

Hidroescudos y tuneladoras E.P.B. Campos de utilización

Hydroshields and E.P.B. tunnel boring machines. Areas of application

Felipe Mendaña Saavedra. Dr. Ingeniero Caminos, Canales y Puertos
Presidente ejecutivo de SPICC, S.L. Madrid (España). fms@spicc.e.telefonica.net
Ramón Fernández Martínez. Ingeniero Técnico Industrial
Director técnico de SPICC, S.L. Madrid (España). rfm@spicc.e.telefonica.net

Resumen: Los autores hacen un Resumen histórico de la tecnología de los escudos, hasta la aparición de los tipos modernos de máquinas presurizadas. Exponen seguidamente las bases de la utilización tanto de los Hidroescudos como de los Escudos EPB, así como la caracterización de los campos clásicos de su utilización. Finalmente se refieren a la posible ampliación de dichos campos de aplicación, así como al resurgir de los escudos de tipo dual, para terminar con una propuesta clara de conclusiones sobre los temas tratados. Esta comunicación se expuso en Madrid, en la Jornada Técnica de divulgación sobre PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPOS DE SEGURIDAD DE TÚNELES, organizada por EXPOMATEC y AETOS en Mayo 2011.

Palabras Clave: Historia de los escudos; Presurización del túnel; Frentes inestables; Tiempo de descompresión; Lodo; Bentonita; Planta de separación; Bolos; Tornillo sin fin; Aditivos; Productos tensoactivos (o espumas); Polímeros desestructurantes; Polímeros reductores de agua; Escudos de tipo dual

Abstract: The authors give a historical overview of shield technology, up to the appearance of the modern types of pressurized machines. They then explain the foundations for the use of both Hydroshields and EPB shields, as well as the classical areas of application. Finally, they refer to the possible extension of these areas of application, as well as the resurgence of dual type shields, ending with a clear proposal of conclusions regarding the issues covered. This communication was presented in Madrid at the Technical Conference on TUNNEL CONSTRUCTION PROCEDURES AND SAFETY EQUIPMENT, organized by EXPOMATEC and AETOS in May 2011.

Keywords: Shield historical overview; Tunnel pressurization; Unstable fronts; Decompression time; Slurry; Bentonite; Separation plant; Boulders; Screw conveyor; Additives; Surfactant products (foams); Deconstructing polymers; Water-reducing polymers; Dual shields models

1. Razón de ser de los escudos

1.1. Resumen histórico de la tecnología de los escudos

La excavación con tuneladoras en suelos y terrenos inestables, en general, se resolvió con los "escudos" (en inglés, "shields"), denominación aplicada a máquinas de túnel, cuyos elementos principales son los siguientes (Figura 1).

- Una coraza o "escudo" de acero para proteger la máquina y, a la vez, sostener el terreno hasta que va siendo sustituida por el revestimiento prefabricado, según progresa el avance de cada módulo.
- El corte mecánico del terreno con herramientas manuales, (hasta que se implantó su mecaniza-

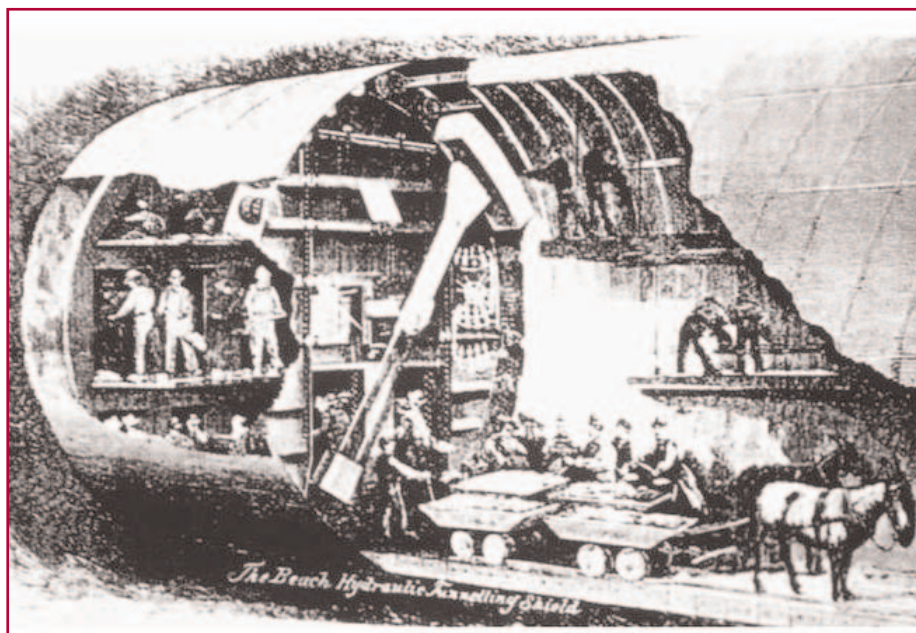
1. Rationale for shields

1.1. Historical overview of shield technology

The excavation with tunnel boring machines in unstable soils and terrain, in general, was resolved with "shields", the name give to tunnel boring machines whose main elements are the following (Figure 1).

- *A steel shell or "shield" to protect the machine and, at the same time, hold up the terrain until that is replaced by the prefabricated lining as the advance of each module progresses.*
- *The mechanical cutting of the ground with manual tools (until their total mechanization was introduced): the operators worked in enclosures with a small cross-section, an indirect way of reducing the effects of the instability of the terrain.*

Fig. 1. Escudo Beach (≈1890) de accionamiento hidráulico/*The Beach Hydraulic Shield*.



Antigüedad de la sección circular
(Old circular section)

Excavación manual (recintos)
(Hand made excavation)

Empuje y revestimiento mecanizados
(Mechanised thrust and lining)

Transporte animal
(Muck carrying by horse)

ción total): los operarios trabajaban en recintos de pequeña sección, una forma indirecta de reducir los efectos de la inestabilidad del terreno.

- **El equipo de empuje contra el frente**, constituido por cilindros hidráulicos que permiten avanzar la máquina, para lo cual reaccionan contra el módulo de revestimiento recién colocado. Este sistema de empuje, junto con el **equipo de colocación de las dovelas del revestimiento prefabricado**, fueron los únicos mecanismos de los escudos, ambos accionados por motores, primero de vapor y después neumáticos o hidráulicos, hasta 1890-99, en que se fue implantando la mecanización total del arranque o excavación en el frente. ⁽¹⁾

Para la mecanización del arranque se emplearon, primero, **equipos de excavación de brazos rozadores o de tipo "retro"**, con lo que la sección del túnel, y por tanto la del "escudo", podía tener una forma cualquiera.

Pues bien, la posibilidad de adoptar formas en "herradura", como la del escudo de la Figura 2, clásica-

- **The equipment for thrusting against the front**, consisting of hydraulic cylinders which enable the machine to advance, for which purpose they react against the newly placed lining module. This thrust system, along with the **equipment for placing the prefabricated lining segments**, were the shields' only mechanisms, both driven by engines, first steam and later pneumatic and hydraulic, until 1890-99, when the total mechanization of extraction or excavation at the front was introduced⁽¹⁾.

For the mechanization of extraction, **scraper arm or "retro" type excavation equipment** was first used, with which the tunnel section and, therefore, that of the "shield" could be **any shape**.

However, the possibility of adopting "**horseshoe shapes**", like that of Figure 2, classical until that time, if not unique, in the construction of tunnels, was considered an undoubted advantage at the time. For this reason it was not until 1945-50 that machines with **cutting wheels and, therefore, the circular section of**

(1) Hay referencias comprobadas de túneles construidos con escudos en los años 1860-70 como es el caso de la máquina de Greathead de 1869. Existen relatos anteriores, de veracidad muy dudosa, siendo el más antiguo el relativo a una máquina, atribuida a Brunel, con la que en 1818 se intentó excavar un túnel bajo el Támesis, sufriendo un hundimiento general con inundación y víctimas, que impidió la ejecución de la obra.

(1) There are proven references to tunnels built with shields in 1860's, as in the case of the Greathead machine of 1869. There are earlier accounts, of doubtful veracity, the earliest being that referring to a machine attributed to Brunel, with which an attempt was made in 1818 to excavate a tunnel under the Thames, which suffered an overall collapse with flooding and victims, preventing the project from being completed.

sicas hasta entonces, por no decir únicas, en la construcción de túneles, se interpretó en la época como una ventaja indudable. Ello fue la causa del retraso hasta 1945-50 de la aparición de las máquinas con **Rueda de corte y, por tanto, de la sección circular de los túneles**, cuya adopción preferente tardó bastante más en producirse.

Puede decirse, por ello, que la **forma circular** de la sección hubo de coexistir durante años en igualdad de condiciones con las anteriores, hasta la aparición de los escudos presurizados o, mejor dicho, de los **"escudos de frente en presión"**, tanto si se trata de los **"hidroescudos"** o **"escudos de frente en presión de lodos"** (1965-70), como de los **"escudos de frente en presión de tierras"** o **"escudos E.P.B."** (1985-90), tuneladoras a las que se refiere esta Comunicación, orientada especialmente a tratar lo relativo a los campos de aplicación de uno u otro tipo de máquina⁽²⁾.

1.2. La necesidad de los escudos de frente en presión

Hasta 1965-70, para excavar túneles con frentes inestables, debido tanto a la baja calidad de los terrenos como, sobre todo, a la carga de agua del freático, los escudos hubieron de trabajar al amparo de la **presurización integral del túnel con aire comprimido**.

El inicio de la presurización integral puede situarse en los años 1870-80, y su excepcional duración, de cerca de 100 años, como única tecnología para la **contención de los frentes inestables en terrenos saturados**, se explica, básicamente, por la difícil y lenta implantación a nivel internacional de normas relativas a la Higiene y Seguridad en el trabajo, hecho que sucedió no sólo en la construcción civil, sino, en general, en todas las actividades industriales y, particularmente en la minería, que tiene múltiples aspectos comunes con las obras subterráneas de la ingeniería civil.

