

ALGUNAS NOVEDADES IMPORTANTES DE LOS ACTUALES ESCUDOS DE FRENTE EN PRESIÓN DE TIERRAS

IMPORTANT INNOVATIONS IN MODERN EARTH PRESSURE BALANCE SHIELDS

FELIPE MENDAÑA SAAVEDRA. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de SPICC. fms@spicc.e.telefonica

RESUMEN: El autor expone las nuevas posibilidades que ofrece la tecnología de última generación de los escudos de presión de tierras (o escudos EPB), de acuerdo con experiencias varias, entre las que destacan las llevadas a cabo en tuneladoras utilizadas en la construcción de diversos túneles españoles, en los que ha intervenido, en los últimos 10 años. Un resumen de todo ello fue presentado en la Jornada Técnica organizada por el CEDEX con la colaboración de la SEMR y la SEMS, en septiembre de 2004.

PALABRAS CLAVE: PRESIÓN DE TIERRAS, PEGAJOSIDAD DE LA ARCILLA, ASIENTOS DE GAP, TERRENOS, ESCUDO, ESPUMA, POLÍMEROS

ABSTRACT: The author describes the new possibilities offered by the latest generation of earth pressure balance shields (EPB shields) on the basis of recent experience and particularly that gained by tunnelling machines employed in the construction of various Spanish tunnels in which the author has intervened over the last 10 years. A summary of this experience was presented in the Technical Conferences organised by the Spanish Public Works Research and Study Centre (CEDEX) in association with the Spanish Society of Rock Mechanics (SEMR) and the Spanish Society of Soil Mechanics (SEMS) in September 2004.

KEYWORDS: EARTH PRESSURE, CLAY STICKINESS, GAP SETTLEMENT, SOILS, FOAM, POLYMERS

1. EVOLUCIÓN DE LA TIPOLOGÍA BÁSICA DE LOS ESCUDOS

La tipología de las tuneladoras que conocemos bajo el nombre genérico de Escudos, ha tenido un largo desarrollo, que comenzó hace más de siglo y medio, y que evolucionó lentamente hasta los años 1960, en los que puede situarse el comienzo de los escudos modernos.

El Cuadro nº 1 recoge un sucido resumen histórico de este tipo de tuneladoras. Puede decirse que nacen los escudos alrededor de 1870, para la excavación de túneles en suelos o rocas blandas, sin carga de agua y con frentes que pueden considerarse estables en secciones de dimensiones reducidas (1).

(1) La excavación se hacía de modo manual. El escudo podía tener una estructura frontal, que se dividía en recintos, para hacer las excavaciones parciales sucesivas del frente. Cada recinto tenía un mamparo de contención, que se retiraba para proceder a la excavación parcial correspondiente.

Para resolver el problema de los terrenos con carga de agua o alta inestabilidad de los frentes, se añadió muy pronto a esos escudos de frente abierto (año 1875) la tecnología de las presurización neumática integral del túnel. Ésta fue la solución de aplicación general durante un siglo más (aunque en algunos países la presurización integral se siguió utilizando durante más tiempo), hasta la aparición en los años 1960-65 de los primeros escudos de frente en presión, que hicieron posible acabar con los riesgos que supone para la salud el trabajo continuado en ambiente de aire comprimido.

Aparecen primero los escudos de frente en presión de lodos, o hidroescudos, aplicables a los suelos no cohesivos, y 20 años después (1980-95) los escudos de frente en presión de tierras, o tipo "EPB", para excavar en suelos cohesivos, que tienen un periodo largo de prototipos, recogidos en el Cuadro 1, con los que se completa la tipología básica.

**CUADRO N° 1. ESCUDOS PARA SUELOS Y ROCAS BLANDAS.
RESUMEN HISTÓRICO**

1818 Brunel? [*] 1869 Greathead	ESCUdos ABIERTos	Terrenos sin carga de agua. Frentes estables
1875/1980	ESCUdos ABIERTos + PRESURIZACIÓN NEUMÁTICA INTEGRAL DEL TÚNEL	Terrenos con carga de agua. Frentes inestables.
1960-65	ESCUdos DE FRENTE EN PRESIÓN DE LODOS ("HIDROS")	SUELOS NO COHESIVOS Terrenos con carga de agua Frentes estables
1980-95	ESCUdos DE FRENTE EN PRESIÓN DE TIERRAS ("EPB Ms")	SUELOS COHESIVOS Terrenos con carga de agua Frentes inestables

* Referencia sin confirmación objetiva

**2. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESCUDOS MODERNOS
DE FRENTE EN PRESIÓN**

Las características principales de los dos tipos de escudos de frente en presión, que sirven también para diferenciarlos, son las siguientes:

**Escudos de frente en presión de lodos
("Hidroescudos")**

- Contención del frente. El lodo arcilloso es una excelente contención del frente, no sólo por la presión hidráulica que ejerce sobre él, sino también por la formación de un "cake" lodo / terreno que es altamente estable, sobre todo con lodos bentoníticos, que son los más usuales.
- Asientos. Por otra parte, se logran asientos mínimos en superficie, porque la presión del lodo contra el terreno evita deformaciones de éste, al actuar en el 100% de su contacto con el escudo.
- Balance de energía. El balance es óptimo, porque este tipo de escudos precisa valores mínimos, tanto del Empuje total (F), como del Par motor de la rueda de corte (M_g).
- Transporte de escombro. De acuerdo con el principio de esta tecnología, la mezcla del terreno excavado con el lodo arcilloso es un líquido de alta viscosidad pero perfectamente bombeable, por lo que el transporte de esa mezcla se hace hidráulicamente y, en general, hasta el exterior del túnel.
- Separación del escombro. No obstante las ventajas anteriores, las limitaciones de las plantas de separación subsisten, en cuanto hay un porcentaje sensible de arcilla en el terreno (a partir de un 10-12% como cifras

orientativas). En la práctica, la separación se hace inviable en tales casos, por razones diversas, y en ello reside la dificultad mayor de ampliar el campo de los "hidros" a otro tipo de terrenos, pese a la opinión de algunos expertos que siguen insistiendo en que estos escudos tienen posibilidades análogas a los de Presión de tierras.

