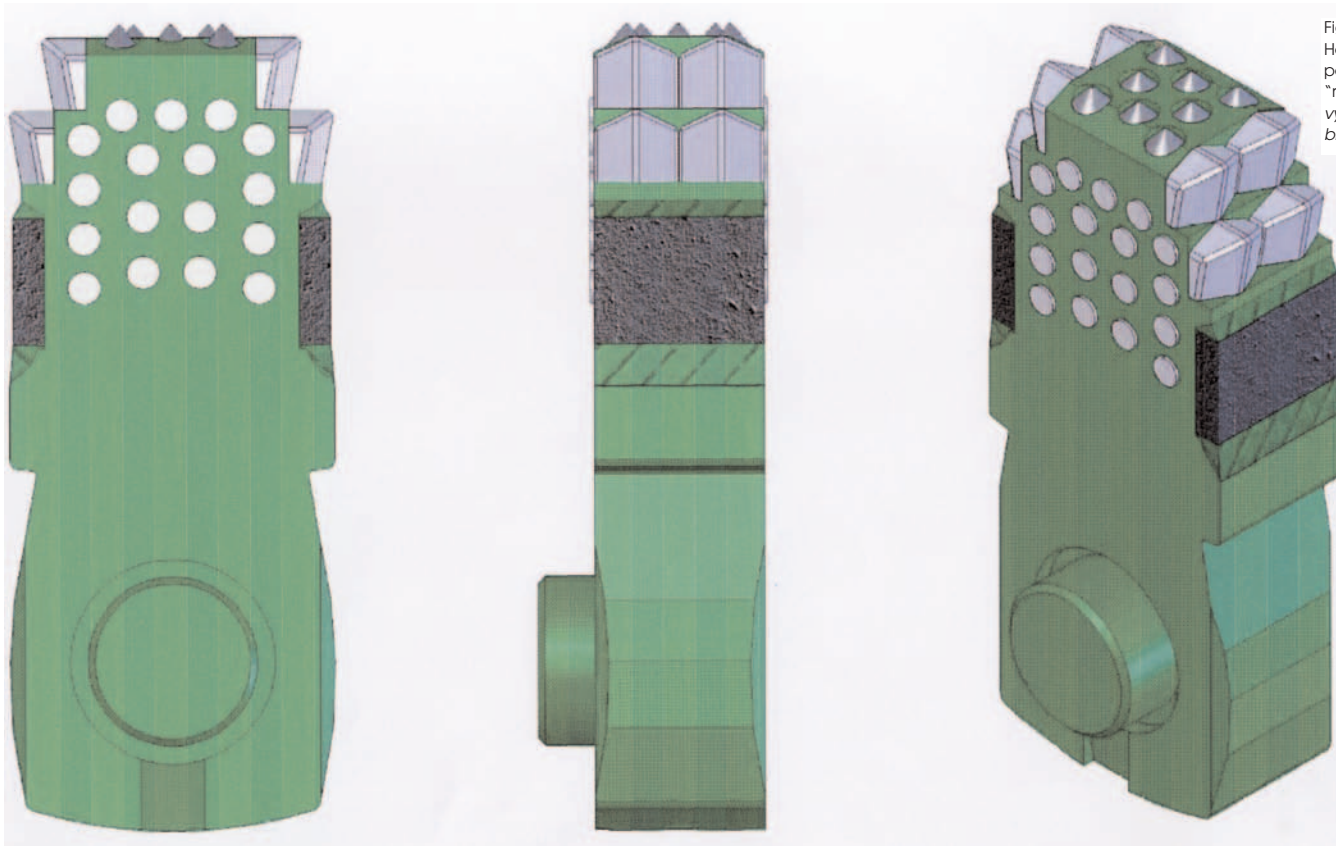


Fig. 3.
 Herramientas pesadas tipo "ripper" / Heavy ripper type bits.

Por lo que se refiere a la mayoría de los **escudos de frente en presión** el recambio de herramientas, cuando la máquina trabaja como tal, exige una intervención hiperbárica, lo que requiere como mínimo 2 ó 3 turnos de trabajo. Ahora bien:

- Desde hace unos 10 años, en **Hidroescudos de gran diámetro se diseñaron brazos radiales huecos**, que se mantienen a presión atmosférica y aislados del resto de la cámara, por los que se puede acceder, a través de la junta giratoria, para **sustituir herramientas fijadas a ellos, trabajando a presión atmosférica**.
- Actualmente hay aplicaciones similares japonesas que están en fase de diseño para dotar de esta posibilidad a los **Escudos del tipo E.P.B.**(4). Su comportamiento real se conocerá en breve (Figura 5).
- Por supuesto, **en todo caso siempre se puede recurrir a la intervención hiperbárica**, tanto para sustituir el resto de herramientas no accesibles desde el interior de los brazos, como para resolver situaciones de avería en el sistema operativo de reposición a presión atmosférica.

