

Master Universitario
en Túneles
y Obras Subterráneas

ÁREA: C8
MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

SISTEMAS DE ARRANQUE

PONENTE: Carlos Cebamanos

I.C.C.P.
FCE

Día: 07/06/07

Hora: 19:15 a 20:15

2ª EDICIÓN DEL MASTER
EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS
JUNIO 2007

**INNOVACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS
EN TUNELADORAS**

CARLOS CEBAMANOS

**INNOVACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS
EN TUNELADORAS (T.B.M.'S)**

INDICE

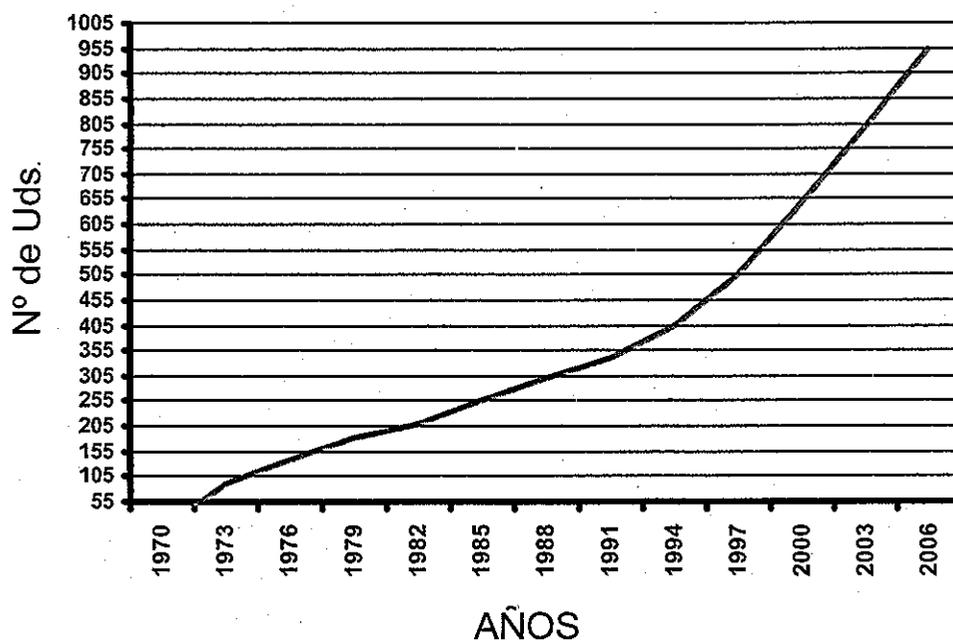
- 1.- INTRODUCCIÓN**
- 2.- TIPOS DE TUNELADORAS**
- 3.- FUTURO. INNOVACIÓN Y DESARROLLO**
 - **CONCEPTO DE MÁQUINA**
 - **SOSTENIMIENTO Y/O REVESTIMIENTO**
 - **PARTES QUE LA CONSTITUYE**
 - **PREDICCIÓN DEL TERRENO**
 - **OPTIMIZACIÓN DE TIEMPOS**

1.- INTRODUCCIÓN

El empleo de tuneladoras en la ejecución de obras subterráneas, donde poco a poco se están dejando de usar métodos de trabajo menos mecanizados por la utilización de TBM'S, donde la ejecución es más rápida y de forma general más segura.

En la década de los 70 se empezó a pensar de forma generalizada el uso de las tuneladoras, pero un verdadero impulso comenzó en los años 90 y, teniendo un desarrollo en los últimos siete años que podemos calificar de espectacular, con máquinas capaces de excavar túneles por encima de los 15 m. de diámetro y atravesar terrenos de extremas características geológicas

Un ejemplo de esta evolución es la progresión en la fabricación en el mundo de este tipo de máquinas como se puede observar en el gráfico



2.- TIPOS DE TUNELADORAS

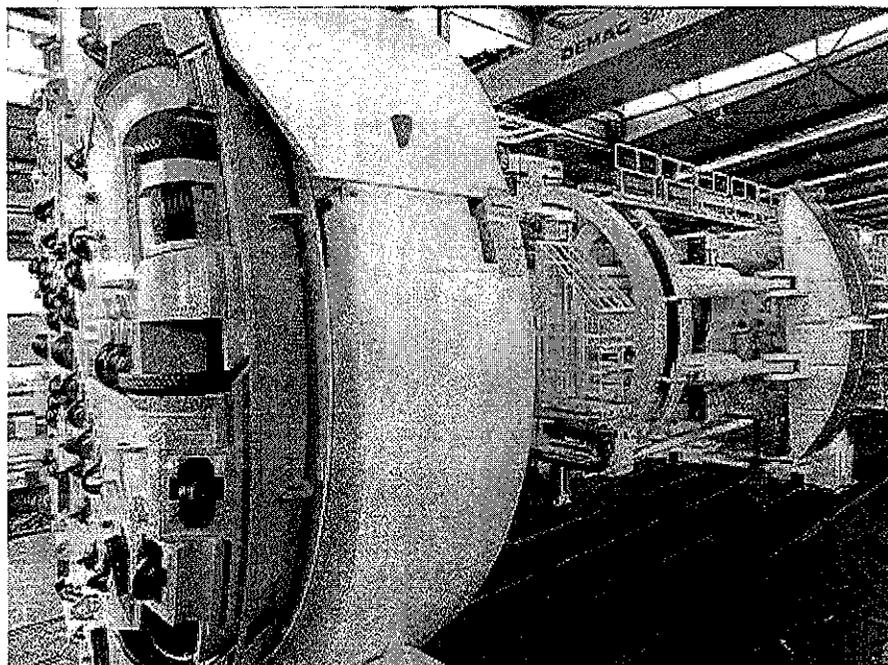
En función de las características del terreno pueden usarse distintos tipos de TBM'S, estas deberán ser capaces de excavar con los parámetros geotécnicos del proyecto, ejecutar los trazados convenientemente, cumplir perspectivas de las obras (plazos, calidad, seguridad, etc) Lo importante es la elección del tipo de máquina que sea la más adecuada, con respecto a la geología y al estudio geotécnico

Hoy en día hay desarrolladas diferentes tipos de tuneladoras y el ponente hace una clasificación en función del tipo de terreno que van a excavar