Escudos de frente en presión de tierras (Tipo EPB)

Haciendo un repaso similar de las características de los escudos de presión de tierras puede decirse:

- Contención del frente. En este caso, la presión ejercida contra el frente por la máquina, a través de la masa visco plástica que llamamos "mezcla" (terreno más agua y aditivos), es la que contiene el frente.
- Asientos. Los asientos pueden tener valores aceptables siempre que: a) la presión en la cámara no tenga fluctuaciones importantes, y b) se efectúe un relleno continuo y completo con mortero del trasdós de los anillos.
- Transporte de escombro. Una ventaja notable es que el transporte de escombro se hace siempre con métodos convencionales, esto es, se pueden usar, indistintamente, trenes de vagones o cintas transportadoras a todo lo largo del túnel.
- Ampliación del campo de aplicación. Finalmente, y esto es lo más importante, la modalidad "EPB" es la única que, de momento, ha permitido ampliar el campo de los escudos para tratar casos cada vez más complejos, lo que se está llevando a cabo actualmente, por una parte, en aplicaciones a los terrenos no cohesivos, y, por otra, a los frentes mixtos (roca + suelos). Se comentan más adelante algunas de las últimas experiencias realizadas.

**3. PROBLEMÁTICA DE LOS ESCUDOS
DE FRENTE EN PRESIÓN DE TIERRAS**

Entrando ya en la problemática de los modernos escudos de presión de tierras, hay que hablar, en primer lugar, de las dificultades que persisten todavía, para aquellas aplicaciones convencionales de estos escudos, llamando así a las que se siguen planteando en los tipos de terreno para los que se han concebido. Pueden ordenarse estos problemas en los tres grupos que aparecen en el Cuadro n° 2.

En cuanto a la dificultad del corte y entrada del material excavado a la cámara (primer grupo):

- Influyen mucho los diseños, tanto de las aberturas de entrada, como de las herramientas de la rueda de corte. Es fundamental insistir a los fabricantes, en que se tengan en cuenta las características de los terrenos a atravesar y se estudien los diseños de acuerdo con su

CUADRO N°2. PROBLEMÁTICA DE LAS APLICACIONES CONVENCIONALES DE LOS ESCUDOS E.P.B

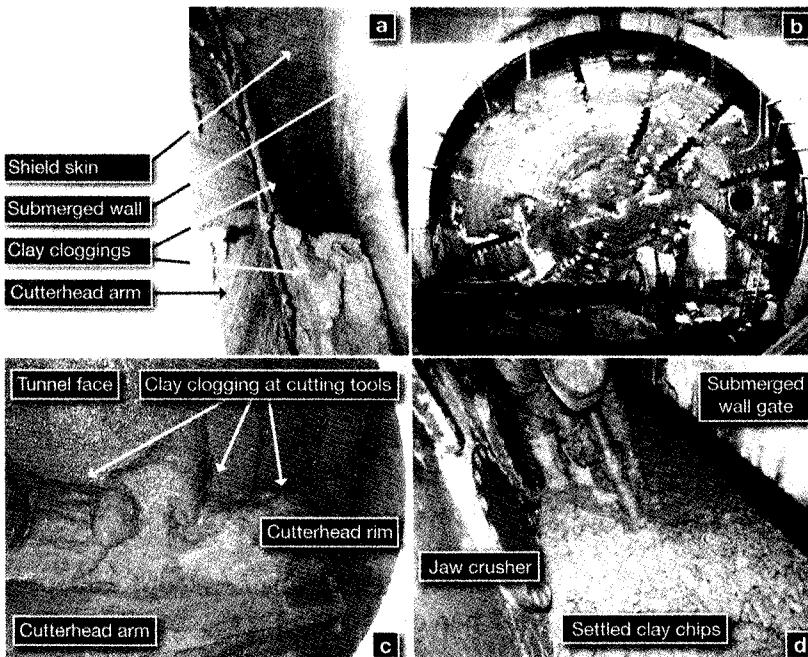
CORTE Y ENTRADA DE MATERIAL A LA CÁMARA	Diseño de aberturas Id. Id. Herramientas Pegajosidad de las arcillas Reaglomeración de la arcilla (u otro material) en la cámara
ALIMENTACIÓN DEL TORNILLO SINFÍN	Reaglomeración del material Dificultad de entrada
ASIENTOS	Plasticidad irregular de la mezcla "Gap" escudo / terreno Relleno del trasdós de los anillos discontinuo o incompleto

experiencia en casos similares junto con la de los expertos de la Dirección de Obra.

- Influye muchísimo la pegajosidad de las arcillas, como se comentará seguidamente con ayuda de unas figuras al respecto.
- Finalmente, influye extraordinariamente la reaglomeración de las arcillas dentro de la cámara (fenómeno que pueden presentar también otros materiales como, por ejemplo, los yesos), de lo que se detallan las últimas soluciones adoptadas.

Respecto de la alimentación del tornillo sinfín (segundo grupo), debe decirse que, a causa de la ya citada reaglomeración de los materiales dentro de la cámara, se forman blo-

Fig. 1.
Ejemplos de taponamiento de los escudos.



ques que no pueden entrar al tornillo, limitando la producción de este y, como consecuencia, la del escudo.