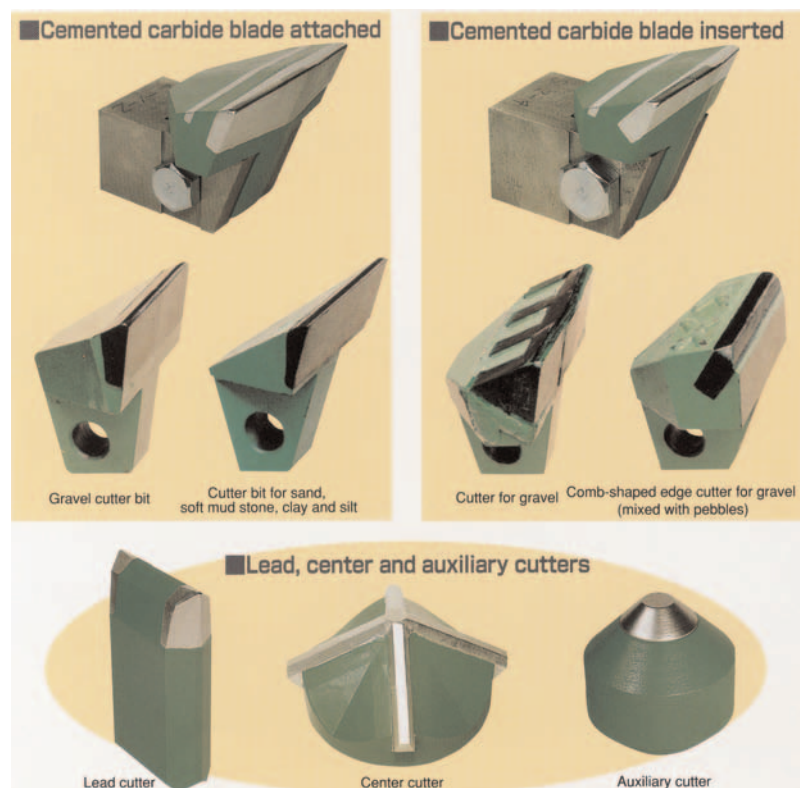


Fig. 4. Herramientas tipo "scraper" con filos de metal duro / Scraper type bits with carbide blades.

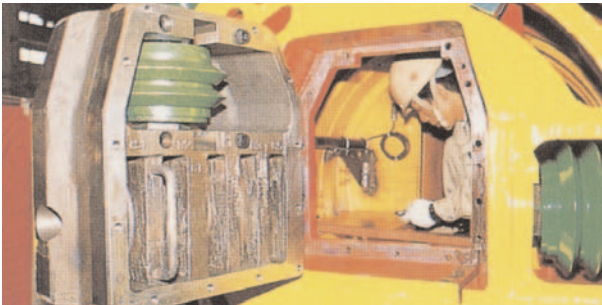
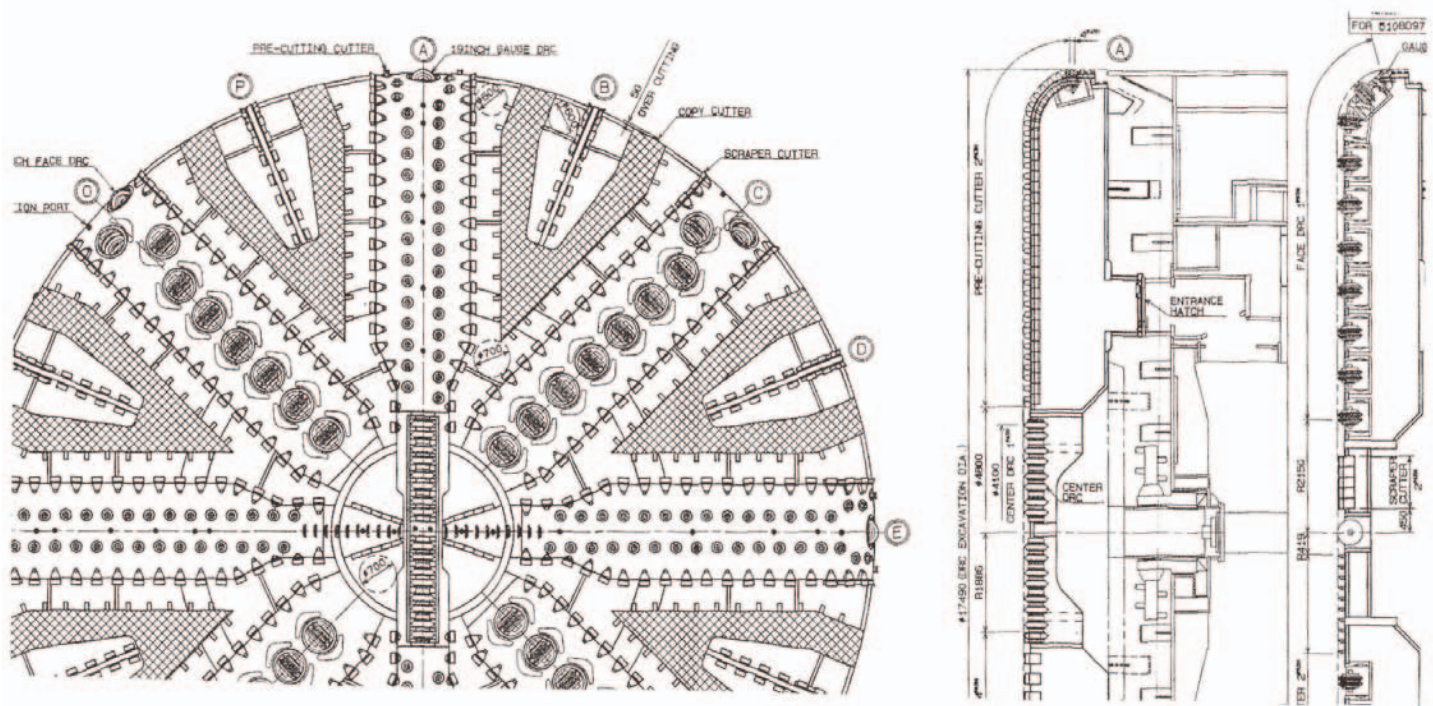


Fig. 5. Esquema y detalle de un escudo EPB KAWASAKI/KAWASAKI EPB Shield. Cutterhead and cutter change schemes.

space and the difficulty of supply to the grout manufacturing facilities.