Por ello, puede decirse que es después de la Segunda Guerra mundial, a partir de los años 1950-60, cuando puede hablarse de un reconocimiento serio de las razones contrarias al trabajo prolongado en condiciones hiperbáricas, razones que pueden resumirse así:

(2) Los "hidroescudos" reciben en inglés la denominación de "mixshields". En cuanto a, las siglas E.P.B. aplicadas a los escudos de frente en presión de tierras, son las iniciales de su denominación inglesa "Earth Pressure Balance Machines".



Fig. 2. Escudo con brazos de tipo rozador y retroexcavador / Roadheader / Retro boom type Shield.

tunnels first appeared, it being a good deal longer until their preferential use came about.

Therefore, it can be said that the **circular shape** of the section had to coexist with the previous ones for years on an equal footing, until the appearance of pressurized shields or, rather, **"pressure front shields"**, whether these be **"mixshields"** or **"mud pressure balance shields"** (1965-70), or **"earth pressure balance shields"** or **"E.P.B. shields"** (1985-90), the TBM's referred to in this Communication, aimed particularly at dealing with the areas of application of one or other type of machine⁽²⁾.

1.2. The need for earth pressure balance shields

Until 1965-70, to excavate tunnels with unstable fronts, due both to the low quality of the terrain and, above all, to the burden of the water table, shields had to work under **total pressurization of the tunnel with compressed air**.

The beginnings of total pressurization can be situated in the 1870's and its exceptionally long duration of around 100 years, as the only technology for the **containment of unstable fronts in saturated soils**, can basically be explained by the slow and difficult introduction at an international level of rules

(2) "Slurry Pressure Shields" are known as "Mixshields" (sometimes as "Hydroshields" as in English. E.P.B. stands for "Earth Pressure Balance Machines".

Tabla n° 1. Condiciones de trabajo con aire comprimido/ Table n° 1. Air compressed working conditions

Presión maxª (m columna de agua)	Tiempos de descompresión en minutos según horas de exposición								Tiempo maxº (h) de exposición
Max. Press. Waterhead m	Decompression minutes time a. exposition hours time								Maximun expo. (h) time
-	0,5 h	1 h	1,5 h	2 h	2,5 h	3 h	3,5 h	> 4 h	-
12	4	4	9	14	24	29	39	44	9.25
16	5	10	25	45	60	70	80	90	8.50
20	11	26	56	76	96	106	116	136	7.75
24	12	42	82	107	127	137	157	187	6.75
28	18	68	113	138	153	168	183	253	5.75
32	24	89	134	164	184	199	219	344	4.25

- El trabajo continuado bajo presiones hiperbáricas afecta gravemente a la salud.
- Además, en terrenos con frentes en materiales “permeables al aire”; como es el caso de los suelos granulares no cohesivos, existe un alto riesgo de accidentes muy graves con posible pérdida de vidas, debido a la inestabilidad total que se produciría en el túnel por la probable rotura del frente a través de los terrenos citados.
- Por otra parte, los rendimientos logrados fueron siempre muy limitados porque la entrada al túnel del personal y de los vehículos había de hacerse a través de esclusas para mantener la presión, lo que obligaba a una pérdida notable de tiempo.
- Finalmente, aún trabajando por debajo de los 3 Bar, las Normas internacionales exigen que los tiempos de descompresión se acerquen a las 4 horas, lo que, al disponer sólo de 2 a 3 horas útiles por turno, hacía antieconómico el sistema, como puede apreciarse en la Tabla n° 1.

2. De los prototipos a la tipología actual de los escudos presurizados

Los primeros intentos de la industria de maquinaria para abandonar la presurización integral del túnel fue presurizar exclusivamente con aire el terreno del frente o, más propiamente, el espacio entre la

regarding health and safety at work, something which occurred not only in civil construction but, in general, in all industrial activities and particularly in mining, which has many common aspects with underground civil engineering work.

Therefore it can be said that it is not until after the Second World War, in the 1950's, that we can talk about the serious recognition of the reasons against prolonged work in hyperbaric conditions, which can be summarized as follows:

- Continuous work under hyperbaric pressures has serious affects on health.
- Moreover, in terrain with fronts in material “permeable to air”; as in the case of non-cohesive granular soils, there is a high risk of very serious accidents with possible loss of life, due to the total instability that would be caused in the tunnel by the probable breakage of the front through the aforementioned terrain.
- On the other hand, the yields achieved were always very limited because the entry of staff and vehicles to the tunnels had to be via airlocks in order to maintain the pressure, causing a significant loss of time.
- Finally, even working at below 3 Bar, international standards require decompression times of around 4 hours, meaning there were only 2 to 3 useful hours per shift, making the system uneconomic, as shown in Table n° 1.

Rueda de corte y un mamparo (espacio denominado "cámara de tierras" o simplemente "cámara") para aislarlo del resto de la máquina, donde los operarios pudieran trabajar a presión atmosférica.

Ya se comprende que el **riesgo de rotura del terreno en el caso de excavar zonas o bolsas de materiales granulares no cohesivos**, que son los que presentan "permeabilidad al aire", **seguía existiendo**, y fue por ello que los trabajos de investigación de nuevos equipos hubieron de orientarse por otras vías.

La **presurización neumática de la cámara** se aplica hoy día solamente para entrar en ella y **hacer la revisión de la Rueda y la reposición de herramientas**, es decir, solo en operaciones auxiliares de duración limitada y **siempre con la máquina parada**.

2.1. Los escudos de frente en presión de lodos o hidroescudos

Las primeras investigaciones se dirigieron, como es natural, a resolver el problema planteado por los **mencionados materiales no cohesivos**. En los trabajos de ensayos en factoría y en túneles de prueba se pudo comprobar, con relativa rapidez, que **la permeabilidad no existía si en vez de aire se presurizaba la cámara con agua y, por supuesto, menos aún si se usaba un lodo arcilloso bombeable**.

La razón de emplear un lodo arcilloso bombeable era no sólo para mantener la presión sin pérdidas a través del terreno granular del frente, sino también para resolver el **transporte hidráulico de la mezcla de suelo y lodo** es decir, el transporte hidráulico de un "lodo espeso" pero bombeable, sin desgastes excesivos de las tuberías de transporte. Así nació la tecnología de los "hidroescudos", en los que la Rueda de corte trabaja dentro de un circuito cerrado de bombeo de un lodo a presión: **la bomba principal** del escudo, acoplada al mamparo **aspira la mezcla de la cámara y la envía por la tubería de descarga** hasta el exterior, donde se pasa por una **Planta de separación**, en la que se recupera el lodo, a la vez que se obtiene el escombros de la excavación para su transporte a vertedero. El lodo "fresco" se envía de nuevo a la cámara por la **tubería de alimentación** del circuito y se va mezclando con el terreno excavado en la cámara frontal del escudo según progresa el avance (Figura 3).

2. From prototypes to the current types of pressurized shields

*The first attempts of the machinery industry to break away from the total pressurization of tunnels were to **pressurize exclusively with air the terrain of the front or, more accurately speaking, the space between the cutting wheel and a bulkhead** (a space called the "earth chamber" or just "chamber"), in order to isolate it from the rest of the machine, where the operators could work at atmospheric pressure.*

*It is now understood that the **risk of breakage of the terrain in the event of excavating areas or pockets of non-cohesive granular materials**, which are those with "air permeability", **still existed**, and therefore research into new equipment had to focus on different channels.*

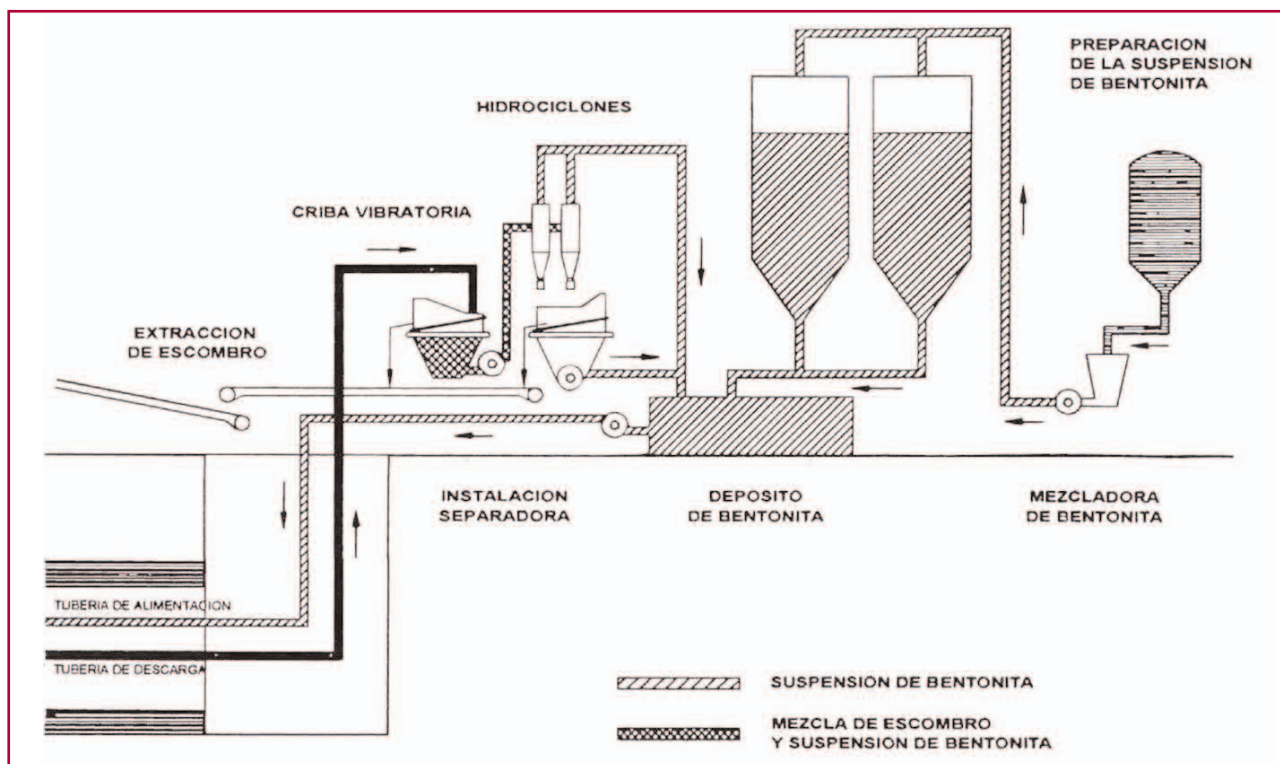
*Nowadays, **the pneumatic pressurization of the chamber** is only applied when it is necessary to enter the same and **carry out the inspection of the wheel and replacement of tools**, i.e. only in auxiliary operations of limited duration and **always with the machine stopped**.*