Por último, los asientos del terreno (grupo tercero) se producen por las tres causas principales siguientes: a) una irregular plasticidad de la mezcla; b) el "gap" terreno-escudo, hueco que no puede llenar la mezcla plástica por falta de fluido, lo que favorece la deformación del terreno en toda la longitud de la coraza, desde la rueda de corte hasta los anillos del revestimiento; y, por último, c) un relleno defectuoso del trasdós de los anillos, por ser discontinuo o incompleto. Puede decirse al respecto:

- Una buena operación del escudo es la solución para disminuir la influencia de las causas a) y c) antes citadas.
- Por lo que respecta al "gap" escudo/terreno, aparte de algunas experiencias que permiten cierto optimismo para llegar a llenar este hueco, y que se comentarán seguidamente, puede decirse también que una correcta operación del escudo permite optimizar el ritmo del avance, con lo cual el efecto desestabilizador del "gap" se disminuye notablemente.

4. ALGUNAS SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS CONVENCIONALES

Es de interés ampliar algo más los comentarios anteriores, sobre todo los relativos a la "pegajosidad" y al "endurecimiento" de las arcillas, por una parte, y, por otra, al "gap" escudo/terreno, exponiendo los resultados de estudios y experiencias recientes.

Pegajosidad de las arcillas

Seguidamente se resumen los resultados de los estudios del Dr. Markus Tewes, que viene investigando este fenómeno desde hace años, con ayuda de la Figura 1, tomada de sus publicaciones.

En dicha figura se ve, arriba y a la izquierda (a), la cámara de un escudo con una masa reaglomerada de material arcilloso y a la derecha (b), así como abajo a la izquierda (c), el taponamiento de algunas zonas de las aberturas y de las herramientas en el exterior de la rueda de corte. El detalle (d) corresponde a la entrada de la boca de aspiración de un hidroescudo, en la que se monta la machacadora para reducir los tamaños superiores a unas 4 pulgadas.

Según los estudios de Tewes, la pegajosidad de las arcillas es consecuencia, principalmente, de la "adhesión" de éstas a la superficie de las piezas de acero mecanizadas de la estructura, mecanismos o herramientas de un escudo.

Básicamente, el fenómeno de la pegajosidad depende, de acuerdo con sus estudios, en primer lugar de los índices de plasticidad y de consistencia de la arcilla, y también de

la presencia de minerales expansivos (como la illita o la montmorillonita) que la incrementan.

La Figura 2 recoge sus conclusiones sobre la influencia de los índices citados, en un diagrama que sirve para advertir del riesgo de taponamiento que, en principio, pueden presentar los terrenos arcillosos.

Pues bien, por nuestra parte, hemos utilizado con éxito los criterios anteriores para evaluar "a priori" el riesgo de taponamiento por pegajosidad de los materiales arcillosos, hecho lo cual se desarrollaron los estudios pertinentes para la adecuada selección de espumas desestructurantes, como aditivo químico principal, acompañado en algún caso de polímeros reductores de agua, en una serie de obras últimamente construidas o actualmente en ejecución.

Pueden citarse como referencias principales: tramos varios del Proyecto Metrosur de la Ampliación del Metro de Madrid (Plan 1999-2003), entre las que destacan los terrenos yesíferos de la zona de Getafe (2); Tramo Borg-Sagrera de la nueva Línea 9 del Metro de Barcelona; obras del Metrotren de Gijón, etc.

Debe destacarse que en las dos últimas obras mencionadas, con presencia significativa de terrenos arcillosos, y pese a la importante variación a lo largo del trazado de la composición y granulometría de dichos terrenos, se logró una consistencia pastosa de la mezcla que permitió la extracción por cinta a todo lo largo del túnel.

Finalmente, y como recomendación general derivada de estas experiencias puede decirse que los estudios de selección de aditivos deben hacerse conjuntamente por el constructor y el fabricante del producto y deben de tener dos fases prácticamente coincidentes en el tiempo:

- Ensayos de laboratorio para hacer una primera selección y dosificación del producto químico, de acuerdo con su comportamiento con las muestras del terreno a excavar.
- Estudios del control real del comportamiento en la propia tuneladora, en directa colaboración del fabricante con el contratista y durante el tiempo necesario para poder comparar las distintas aplicaciones de un mismo producto, que resulten de variar los parámetros usuales (tasas de tratamiento y expansión y cantidad de agua a introducir en la cámara).

Endurecimiento de las arcillas

Pero tan importante como la pegajosidad es el endurecimiento de las arcillas, sea en la zona exterior central de la rueda, sea en la masa del interior de la cámara. En la supervisión de las obras antes citadas, hemos conseguido que, so-

(2) La problemática conjunta que presentaron los yesos masivos de carácter kárstico y las arcillas de la zona de Getafe, se experimentó en un escudo diseñado para este Proyecto. Ver Referencias.

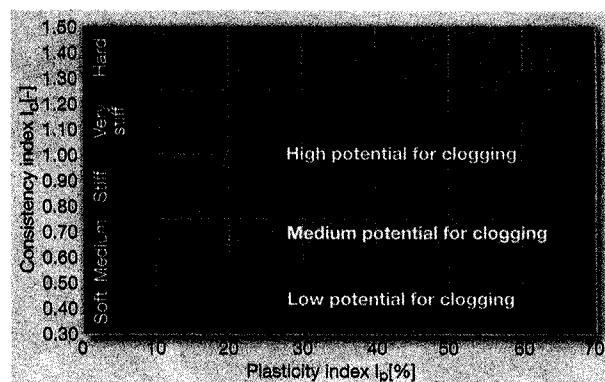


Fig. 2.
Taponamiento
potencial de
las arcillas.

bre este tema, los equipos técnicos de obra dedicaron mucho tiempo a ayudarnos en el análisis del fenómeno y en la experimentación de soluciones hasta poder aplicar la conveniente. Se resumen seguidamente las conclusiones.