Installation can be in 2 ways:

- On an independent structure adapted to the TBM, allowing systematic reconnaissance to be carried out (drill holes of about 30 m. maximum).
- On the erector for specific reconnaissance.

— In non-pressurized TBM's, the drills can be installed for drilling, at the top of the section, micropile umbrellas or horizontal self-drilling anchors above the lining. In these cases it is possible to inject grout because of the small volumes involved.

b) Continuous reconnaissance of the terrain close to the advance by sound waves (6)

— This is based on the reception and analysis of the reflected waves, which show alterations due to the presence of obstacles or changes in the geology of the terrain.

In the case of earth pressure balance shields, this technique has been successfully applied in mixshields. Major improvements of the system

2.7. Equipos complementarios actuales de las TBMs

a) Reconocimiento del terreno por perforaciones desde la máquina

— Desde hace algo más de 5 años, se vienen utilizando Perforadoras a rotoperusión montadas en la máquina, para hacer taladros inclinados (10° a 12°) exteriores a la sección de excavación con el fin de detectar: presencia de agua; huecos ("karst"); cambios de terreno, etc.

No es recomendable intentar utilizarlos para el tratamiento del terreno por la limitación del espacio disponible y la dificultad de suministros a las instalaciones de fabricación de lechada.

Los montajes pueden ser de 2 formas:

- En una estructura independiente adaptada a la TBM, lo que permite hacer reconocimientos sistemáticos (taladros de unos 30 m como máximo).
 - En el erector para reconocimientos puntuales.
- En TBMs no presurizadas, las perforadoras pueden montarse para perforar, en la parte superior de la sección, paraguas de micropilotes o bulones autoperforantes horizontales por encima del revestimiento. En esos casos es posible inyectar lechada al tratarse de volúmenes pequeños.

b) Exploración continua del terreno próximo al avance por ondas acústicas⁽⁶⁾

- Se basa en la recepción y análisis de las ondas reflejas que muestran alteraciones debidas a la presencia de obstáculos o a la variación de la geología del terreno.

En el caso de escudos de frente en presión, esta técnica se ha aplicado con éxito en Hidroescudos. Se han conseguido importantes mejoras del sistema a lo largo de los últimos 3 años, lo que ha permitido:

- Reconocer el terreno hasta 30 a 40 m delante de la Rueda.
 - Detectar no sólo los obstáculos existentes como pantallas continuas o pilotes de hormigón, anclajes etc., los cuales dan señales reflejas muy claras, sino también los cambios de terreno.
- Su aplicación a los Escudos EPB sólo es posible si no se emplean espumas. Las espumas impiden la transmisión de las ondas que necesariamente han de atravesar el material que rellena la cámara de tierras y las aberturas de la Rueda.

2.8. Otras novedades en ciertos componentes y equipos auxiliares de las TBMs

a) Escudos EPB

- Equipos automáticos para relleno del “gap” terreno / escudo
- El producto más utilizado es el lodo bentonítico con inyección automática a presión (en gene-

have been achieved over the last 3 years, making it possible to:

- *Examine the terrain up to 30 to 40 m. ahead of the wheel.*
- *Defect not only existing obstacles such as continuous screens or concrete piles, anchors, etc., which give very clear reflected signals, but also changes in terrain.*

- *Its application to EPB shields is only possible if foams are not used. Foams prevent the transmission of the waves which must necessarily cross the terrain that fills in the earth chamber and the wheel openings.*

2.8. Other developments in some tbm components and auxiliary equipment

a) EPB shields

- *Automatic equipment for filling the terrain/shield gap*

- *The most widely used product is bentonite slurry using automatic high pressure injection (generally around 0.2 to 0.3 Bar above the confining pressure of the chamber), based on previously established values.*
- *High pressure injections for filling the gap have been tested with two types of product:*
 - *Variants of the previous system for applying inert mortars, which are generally significantly more expensive.*
 - *Variants of silicate “gels” with/without cement. No high pressure filling was achieved, nor even a complete filling, but only partial, so no attempt at automation was attempted.*

- *Automatic equipment for maintaining the confining pressure in the chamber.*

This is bentonite slurry injection equipment with the capacity to ensure the immediate restoration of confining pressure. It is applied both in the process of advance and in the scheduled stops, as those for the preparation of hyperbaric interventions. The main slurry tank should have a considerable capacity, of around 1/3 of the volume of the chamber.