2.1. Mud pressure balance shields or mixshields

*The earliest research was naturally aimed at solving the problem posed by the **aforementioned non-cohesive materials**. In the factory and test-tunnel trials it was possible to demonstrate, relatively quickly, that **permeability did not exist if the chamber was pressurized with water instead of air and, of course, even less so if a pumpable clay slurry was used**.*

*The reason for using pumpable clay slurry was not only to maintain the pressure with no losses through the granular terrain of the front, but also to resolve the **hydraulic transport of the soil-slurry mixture**, i.e. the hydraulic transport of a "thick but pumpable slurry", without excessive wear of the pipelines. This led to the technology of "mixshields", in which the cutting wheel works within a closed circuit for the pumping of pressurized slurry: **the main pump** of the shield, attached to the bulkhead, **sucks the mixture from the chamber and sends it through the discharge pipe** to the outside, where it goes through a **separation plant**, where the slurry is recovered, while the excavation debris is obtained for transport to landfill. The "fresh" slurry is sent back to the chamber through the **feed pipe** of the circuit and is mixed with the soil excavated*

Fig. 3. Circuito de transporte de un "hidroescudo" y Planta de separación/ Mixshield hydraulic transportation circuit and separation plant.



Otra ventaja de este sistema es que el flujo de lodo a presión ocupa no solo la cámara, sino también el "gap" entre escudo y terreno, con lo que se consigue reducir a un mínimo los asentos.

Las primeras máquinas, de tecnología japonesa (1965-70), adoptaron ruedas bastante cerradas y utilizaban lodos de cualquier tipo de arcilla (se denominaron en inglés "slurry shields"). Mantenían la debida regularidad de presión en el circuito, variando automáticamente el caudal de las bombas hasta recuperar la presión establecida.

Por otra parte, desde los primeros años de la década 1990-99, la tecnología alemana, a la vez que presentaba Ruedas de corte con mayores aberturas para facilitar el flujo de lodo espeso –a veces reducidas casi a los radios– aportó modificaciones que se aceptaron pronto con carácter general en la tecnología de los hidroescudos. En primer lugar, el uso exclusivo de lodos bentoníticos, por las ventajas que ofrece la bentonita, la regularidad de su composición y la facilidad de formar con los suelos granulares un "cake", de unos pocos centímetros de espesor que mejora el sostenimiento del frente. La segunda aportación fue la adición, en la zona de la clave de la cámara, de un recinto de paredes estancas semisumergidas en el lodo y fondo abierto, (de tono más claro en el esquema de la Figura

in the front chamber of the shield as the advance progresses (Figure 3).

Another advantage of this system is that the flow of pressurized slurry occupies not only the chamber, but also the gap between shield and terrain, thereby reducing subsidence to a minimum.

The first machines, with Japanese technology (1965-70), employed fairly closed wheels and used slurry from any type of clay (these were called "slurry shields"). They maintained adequate pressure regularity in the circuit by automatically varying the flow of the pumps until the established pressure was recovered.

On the other hand, from the early 1990's, German technology, while presenting cutting wheels with larger openings to facilitate the flow of thick slurry –sometimes almost reduced to the spokes– offered changes in mixshield technology which were soon widely accepted. Firstly, the exclusive use of bentonite slurry, for the advantages offered by bentonite, the regularity of its composition and the ease with which it forms a "cake" with granular soils, with a thickness of a few centimetres, which improves the support of the front. The second contribution was the addition, in the key area of the chamber, of an open-bottomed

4), en cuya parte superior se mantiene una "burbuja" de aire a presión, por medio de un **equipo compresor-depresor de aire, que actúa automáticamente y, con inercia prácticamente "cero", con lo que se consiguió la regulación instantánea de la presión del circuito y, por tanto, la de confinamiento de la cámara, resolviendo el importante problema de la inercia significativa que tiene el control de la presión por medio de la regulación de caudales de las bombas del circuito, que comprometía con frecuencia el funcionamiento de todo el sistema.** (1) (3) (5)

Debe señalarse también otra aportación de esta tecnología para resolver los casos de **terrenos con bloques de roca o gravas de gran tamaño ("bolos")**, que impiden el transporte hidráulico de la mezcla lodo-escombros. A estos efectos, el límite del **tamaño máximo del material transportable hidráulicamente puede fijarse en los 80 a 100 mm**, por lo que, si se prevé la presencia de tamaños mayores, el hidroescudo ha de incorporar una machacadora de mandíbulas (indicada simbólicamente en el gráfico de la Figura) montada en la parte inferior del mamparo para hacer la reducción de los tamaños antes de la entrada del material a la cámara de aspiración de la bomba principal. Estas machacadoras, con admisión de hasta unos 900 a 1000 mm, son de diseño muy simple y robusto y su alimentación se hace recogiendo los bloques en el fondo de la cámara con unos cangilones dispuestos en la cara interior de la Rueda de corte, que descargan sobre la boca de la machacadora.

Por supuesto, **el problema de los bolos existentes en un terreno inestable y saturado sólo puede resolverse con un hidro**, pero eso también tiene sus limitaciones si el porcentaje de tamaños en el frente es muy significativo. La realidad es que la Rueda de corte del hidroescudo, por una parte, va desplazando hacia los lados un cierto porcentaje de bolos, de modo que el machaqueo previo ha de aplicarse sólo al resto, pero, es evidente que si el porcentaje global medio de tamaños grandes supera cifras del orden del 15% al 20% del total a excavar, los **rendimientos llegan a no ser asumibles**, con independencia de que, sobre todo, **es imposible mantener la continuidad del proceso normal del avance y, por tanto, su viabilidad técnica.**

Por ello, cuando se sobrepasan los porcentajes citados es imprescindible un **tratamiento previo del terreno por inyecciones de masa o bien implantación de pilotes de mortero que rellenen al menos un 50% de**

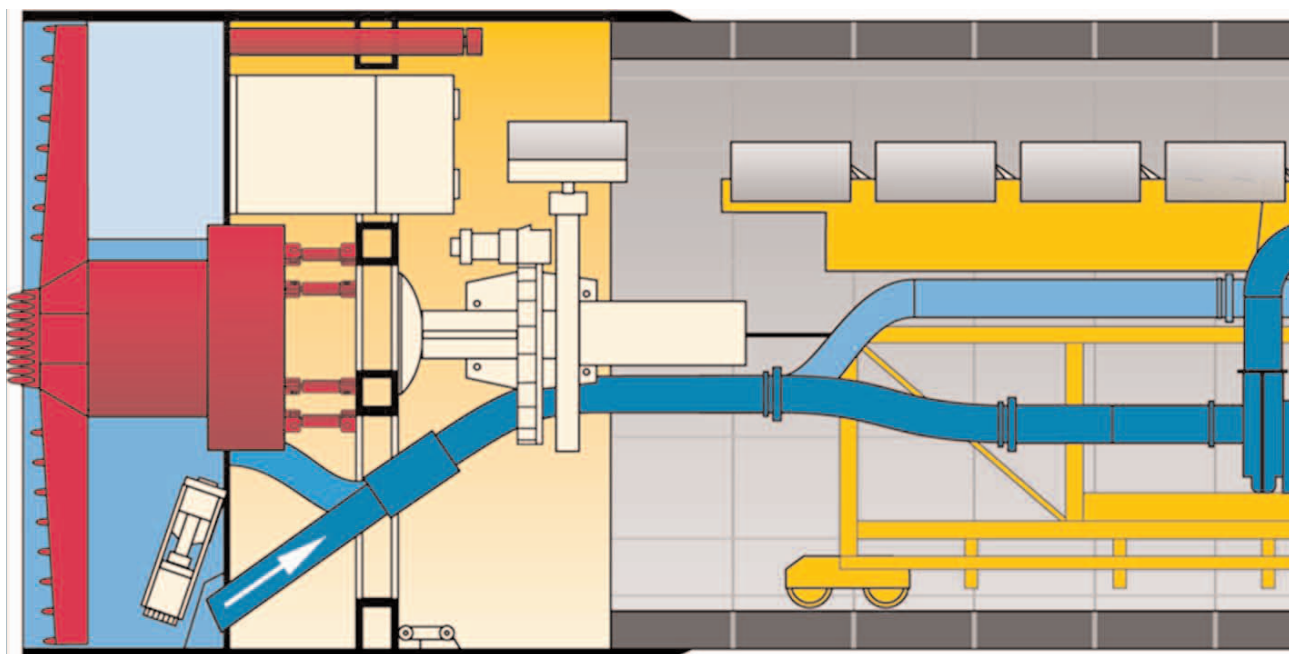
enclosure with watertight walls partially submerged in the slurry (with a paler shade in the diagram of Figure 4), at the top of which a "bubble" of pressurized air is maintained by means of an air compressor-decompressor unit, which acts automatically and with virtually "zero" inertia, with which instant regulation of circuit pressure was achieved and, therefore, the confining pressure of the chamber, solving the major problem of the significant inertia of pressure control by regulation of the flows of the circuit pumps, which often compromised the operation of the whole system. (1) (3) (5)

We should also mention another contribution of this technology for resolving the cases of **terrain with blocks of rock or large gravel ("boulders")**, which prevent the hydraulic transport of the slurry-debris mix. For these purposes, the **maximum size limit for hydraulically transportable material can be set at 80 to 100 mm**, such that, if the presence of larger sizes is expected, the mixshield has to include a jawed crusher (indicated symbolically in the graph of the Figure) installed at the bottom of the bulkhead in order to carry out the size reduction before the material enters the suction chamber of the main pump. These crushers, which accommodate sizes of up to 900 to 1000 mm, are of very simple, robust design and are fed by picking up the blocks at the bottom of the chamber with buckets arranged on the inside of the cutting wheel, which unload into the mouth of the crusher.