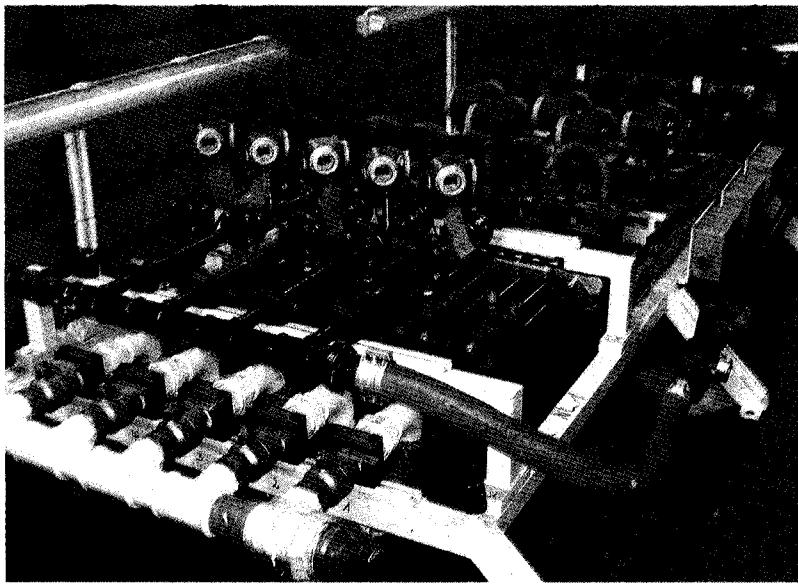
- La causa del fenómeno es el calor que se produce en el corte del terreno: la arcilla sufre, por así decir, una cocción imperfecta que llega a convertirla en una masa cerámica sólida o en un conjunto de grandes bloques duros. De ahí nuestra insistencia en romper esas masas, para lo cual la única solución, que tuvo el éxito deseado, consistió en aplicar las dos medidas que siguen.
- Dotar a los escudos de equipos de inyección de agua a alta presión en la cámara (y al decir alta presión, deben entenderse cifras iguales o superiores a los 300 Bar).
- Además, aumentar el número de barras de batido y homogeneización del material de la cámara, tanto las fijadas al mamparo como a la rueda de corte.

Así pues, la solución consistió en fracturar debidamente la masa endurecida, por medio de su rotura contra las barras, conjuntamente con el efecto del chorro de agua a alta presión, solución basada, en definitiva, en procedimientos de impacto mecánico (3).

Es muy satisfactorio anunciar que en las últimas máquinas construidas (o que se están construyendo) para obras en España los fabricantes han incorporado este tipo de modificaciones al diseño de los escudos EPB de hasta 12 m de diámetro.

En ninguna de estas máquinas hemos probado mecanismos rotativos de homogeneización, que Tewes ha considerado ineficaces ante una alta pegajosidad, al quedar muy afectados por la misma. Aceptando esa opinión, y ex-

(3) En el caso de los yesos, el calor conlleva pérdida de agua, lo que causa una transformación en yeso anhidro que, pese a su baja calidad, se endurece por un fraguado casi instantáneo. Los ensayos con productos inhibidores de fraguado incorporados a la cámara no tuvieron éxito, teniendo que recurrir igualmente a las barras de batido.



tendiéndola al fenómeno adicional del endurecimiento, hemos considerado preferible adoptar exclusivamente las medidas citadas para evitar un posible aumento del problema.

Relleno del "gap" entre escudo y terreno por inyección complementaria de un material de adición

Estamos desarrollando en el escudo de Øexc 12,06 m del tramo Borg-Sagrera, de la Línea 9 del Metro de Barcelona, una idea del Dr. Ing. de C.C.P. D. Xavier Borras: la inyección a media presión (unos 2 bar por encima de la presión de confinamiento de la cámara: en este caso 2 + 2,5 = 4,5 Bar) de un material de relleno, a través de varios puntos de la coraza. Pueden verse, en la Figura 3, los mandos del prototipo del equipo que se está empleando y en la 4, el frente del túnel, un mioceno muy competente y de alta dureza.

El "gap" se estima en 300 a 320 mm. La excelente plasticidad de la mezcla de la cámara permitía contar con una ocupación alta del volumen teórico total del "gap" (unos 12 m³). Por otra parte, la inyección a presión de un producto añadido ha llegado a alcanzar cifras máximas del orden de los 0,7 a 0,85 m³ por metro lineal de túnel.

Se ha comprobado:

- Que en el relleno del "gap" no debe rebasarse la presión de confinamiento, para evitar desplazamientos del mismo hacia la cámara, que es donde pueden producirse holguras por agua, burbujas de aire, etc.
- Que con dichas cifras máximas el relleno del gap se acercaba al 100%, puesto que, al aumentarlas, se em-

Fig. 3. Mando del equipo para la inyección complementaria de relleno del "gap".

pezaba a rebasar en el mismo la presión de confinamiento de la cámara.

En el presente caso, se estimó que un 90% del volumen de relleno se logró con la propia mezcla, gracias a su alta plasticidad, y el 10% restante con el producto añadido.

