



I CONGRESO
INTERNACIONAL
SOBRE LA TRAVESÍA
FERROVIARIA POR EL
PIRINEO CENTRAL

Ier CONGRÈS
INTERNATIONAL
SUR LA TRAVERSÉE
FERROVIAIRE DES
PYRÉNÉES CENTRALES

I INTERNATIONAL
CONGRESS
ON THE CENTRAL
PYRENEES RAILWAY
CROSSING

LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN TERRENOS MIXTOS CON TUNELADORAS DE GRAN DIAMETRO. EXPERIENCIAS RECIENTES DE ALGUNAS OBRAS



Felipe Mendaña Saavedra

Dr. Ingeniero de C.C.P.



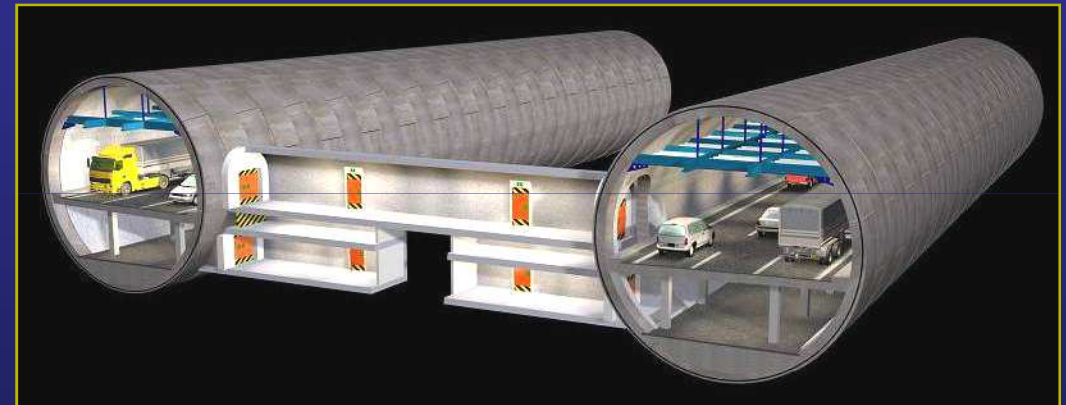
Grandes Infraestructuras Europeas - Grandes Infrastructures Européennes - Large European Infrastructures

ZARAGOZA (España), 29/31 Octubre 2008 - SARAGOSE (Espagne), 29/31 Octobre 2008 - ZARAGOZA (Spain), 29/31 October 2008



¿POR QUÉ INCREMENTAR EL DIÁMETRO DE LAS TBMs?

- ♦ EN EL PERIODO 2000-2008 SE HA VENIDO MANIFESTANDO UNA **TENDENCIA MANTENIDA AL EMPLEO DE TUNELADORAS DE GRAN DIÁMETRO**, SOBRE TODO EN LOS PROYECTOS DE LOS GRANDES PLANES DE **INFRAESTRUCTURAS DEL TRANSPORTE**.
- ♦ **OBJETIVO: INTEGRAR EN EL SISTEMA BÁSICO DE TRANSPORTE**
 - Otros sistemas adicionales.
 - **Galerías de servicio** (ventilación, energía, etc.)
 - **Servicios urbanos de la zona** (aguas residuales, tormentas, etc.)
- ♦ A LO ANTERIOR SE UNEN LAS **VENTAJAS GENERALES DE LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES CON TBMs**:
 - **Seguridad de las personas** (operarios/habitantes de la zona)
 - **Afección mínima a bienes existentes** (subsidiencias en zonas urbanas)
 - **Plazos mínimos de construcción.**
 - **Certeza razonable del coste esperable.**





EL PROBLEMA DE LOS GRANDES DIÁMETROS

- ♦ **EL PROBLEMA NO ESTÁ**, como veremos, **EN EL DISEÑO DE LAS MÁQUINAS PARA OPERAR CON SEGURIDAD EN TODO TIPO DE TERRENOS** (suelos, roca e incluso terrenos mixtos)
- ♦ **LA DIFICULTAD** sigue siendo **EL INSUFICIENTE CONOCIMIENTO PREVIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS TERRENOS A ATRAVESAR.**
- ♦ **EL GRADO DE INCERTIDUMBRE** de toda obra subterránea **PUEDE RESOLVERSE SALVO CASOS EXCEPCIONALES DE DIFICULTADES HUMANAMENTE IMPREVISIBLES.**
- ♦ En la mayoría de los casos de **FRACASO LOS RECURSOS DE PLAZO Y PRESUPUESTO PARA ESTUDIOS HAN SIDO INSUFICIENTES.**