Of course, **the problem of boulders in unstable and saturated ground can only be solved with a mixshield**, but this also has its limitations if the percentage of sizes at the front is very significant. The fact is that the cutting wheel of the mixshield, on the one hand, displaces a certain percentage of boulders to the sides, such that the prior crushing only has to be applied to the rest, but it is evident that if the overall average percentage of large sizes exceeds figures of around 15% to 20% of all the material to be excavated, **yields become impossible to admit**, regardless of the fact that, above all, **it is impossible to maintain the continuity of the normal process of advance and, therefore, its technical viability.**

Therefore, when the aforementioned percentages are exceeded, it is essential to apply **prior treatment of the terrain with injections of mass or introduction of**

Fig. 4. Esquema simplificado de un "hidroescudo" / Mixshield simplified scheme.



la zona ocupada por los bolos, con el fin de conseguir una consolidación suficiente para inmovilizar los tamaños grandes y poder hacer su corte mecánico con las herramientas de la Rueda del hidroescudo. Esta es la solución que se viene aplicando cuando se presentan en los frentes franjas de bolos o bloques hasta límites difíciles de establecer con cifras orientativas, porque hay que estimar tanto la frecuencia, como las proporciones de la presencia de dichos tamaños en las secciones sucesivas del trazado.

En resumen, cuando en la mayoría del trazado se prevé que pueden alcanzarse cifras muy elevadas de tamaños grandes, hay que estudiar cada caso en detalle, pero ya se comprende que en ello puede estar no solo el límite de aplicación de los hidroescudos y, por tanto, de la excavabilidad con tuneladora, sino incluso de la viabilidad económica del proyecto del túnel, sea cual fuere el sistema constructivo a aplicar⁽³⁾.

Por último, en favor de la tecnología de los hidroescudos debe decirse que es la única que, por el momento, puede aplicarse en los casos de trabajo a pre-

mortar piles to fill in at least 50% of the volume occupied by the boulders, in order to achieve sufficient consolidation to immobilize the large sizes and be able to cut them mechanically with the bits of the mixshield wheel. This is the solution which has been applied when there are strips of boulders or blocks at the fronts up to limits difficult to establish with indicative figures, because it is necessary to estimate both the frequency and the proportions of the presence of such sizes in the successive sections of the route.

In summary, when very high figures of large sizes are expected to be reached over most of the route, it is necessary to study each case in detail, but it is now understood that this may not only involve the limit of application of mixshields and, therefore, of excavatability with TBM, but even of the economic viability of the tunnel project, whatever the construction system to be applied may be⁽³⁾.

Finally, in favour of mixshield technology it should be said that it is the only type that, up to now, can be

(3) En los casos en que no hay carga de agua, y siempre que sea posible adoptar un diseño superficial, la construcción del túnel puede hacerse con la modalidad "cut and cover" si las condiciones del entorno lo permiten, o bien al amparo de pantallas. En general, en tales casos no es económica la construcción con tuneladora. Así se han estudiado diversos túneles a construir en Lima, Santiago de Chile y otras ciudades.

(3) In cases in which there is no water burden, and provided it is possible to adopt a surface design, the tunnel can be constructed either by the "cut and cover" mode if the environmental conditions allow, or protected by screens. In general, in such cases, construction with TBM is not economic. Hence, diverse tunnels to be built in Lima, Santiago de Chile and other cities have been studied.

siones elevadas por encima de los 5 Bar, como demuestra una amplia experiencia a lo largo de más de 10 años.

2.2. Los escudos de frente en presión de tierras o escudos E.P.B.

El problema de los **terrenos cohesivos**, ni podía tener una solución similar, ni se consideró tan urgente, ya que se mantuvo la postura de que era posible trabajar sin riesgo de accidente en estos terrenos con presurización integral del túnel. Por ello, la solución, que hubo de ser más compleja, no se logró hasta bien entrados los años 1980-89, gracias a la insistencia general de las autoridades sanitarias para el abandono del trabajo a presión hiperbárica, por razones de salubridad y de seguridad.

Por otra parte, las aplicaciones de esta **nueva tecnología de presurización exclusiva del frente** para excavar terrenos cohesivos sufrieron algunos fracasos sonados a lo largo del periodo inicial de su adopción (1985-90), pudiendo decir que no se logró una clara aceptación general hasta la **aplicación generalizada de los aditivos químicos**, que se fue imponiendo a lo largo de la década de los años 1990-99, y que ha alcanzado el actual nivel técnico en los últimos 5 años.

En resumen, las **bases del diseño del "escudo de presión de tierras"** pueden resumirse en los 3 objetivos siguientes, con las correspondientes soluciones adoptadas (Figura 5):

applied in cases of work at high pressures of above 5 Bar, as shown by wide experience obtained over a period of more than 10 years.

2.2. Earth pressure balance or E.P.B. shields

*The problem of **cohesive soils** could neither have a similar solution, nor was it considered so urgent, since the position was held that it was possible to work in such terrain without risk of accident using whole tunnel pressurization. Therefore, the solution, which had to be more complex, was not achieved until well into the 1980's, thanks to the general insistence of health authorities on the abandonment of hyperbaric pressure work for reasons of health and safety.*

*On the other hand, the applications of this **new technology of exclusive pressurization of the front** for excavating cohesive soils suffered some notorious failures during the initial period of use (1985-90), it being possible to say that clear general acceptance was not achieved until the **widespread application of chemical additives**, which came into use during the 1990's, and which has reached its current technical level over the last 5 years.*

*In summary, the **basis for the design of the earth pressure balance shield** can be summed up in the 3 following objectives, with the corresponding solutions adopted (Figure 5):*

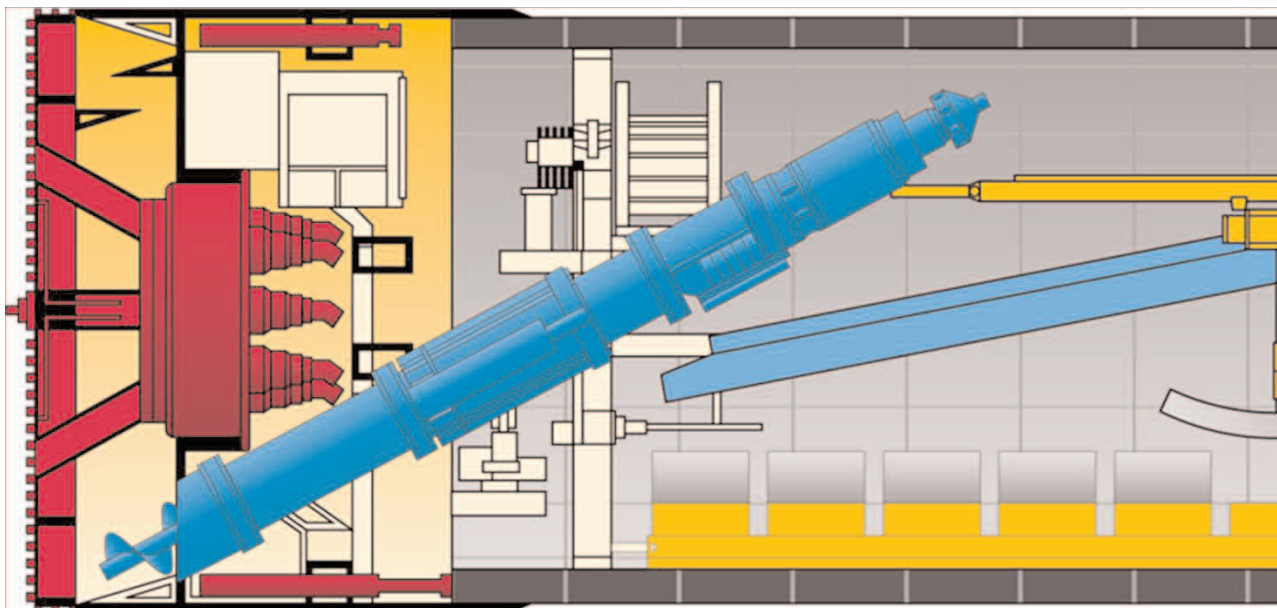


Fig. 5. Esquema simplificado de un "escudo de presión de tierras" / EPB Shield simplified scheme.

- Presurizar el frente con una masa plástica, mezcla del terreno excavado con agua y productos químicos de adición, con lo que se siguió una línea similar a la de los "hidroescudos", en cuanto a la contención del terreno del frente.
- Extraer dicha mezcla sin pérdida de la presión por medio de un tornillo sinfín, continuando en la misma línea de la anterior tipología y, finalmente.
- Conseguir que la masa plástica, a la salida del tornillo, fuese transportable por cinta y vagón, manteniendo así un principio general de las TBMs: la "continuidad del proceso cíclico del avance".

Una vez lograda la puesta a punto de los elementos propios del diseño que se acaban de citar, el éxito de esta tipología se consiguió con la **mejora de los aditivos químicos que**, como ya se ha dicho, son fundamentales para lograr una preparación adecuada del material excavado (2) (8) (12). Los aditivos actualmente disponibles responden a los tipos siguientes:

- **Productos tensoactivos** (denominados también "espumas") para lograr la trabajabilidad de los terrenos cohesivos por medio de la generación de burbujas de aire⁽⁴⁾. Estos productos:
 - Reducen el rozamiento del terreno con el acero de la Rueda y, en consecuencia, **disminuyen el Par de giro y el desgaste de las herramientas.**
 - Refrigeran el corte mecánico, evitando la **tendencia general de las arcillas a endurecerse formando bloques que obturan las entradas a la cámara o al tornillo sinfín.**
 - Reducen la "pegajosidad" de las arcillas a la Rueda, otra causa mas del cierre de las aberturas de entrada del material a la cámara.
 - Homogenizan la mezcla en la cámara rellenoando los vacíos creados por el esponjamiento del terreno a excavar para conseguir el efecto de estabilización del frente en la **extracción con tornillo sin pérdida de presión.**

(4) Son usuales las características siguientes del tensoactivo: Tasa de tratamiento o FIR ("Foam Injection Rate") que es la relación entre Volumen Espuma/Volumen Terreno excavado, alrededor de un 50% pero llegando muchas veces del 80%-100%. Se sirve el producto en Soluciones espumantes con concentraciones de tensoactivo CF ("Concentration Foam") o relación Volumen Tensoactivo/Volumen de agua, entre 1%-5% y un Coeficiente de expansión FER ("Foam Expansion Rate") o relación Volumen Espuma/Volumen Solución espumante con valores entre 5-10 y a veces 30.