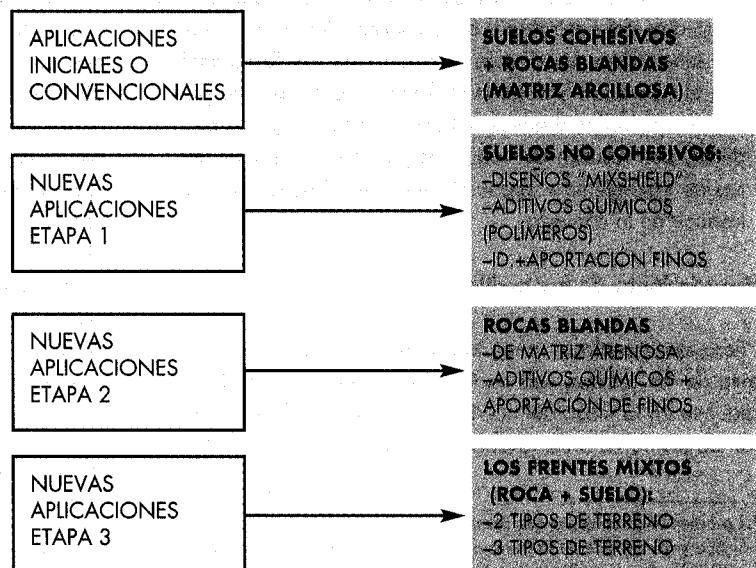
- Por último, en los tramos tratados, el sistema de auscultación y vigilancia de la obra detectó siempre asientos despreciables en superficie, por debajo de pérdidas de terreno del orden del 1% a 1,2%.
- En las pruebas que vienen haciéndose, el producto de adición es una mezcla de un conglomerante de frágil lento (cemento con cenizas, o bien con arcilla) y árido fino calizo (tamaño máximo <1,6 mm) con adición de espumas para facilitar la inyección.

En resumen, la combinación de un equipo perfeccionado de este prototipo, con una operación del escudo que logre una plasticidad adecuada de la mezcla, hacen posible pensar que un relleno del "gap" en escudos EPB, que se aproxime al que se consigue en un hidroescudo con la mezcla viscosa de lodo/terreno, parece un objetivo consegurable a medio plazo.

5. AMPLIACIÓN DEL CAMPO DE UTILIZACIÓN DE LOS ESCUDOS EPB

En el Cuadro nº 3 que sigue resumimos todas las aplicaciones que actualmente se están haciendo de los Escudos E.P.B.

Cuadro nº 3. ESCUDOS E.P.B.
CAMPOS POSIBLES DE APLICACIÓN



En primer lugar, las que podemos llamar Aplicaciones Convencionales, cuya problemática principal se ha tratado en los apartados anteriores y acerca de las que hemos de añadir un breve comentario.

Deben definirse como tales, las aplicaciones a suelos cohesivos, en general, más las rocas blandas ($RCS < 30 \text{ MPa}$, como orden de magnitud) de matriz arcillosa.

Ahora bien, el concepto de suelos cohesivos debe entenderse que corresponde a aquellos que tienen un porcentaje mínimo de finos del orden del 15% que es el que limita el campo de las llamadas aplicaciones convencionales. Con porcentajes menores, entre el 12% y el 15% un E.P.B. puede trabajar con cierta dificultad y puede decirse que por debajo de un 10%-12% se requiere un tipo de tratamiento de los que se incluyen en la Etapa 1 de las Nuevas aplicaciones a que se refiere el Cuadro nº 3.

Estas nuevas aplicaciones, que son las que están haciendo posible la ampliación del Campo de utilización de los escudos E.P.B. se tratan en los apartados siguientes.

6. NUEVAS APPLICACIONES DE LOS ESCUDOS E.P.B. ETAPAS 1 Y 2.

Hace ya varios años que se iniciaron los ensayos de los escudos E.P.B. en suelos no cohesivos. La serie de terrenos de características cambiantes en los suelos del trazado de un mismo túnel fue lo que motivó esta ETAPA 1 de las nuevas aplicaciones. La tecnología se orientó en tres vías de investigación diferentes, todas ellas aplicadas actualmente, que figuran en el Cuadro nº 3:

- Escudos de diseño tipo "mixshield". Este tipo de diseño permite transformar la maquinaria en "hidro" y recíprocamente. Hasta hace unos 7 años, ello suponía una pa-



Fig. 4. Miocene típico del Tramo Borg-Sagrera (Línea 9 del Metro de Barcelona).

rada de 3 meses como mínimo, teniendo incluso que llegar a realizar ciertos trabajos en fábrica. Ahora es posible hacer el cambio en pocos días y en la misma obra.

Son varias las referencias de obras que han aplicado este tipo de solución en los últimos años. La autopista A-86 de París de la que adjuntamos un perfil del trazado es un buen ejemplo.

- Empleo de aditivos químicos, básicamente polímeros reductores de agua. Ello nos ha permitido trabajar en arenas finas de tipo granular, por ejemplo en el Colector de Avilés (España). En la Figura que sigue puede verse, a la izquierda, decantada en el fondo del recipiente, la arena tratada sólo con espumas. La adición del polímero