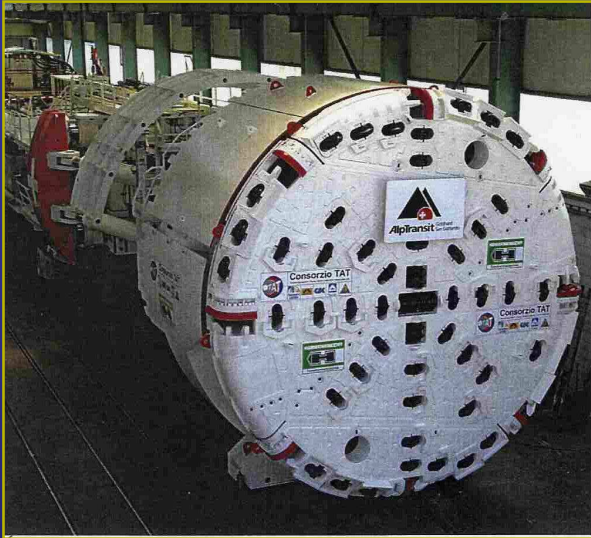
ROCAS DURAS Y ABRASIVAS

♦ EXPERIENCIAS PRINCIPALES:

- **Túneles de GUADARRAMA**.....4 TBM “doble escudo”
(2 x 29,5 km $\varnothing_{exc}$: 9,50 m) c/ cabeza de roca
- **Túneles de PERTHUS**.....2 TBM “doble escudo”
(2 x 8,5 km $\varnothing_{exc}$: 9,96 m) c/ cabeza de roca
- **Túneles de PAJARES**..... 4 Escudos simples
(2 x 26 km $\varnothing_{exc}$: 10,10 m) 1 “D.E.” c/ cabeza de roca
- **Línea 9. Metro de Barcelona**.....3 Escudos “EPB”
(40 km $\varnothing_{exc}$: 12,06 m) c/ cabeza mixta

ROCAS DURAS Y ABRASIVAS

4



TBM abierta
de roca ("topo")
(GOTTHARD)



Escudos simples
para roca
(PAJARES)



Doble escudo
(PERTHUS)



Escudos
"EPB" para
roca
(PORTO)



ROCAS DURAS Y ABRASIVAS

5

♦ “DOBLE ESCUDO” $\Leftrightarrow$ TBM ABIERTA (“TOPO”): RENDIMIENTOS.

- **Rocas clase I y II..... 80%** $\Leftrightarrow$ **100%.....** (Terreno autoestable)
(RMR>60)
- **Rocas clase III..... 100%** $\Leftrightarrow$ **100%.....** Similares
(45<RMR<60)
- **Rocas clase IV*..... 100%** $\Leftrightarrow$ **50%.....** Anillos prefabricados
(25<RMR<45) como sostenimiento
- **Rocas clase V*..... VIABLE $\Leftrightarrow$ INVIABLE.....** Avance posible del
(RMR<25) **A VECES** D.E. en muchos casos
(*) Frentes mixtos



ROCAS DURAS Y ABRASIVAS

♦ “DOBLE ESCUDO” ↔ ESCUDO PRESURIZADO

- Solamente en terrenos Clases I ó II (algún caso Clase III) **puede resultar ventajoso el “Doble Escudo”** (el revestimiento se coloca durante el ciclo de avance).
- Para diámetros $\emptyset_{exc} < 12$ m ambas tipologías ofrecen resultados similares.
- Para diámetros mayores ($\emptyset_{exc} \geq 12$ m) han de revisarse las actuales soluciones del D.E. relativas a:
 - Deformaciones, rozamientos, etc. del **E. telescópico**.
 - Mejora (o nuevo diseño del actual **Sistema de empuje** trabajando en “modo **escudo simple**”).