2.1.- Tuneladoras para rocas

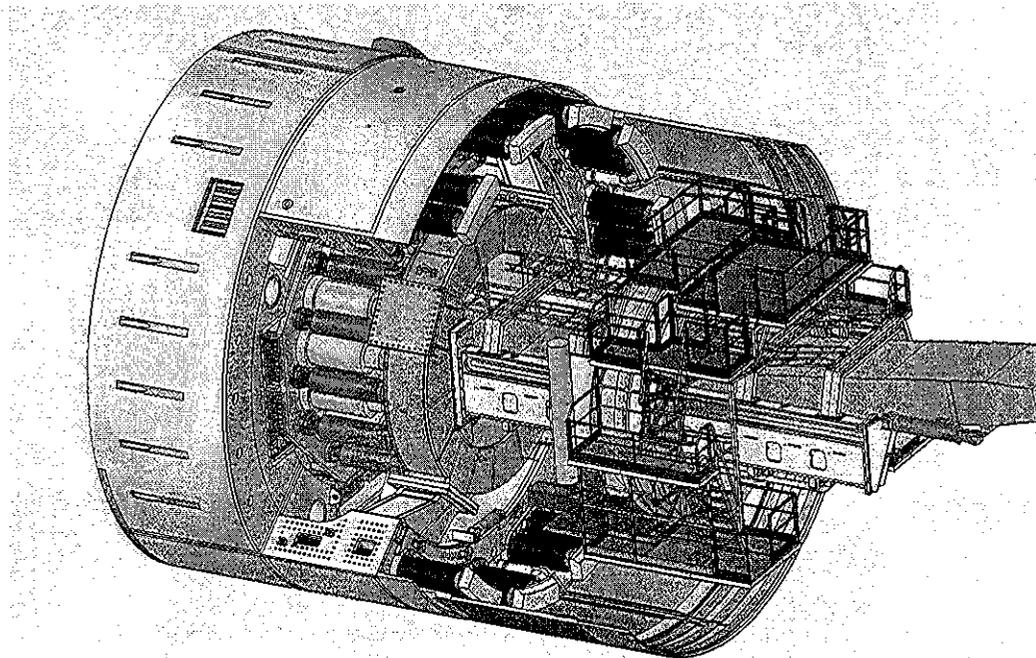
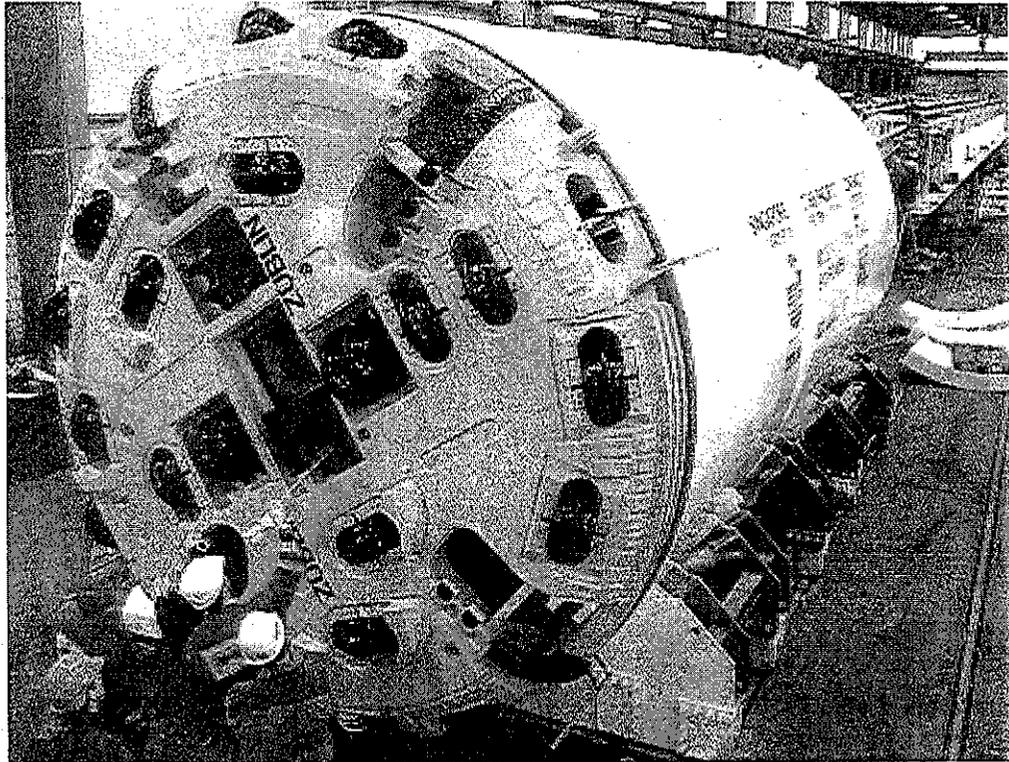
a) Topos (Grippers)

La principal característica es que para avanzar se apoyan sobre el propio túnel por medio de unos codales/zapatas que los denominamos grippers. La máquina dispone de dispositivos para el sostenimiento del terreno en función de la calidad del mismo (bulones, mallazo, hormigón proyectado y cerchas). El revestimiento del túnel, si el proyecto lo requiere, se hace con procedimientos tradicionales, carro de encofrado y hormigonado "in situ".



b) **Topos escudados con erector de dovelas**

El ciclo de avance se compone de excavación y colocación del anillo de dovelas, dejando el túnel terminado. El hueco entre el diámetro de excavación y el diámetro exterior del revestimiento se rellena, generalmente, a través de las propias dovelas.

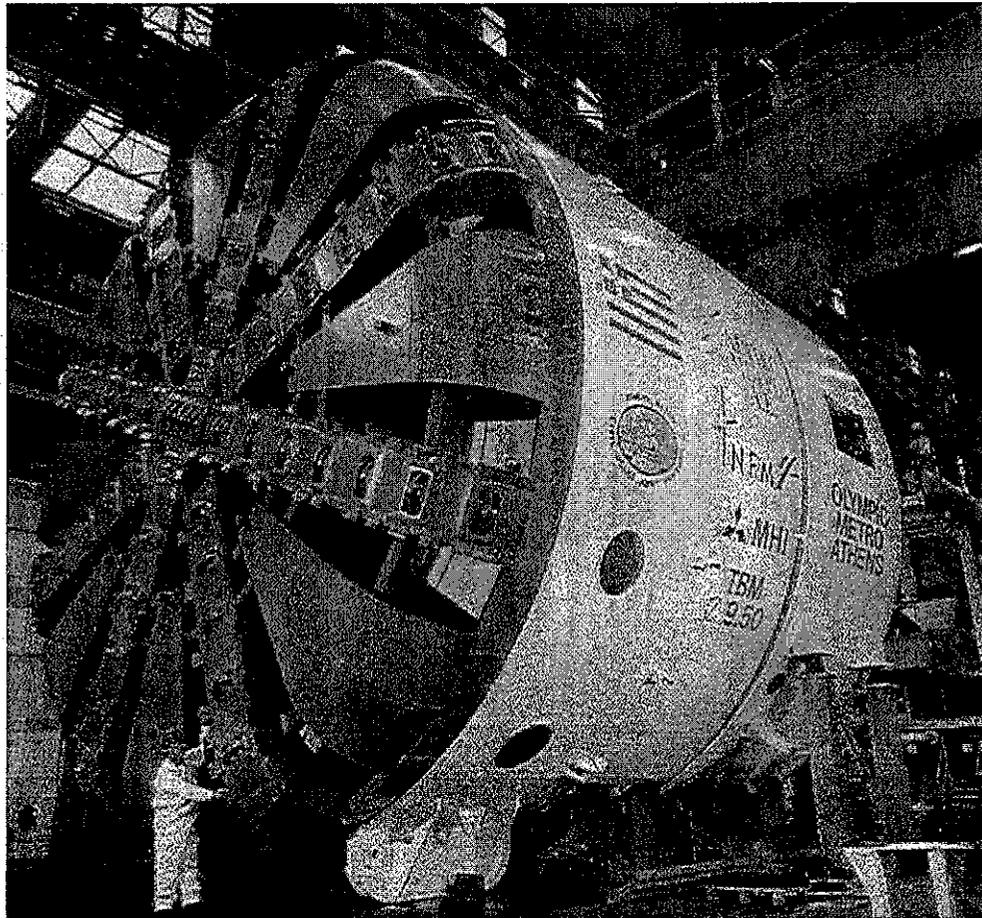


2.2. Tuneladoras para suelos

Estas TBM'S siempre colocan dovelas, por tanto el avance de la tuneladora se hace apoyando y empujando con los cilindros que la propia máquina lleva. Existen otras características que los diferencia de las tuneladoras de roca, como por ejemplo, la cabeza de corte (tipo de herramientas, % de apertura, el accionamiento "r.p.m. y par"), el relleno del trasdos del anillo, etc.

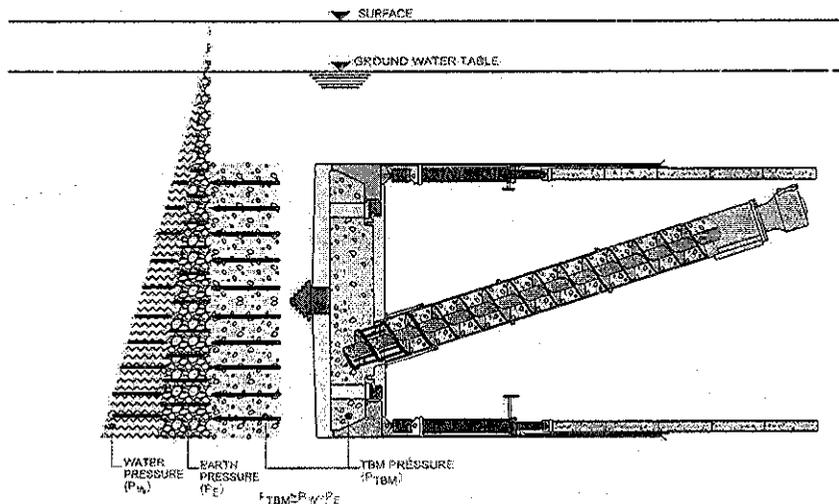
a) **Escudos abiertos**

Quando los terrenos formados por suelos y su frente es estable, se utiliza este tipo de TBM'S. A diferencia de las otras máquinas para suelos, la extracción de los escombros en la cámara se hace por medio de una cinta.