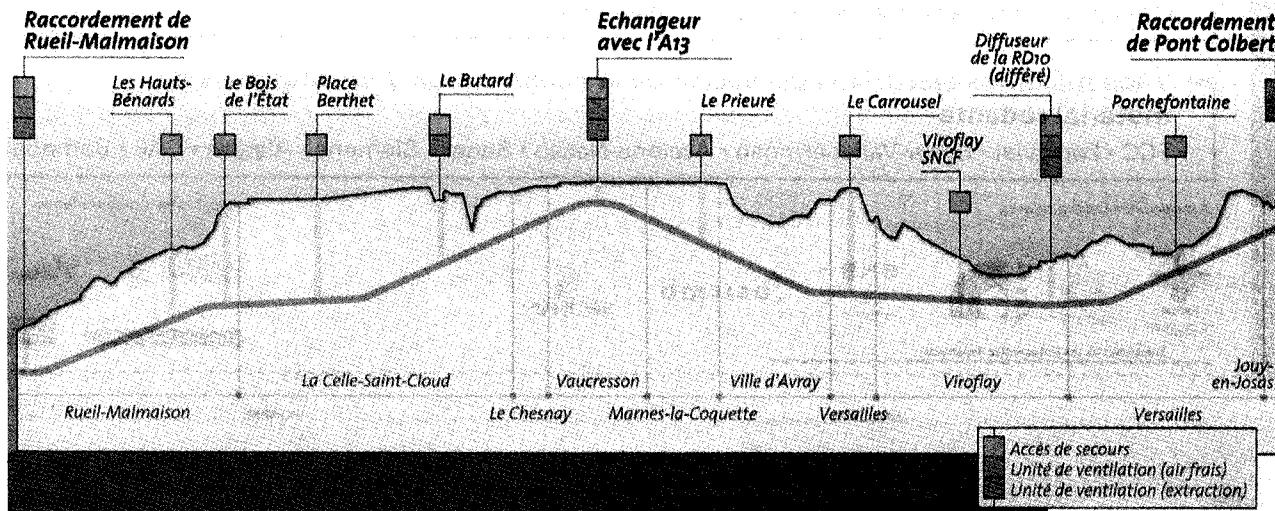
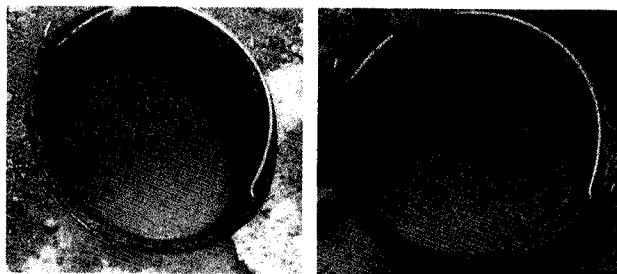


Fig. 5. Perfil del trazado de la A-86 (arenas y arcillas).



la transforma en la masa plástica, manejable por el escudo E.P.B., que vemos a la derecha.

- Aportación de finos naturales a la cámara más los aditivos químicos antes mencionados. Cuando se trata de terrenos granulares con tamaños de gravas medios o grandes y contenido en finos menor del 10%, hay que hacer una aportación de préstamos ricos en finos hasta lograr una granulometría que entre en el huso de los escudos E.P.B. (Figura 7).

En Escudos de diámetro a partir de 8 m, y con materiales de aportación próximos al 100% de finos, si las cifras de adición son inferiores a un 5 % del terreno a excavar, la solución puede ser viable técnica y económicamente. Así hemos procedido con éxito en cuatro obras recientes: un tramo del Metro de Turín (escudos de un Ø 9 m, en un aluvial con predominio de gravas medias y gruesas); tramos del paso bajo el río Besós, en Línea 9 del Metro de Barcelona (escudo de Ø 12,6 m. Aluvial con ligero déficit de finos en ciertas zonas) y unos primeros ensayos que se comentarán al hablar de los frentes mixtos del Ramal Sagrera-Can Zam de la Línea 9 del Metro de Barcelona y del proyecto Metrotren de Gijón.

Cuando las cifras de aportación son mayores (con independencia de que, tanto el coste del préstamo, como de la instalación exterior, pueden ser muy importantes) no es posibili-

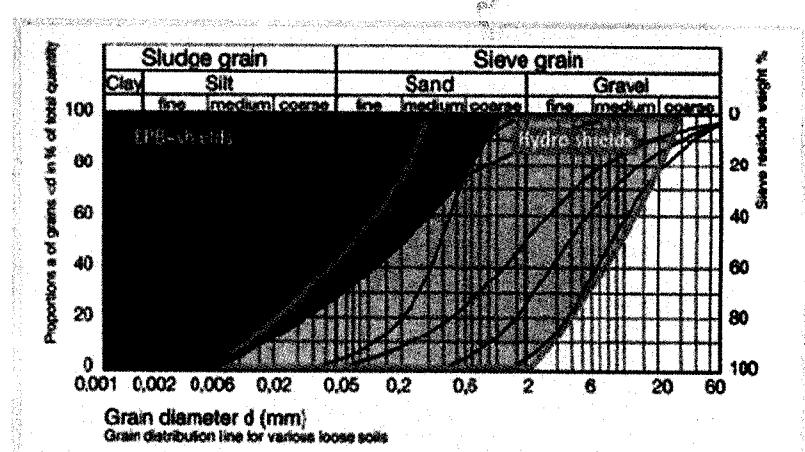


Fig. 6. Arena de playa del túnel Colector de Avilés. A la derecha, Fig. 7. Husos granulométricos de los escudos.

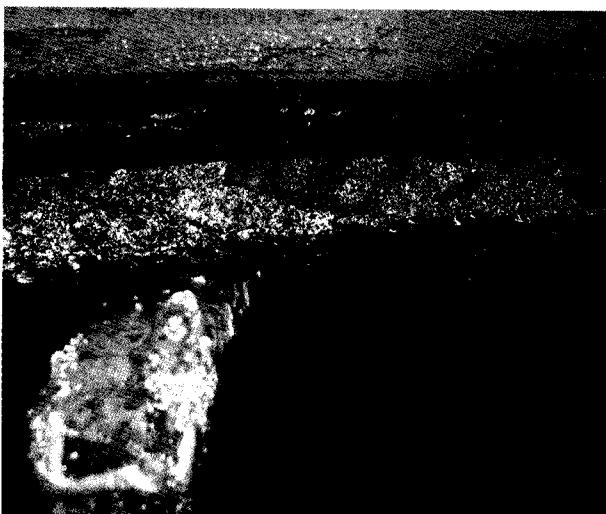
ble hacer la incorporación a la cámara de tales volúmenes en la forma habitual, que es utilizando los equipos existentes en el escudó para el empleo de bentonitas o morteros. Harían falta equipos auxiliares de gran capacidad, en cierto modo incompatibles con la propia concepción del escudo, y que, en todo caso, constituyen un tema a estudiar por fabricantes y expertos.