- *Pressurizing the front with a plastic mass, a mixture of the excavated soil with water and chemical additives, by which a similar line was followed to that of "mixshields", with regard to the containment of the soil at the front.*
- *Extracting this mixture with no loss of pressure by means of a screw, continuing along the same lines as the previous types and, finally;*
- *Ensuring that the plastic mass coming out of the screw can be transported by conveyor belt and wagon, thus maintaining a general principle of TBM's: the "continuity of the cyclic process of the advance".*

Once the aforementioned design elements had been perfected, the success of this type of shield was achieved with the **improvement of the chemical additives which**, as already mentioned, are essential in order to achieve a suitable preparation of the excavated material (2) (8) (12). The additives currently available are of the following types:

- **Surfactant products** (also known as "foams") to achieve the workability of cohesive soils by the generation of air bubbles⁽⁴⁾. These products:
 - *Reduce the friction of the soil with the steel of the wheel and, therefore, decrease the torque and wear of the tools.*
 - *Cool the mechanical cutting, preventing the general tendency of clays to harden forming blocks that obstruct the entrances to the chamber or screw.*
 - *Reduce the adhesion of the clay to the wheel, another cause of obstruction of the openings for the entry of material to the chamber.*
 - *Homogenize the mixture in the chamber by filling in the gaps created by the sponging of the soil to be excavated in order to achieve the effect of stabilization of the front in the extraction by screw with no pressure loss.*

(4) The following are the usual characteristics of surfactants: Treatment rate or FIR (Foam Injection Rate), which is the ratio of Foam Volume/Excavated Soil Volume, around 50%, but often reaching 80%-100%. The product is served in foaming solutions with surfactant concentrations CF (Concentration Foam) or Surfactant Volume/Water Volume ratio between 1%-5% and a FER (Foam Expansion Rate) or Foam Volume/Foaming Solution Volume ratio of between 5-10 and sometimes 30.

Por otra parte, hay **polímeros que aumentan la estabilidad de las burbujas de aire** y que se aplican para ello como **complemento del tensoactivo** elegido.

- **Polímeros desestructurantes**, a los que hay que recurrir, como complemento de los tensoactivos, cuando **la alta plasticidad de algunas arcillas** producen dificultades máximas tanto por su “pegajosidad” como por la dificultad para lograr una masa uniforme y trabajable. Por último (6) (7)
- **Polímeros reductores de agua**, imprescindibles para **impedir la disgregación de la mezcla** cuando hay arenas muy finas, generalmente de **estructura monogranular**, es decir, con husos estrechos de tipo vertical en el gráfico de su granulometría.

Por otra parte, las máquinas modernas suelen llevar un **equipo de inyección automática de lodo bentonítico** para rellenar el “gap” entre escudo y terreno a una presión del orden de 0,5 Bar por encima de la presión de confinamiento, con lo cual es posible reducir muy sensiblemente los asentos.

Con un objetivo similar, está también generalizado el dotar a estos escudos de un **equipo similar de inyección automática a la cámara de lodo bentonítico**, bien que con depósitos de capacidad mayor, para **estabilizar la presión de confinamiento de las tierras**, en el rango de valores establecidos en el Procedimiento operativo del Escudo (4) (5).

Es un hecho comprobado en las últimas obras españolas de la red ferroviaria de Alta Velocidad que con los Escudos EPB de última generación se han conseguido asentos mínimos (< 5mm) en la excavación de túneles en suelos con materiales cohesivos de muy diversas granulometrías.

Finalmente, hay que señalar que **esta tecnología tiene la limitación de la presión máxima de trabajo** que, por el momento ha de limitarse a los 5 Bar (9), para escudos de diseño convencional.

3. Los campos de aplicación de los escudos presurizados

Las diversas experiencias relativas a la excavación de Túneles en suelos saturados e inestables con escudos de frente en presión, se resumen en el gráfico de la Figura 6, que relaciona la granulometría del terreno con el % de su paso por los tamices clásicos utilizados en laboratorio.

*On the other hand, there are **polymers that increase the stability of the air bubbles** and which are therefore applied as a **complement to the chosen surfactant**.*

- **Destructuring polymers**, which have to be used as a complement to the surfactants when **the high plasticity of some clays** causes major difficulties both due to their “stickiness” and due to the difficulty of achieving a uniform, workable mass. Finally (6) (7)
- **Water-reducing polymers**, necessary to **prevent the disintegration of the mixture** when there are **very fine sands**, generally of a **monogranular structure**, i.e. with narrow vertical zones in the graph of particle size.

*On the other hand, modern machines usually include a **unit for the automatic injection of bentonite slurry** to fill in the shield-terrain gap at a pressure of around 0.5 Bar above confining pressure, by which it is possible to significantly reduce subsidence.*

*For a similar purpose, it is also widespread practice to provide these shields with a **similar automatic injection unit to the bentonite slurry chamber**, possibly with larger capacity tanks, to **stabilize the confinement pressure of the earth**, in the range of values established in the operating procedure of the shield (4) (5).*

It is a proven fact in the latest Spanish work of the High Speed rail network that with latest generation EPB shields minimum subsidence (< 5mm) has been achieved in the excavation of tunnels in soils with cohesive materials of highly diverse particle sizes.

*Finally, it should be pointed out that **this technology has the limitation of the maximum working pressure** which, for the time being, has to be limited to 5 Bar (9), for conventional design shields.*

3. Fields of application of pressurized shields

The various experiences regarding the excavation of tunnels in saturated and unstable soils with pressure balance shields are summarized in the graph in Figure 6, which relates the particle size of the soil with the % passing through the classical sieves used in laboratories.

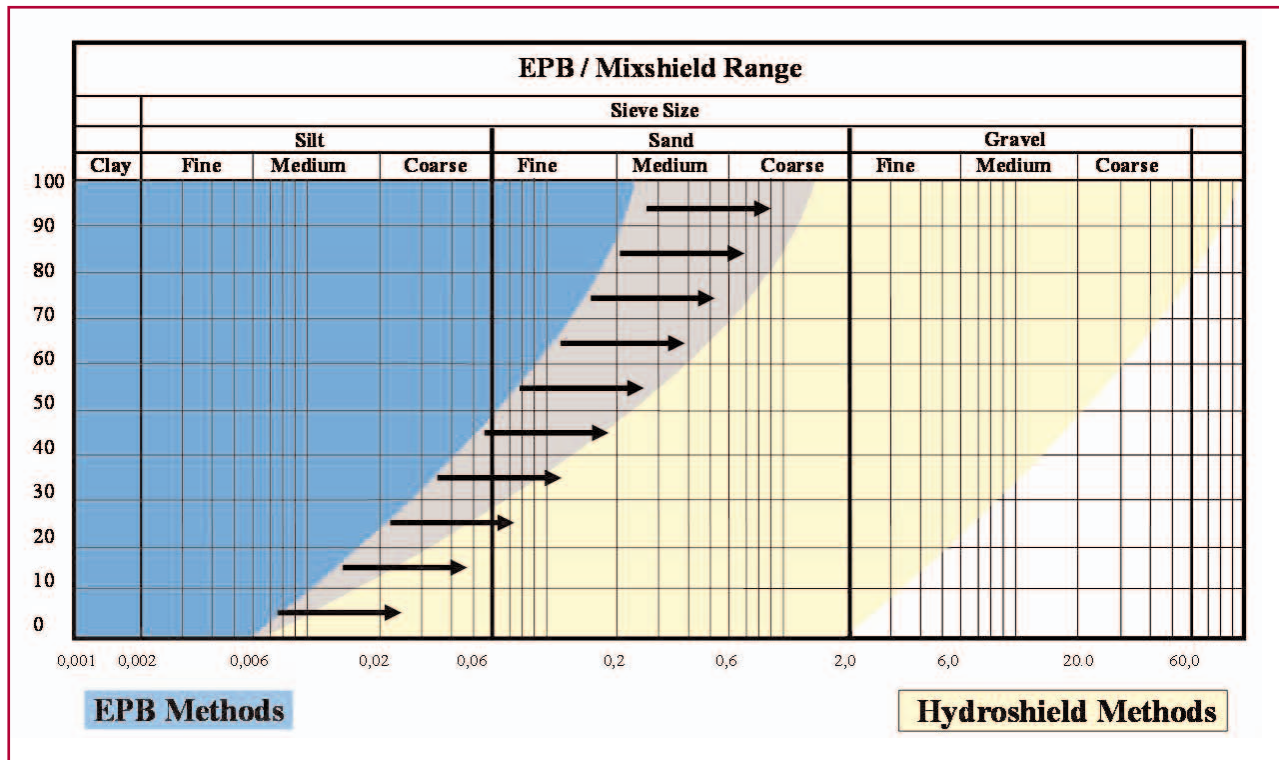


Fig. 6. Campos de aplicación de los escudos presurizados/EPB and Mixshield Range.

La parte izquierda en azul del gráfico, que corresponde a terrenos ricos en finos o, si se quiere, a terrenos cohesivos, es el campo ideal de empleo de los escudos E.P.B., mientras que la parte derecha en color amarillo (terrenos no cohesivos con escasez de finos) es el campo de empleo de los hidroescudos.