- ral, del orden de 0,2 a 0,3 Bar por encima de la presión de confinamiento de la cámara), a partir de valores previamente establecidos.
- Se han ensayado inyecciones para relleno a presión del "gap" con dos tipos de productos:
 - Variantes del sistema anterior para aplicar morteros inertes que, en general, son sensiblemente más caras.
 - Variantes de "geles" de silicato con/sin cemento. No se consiguió un relleno a presión, ni siquiera un relleno completo, sino sólo puntual, por lo que no se intentó su automatización.
 - Equipo automático para mantenimiento de la presión de confinamiento en la cámara. Son equipos de inyección de lodos bentoníticos con capacidad para asegurar de inmediato el restablecimiento de la presión de confinamiento. Se aplican tanto en el proceso de avance, como en las paradas programadas y en la preparación de las intervenciones hiperbáricas.
 - El depósito principal de lodos debe tener una capacidad importante, del orden de 1/3 del volumen de la cámara.
 - Desplazamiento axial de la rueda de corte, del orden de los 200 mm como mínimo. Es un mecanismo que facilita el trabajo de recambio de herramientas.
 - Sistema anti-rolling, por inclinación de los gatos de empuje, para contrarrestar la tendencia al giro del escudo sobre su eje.
 - Células de presión sustituibles en carga, desde la cara posterior del mamparo. Con ello es posible mantener activas todas las células que se precisan para el control de la operación del escudo.
 - Control automático de la temperatura del escombros en la cámara, con sensores colocados en la pared del mamparo.
 - Detector de metales en la cinta primaria (o cinta continua)

Se utiliza para avisar de la posible rotura de herramientas o placas de protección pesadas, transmitiendo una alarma que puede recogerse en las pantallas del operador.

 - Se usan sobre todo en los escudos EPB, en los que no es posible la inspección directa del material de la cámara.
 - Como complemento, puede instalarse un equipo de retirada de las piezas de acero, que lleva un electroimán muy potente. La recogida puede ser manual o mecanizada.

- *Axial displacement of the cutting wheel, of around at least 200 mm. This is a mechanism that facilitates the work of changing bits.*
- *Anti-rolling system, by tilting of the power jacks, to counteract the tendency of the shield to rotate on its axis.*
- *Pressure cells replaceable under load from the rear of the bulkhead. In this way it is possible to keep all the cells active that are required to control the operation of the shield.*
- *Automatic control of the temperature of the debris in the chamber, with sensors positioned on the wall of the bulkhead.*
- *Metal detector on the primary belt (or conveyor belt) This is used to warn of the possible breakage of tools or heavy protection plates, by transmitting an alarm which can be picked up on the operator screens.*
 - *Used mainly in EPB shields, in which direct inspection of the material in the chamber is not possible.*
 - *In addition, a unit for the removal of steel parts can be installed, with a very powerful electromagnet. Collection can be manual or mechanized.*

b) Mixshields

- *Confining pressure. Both in the chamber and in the shield / terrain gap, pressure is controlled and maintained by the bentonite slurry pumping system with submerged screen air bubble, which is the modern basis of this technology.*
- *The remaining control equipment (pressure cells, mix temperature) may be similar to that of E.P.B. shields.*

3. Current situation and new trends in the prefabricated linings of shields (2)(19)

3.1. Segment linings reinforced with fibre only

- *The project of the CTRL, the high speed line linking the Channel Tunnel with London, was the first important work in which this variant was applied. The main circumstances and characteristics of the project were the following (23):*
 - *Studies were based on full-scale trials of the resistance of the segments to expected loads and to fire, i.e. there were no structural calculations as such.*

b) Hidroescudos

- Presión de confinamiento. Tanto en la cámara como en el “gap” escudo / terreno, la presión se controla y mantiene por el sistema de bombeo de lodo bentonítico con burbuja de aire en tabique sumergido, que es la base moderna de esta tecnología.
- Los restantes equipos de control (células de presión, temperatura de la mezcla) pueden ser análogos a los de los Escudos E.P.B.

3. Situación actual y nuevas tendencias en los revestimientos prefabricados de los escudos (2)(19)

3.1. Anillos armados sólo con fibras

- El proyecto del CTRL, la línea de A.V. que une el Túnel del Canal de la Mancha con Londres, fue la primera obra importante en que se aplicó esta variante. Las principales circunstancias y características que concurren en el proyecto fueron estas (23):
 - Los estudios se basaron en ensayos a escala real de la resistencia de las dovelas a las cargas esperables y al fuego, es decir, no hubo cálculos estructurales propiamente dichos.
 - En general, los terrenos (suelos cohesivos y rocas blandas arcillosas) presentaban condiciones favorables al trabajo del anillo a compresión.
 - De todas formas, el número de dovelas fue mayor que el habitual en anillos armados con acero redondo: en la dovela se tendió más a la “forma de losa” que a “la de arco”. El acopio se hizo en posición vertical para simplificar la manipulación y lograr una resistencia uniforme.
 - Si bien se añadieron fibras de polipropileno no estructurales para aumentar la resistencia al fuego, en muchos casos se considera que bastan las fibras de acero para resolver este problema.
- El buen resultado de este proyecto hace pensar que se repetirá esta modalidad en los casos en que los terrenos presenten condiciones similares.

3.2. Aumento de resistencia en anillos con armadura convencional

- En la mayoría de los proyectos actuales, la resistencia a las cargas del terreno se confía a una

- *In general, the conditions of the terrain (cohesive soils and soft clay rocks) were favourable for the work of the compression segment lining.*
 - *At all events, the number of segments was higher than is usual with segment linings reinforced with round steel: in the segment, the tendency was more towards the “slab form” than the “arch form”. Segments store was done in a vertical position to simplify handling and achieve uniform strength.*
 - *Although non-structural polypropylene fibres were added to increase fire resistance, in many cases steel fibres are considered to be enough to solve this problem.*
- *The success of this project suggests that this pattern will be repeated in those cases in which the conditions of the terrain are similar.*