- La segunda Etapa es la que corresponde a la aplicación a las rocas blandas de matriz arenosa. Es el caso de bastantes obras europeas en arenas blandas bajo carga de agua, en las que podrían usarse los escudos E.P.B. Puede considerarse, obviamente, como un caso particular de la Etapa 1 anterior.

7. NUEVAS APLICACIONES DE LOS ESCUDOS E.P.B.: ETAPA 3

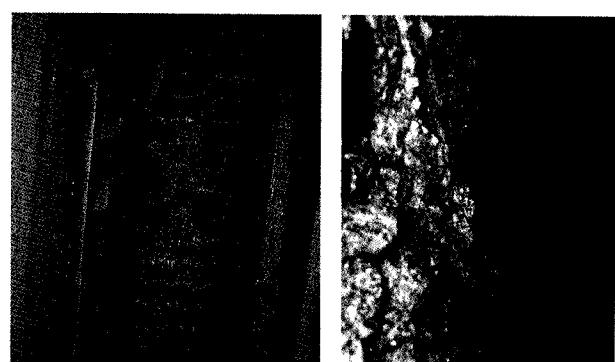
La que hemos llamado ETAPA 3 de las tendencias actuales para la ampliación del campo de aplicación de los E.P.B. es el trabajo en frentes mixtos, llamado así a los frentes en roca y suelos.

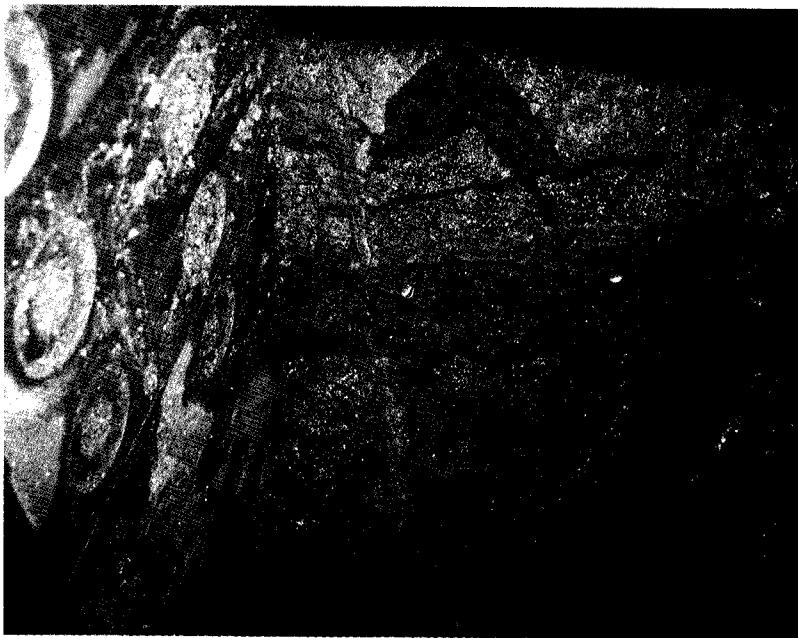
Antes de entrar a comentar algunas referencias de obras en las que se está abordando este problema es conveniente



**Fig. 8. Jabre en la parte superior.
Frente con 3 materiales (Línea 9 Metro de Barcelona. Tramo Sagrera- Can Zam)**

**Fig. 9. Granito
grados III y IV en la
parte intermedia.
Frente con 3
materiales (Línea 9
Metro de Barcelona.
Tramo Sagrera- Can
Zam)**





recapitular las 4 formas de trabajo que pueden ofrecer los escudos E.P.B. actuales y que son las siguientes:

- El «Modo abierto» consiste en trabajar sin presión en la cámara y es aplicable a los casos de frentes estables con aportación de agua que no altere ni el comportamiento geotécnico del terreno ni cree problemas de operación de la TBM. La razón básica de este modo de operar es el menor consumo de herramientas de corte.

Dentro de esta modalidad, siguen coexistiendo máquinas con extracción exclusiva por tornillo sinfín, y máquinas

Fig. 10. Granito grados I y II en la parte inferior. Frente con 3 materiales (Línea 9. Metro de Barcelona. Tramo Sagrera-Can Zam).



Fig. 11. Gravas y bolos en el frente del Túnel del Metrotren de Gijón.

con “sistema dual” alternativo (cinta o tornillo), para la extracción de escombro (4).

- El “Modo cerrado sin presión” (también llamado “Modo de transición”) consiste en trabajar con la cámara cerrada pero sin presión de tierras. Este tipo de operación es posible sólo en condiciones similares a las anteriores, es decir, frentes estables y presencia de agua no problemática.

Realmente, esta modalidad es prácticamente equivalente a la anterior cuando se excluye todo «sistema dual» de extracción y se extrae el escombro sólo con tornillo.

Puede añadirse que, para operar de este modo, es recomendable mantener la cámara llena de escombro y agua, con una presión mínima en las células superiores (0,1 a 0,2 Bar) lo que ayuda a tener el control de la entrada de agua del terreno a la cámara y permite hacer paradas de la TBM sin riesgo de desequilibrar la presión de agua.

- El “Modo cerrado en presión de tierras” es el típico de estas máquinas, para su trabajo en terrenos cohesivos (suelos o rocas blandas), cuyas características han sido definidas, en principio, por un amplio huso dentro del que deben estar las curvas granulométricas del terreno, huso que reproducimos en la Figura 7, junto con el correspondiente a los hidroescudos o escudos de lodos.