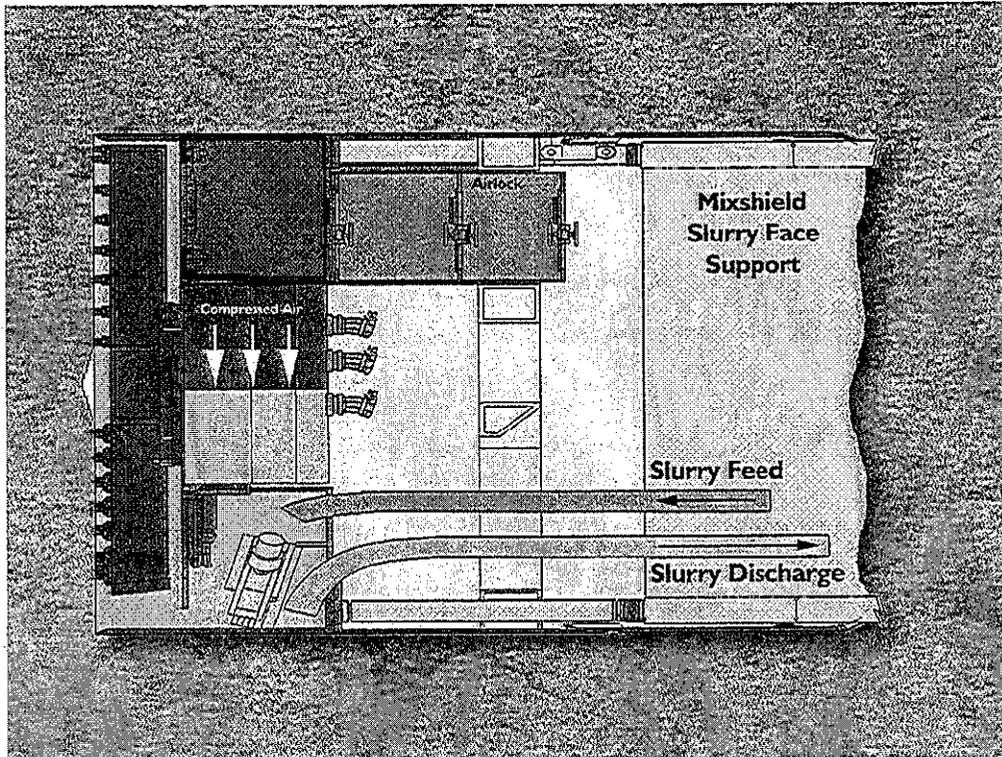
b) Escudos frentes inestables (E.P.B.)

Quando el frente es inestable se usan estas TBM'S que las denominaremos E.P.B. (EARTH PRESSURE BALANCE) Su funcionamiento consiste en sostener a una presión determinada el frente de excavación, esto se consigue con un tratamiento a base de espumas (tensoactivos, polímeros y otros componentes químicos) de los escombros en la cámara de excavación, de tal manera que se comportan como una masa semisólida que permite un efecto de empuje hidráulico hacía el frente de excavación. Los escombros se extraen de la cámara mediante un tornillo sin-fin.



c) Escudos Hidro (Frentes inestables)

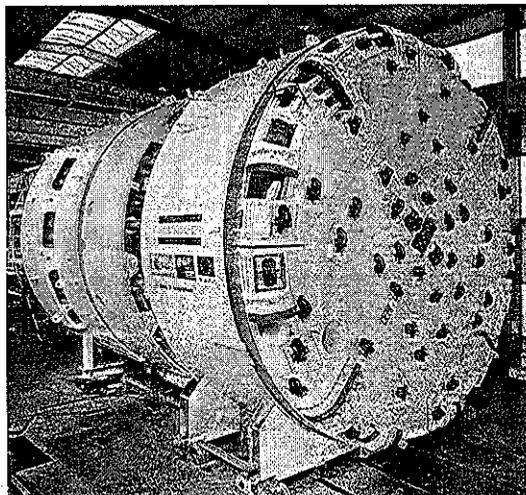
Quando el terreno a excavar en el túnel está por debajo del nivel freático, con aportación de fuerte cantidad de agua y/o presenta una permeabilidad alta, es necesario mantener el frente de excavación con un tratamiento a base de lodos bentoníticos. Los escombros mezclados con bentonita se extraen desde la cámara hasta la superficie, por medio de bombas eléctricas de gran potencia. En el exterior se instala una planta de separación y recuperación de la propia bentonita. Típicamente estas máquinas, también llamadas SLURRY SHIELD ó MIXSHIELD, se utilizan en terrenos que contienen arenas limpias y/o gravas.

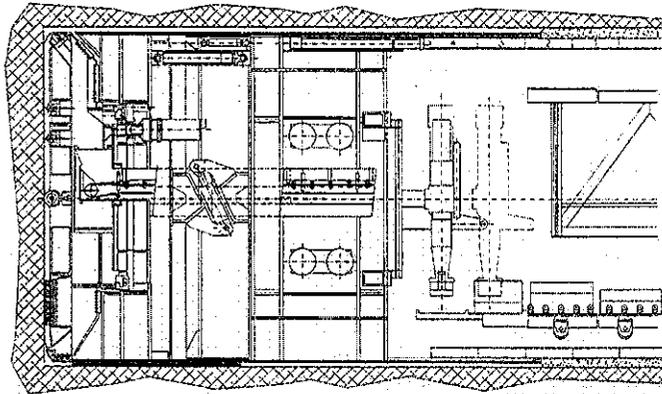


2.3. Tuneladoras mixtas

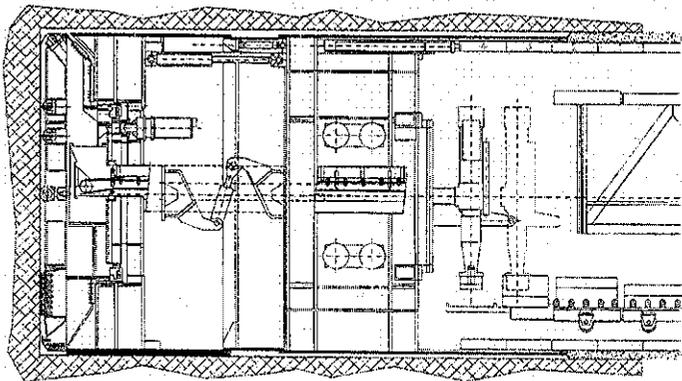
a) **Dobles escudos (Telescópicos)**

Tuneladoras que pueden avanzar, excavar, apoyando los grippers en el túnel, cuando la roca es competente y cuando no lo es, se apoyan los gatos sobre el anillo de dovelas. Son máquinas de gran rendimiento ya que pueden simultanear la excavación con la colocación del anillo cuando el terreno lo permite.