3.2. Increased strength in segment linings with conventional armour

- *In most current projects, resistance to the pressure of the terrain is entrusted to conventional armour, but steel fibres are added (at a proportion of 15 to 25 kg/m³) in order to increase the tensile strength at edges and corners, in addition to fire resistance.*
- *High strength concrete (Rc = 100 to 110 Mpa) is being used to increase the strength of the segment linings without changing their geometry (1), and enable them to be used in the sections of the route with high ground thrusts, in order to guarantee the long-term stability of the project⁽⁴⁾.*

3.3. Bicomponent mortar for filling the extrados of the segment linings

The usual product for filling the extrados of the segment linings is compound cement mortar (portland with bentonite or fly ash or simply lime powder) with Rc=12 MPa at 24 hours with start of setting from 5 to 9 hours, and end of setting 3 or 4 hours later. However, on the other hand:

- *Over the last 3 years, a bicomponent mortar composed of portland cement slurry and silicate has been used (9), with diverse results:*

⁽⁴⁾ *A solution of this type is being applied to the twin tunnels of SORBAS (new high-speed railway line Murcia-Almería) in a section with the presence of anhydrite.*

armadura convencional, pero se añaden fibras de acero (dosis de 15 a 25 kg/m³) para aumentar la resistencia a tracción en bordes y esquinas, además de la resistencia al fuego.

- Se están utilizando hormigones de alta resistencia ($R_c = 100$ a 110 Mpa) para aumentar la de los anillos sin variar su geometría (1), y poder ser utilizados en los tramos del trazado de empujes elevados del terreno, con el fin de garantizar la estabilidad de la obra a largo plazo⁽⁴⁾.

3.3. Mortero bicomponente para el relleno del trasdós de los anillos

El producto usual para el relleno del trasdós de los anillos es el mortero de cementos compuestos (portland con bentonita o con cenizas volantes o, simplemente, con polvo calizo) que tenga una $R_c=12$ MPa a las 24 horas y un inicio de fraguado entre 5 y 9 horas, con final a las 3 ó 4 horas adicionales. Pues bien, por otra parte:

- En los últimos 3 años, se ha venido utilizando un mortero bicomponente formado por lechada de cemento portland y silicato (9), con resultados diversos:
 - En general es necesaria una amplia experiencia para evitar incidentes por atascos en las TBM en que se hace la inyección de mortero por cola.
 - Por el contrario, si el mortero se bombea a través de los orificios de las dovelas, el proceso se desarrolla con más facilidad.

3.4. Anillos armados flexibles

Por último, se han ensayado con éxito prototipos de anillos flexibles o de diámetro ajustable (Figura 6) para su aplicación a casos de esfuerzos extraordinarios del terreno, como sucede a veces en tramos de roca muy alterada de túneles con recubrimientos importantes en los que puede quedar atrapado el escudo. Tal aplicación se podría combinar con el empleo de hormigones de alta resistencia (15).

Del fundamento de estos nuevos diseños, y de la experiencia de su aplicación, puede decirse lo siguiente:

(4) Una solución de este tipo se está aplicando a los Túneles gemelos de SORBAS (nueva L.A.V. ferroviaria Murcia-Almería) en un tramo con presencia de anhídritas.

- In general, wide experience is required to avoid incidents from blockages in the TBM's in which tail injection of mortar takes place.
- On the other hand, if the mortar is pumped through the holes in the segments, the process is carried out more easily.

3.4. Flexible armed segment linings

Finally, prototypes of flexible or adjustable diameter segment linings have been successfully tested (Figure 6) for application in cases of extraordinary ground forces, as sometimes occurs in sections of highly altered rock in tunnels with major cover in which the shield might become trapped. This application could be combined with the use of high strength concretes (15).

The following can be said about the basis of these new designs and about the experience of their application:

- As in the conventional methods of excavation, it is possible to adjust the values of the flexible holders to the actual quality of the formation, the flexible (compressible) elements of these segment linings, when compressed, create new paths for the deformation of the rock, reducing its state of stress and, consequently, the pressure on the lining until a balance of stresses and forces is reached.
- The development of the designs and full-scale tests of their carrying capacity took place at the Polytechnic University of Bochum (Germany).
- On the other hand, the second tube designed for the Tauern tunnel could be excavated by shield in fault areas of very poor quality thanks to the use of adjustable segment linings.

- Shield designs capable of using this type of segment lining when necessary can be expected to become widespread.

4. Control of implementation and modelling of studies

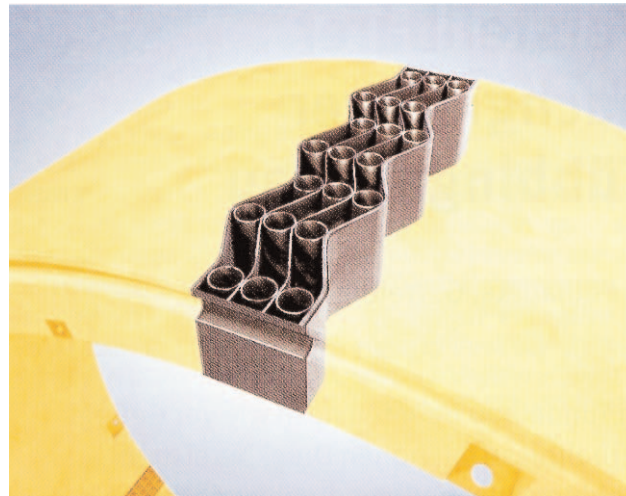
4.1. The PLC as basic element of control of the modern TBM

This is undoubtedly the most important aspect of the latest technological advances, once its application has become general to TBM design.