ROCAS DURAS Y ABRASIVAS

7

♦ ESCUDOS “EPB” PARA ROCA

- **Contingencias anteriores negativas** (Metros de **PORTO** y **MADRID**) recomendaban abandonar el modelo “dual”, básicamente por:
 - Difícil previsión exacta del inicio de “frentes inestables”.
- **Diseño “EPB” $\varnothing_{exc} = 12$ m Línea 9** (Metro BARCELONA) **en granitos.**
 - Rueda de **configuración mixta. Giro en ambos sentidos.**
 - “**Cutters**” para roca (71 ud. 17” doble/simple disco)
 - **Herramientas de suelos** (151 ud. “scraper” + “ripper” periferia).
 - **Aberturas: 34%. Extracción sólo por tornillo.**
 - **Par de giro para suelos ≈ 3.800 Txm**
- **Rendimiento razonable en frentes mixtos** (granito + “jabre” + +aluvial)



Escudo HNK de tipo
“EPB” puro ($\varnothing_{exc} = 12,06 \text{ m}$)

Línea 9 del METRO DE BARCELONA



ROCAS DURAS Y ABRASIVAS

9

♦ ESCUDOS “EPB” TIPO DUAL PARA ROCA

- **Contingencias anteriores negativas** (Metros de **PORTO** y **MADRID**) se consideraron evitables.
- **Diseño TBM Ø 11,96 m Línea 9** (Metro BARCELONA) en granitos.
 - Rueda de configuración mixta. Giro en un solo sentido. ↗
 - “Cutters” para roca (69 ud. 17” + 12 ud 14”)
 - Herramientas de suelos (451 ud “scraper + 84 ud “ripper”)
 - ↘ – Aberturas 22%. Extracción por cinta o tornillo.
 - ↘ – Par de giro para roca dura $\approx 2.900 \text{ Txm}$
- **Trabajo muy penoso en frentes mixtos** (granito + “jabre” + aluvial): Consecuencia de los aspectos del diseño marcados ↘ ↙)



Escudo NFM de tipo
dual ($\varnothing_{exc} = 11,96 \text{ m}$)

Línea 9 del METRO DE BARCELONA



ROCAS DURAS Y ABRASIVAS

11

♦ ESCUDOS “EPB” PURO” ↔ “TIPO DUAL”

- Con el tipo “EPB” sólo es posible la extracción por tornillo se trabaje en “modo abierto” o “en presión de tierras” (EPB).
- Es posible un cambio instantáneo para pasar de “modo abierto” → “EPB” si aparece un frente inestable.
- La extracción por tornillo o cinta tienen capacidad similar.
- Ahora bien, el coste de la extracción por tornillo es bastante superior cuando se trata de terrenos muy abrasivos incluso con aditivos adecuados.

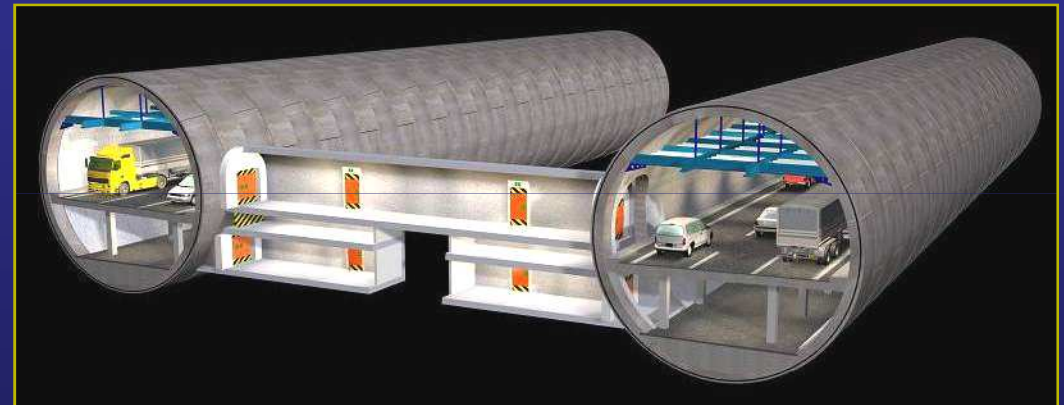
♦ CONCLUSIÓN: AUMENTAR AL MÁXIMO LOS TRABAJOS DE RECONOCIMIENTO / DIMENSIONAR CON HOLGURA LOS PARÁMETROS BÁSICOS DEL ESCUDO.