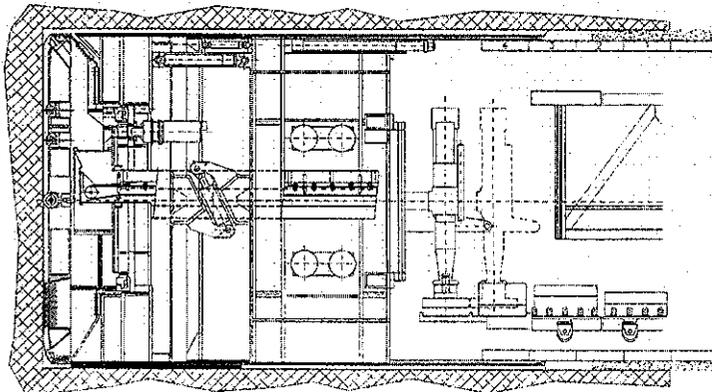




FASE Nº 1
INICIO
EXCAVACIÓN



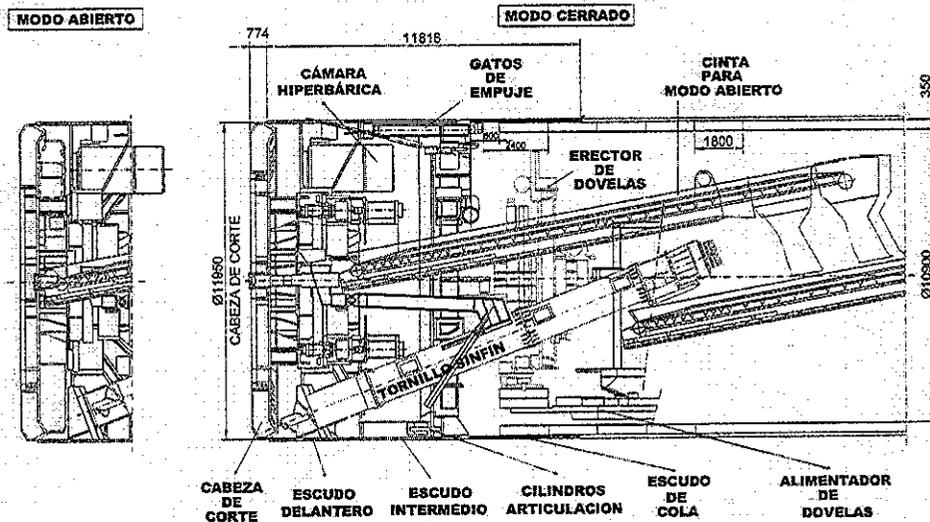
FASE Nº 2
FINAL
EXCAVACIÓN



FASE Nº 3
REGRIPPING

b) Escudo Dual (Roca-EPB)

Pueden trabajar en terrenos formados por roca y por suelos de frentes no estables (Modo E P B)



c) Escudos convertibles (Roca-hidro)

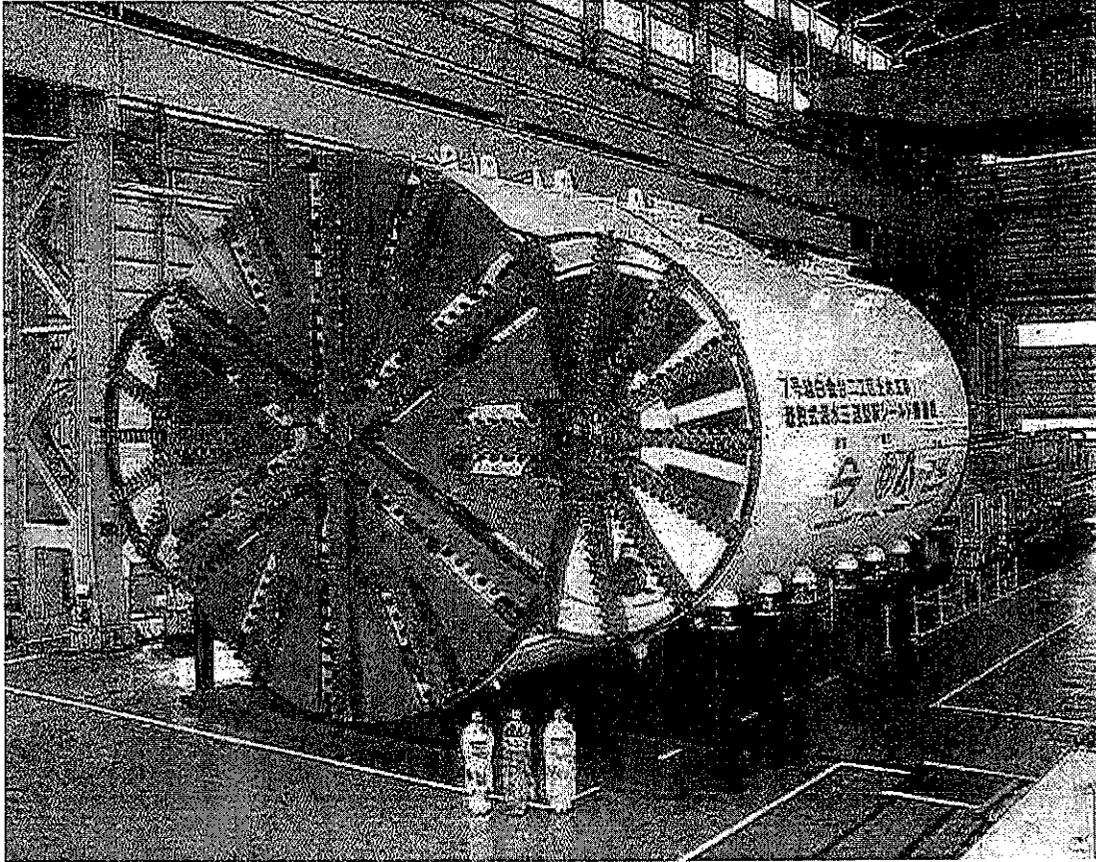
Pueden trabajar en frentes rocosos y en suelos de permeabilidad alta y gran cantidad de agua (Modo SLURRY SHIELD ó MIXSHIELD)

d) Escudos convertibles (EPB-SLURRY SHIELD)

En proceso de desarrollo, ya se han fabricado alguna unidad para trabajar como EPB y SLURRY-SHIELD

2.4. Tuneladoras especiales

Se han ejecutado tuneles con doble ó triple cabeza para ejecutar secciones diferentes a las circulares



3.- FUTURO. INNOVACIÓN Y DESARROLLO

Cada tuneladora que se fabrica es un prototipo, cada máquina que se construye se recogen experiencias vividas anteriormente, bien por los propios fabricantes o por las otras partes implicadas, administraciones, proyectistas, consultores, constructoras, etc. El "mundo" del túnel es muy sensible y se transmite información con bastante generosidad por todos, a través de, revistas, libros, conferencias, seminarios, etc. Por lo tanto el I+D+i es constante y permanente. Como circunstancia especial, sólo hay 7 fabricantes en el mundo y les llega información y experiencia de todos los túneles que se están ejecutando.

Las INNOVACIONES en el campo de las TBM S y las PERSPECTIVAS DE FUTURO se desarrollan o se deberían desarrollar, a nuestro entender, por cinco vías diferentes:

- COMO CONCEPTO DE MÁQUINA
- COMO LAS PARTES O ELEMENTOS QUE LA CONSTITUYE

- SOSTENIMIENTOS Y/O REVESTIMIENTO
- PREDICCIÓN DE LOS TERRENOS A EXCAVAR
- OPTIMIZACIÓN DE TIEMPOS

3.1. Como concepto de máquina

a) **Presente.**

En los últimos años se han desarrollado:

- Dobles escudos
- Escudos Dual: ROCA-EPB
- Escudos convertibles ROCA-HIDROESCUDO
- Escudos mixtos. EPB-HIDROESCUDOS

b) **Futuro**

Escudos universales. Que pueden excavar en todo tipo de terrenos. Hoy por hoy parece una utopía, pero no dudamos que tendrán su aplicación en el futuro en proyectos de túneles largos con geologías cambiantes