La parte del gráfico en color gris señalada con flechas, puede interpretarse, en líneas generales, como la que corresponde a los husos granulométricos de los terrenos en los que puede emplearse uno u otro tipo de escudo⁽⁵⁾, si bien añadiendo condiciones complementarias, según los casos.

Pues bien, sobre esto hay que decir lo siguiente:

- Este gráfico debe entenderse como **meramente indicativo**, por las razones siguientes:
- Cuando los husos granulométricos del terreno caen en uno de los dos campos, la elección del tipo de escudo de acuerdo con el gráfico es correcta, pero es

(5) En primera aproximación, el producto de un escudo E.P.B. que excave en roca o frentes mixtos de roca y suelos bajo carga de agua, suele corresponder a esta zona del gráfico. Por el contrario, el de los hidroescudos, que pueden trabajar en rocas no arcillosas (del tipo de las limolitas y las areniscas blandas) o en frentes mixtos con rocas similares, suele corresponder a la parte derecha del gráfico.

The left-hand, blue coloured part of the graph, corresponding to soils rich in fine particles or, if you like, cohesive soils, is the ideal field of application of EPB shields, whereas the right-hand, yellow coloured part (non-cohesive soils with few fine particles) is the field of application of mixshields.

The grey coloured part of the graph shown with arrows can be interpreted, in general, as that corresponding to the particle size zones of soils in which either type of shield can be used⁽⁵⁾, but with the addition of complementary conditions, according to each case.

However, the following must be said about this:

- This graph should be understood as **purely indicative**, for the following reasons:
- When the particle size zones of the soil fall within one of the two fields, the choice of shield type in accordance with the graph is correct, but it is

(5) As a first approximation, the product of an E.P.B. shield excavating in rock or mixed fronts of rock and soils under a water burden, usually corresponds to this area of the graph. On the other hand, that of mixshields, which can work in non-clay rocks (of the soft sandstone and siltstone type) or in mixed fronts with similar rocks, usually corresponds to the right-hand part of the graph.

necesario elegir también los aditivos adecuados, con ensayos previos en laboratorio.

- La razón es que el conseguir un acondicionamiento adecuado del terreno, no depende sólo de la granulometría de éste, sino muy señaladamente del tipo y tasa de los aditivos empleados.

Así, por lo que se refiere a los escudos E.P.B., un determinado tipo de tratamiento puede mejorar de modo radical la trabajabilidad de la mezcla, variando simplemente el FIR del espumante, y manteniendo estable el resto de valores de los otros aditivos.

- Por último, el señalar con flechas de izquierda a derecha lo que, en principio, debe interpretarse como campo común a ambos tipos de escudo, **no es arbitrario**, porque, como veremos seguidamente, **por el momento tienen una mayor posibilidad de empleo en esta franja del gráfico los escudos E.P.B. que los hidroescudos.**

4. Los escudos E.P.B. en suelos no cohesivos y en rocas

En el gráfico de la Figura 7 se recoge la casuística de las posibles aplicaciones de los escudos E.P.B. en suelos no cohesivos:

- La zona 1 es el campo ideal de utilización de este tipo de escudos. Puede decirse que cuando el suelo tiene del orden de un 30% ó más de materiales finos (arcillas y limos) en general puede excavarse incluso sin aditivos.
- La zona 2 corresponde a las excavaciones posibles con escudos E.P.B., con **empleo indispensable de aditivos químicos** cuyos tipos y dosis deben decidirse según los resultados de los estudios de laboratorio.

Un buen ejemplo de ello fue la excavación con un escudo E.P.B. de los túneles gemelos de la línea 1 del Metro de Sevilla en el tramo bajo el río Guadalquivir, en que el corte de unos pequeños espesores de margas azules aportó entre un 6% y un 10% de finos, lo que, con el tensoactivo correspondiente permitió el avance en el aluvial del río.

- Por último en la zona 3, puede lograrse un comportamiento aceptable de dichos escudos, **incorpo-**

necessary also to choose the suitable additives, with prior laboratory testing.

- *The reason is that achieving suitable conditioning of the soil does not depend only on the particle size of the same, but also very significantly on the type and rate of additives used.*

Therefore, with regard to EPB shields, a particular type of treatment can radically improve the workability of the mix, simply by changing the FIR of the foaming agent, and keeping the values of the other additives stable.

- *Finally, indicating with arrows from left to right what, in principle, should be interpreted as common field for both types of shield, is not arbitrary, because, as we shall see below, at the present time EPB shields have a greater possibility of use than mixshields in this area of the graph.*

4. EPB shields in non-cohesive soils and rocks

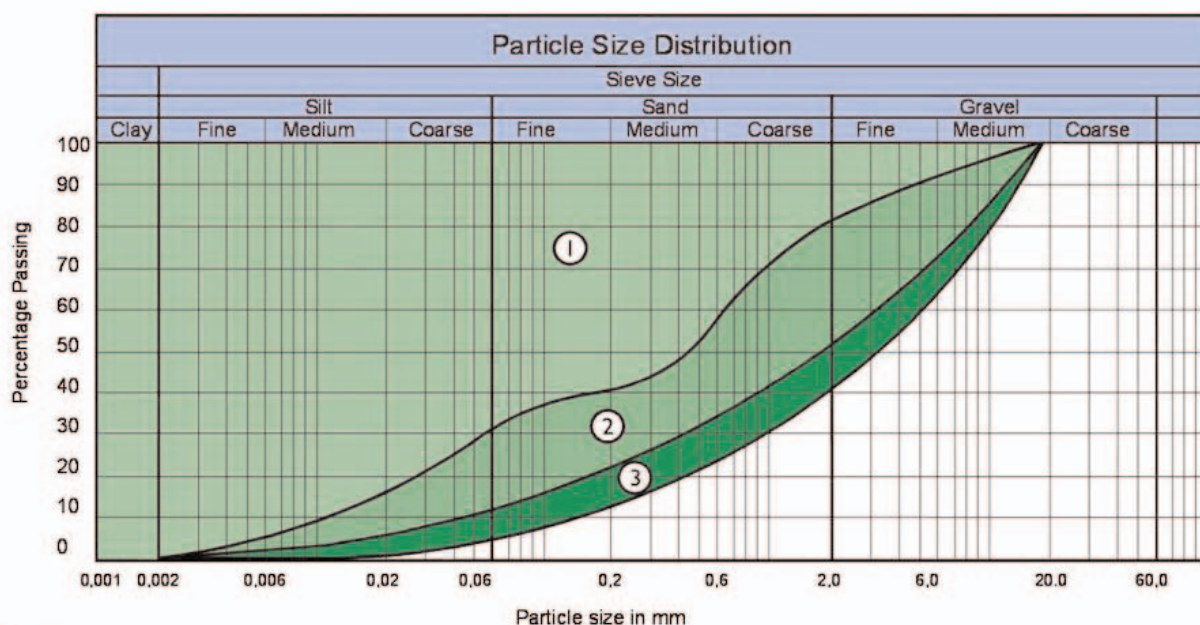
The graph in Figure 7 shows the casuistry of the possible applications of EPB shields in non-cohesive soils:

- *Area 1 is the ideal field of application of this type of shield. It can be said that when the soil has around 30% or more of fine materials (clay and silt) it can generally be excavated even without additives.*
- *Area 2 corresponds to possible excavations with EPB shields, with **essential use of chemical additives**, whose types and proportions must be determined according to the results of laboratory studies.*

A good example of this was the excavation with EPB shield of the twin tunnels of Line 1 of the Seville Metro in the section under the River Guadalquivir, in which the cutting of some small layers of blue marl contributed between 6% and 10% of fine material, which, with the appropriate surfactant allowed for the advance in the flood plain of the river.

- *Finally, in area 3, acceptable performance of these shields can be achieved by adding fine*

Fig. 7.
Ampliación del
campo de
empleo de los
Escudos
E.P.B./EPB
Shields range
enlargement.



- ① Trabajo normal sin aditivos. / Normally work without foam additives.
- ② Trabajo posible sólo con aditivos. / Only possible with foam additives.
- ③ Trabajo posible sólo con aditivos y aportación de finos a la cámara. / Only possible with foam additives and providing fine materials to the inside of the chamber

rando 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, ó bien
- Suspensiones en agua de otros materiales, como el polvo de carbonato cálcico, obtenido por molienda (actualmente en experimentación con ciertas clases de CaCO_3).

Con referencia a la obra ya citada del Metro de Sevilla, la dificultad mayor fue la excavación en los tramos de entrada y salida del paso bajo el río Guadalquivir, en los que la total ausencia de finos dificultó mucho la excavación pues, aunque se incorporó lodo bentonítico a la cámara, no era suficientemente denso para lograr un efecto claramente positivo.

Por otra parte, podemos añadir que los ensayos con polvo de carbonato cálcico para añadir a las capas de gravas a atravesar por los futuros túneles de la autopista SE-40 el Río Guadalquivir en la zona de Coria del Río (Sevilla) han dado resultados satisfactorios.

material to the chamber (in addition to chemical additives) by the pumping of:

- Dense clay slurry prepared with loaned clay material in proportions that can range from 15% to 30% of all the material in the chamber, or
- Suspensions in water of other materials, such as calcium carbonate powder obtained by grinding (currently under experimentation with certain kinds of CaCO_3).

With reference to the aforementioned work on the Seville Metro, the main difficulty was the excavation in the entry and exit sections of the passage under the River Guadalquivir, in which the complete absence of fine material made excavation very difficult since, although bentonite slurry was added to the chamber, it was not dense enough to achieve a clearly positive effect.

On the other hand, we can add that the trials with calcium carbonate powder to be added to the layers of gravel to be crossed by the future tunnels of the SE-40 motorway under the River Guadalquivir in the area of Coria del Río (Seville) have given satisfactory results.

- En cuanto a los aditivos químicos, debe añadirse que algunos **terrenos no cohesivos**, como pueden ser las **arenas finas** y los **limos arenosos** suelen **necesitar polímeros reductores de agua**, además del tensoactivo.

Todo lo anterior es aplicable al caso de **rocas blandas de matriz arcillosa** (margas, argillitas y pizarras) mientras que en los casos de matrices arenosas y rocas de dureza media hay que recurrir a la **adición de finos**, además de los aditivos químicos (10).