The following can be said about the present situation in EPB machines, which are the ones which are fitted with the most complex equipment:



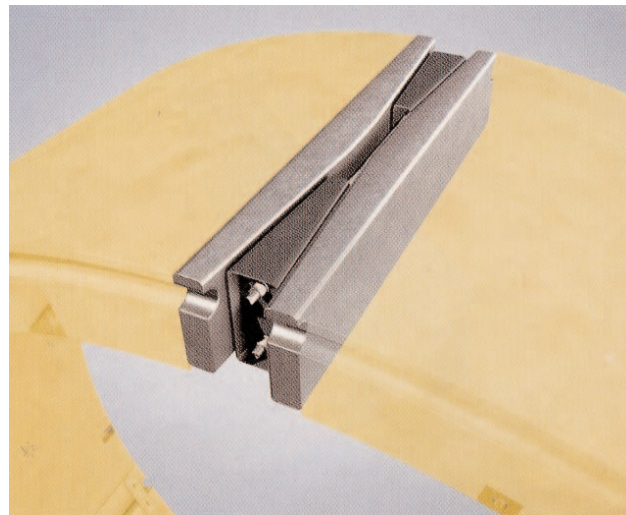
Elemento flexible tipo celda de abeja/Honey comb type



Tipo celda de abeja de forma ondulada/Honey comb type in wave form.

Fig. 6. Anillos flexibles o de diámetro ajustable/
Adjustable flexible segment linings.

- De la misma forma que en los métodos convencionales de excavación es posible ajustar los valores de los sostenimientos flexibles a la calidad real de la formación, los elementos flexibles (compresibles) de estos anillos de revestimiento, al comprimirse, crean nuevos caminos a la deformación de la roca, reduciendo su estado tensional y, en consecuencia, la presión sobre el revestimiento hasta llegar a un equilibrio de tensiones y fuerzas.
 - La puesta a punto de los diseños y los ensayos a escala real de su capacidad portante se llevaron a cabo en la Universidad Politécnica de Bochum (Alemania).
 - Por otra parte, el segundo tubo proyectado para el túnel de Tauern pudo ser excavado con escudo en zonas de falla de pésima calidad, gracias al empleo de anillos ajustables.
- Es de esperar que se generalicen los diseños de escudos que puedan utilizar este tipo de anillos en los casos necesarios.



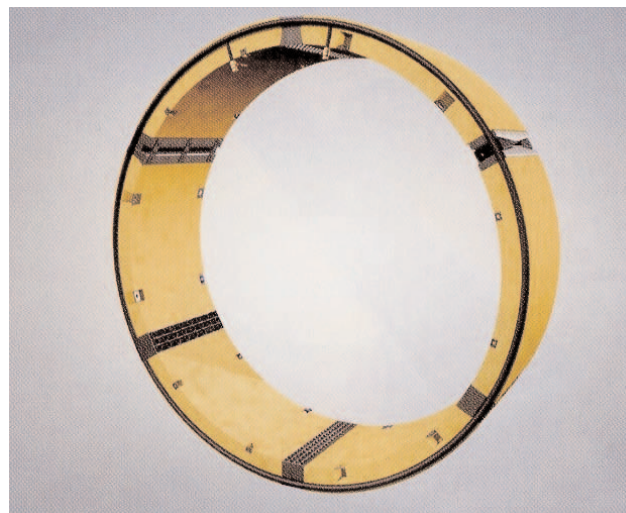
Elemento ajustable tipo doble tope/Doble wedge type.

4. El control de la ejecución y la modelización de los estudios

4.1. El PLC como elemento básico del gobierno de la tbm moderna

Este es, sin duda, el aspecto más importante a destacar de los últimos avances tecnológicos, una vez generalizada su aplicación al diseño de las tuneladoras.

Puede decirse lo siguiente, sobre la situación actual en las máquinas EPB que son las que montan equipos más complejos:



Diversas opciones de colocación/Element arrangement options.

a) A través del PLC de la TBM, se tiene la visualización en tiempo real de todos los parámetros de operación, lo que permite al operador de la TBM la optimización de la excavación mediante el balance continuo entre empuje y penetración.

En los escudos EPB, se dispone, también en tiempo real, de la visualización de otros valores de la excavación como pueden ser el peso del material excavado en cada avance, la presión en cámara y otros datos de la operación de este tipo de máquinas. Por último, y para protección de la máquina, se incorpora un control automático con parada cuando se rebasen ciertos límites.

Por otra parte, incluye la posibilidad de la comprobación y corrección por el operador de ciertos valores de la excavación.

b) De forma similar se procede en un hidroescudo para la visualización en tiempo real de los valores con que se gobierna este tipo de máquinas y sabiendo que en ellas hay valores que no se pueden verificar automáticamente, como el peso del material excavado.

c) Hay también Programas para la automatización de las rutinas de operaciones complementarias desarrolladas para los equipos montados en el "back up", como son:

- Montaje de los anillos.
- Inyección de mortero (controles de presión y volumen) en el trasdós de los anillos.

4.2. La modelización de los estudios para la estimación de la producción (24)

Las previsiones que el Constructor hace en los Estudios son la base para la determinación de los Costes y de los Programas de Obra de las ofertas y, como consecuencia de ello, la progresión del avance de la TBM (m/día) es la variable decisiva para evaluar la producción a lo largo del trazado, en plazos y costes, la cual suele evaluarse sin el debido criterio objetivo.