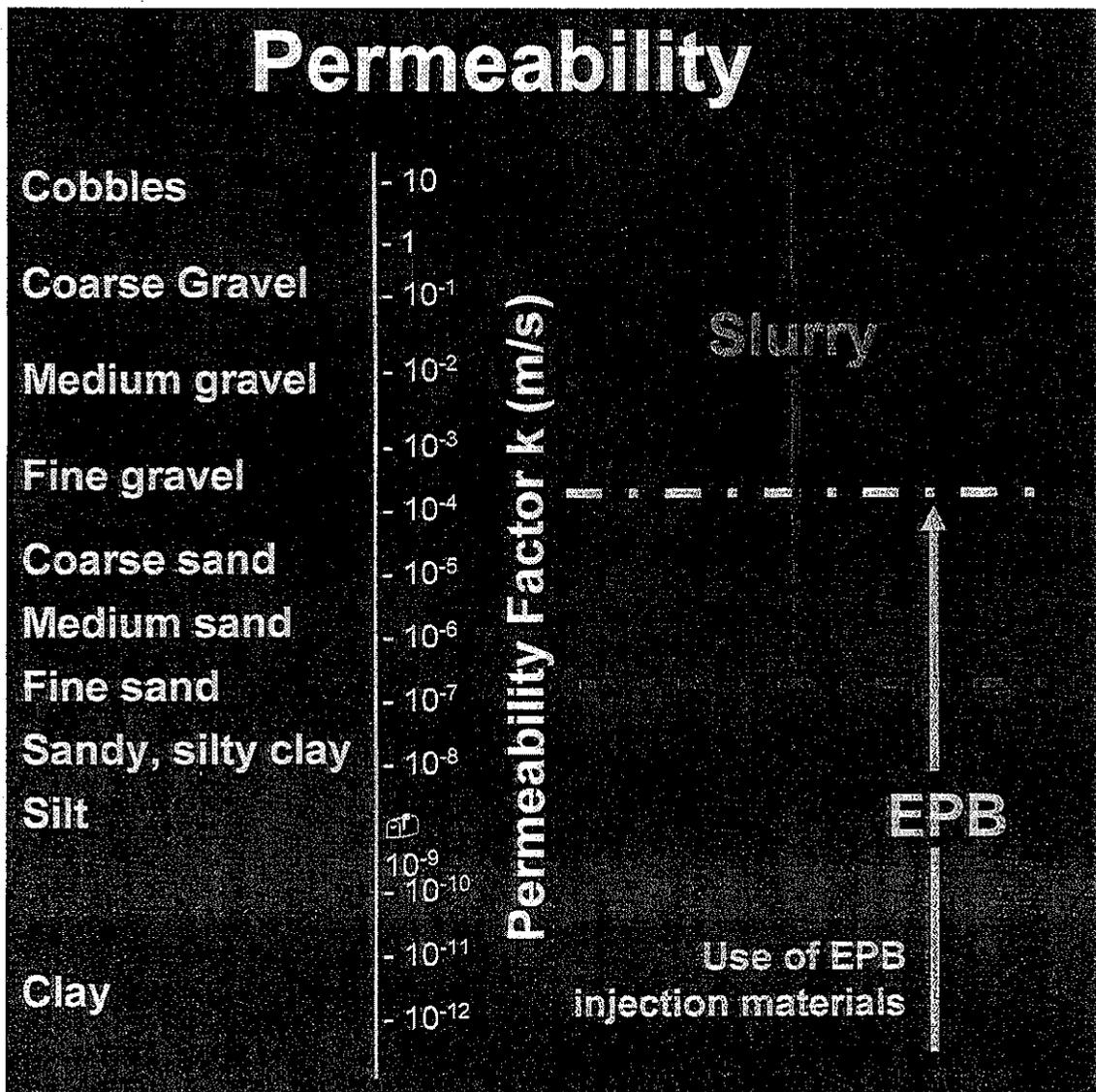
Mayor campo de aplicación en los escudos EPB.

Los escudos EPB están experimentando y no dudamos que en el futuro aumenten su campo de aplicación a terrenos que geológicamente están destinados hoy en día a los hidroescudos por dos razones:

- La primera razón es y será debido a la investigación continua sobre espumas, tensoactivos, polímeros y otros productos químicos que mezclados con los terrenos excavados pueden tener un buen comportamiento en túneles que tradicionalmente eran o son excavados por hidroescudo
- La segunda razón es el elevado coste del transporte de escombros cuando se utiliza hidroescudos y los posibles problemas medioambientales que se puedan plantear

Permeability

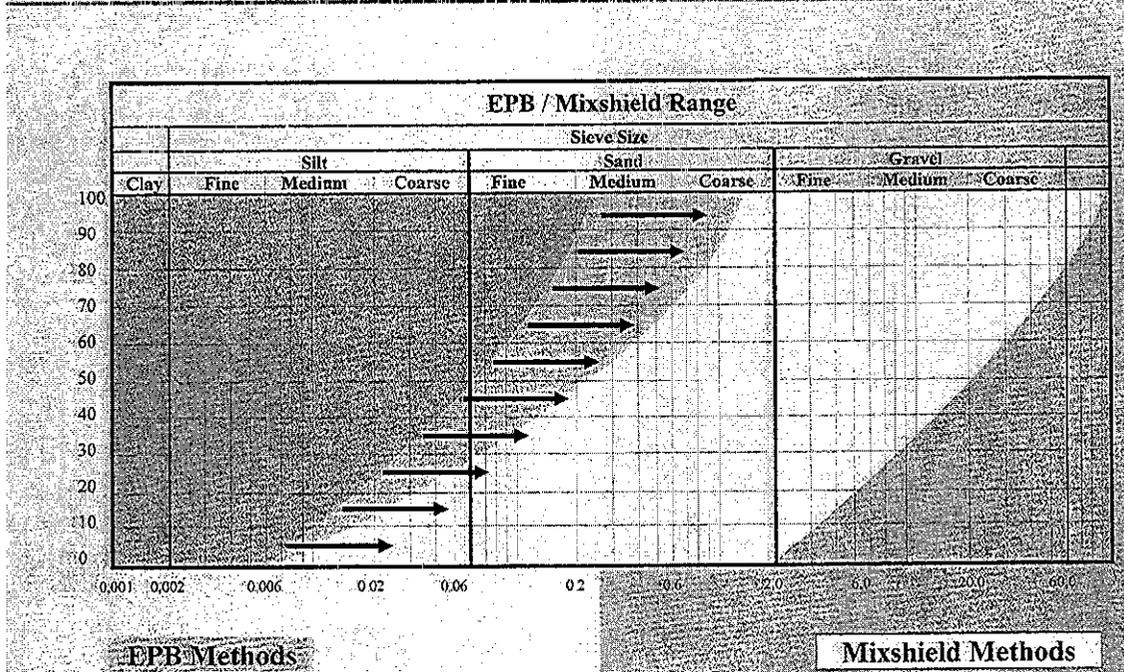
	Permeability k (m/s)	Classification
<div style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> EPB	Less than 10^{-8}	Impermeable / V low
	10^{-8} to 10^{-6}	Low permeability
	10^{-6} to 10^{-4}	Permeable
<div style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #333333; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> SLURRY		Highly permeable



Permeability

	Ground description	Permeability k (m/s)	
		Limit	Average
<div style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> SLURRY			
<div style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> EPB	Coarse sand	10^{-5} to 10^{-2}	10^{-4} to 10^{-3}
	Medium sand	10^{-6} to 10^{-3}	10^{-4}
	Fine sand	10^{-6} to 10^{-3}	10^{-5} to 10^{-4}
	Sandy, silty clay	10^{-7} to 10^{-4}	10^{-4}
	Silt	10^{-8} to 10^{-5}	10^{-8} to 10^{-7}
	Clay	10^{-12} to 10^{-8}	10^{-10} to 10^{-9}

EPB / Mixshield



Cuadros y gráfico donde se puede observar los rangos de valores en la utilización de los escudos EPB/HIDROSHIELD (MIXSHIELD).