5. Los hidroescudos en suelos cohesivos y en rocas

Los hidroescudos nacieron, como ya se ha dicho, para resolver la excavación con escudo de **suelos no cohesivos inestables y saturados** pero, además, ha venido siendo difícilmente justificable su utilización en túneles en terrenos cohesivos por las siguientes razones:

- La bentonita no es gratis y, por tanto, es obligada su recuperación, hoy día fácil de lograr con pérdidas mínimas (de un 1% a un 2% como máximo) con las plantas de separación modernas, pero eso **es aplicable a los suelos no cohesivos**, porque comercialmente ha venido siendo imposible separar dos arcillas (en este caso, la bentonita y la arcilla del terreno).
- Ahora bien, con la actual tecnología de las plantas se ha conseguido **separar la bentonita de un escombros arcilloso** con pérdidas limitadas (se habla hasta de un 5%) pero, por el momento, a costa de un **incremento exagerado de la potencia de las plantas**, lo que lleva sus costes de inversión y explotación a cifras inaceptables.

Por todo lo anterior, hoy día sólo cabe la aplicación de los hidroescudos a los suelos cohesivos en circunstancias particulares, como pueden ser las siguientes:

- En obras situadas en la costa, con posible **vertido de los escombros en alta mar**, podría ser aceptable la **pérdida de grandes cantidades de bentonita** si, aparte de comprobar la ventaja económica (dado el menor coste del vertido) hay autorización oficial para ello desde el **punto de vista medioambiental**. En tal caso puede combinarse una recuperación parcial del lodo, a enriquecer con lodo "fres-

- *With regard to chemical additives, it should be added that some **non-cohesive soils**, such as **fine sands and sandy silts** usually require **water-reducing polymers**, in addition to the surfactant.*

*All the above is applicable to the case of **soft rocks with a clay matrix** (marls, argillites and slates), whereas in the case of Sandy matrices and rocks of medium hardness it is necessary to resort to the **addition of fine materials**, in addition to chemical additives (10).*

5. Mixshields in cohesive soils and rocks

*Mixshields were developed, as mentioned before, to resolve the problem of excavation with shields of **unstable and saturated non-cohesive soils** but, moreover, it has been difficult to justify their use in tunnels in cohesive soils for the following reasons:*

- *Bentonite is not free and, therefore, its recovery is obligatory, nowadays easily achieved with **minimum losses** (from 1% to 2% at most) with modern separation plants, but this is **applicable to non-cohesive soils**, because it has been commercially impossible to separate two clays (in this case, bentonite and the clay from the soil).*
- *However, with the current technology of the plants it has been possible to **separate the bentonite from a clay debris** with limited losses (5% has been mentioned) but, at the present time, at the expense of an **exaggerated increase in the power of the plants**, which raises their investment and operating costs to unacceptable figures.*

For all the above reasons, nowadays mixshields can only be applied to cohesive soils in particular circumstances, such as the following:

- *In projects situated on the coast, with possible **dumping of debris at sea**, the loss of large amounts of bentonite might be acceptable if, apart from demonstrating the economic advantage (given the lower cost of dumping), there is official authorization to do so from the **environmental viewpoint**. In this case, partial*

co" para mantener la impulsión al túnel, con el vertido del resto de la mezcla en un silo regulador del que se cargarían los gánguiles para su vertido final en alta mar⁽⁶⁾.

- En el caso de **disponer de escombreras autorizadas para verter escombros arcillosos**, podría ser aceptable económicamente **la separación del lodo con un bajo contenido en bentonita** (cuya dosis se incrementaría desde la planta para realimentar el circuito del túnel) **del grueso restante de la mezcla** (escombro arcilloso con bentonita), una masa viscosa que puede desecarse en la planta a un coste razonable para su carga y transporte con medios convencionales hasta la escombrera.

En resumen, todo lo expuesto confirma lo ya dicho anteriormente: **por el momento, es muy limitada la posibilidad de empleo de los hidroescudos en suelos cohesivos** que, en principio, corresponden al campo de utilización de los escudos E.P.B.

La misma conclusión puede aplicarse a los casos de **rocas de matriz arcillosa**, en los que la dificultad de aplicación puede ser total si la dureza de la "roca intacta" o roca matriz de la formación es alta, ya que, los parámetros básicos (Empuje y Par de giro) de un hidroescudo son bastante menores que los de un escudo tipo E.P.B. lo que hace obligado tener que recurrir a este último tipo de escudo en rocas duras de matriz "arenosa" (granitos, areniscas, etc) en aquellos casos en que es obligado trabajar con frente en presión, por razones de estabilidad.

6. Los modelos duales de escudos presurizados

El diseño de cada escudo, como el de todo tipo de tuneladora, debería adaptarse a la problemática que presenten los terrenos del trazado, de acuerdo con lo expresado hasta aquí. Pero las características de muchos proyectos actuales y las circunstancias

(6) La bentonita no es causa de contaminación química o biológica, es decir, no es tóxica y no causa otro tipo de daños a las personas, por lo que sólo puede ser rechazable su vertido al mar si las corrientes pueden llevarla a las playas de una zona turística por lo desagradable de su contacto por las personas. Es cierto que afecta a los peces por asfixia si llega a depositarse en las branquias, hipótesis que sólo es posible en el caso de ríos o de lagos, en general de profundidad limitada y sin corrientes que dispersen suficientemente los vertidos. En todo caso, en España no hemos conseguido hasta ahora el permiso de las autoridades marítimas para hacer tales vertidos, como se han realizado en el Canal de la Mancha.

recovery of the slurry, to be enriched with "fresh" slurry to maintain the drive of the tunnel, can be combined with the dumping of the rest of the mixture in a regulating silo from which the barges would be loaded for its final dumping at sea⁽⁶⁾.

- *In the event of **there being authorized tips for the dumping of clay debris**, it could be economically acceptable to **separate the slurry with a low bentonite content** (whose proportion would be increased from the plant to feed back into the tunnel circuit) **from the remaining bulk of the mixture** (clay debris with bentonite), a viscous mass which can be dried in the plant at a reasonable cost for loading and transport to the tip by conventional means.*

*In summary, the above confirms what has been said before: **at the moment, there is a very limited possibility of using mixshields in cohesive soils**, which, in principle, correspond to the field of application of EPB shields.*

*The same conclusion can be applied to cases of **rocks with clay matrix**, in which the difficulty of application can be absolute if the hardness of the "intact rock" or matrix rock of the formation is high, since the basic parameters (thrust and torque) of a mixshield are a good deal lower than those of an EPB type shield, making it necessary to resort to this latter type of shield in hard rock with "sandy" matrix (granites, sandstones, etc) in those cases in which it is necessary to work with a pressurized front for reasons of stability.*

6. Dual models of pressurized shields

The design of each shield, like that of all types of tunnel boring machine, should be adapted to the problems presented by the terrain of the route, in accordance with everything explained up to now.

(6) *Bentonite is not a cause of chemical or biological solution, i.e. it is not toxic and does not cause other types of damage to people, so dumping at sea can only be rejected if currents might take it to the beaches of a tourist area due to its unpleasant contact for people. It can be a cause of asphyxia in fish if it gets into their gills, something which is only possible in rivers and lakes, generally of a limited depth and without currents to disperse the material dumped. At all events, in Spain, up to now we have not gained the permission of the maritime authorities to dump in this way, as has been done in the British Channel.*

presentes en el mercado internacional de los túneles a construir con escudos presurizados plantean dos tipos de problemas:

- Un número importante de proyectos de túneles de las nuevas infraestructuras modernas discurren a través de terrenos de características muy diferentes. Es frecuente que para el escudo que va a construir un túnel lo lógico sería adoptar las dos tipologías básicas tratadas en esta ponencia.
- En otros casos, sucede que no es posible amortizar en la obra a ejecutar la inversión que supone la construcción del tipo de escudo concreto que hay que fabricar, debido a la longitud limitada del túnel, siendo muy difícil asegurar que se consiga otro proyecto similar en un futuro próximo.

Los dos tipos de problemas expuestos han motivado en estos últimos años la reaparición de los diseños “duales” de escudos, para disminuir las consecuencias desfavorables que se plantean a los constructores (11) (14) (15).

El primer tipo de problemas plantea el **diseño dual de un escudo para adoptar las dos tipologías de los escudos presurizados** y el segundo se refiere más bien a los diseños de **una tipología de escudo a presión con la alternativa de escudo no presurizado**. En ambos casos, la decisión depende, básicamente de las transformaciones a realizar, con la duplicación necesaria, bien sea de los componentes propios del escudo, o bien de las instalaciones principales de transporte del escombros. Sobre todo ello puede decirse lo siguiente:

• Diseño “Hidro” / “Escudo EPB”

Ha habido casos en que este diseño ha permitido mejorar el coste final del túnel, como sucedió en la máquina de la autopista perimetral de París A-86.

No obstante, la **transformación, aunque haya que aplicarla una sola vez, tiene un coste muy elevado, por la necesaria duplicación de las instalaciones de transporte de escombros**, (cinta continua/transporte hidráulico y planta de separación) todo ello con un coste muy importante que ha de amortizarse en la obra.

Hay que añadir además que **es posible emplear escudos EPB en tramos de suelos no cohesivos** (aunque, en principio, sean terrenos más adecuados a su excavación con “hidroescudos”) con ciertas me-

But the characteristics of many current projects and the present circumstances in the international market of tunnels to be constructed with pressurized shields pose two types of problem:

- *A considerable number of tunnel projects for new modern infrastructures pass through terrain with very different characteristics. It may be often logical to adopt the two basic types of shield dealt with in this paper for the construction of a tunnel.*
- *In other cases, it is not possible to amortize in the project to be implemented the investment involved in the construction of the specific type of shield to be built, due to the limited length of the tunnel, it being very difficult to ensure that another similar project will arise in the near future.*

The two types of problem indicated have led to the reappearance in recent years of “dual” shield designs, to reduce the adverse consequences faced by builders (11) (14) (15).