Por ello, debe señalarse la importancia de los modelos aparecidos en los últimos 5 años para evaluar la producción, de los que cabe decir:

a) Modelos actuales en el mercado:

- Aunque se trata de modelos estudiados para TBMs en roca dura, su estructura es válida para aplicarla a todo tipo de tuneladoras. Nos referimos a los siguientes:

a) *Via the PLC of the TBM, all operating parameters are displayed in real time, enabling the TBM operator to optimize the excavation through the continuous balance between thrust and penetration.*

In EPB shields, it is also possible to see in real time the display of other values of the excavation such as the weight of the material excavated in each advance, the chamber pressure and other operating data of this type of machine. Finally, for the protection of the machine, there is an automatic cut out control when certain limits are exceeded.

On the other hand, it includes the possibility of checking and correcting by the operator of certain values of the excavation.

b) *The same thing occurs in a hydrosshield for the real time display of the values by which this type of machine is controlled and in the knowledge that in said machines there are values which cannot be checked automatically, such as the weight of the material excavated.*

c) *There are also programmes for the automation of the routines of additional operations carried out for the equipment installed in the "back up", such as:*

- *Installation of the segment lining.*
- *Mortar injection (pressure and volume controls) in the extrados of the lining.*

4.2. Modelling of studies for estimating production (24)

The forecasts made by the Constructor in the Studies are the basis for determining the Costs and Work Programmes of the offers and, as a result of this, the progress of the advance of the TBM (m/day) is the decisive variable for assessing production along the route, in time and cost, and this is usually assessed without proper objective criteria.

Therefore, it is necessary to point out the importance of the models appearing over the last 5 years for assessing production, of which the following can be said:

a) Current models on the market:

- *Although they are models studied for TBM's in hard rock, their structure is valid for application in all types of TBM. We are referring to the following:*

CSM (Colorado S.M., USA 1993): USA y Canadá
GERING (Vöest-Alpine, Austria, 1995):
Suráfrica y Korea
NTU (Trondheim U, Noruega, 1998):
Países escandinavos
SIMTUNNEL PR02 (Innsbruck, U, 2009-10):
Austria, Suiza.

b) Principios comunes a la modelización de la Producción

- La excavación con TBM no es un proceso continuo, sino cíclico, con independencia del tipo de TBM.
- Las operaciones principales del proceso, la “excavación” del módulo de avance y la colocación de su “revestimiento” siguen secuencialmente una a la otra, pero se producen paradas por causas diversas.
- Este concepto de modelización debe tener en cuenta los tiempos de parada, expresados en minutos, como se hace con los tiempos asignados a la “excavación” o “el revestimiento”.

c) Configuración estándar de los “software” de los modelos. Debe incluir, como elementos principales, los siguientes:

- Tabla de entrada de datos del terreno del trazado y parámetros de la TBM que correspondan.
- Módulo de cálculo de la penetración y del desgaste de las herramientas y de las piezas de protección de la Rueda de corte.
- En relación con la secuencia del proceso:
 - **Tiempos de trabajo**, que pueden incluir turnos, curva de aprendizaje..... Y, por lo que se refiere a las:
 - **Paradas**, se deben diferenciarse los tiempos de:
 - **Paradas programadas** (Mantenimiento, inspección de desgastes en la rueda y herramientas).
 - **Paradas del sistema de la TBM** (maniobras de trenes; prolongación de la cinta continua y del cable de MT ...)
 - **Otras paradas** (averías, corte de energía...).

En resumen, sea que se utilice uno de los modelos citados, o bien un modelo propio, **deben tenerse en cuenta las recomendaciones señaladas. Solo así se podrán obtener estimaciones objetivas de los costes de producción** y evitar lo que el Presidente de ROBBINS USA manifestó públicamente ante el espectáculo de ofertas

CSM (Colorado S.M., USA 1993):
USA and Canada
GERING (Vöest-Alpine, Austria, 1995):
South Africa and Korea
NTU (Trondheim U, Norway, 1998):
Scandinavian countries
SIMTUNNEL PR02 (Innsbruck, U, 2009-10):
Austria, Switzerland.

b) Principles common to production modelling

- *The process of excavation with TBM's is not continuous, but cyclical, regardless of the type of TBM.*
- *The main operations of the process, the “excavation” of the advance module and the placement of its “lining” follow each other sequentially, but stoppages occur for various reasons.*
- *This modelling concept should take into account the stop times, expressed in minutes, as is done with the times allocated to “excavation” and “lining”.*

c) *Standard configuration of the model “software”. This should include the following main elements:*

- *Table for the entry of data regarding the terrain of the route and the appropriate parameters of the TBM.*
- *Module for the calculation of the penetration and wear of the bits and protective elements of the cutting wheel.*
- *With regard to the process sequence:*
 - *Work times, which can include shifts, learning curve..... And, with regard to:*
 - *Stops, it is necessary to differentiate between the times of:*
 - *Scheduled stops* (maintenance, inspection of wear to the wheel and bits).
 - *TBM system stops* (train manoeuvres; extension of the conveyor belt and of the MT cable...)
 - *Other stops* (breakdowns, power cuts...).

In summary, whether you use one of the models mentioned or your own model, the recommendations indicated must be taken into account. Only in this way can you obtain objective estimates of production costs and avoid what the Chairman of

con divergencias notables en plazos y costes que han venido presentándose a licitaciones internacionales de túneles en los últimos años: «la tolerancia en las estimaciones inexactas está dañando gravemente el prestigio de nuestra profesión y de nuestra industria».