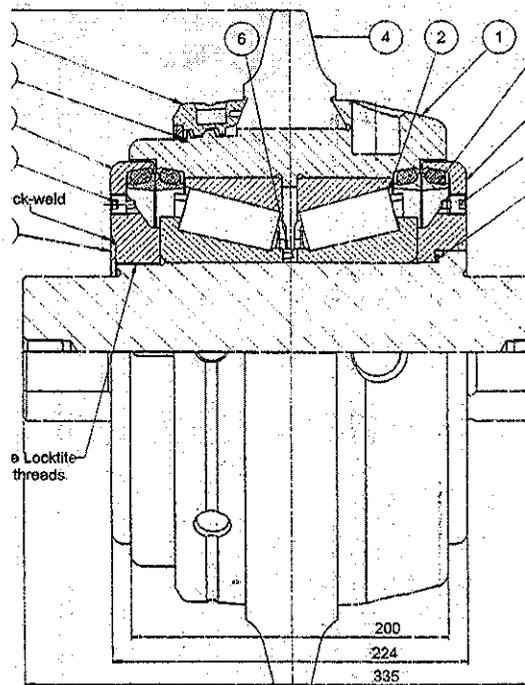
3.2. Como partes o elementos que las constituyen

3.2.1. Cabeza de corte

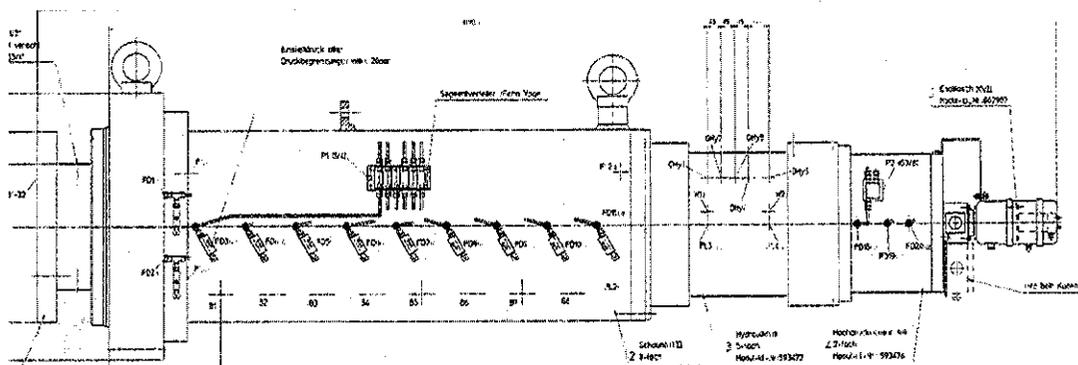
Es una de las partes más importantes de una TBM y como tal, debe de estar en permanente desarrollo e innovación

a) Herramientas de corte

- Comportamientos de mayor rentabilidad en la excavación nos hace pensar en el desarrollo de las herramientas de corte en general, pero en particular los discos de corte deberán experimentar en un futuro próximo un cambio importante Desde el año 1956 donde James Robbins empezó a desarrollar los cortadores se ha estado INNOVANDO continuamente pero queda mucho camino por recorrer Por ejemplo los cortadores de 17" por sus dimensiones y pesos son en la actualidad los más empleados, pensar que mejorando sus componentes de pasar a 250 kN a 300 kN de carga a soportar y aumentar la velocidad lineal del cortador de 150/180 m/min actual a 200/220 m/min podríamos acometer rocas por encima de 300 MPa de resistencia a la compresión o con rocas de menor resistencia conseguir mayor penetración



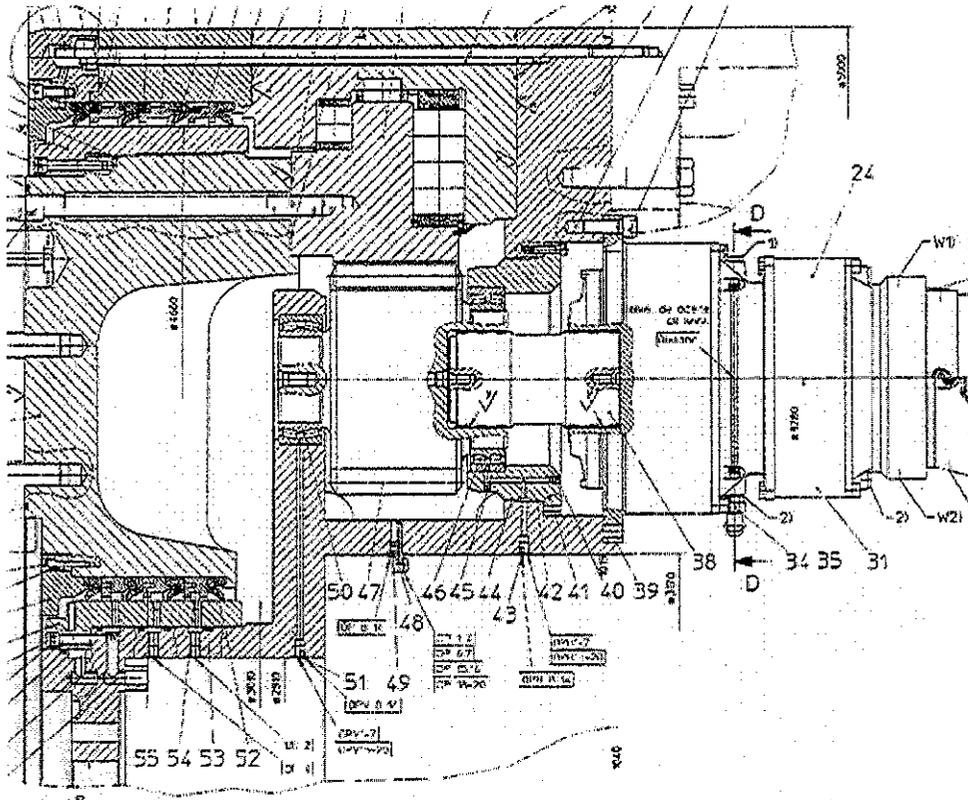
- Control de desgaste de todas las herramientas que componen la cabeza, así como su propia estructura
- Diseños de sustitución de las herramientas más rápidas y seguras que los actuales.
- Junta giratoria. Más eficaces que los actuales y menos voluminosas



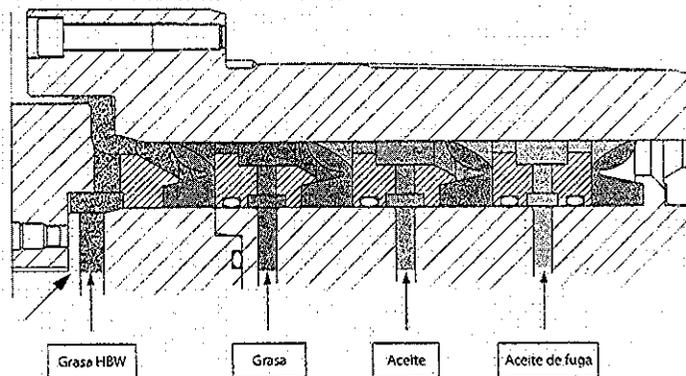
b) Accionamiento de la cabeza de corte

- ❖ Cada día los accionamientos eléctricos de frecuencia variable (FVD) son más utilizados por ventajas sobre los accionamientos hidráulicos:
 - Ahorro energético
 - Menor generación de calor
 - Menor nivel de ruidos
 - Facilidad de mantenimiento

Pero todavía nos queda por desarrollar y mejorar la interconexión entre todos los elementos que componen el accionamiento, para que la transmisión a la corona del rodamiento en todos sus puntos (dientes) sea la misma y no se produzcan efectos de fatiga en los propios dientes



- ❖ Sellos de estanqueidad Hoy en día se nos presentan con cierta periodicidad, problemas de comportamiento y efectividad de estas partes de la motorización, tan importantes para la vida del rodamiento. Entendemos que se debe buscar mejores soluciones que las actuales, piensesé que si hay problemas con el rodamiento en una tuneladora ejecutando el túnel su solución en algunos casos no existe y, en otros es muy costoso y podemos tener el túnel durante mucho tiempo parado.



c) Erector

En aquellas tuneladoras que en el ciclo de avance, se coloca el anillo de dovelas, es muy importante el diseño del erector por dos motivos:

- Calidad de construcción del anillo
- Posibilidad de ahorro en la colocación. Podemos cifrar entre el 35 al 50% del tiempo del ciclo en la colocación

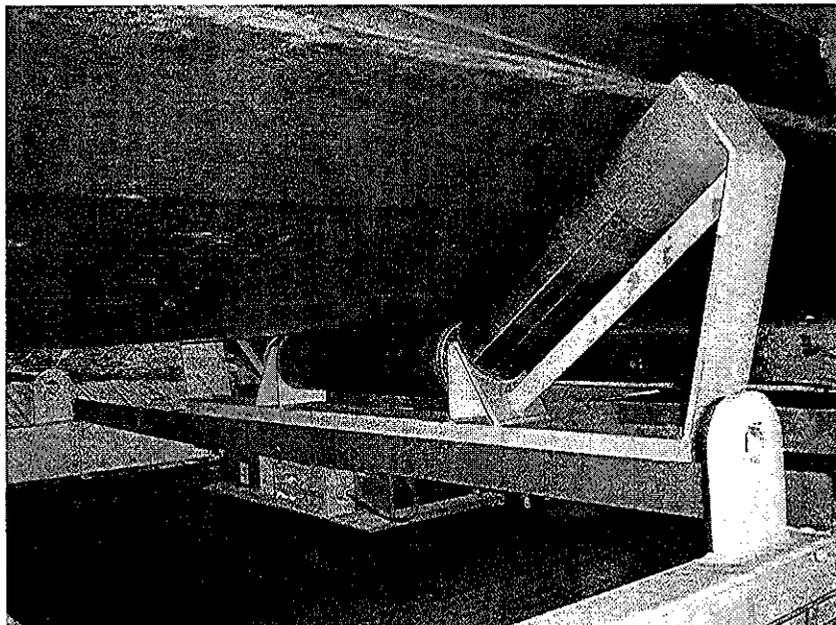
Los fabricantes japoneses han diseñado algún erector robotizado, pero la experiencia no ha sido del todo positiva.

Entendemos que se debe de seguir estudiando diseños para la optimización en calidad y ahorro de tiempos.

d) Control de escombros

Uno de los componentes de una tuneladora que nos dá lo que puede pasar en el frente de excavación, respecto al equilibrio entre el escombros teórico y el real, es el control de la cantidad que estamos extrayendo.

Los sistemas de control han ido evolucionando y en la actualidad disponemos de básculas múltiples e integradas entre sí, pero pensamos que es un campo de continúa evolución por su importancia.



e) Control de Par

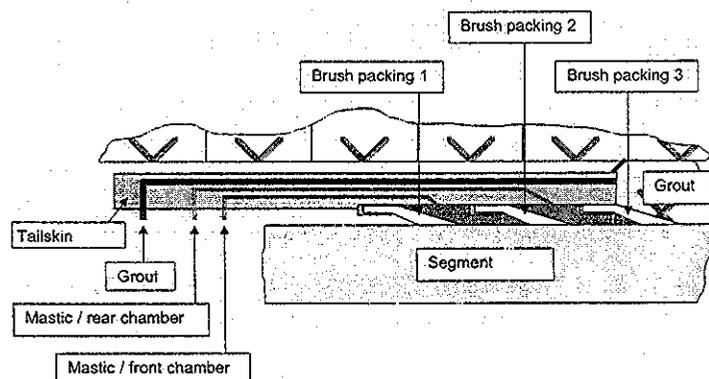
En la mayoría de tipos de TBM'S está solucionando este fenómeno de control de par (anti-roll) Queda por resolver de forma eficaz en aquellas máquinas, como por ejemplo en los "topos" escudados trabajando en roca. La cabeza de corte cuando excava trabaja en el mismo sentido de giro y actualmente se resuelve modificando la dirección de los gatos de empuje, pero esta solución en algunos casos no resuelve el problema y además somete el anillo a empujes no deseados.

f) Cepillos de cierre en la cola del escudo

Cuando se usa TBM's para la excavación en suelos, es necesario la colocación de dovelas dentro de la cola del escudo. Para evitar la entrada de mortero u otros materiales para la inyección de relleno entre el exterior del anillo y la excavación, es necesario "tapar" el gap entre el trasdos de la dovela y la parte interior de la propia cola del escudo

En la actualidad se están empleando los llamados "cepillos" formados por múltiples alambres que se adaptan al perímetro del anillo. En función de la presión necesaria de inyección, se colocan 2 o más filas de cepillos y entre ellos se rellenan de manera continua con grasa biodegradable (mastic), para formar un "sello" que nos evite, la entrada de la inyección y la del agua procedente del propio terreno

Este sistema que es eficaz, en opinión del autor es caro y necesita un mantenimiento cuidadoso. Creemos que es necesario desarrollar e innovar en este punto para mejorar los resultados obtenidos hasta el día de hoy

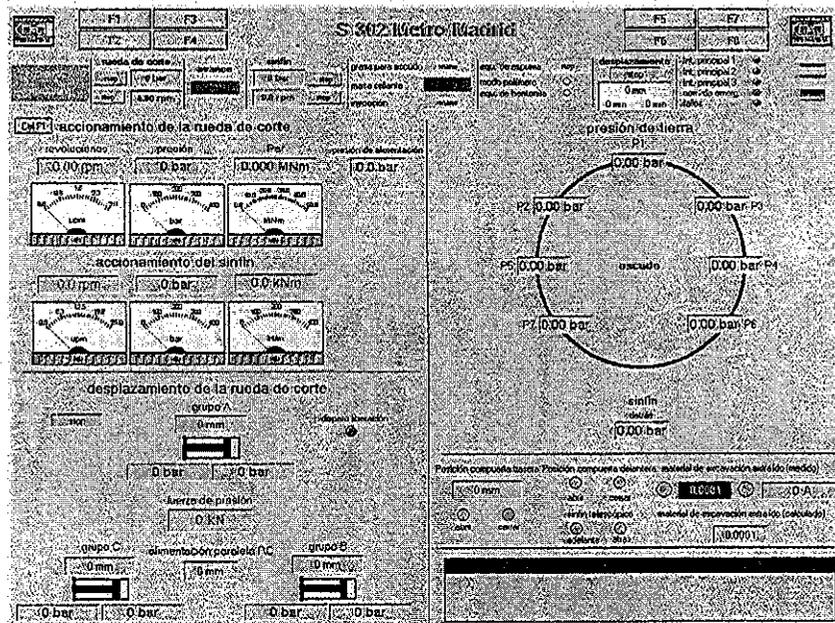


g) Back-up

El back-up en las tuneladoras es el elemento que proporciona la logística a los escudos para su avance. Creemos que se debe de mejorar cada día para que los tiempos de ejecución se reduzcan.

h) Información

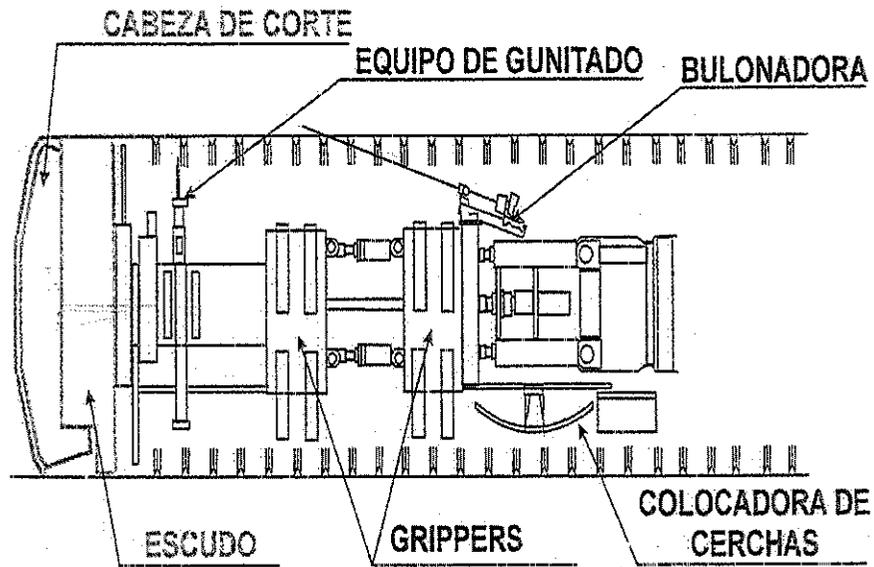
En la actualidad cada máquina nos puede facilitar entre 150/200 parámetros. Esto cada día evoluciona muy rápidamente, tanto en calidad como en cantidad, debido a la integración de la informática y la electrónica.