The first type of problem raises the possibility of a dual shield design to include the two types of pressurized shield and the second refers rather to designs of a pressurized type shield with the alternative of a non-pressurized shield. In both cases, the decision depends basically on the transformations to be carried out, with the necessary duplication either of the shield components themselves or of the main debris transport facilities. With regard to all this, the following can be said:

• “Mixshield” / “EPB shield” design

There have been cases in which this design has made it possible to improve the final cost of the tunnel, as in the case of the machine used on the A-86 Paris perimeter motorway.

However, transformation, even if it only has to take place once, has a very high cost, due to the necessary duplication of the debris transport facilities (conveyor belt/hydraulic transport and separation plant), all of which has involved a major cost that has to be amortized in the work.

We should also add that it is possible to use EPB shields in sections of non-cohesive soil (even

didas complementarias ya comentadas, lo que es una razón más en contra de este tipo de diseño dual.

Por todo ello, es previsible que este diseño **se adopte en el futuro con una frecuencia baja** y siempre que se compruebe previamente que el coste final de obra se puede mejorar.

Y, por lo que refiere a los diseños “duales” que contemplan la alternativa al escudo presurizado con escudos abiertos o no presurizados, puede decirse que la mejora indudable de los reconocimientos y ensayos previos de los terrenos del trazado ha hecho posible tomar la decisión correcta del empleo de los modelos duales en tramos concretos de cada proyecto con la consiguiente reducción del coste cuando se trabaja en “modo abierto”.

7. Conclusiones

El resumen de los aspectos principales comentados en esta comunicación se exponen a continuación, como Conclusiones de la misma.

- 1) El trabajo continuado con escudos abiertos en condiciones hiperbáricas para la estabilización de los frentes está **totalmente abandonado por razones de Seguridad e Higiene**. Solamente sigue aplicándose a **operaciones auxiliares o de mantenimiento**, de una duración limitada y siempre con máquina parada.
- 2) Las dos tipologías actuales de escudos presurizados, “escudos de frente en presión de lodos” o “hidroescudos” y “escudos de frente en presión de tierras” o “escudos E.P.B.” **tienen sus campos de aplicación óptima perfectamente definidos**.
- 3) Los “hidroescudos” modernos utilizan lodo bentonítico para la contención del frente y la reducción de asentamientos debidos al “gap” entre escudo y terreno, siendo la **solución plenamente lograda para la excavación en terrenos no cohesivos**.
- 4) Las plantas modernas que completan el trabajo del “hidroescudo” logran una separación del escombros con **pérdidas mínimas de bentonita** (1% a 2%). Por otra parte se consigue la obtención de un **escombros suficientemente seco** que permite la carga y transporte con medios convencionales.

though, in principle, they are soils more suitable for excavation with “mixshields”) with certain complementary measures already mentioned, which is one more reason against this type of dual design.

*Therefore, it is foreseeable that this design **will be used in the future at a low frequency** and only when it is previously demonstrated that the final cost of the project can be improved.*

And with regard to “dual” designs that involve the combination of pressurized shield with open or non-pressurized shield, we can say that the undoubted improvement of the reconnaissance and prior testing of the terrain of the route has made it possible to make the right decision about the use of dual models in specific sections of each project with the resulting cost reduction when working in “open mode”.

7. Conclusions

The summary of the main aspects discussed in this communication is shown below, as conclusions to the same.

- 1) *Continuous work with open shields in hyperbaric conditions for the stabilization of fronts has been **totally abandoned for health and safety reasons**. It is now only applied to **ancillary or maintenance operations**, of limited duration and always with the machine at a standstill.*
- 2) *The two current types of pressurized shield, “mud pressure balance shields” or “mixshields” and “earth pressure balance shields” or “E.P.B. shields” have perfectly defined optimum fields of application.*
- 3) *Modern “mixshields” use bentonite slurry for containment of the front and reduction of subsidence cause by the shield-terrain gap, this solution being fully developed for excavation in non-cohesive soils.*
- 4) *Modern plants that complete the work of the “mixshield” achieve separation of debris with **minimum loss of bentonite** (1% to 2%). At the same time, they manage to obtain a **sufficiently dry debris** to permit loading and transport with conventional means.*

- 5) Los últimos desarrollos de las plantas han conseguido separar la bentonita de un escombros arcilloso, pero con un aumento de la potencia de las mismas que lleva los costes de inversión y explotación a cifras no asumibles, lo que, de momento, retrasa la posibilidad de empleo de un "hidroescudo" en terrenos cohesivos.
- 6) Los "escudos E.P.B." modernos han conseguido, junto con el empleo de los aditivos químicos actuales, lograr una "mezcla" de tierras de la cámara que cumple satisfactoriamente las condiciones de contención del frente y permite su extracción de la cámara sin pérdida de presión por medio de un tornillo sinfín, controlando, a su vez el peso del material extraído, por lo que esta tipología es la solución óptima para la excavación en terrenos cohesivos.
- 7) La limitación de asentamientos en estos escudos se ha conseguido con la inyección automática de lodo bentonítico al "gap" entre escudo y terreno. Un sistema automático similar, permite regular el mantenimiento de la presión de tierras en la cámara en los márgenes debidos.
- 8) La utilización de los "escudos E.P.B" en tramos de materiales no cohesivos es posible en una gran parte de los casos, por lo que esta tipología es la que, por el momento, mejor se adapta al empleo en terrenos que corresponden a la zona límite poco definida, que separa los campos de aplicación ideal de las dos tipologías.
- 9) Actualmente son frecuentes los diseños "duales" sobre todo de "escudo no presurizado" con "escudo de frente en presión". ♦

- 5) *The latest developments in plants have managed to separate the bentonite from clay debris, but with an increase in the power of the plants which raises the investment and operating costs to unacceptable levels, which, at the moment, delays the possibility of using a "mixshield" in cohesive soils.*
- 6) *Modern "E.P.B. shields", combined with the use of current chemical additives, have managed to achieve a "mix" of soils in the chamber that satisfactorily fulfils the conditions of containment of the front and allows for its extraction from the chamber without loss of pressure by means of a screw, controlling, in turn, the weight of the material extracted, making this type the optimum solution for excavation in cohesive soils.*
- 7) *The limitation of subsidence in these shields has been achieved with the automatic injection of bentonite slurry into the shield-terrain gap. A similar automatic system makes it possible to regulate the maintenance of earth pressure in the chamber within the appropriate margins.*
- 8) *The use of "E.P.B. shields" in sections of non-cohesive material is possible in most cases, such that this type is the one which, at the moment, is best adapted for use in terrains corresponding to the poorly defined limit area between the ideal fields of application of the two types.*
- 9) *"Dual" designs are currently common, above all the models of "non-pressurized shield" with "earth pressure balance shield". ♦*

Referencias/References:

- (1) METZGER, Christof; COLZANI, Greg; IRWIN, Gary "Selection, design and procurement of North America's Largest Mixshield TBM for Portland, Oregon's East Side CSO Tunnel". *Proceedings of the RETC 2009*. Las Vegas, p. 1022-1036. ISBN: 978-0-87335-304-5.
- (2) HEINEMAN, Jesse. "Urban main EPB tunnelling in difficult geology below Downtown Mexico City". *Proceedings of the RETC 2011*. San Francisco, p. 978-991.
- (3) KURAJI, Kentaro (et al.) "Construction works of large-section vertically parallel twin tunnels in close proximity". *Proceedings of the RETC 2009*. Las Vegas, 2009, p. 1083-1101. ISBN: 978-0-87335-304-5.
- (4) PELLEGRINI, Lorenzo; PERRUZZA, Pietro. "Sao Paulo Metro Project-Control Of Settlements In Variable Soil Conditions Through EPB Pressure And Bi-component Backfill Grout". *Proceedings of the*

- RETC 2009*. Las Vegas, 2009, p. 1137-1153. ISBN: 978-0-87335-304-5.
- (5) HERRENKNECHT, Martin; BÄPPLER, Karin; BURGER, Werner. "Engineering innovations for mix-shield and EPB technology for two major projects in Scandinavia". *TBM Technology*. *Tunnel 8*, December 2009.
- (6) THEWES, M.; BUDACH, Ch.; GALLI, M. "Laboratory tests with various conditioned soils for tunnelling with earth pressure balance shield machines". *Tunnel 6*, September 2010.
- (7) WEH, Markus; ZWICK, Otto; ZIEGLER, Martin. "Mechanised driving in subsoil prone to clogging". *Tunnel 1*, part 1, 2009, p. 25; *Tunnel 2*, part 2, March 2009.
- (8) DIXON, Malcom. "Melbourne Main Sewer Replacement Project - Construction Phase - Soft Ground Tunneling in the Yarra Delta". *Proceedings of the RETC 2011*. San Francisco, p. 964-977.
- (9) MONINA, Mauricio (et al.) "High-pressure EPB

- tunnelling under sensitive buildings". *Proceedings of the RETC 2011*. San Francisco, p. 1092-1107.
- (10) SHINOUDA, Mina M. (et al.) "Cutterhead Maintenance for EPB Tunnel Boring Machines". *Proceedings of the RETC 2011*. San Francisco, p. 1068-1082.
- (11) STURK, Robert; DUDOUIT, Francois; AURELL, Oskar; ERIKSSON, Stig. "Summary of the First TBM Drive at the Hallandsas Project". *Proceedings of the RETC 2011*. San Francisco, p. 234-253.
- (12) MAILD, Ulrich; COMULADA, Marc. "Prediction of EPB Shield Performance in Soils". *Proceedings of the RETC 2011*. San Francisco, p. 1083-1091.
- (13) BURGER, W. "Interventions and Chamber Access in Pressurized Face TBMs". *Proceedings of the RETC 2011*. San Francisco, p. 1036-1047.
- (14) BURGER, W.; MCDONALD, J. "Lake Mead Intake Tunnel N° 3". *Tunnel 4*, June 2009, p. 43-48.
- (15) BURGER, Werner; DUDOUIT, Francois. THE HALLANDSAS DUAL MODE TBM. *Proceedings of the RETC 2011*. San Francisco, p. 416-437.