ROCAS BLANDAS Y SUELOS

12

♦ TÚNELES DE LA “CALLE 30 (MADRID)”

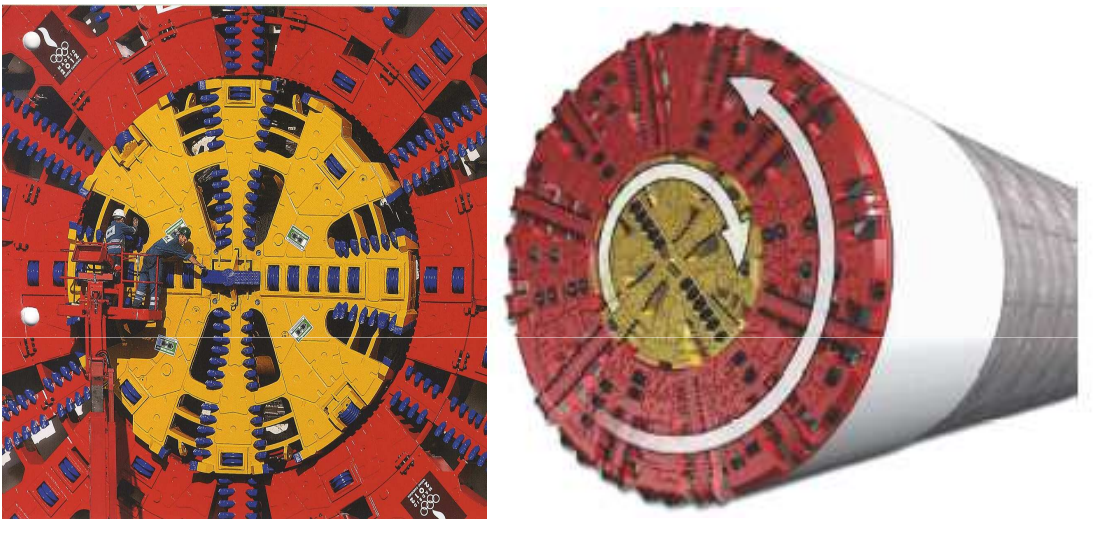
- El nuevo Proyecto “**BY PASS SUR DE LA CALLE 30**” ha sido la modernización del segmento SE-S-SW del **Primer Periférico (M-30) de Madrid**, de unos 32 kms..
- **El BY-PASS SUR** incluye más de 12 km de un circuito bitubo en túnel en el que destacan los **2 TÚNELES DE GRAN DIÁMETRO** $\varnothing_{exc} \approx 15$ m y unos 3.500 m de longitud contruidos con 2 escudos “EPB”.
- El terreno: Alternancias de suelos arenosos-arcillosos de Madrid con rocas yesíferas blandas (<30MPa).
- **SECCIÓN TRANSVERSAL:** Nivel superior con 3 carriles de 3,50 m/Nivel inferior con una **ruta de rescate** / 8 Galenrías de conexión (3 para vehículos). **REVESTIMIENTO:** anillos prefabricados (9+1 dovelas) de 600 mm de espesor.
- **RENDIMIENTOS:** Avances medios mantenidos > 450 m/mes.



ROCAS BLANDAS Y SUELOS

13

♦ EL ESCUDO “HERRENKNECHT” DEL TÚNEL NORTE (“CALLE 30”)



Escudo HNK tipo “EPB” ($\varnothing_{exc}$: 15,16 m) del Túnel Norte de Calle 30 (Madrid)

- **DISEÑO DE LA CABEZA.** Rueda central $\varnothing$ 7 m más 1 Corona concéntrica que giran en sentido contrario para:
 - Evitar la rotación del escudo s/eje.
 - Compensar los Pares de giro de ambas partes.

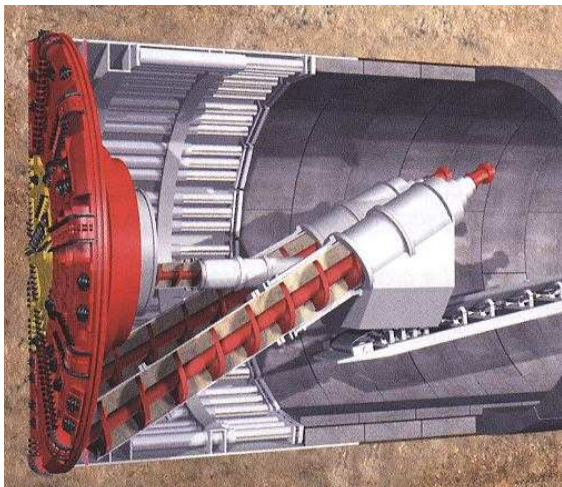
- **CABEZA DE CORTE** de configuración mixta: Cortadores dobles 17” para roca y herramientas tipo “scraper” para suelos. **Aberturas:** 32% de la superficie total de la cabeza.
- **MOTORIZACIÓN HIDRÁULICA:** Rueda central: 10 motores (2450 Txm) que atacan interiormente al cojinete // **Corona exterior:** 24+32 motores (2600 Txm) que atacan interior / exteriormente al cojinete. **Potencia del accionamiento:** 14.000 kW.