3.3. Sostenimiento y/o revestimiento

a) Sostenimiento

En los tipos de tuneladoras que trabajan en terrenos de rocas duras-blandas, los sistemas de sostenimiento deben de evolucionar: colocador de cerchas, robot para hormigón proyectado, sistema de colocación de la malla, puesto de bulones y ejecución de paraguas.

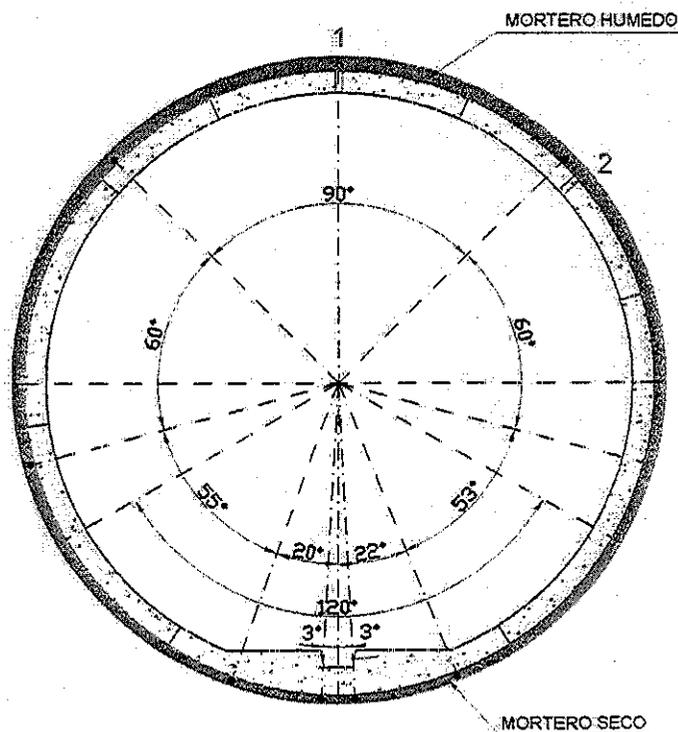


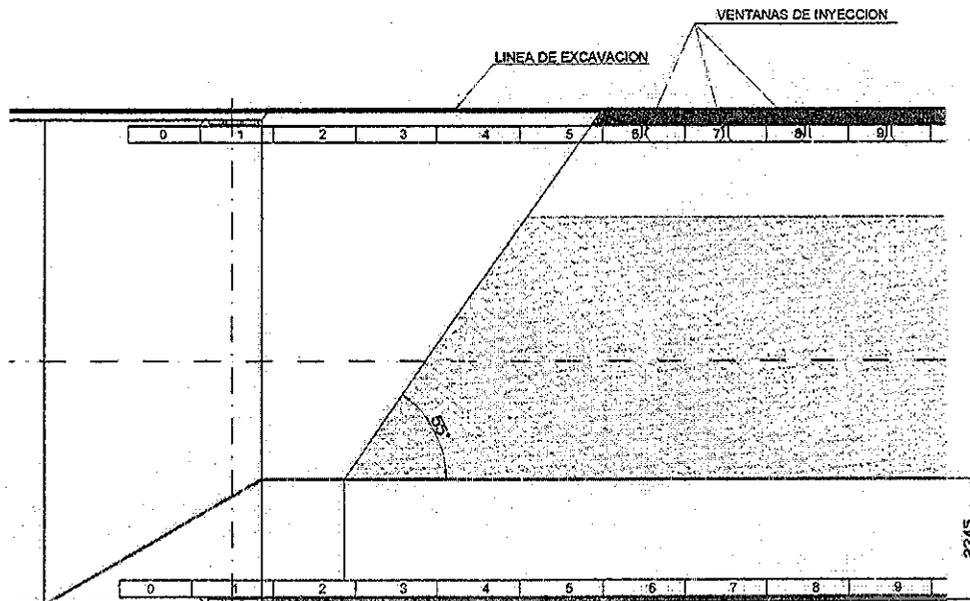
b) Inyección trasdós

En aquellas TBM'S que se colocan anillos hay que rellenar el trasdós, tenemos dos casos:

- *Máquinas que trabajan en roca*

Normalmente se hace en dos etapas, la primera se inyecta la parte interior del anillo por cola ($\approx 120^\circ$) a base de mortero y la segunda a través del propio anillo: bien mortero o gravilla.





- *Máquinas que trabajan en suelos.*
Se inyecta mortero por el escudo de cola.

Ambas soluciones requieren evolución, tanto en la forma de inyectar, control de parámetros; como en los componentes o inyectar.

Igualmente se debe de estudiar si se debe de tener en cuenta el comportamiento de la inyección en el cálculo del anillo

c) **Revestimiento**

En la actualidad hay múltiples diseños bajo el punto de vista geométrico:

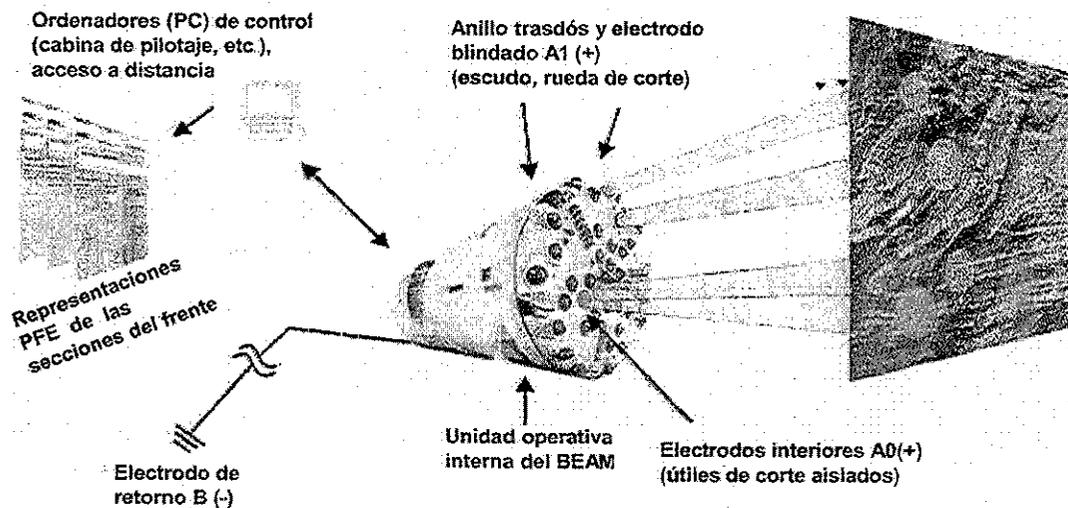
- Anillos rectos
- Anillo izquierda-derecha
- Anillo exagonal
- Anillo universal
- Otros

Igualmente pasa con los diseños de juntas radiales y circunferenciales

Creemos que debe de haber una evolución continua para optimizar el tipo de anillo en cada proyecto.

3.4. Predicción de terrenos a excavar

- Hay sistemas que tímidamente se están empezando a desarrollar. Cuando consigamos una cierta eficacia, ayudaremos de forma significativa a la geotecnia y evitaremos sorpresas en la ejecución.



3.5. Optimización de tiempos

En cualquier análisis de rendimientos en la ejecución de túneles con TBM'S veremos el magnífico campo de mejoras que tenemos por delante. Pensar que en la actualidad, del tiempo total que disponemos para la ejecución solamente utilizamos entre un 40 a un 60%.