4. Agradecimientos

El autor quiere agradecer al Dr. Ingeniero F. MEN-DAÑA, Presidente ejecutivo de S.P.I.C.C., S.L., la ayuda prestada, que hizo posible abarcar el amplio número de aspectos técnicos tratados en esta comunicación.

También quiere expresar su agradecimiento por la colaboración de los fabricantes de tuneladoras cuyos nombres figuran en el texto, que han facilitado las referencias técnicas que se mencionan en el mismo. ♦

ROBBINS USA declared publicly after the spectacle of offers with considerable divergences in time and costs which have been presented to international tunnel tenders in recent years: «the tolerance in inaccurate estimates is seriously damaging the prestige of our profession and of our industry». ♦

4. Acknowledgements

The author wants to thank Dr. Eng. P. MEN-DAÑA, Executive President of S.P.I.C.C., S.L., for the technical support given, that made it possible to relate a so wide table of contents as included in this report.

The author also appreciates the collaboration of the TBMs manufacturers, whose names are mentioned in the text, for the technical references provided, that are included in it. ♦

Referencias/References:

-(1) DE BIASE, A.; GRANDORI, R.; BERTOLA, P.; SCIALPI, M. "Gibe II Tunnel Project - Ethiopia: 40 bars of mud acting on the TBM - special designs and measures implemented to face one of the most difficult events in the history of tunnelling". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009. p. 151-170. ISBN: 978-0-87335-504-5.

-(2) HANSELL, Dieter; GUIRGUIS, Philipp. "Steel-fibre-reinforced segmental linings: State-of-the-art and completed projects". *Tunnel*, 2011, nº1, February, p. 14-24.

-(3) HUESMANN, D.; ENNEKING, G.; SONNENSCHNEIN, M. "Continuous Horizontal and Vertical Conveyors for Tunneling Applications". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. p. 930-945. ISBN: 978-0-87335-343-4.

-(4) FERNÁNDEZ, E.; MAGRO, J.L.; SANZ, A. "Technical Approach on Bid Preparation to Succeed on the Alaskan Way Project". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. p. 102-118. ISBN: 978-0-87335-343-4.

-(5) SCHEIBE, E.; ROBINSON, R.; CLARK, G.; STRUTHERS, J.; WARREN, S. "Geotechnical Baseline for the SR 99 Bored Design-Build Alaskan Way Tunnel, Seattle, Washington". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood,

Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. p. 472-484. ISBN: 978-0-87335-343-4.

-(6) GEHRIG, M. (et al.) "Advance Exploration accompanying the Drive: Mixshield with Vision". *Tunnel*, 2010, nº 3 May.

-(7) BÄPPLER, Karin. "Jinping II: Gripper TBM for Hydro-Power Plant". *Tunnel*, 2009, nº 7 November, p. 32-36.

-(8) BÄPPLER, Karin. "Mechanized Tunnelling for New, Highly Efficient Infrastructure for Traffic and Supply Systems". *BASF TBM Conference 2009 in Singapore on 5th-6th November*. *Tunnel*, 2010, nº 1, February.

-(9) Pellegrini, Lorenzo; Perruzza, Pietro. "Sao Paulo Metro Project-Control of Settlements in Variable Soil Conditions Through EPB Pressure and Bicomponent Backfill Grout". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009. p. 1137-1153. ISBN: 978-0-87335-504-5.

-(10) HERRENKNECHT, Martin; BÄPPLER, Karin. "Large-diameter TBM technology". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. p. 812-821. ISBN: 978-0-87335-343-4.

-(11) HERRENKNECHT, Martin; BÄPPLER, Karin; BURGER, Werner. "Engineering innovations for Mix-Shield and EPB Technology for two major Projects in Scandinavia". *Tunnel*, 2009, nº 8, December, p. 30-38.

-(12) THEWES, M.; BUDACH, Ch.; GALLI, M. "Laboratory Tests with various conditioned Soils for Tun-

nelling with Earth Pressure Balance Shield Machines". *Tunnel*, 2010, nº 6, September.

-(13) THEWES, M.; BURGER, W. "Clogging risks for TBM drive in clay". *Tunnels & Tunneling International*, 2004, June, p. 28-31.

-(14) WEH, Markus; ZWICK, Otto; ZIEGLER, Martin. "Mechanised Driving in Subsoil Prone to Clogging". *Tunnel*, 2009, nº 1, February, p. 25 (Part 1). *Tunnel*, 2009, nº 2, March (Part 2).

-(15) PODJADTKE, R.; WEIDIG, G. "Adjustable flexible segment lining". *Tunnel*, 2010, nº 7, November, p. 37-42.

-(16) STURK, Robert; DUDOUIT, Francois; AURELL, Oskar; ERIKSSON, Stig. "Summary of the First TBM Drive at the Hallandsas Project". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. p. 234-253. ISBN: 978-0-87335-343-4.

-(17) BABENDERERDE, Tim; HENSEL, Wolfgang; SHARMA, Binayak. "Additives to master major Permeabilities for EPB and Slurry TBMs". *Tunnel*, 2011, nº 3, May, p. 35-40.

-(18) BESS, Tomy; SCHNEIDER, Jason. "Increasing Safety And Efficiency With Newly Designed Conveyor Belting for Tunnel Applications". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. p. 320-328. ISBN: 978-0-87335-343-4.

-(19) IRELAND, Tom; ASCHE, Harry. "Developments in Segmental Lining Design". *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Ex-