El sistema asegura la excavación en condiciones de estabilidad con asientos mínimos en superficie, de los terrenos cohesivos con carga de agua, lo que se logra por el equilibrio de la presión de la mezcla de la cámara y la del terreno y agua del frente de excavación.

- Por último, el Modo cerrado con frentes mixtos de roca y materiales blandos plantea el problema de excavar terrenos que la tecnología de las TBMs ha venido resolviendo de forma tan diferente que puede hablarse de incompatibilidad inicial entre tales soluciones.

Así, para las rocas duras, las ruedas de corte se diseñan con aberturas perimetrales reducidas, dotadas de cangilones

(4) En nuestra opinión, el sistema exclusivo de extracción con tornillo está íntimamente ligado a los escudos tipo «EPB», ya que, si se está trabajando con cinta, el empeoramiento súbito de la calidad del terreno puede ser causa de incidentes graves, al no dar tiempo a la imprescindible retirada de los elementos no compatibles con el trabajo del tornillo, principalmente los cangilones o paletas de carga de la cinta primaria de extracción. Por ello, aun trabajando en «modo abierto» debiera imponerse a una «EPB» la condición de extracción exclusiva con tornillo, pese al mayor coste derivado del grado de abrasividad del material.



Fig. 12. Calizas duras y material arcilloso del frente del Metrotren de Gijón.



Fig. 13. Huellas de los "cutters" en las calizas duras. Frente del Túnel del Metrotren de Gijón.

que recogen el escombro del suelo y lo elevan para introducirlo en la cámara. La extracción se realiza por cinta. El trabajo claramente se hace en "modo abierto".

Por el contrario, para los suelos o rocas blandas, las ruedas de corte presentan aberturas radiales importantes a través de las que entra a la cámara el escombro presionado contra el frente. Dicha situación se mantiene en la cámara porque la extracción de la mezcla, de consistencia pastosa, que se realiza por tornillo sínfin, asegura el mantenimiento de la presión en el frente. En resumen, el trabajo se realiza en "modo cerrado y con el frente estabilizado por la presión del propio material excavado".

REFERENCIAS:

-J.M. RODRIGUEZ ORTIZ, C. OTEO, F. MENDAÑA. "Experiencias obtenidas en las campañas de reconocimiento geotécnico de la ampliación del Metro de Madrid". Jornadas hispano-lusas sobre Obras Subterráneas. Relevancia de la Prospección y observación geotécnica y Primera conferencia Internacional Jiménez Salas. Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica / Sociedad Portuguesa de Geotecnia. Septiembre 2003.

- J. TRABADA. "Diseño y nuevos desarrollos a incorporar en la fabricación de tuneladoras de gran diámetro para excavaciones urbanas en suelos blandos con yesos y yesos masivos". Tesis doctoral. Madrid 2003.
- MARKUS TEWES, WERNER BURGER. "Clogging Risks for TBMs Drives in Clay". Tunnel and Tunnelling Int. Junio 2004.
- M. TEJES. "Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden", Berichte aus Bodenmechanik und Grundbau Vol. 21, Bergische Universität Wuppertal, FB Bauingenieurwesen.

Pues bien, respecto del trabajo en frentes mixtos puede decirse lo siguiente, de acuerdo con las experiencias desarrolladas hasta ahora:

- Cuando se trata de sólo dos tipos de terreno, la preparación del trabajo se simplifica y se aproxima al caso de los túneles en arenas finas ya comentados.

Tal ha sido la experiencia del Metro de Oporto, en un granito de alteración media (grado III y como máximo IV) y un jable (alteración grado V) lo que se resolvió simplemente con el empleo de espumas estructurales y polímeros reductores de agua. Hemos seguido muy de cerca la evolución de esta obra, lo que nos ha ayudado mucho en las experiencias siguientes más complejas.

- Al aparecer 3 tipos de terreno el problema se complica. De momento, la solución no puede ser única y es preciso adaptarla a las condiciones cambiantes de cada tramo del túnel, lo que es harto complicado.

Esta es nuestra experiencia de algunos tramos del Ramal de Can.Zam de la Línea 9 del Metro de Barcelona (Figuras 8, 9 y 10) en el que tenemos frentes con 3 tipos de granito diferentes. En la primera figura se ve la zona superior en jable; en la siguiente la zona intermedia de granitos de dureza medio/baja, y en la última, la parte inferior de la sección en granito extraduro.

Lo mismo sucede en el túnel del Metrotren de Gijón, en el que se presentan otros tipos de materiales, por una parte calizas duras; por otra, margocalizas muy alteradas (verdaderas capas gruesas de material arcilloso) y, por último, zonas de materiales no cohesivos, gravas y bolos de tamaño medio a grande.

Estos materiales pueden verse en las Figuras 11, 12 y 13: en la primera, las gravas y bolos mencionados y en la siguiente, dos aspectos de las calizas duras junto a las capas de material arcilloso. La última muestra las huellas de los cortadores de disco en las calizas duras.

Tanto la obra de Barcelona (Can-Zam), como la de Gijón, tienen, además, una carga freática de unos 2,5 bar. ■

- M. HERRENKNECHT. "Paktische Hinweise zur Anpassung von Tunnelvortriebsmaschinen an die Erfordernisse beim Vortrieb". Forschung + Praxis 39, Proceedings of the STUVA-Symposium 2001 in Munich.
- H. J. SAGER, U. MAIDL. "Innovative Methoden zur Begegnung der Verklebungsproblematik bei den Flüssigkeitsschilden der Tunnel unter der Westerschelde". Forschung + Praxis 38, Proceedings of the STUVA-Symposium 1999 in Frankfurt am Main, 2000, Alba Verlag, Düsseldorf.