ROCAS BLANDAS Y SUELOS

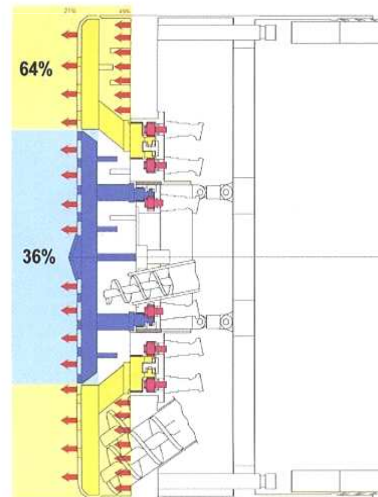
14

♦ EL ESCUDO “HERRENKNECHT” DEL TÚNEL NORTE (“CALLE 30”): PARTICULARIDADES DEL DISEÑO

- **EXTRACCIÓN DEL ESCOMBRO.**- Se hace con 3 tornillos sin fin: uno ($\varnothing$ 600 mm) para la rueda central y dos ($\varnothing$ 1.200 mm) para la corona exterior.



Sistema de extracción de
escombros



Capacidad de aplicación de
aditivos al frente

- **PEGAJOSIDAD DE LAS ARCILLAS.** El esquema recoge el reparto en % de la capacidad total de **aplicación de aditivos en el frente**.
- **TRANSPORTE DE ESCOMBRO.** Por cinta a lo largo del Túnel.
- **TRANSPORTE DE DOVELAS Y OTROS MATERIALES.** Por trenes (doble vía sobre pieza de H.A. de solera).

ROCAS BLANDAS Y SUELOS

15

♦ EL ESCUDO “MITSUBISHI” DEL TÚNEL SUR (“CALLE 30”)

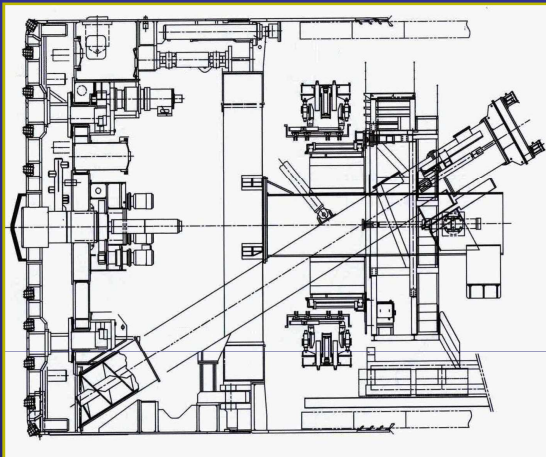


- **DISEÑO DE LA CABEZA DE CORTE:**
Rueda única Ø15,01 m.
Contrarrotación: Alternancias del sentido de giro más la Reorientación de los cilindros de empuje.
- **RUEDA DE CORTE** de configuración mixta: Cortadores triple disco 17" para roca y herramientas tipo “scraper” o “ripper” para suelos.
- **ELEVADO % DE ABERTURAS: 43%.** Permite **mantener una presión adecuada de confinamiento** que se transmite al frente sin obstáculos haciendo posible trabajar con **valores ajustados del Par nominal**.
- **MOTORIZACIÓN ELÉCTRICA (FRECUENCIA VARIABLE):** 28 MOTORES DE 358 Kw (8.600 t·xm) que atacan exteriormente la rueda del cojinete. **Potencia del accionamiento: 10.700 kW.**

ROCAS BLANDAS Y SUELOS

16

♦ EL ESCUDO “MITSUBISHI” DEL TÚNEL SUR (“CALLE 30”): PARTICULARIDADES DEL DISEÑO



Agitador central en cámara



Erector de 2 mesas de vacío

- **AGITADOR CENTRAL** en la cámara, de $\varnothing = 5$ m con tres brazos y accionamiento hidráulico / Velocidad 2 r.p.m. (del orden del doble que la rueda).
- **Impide la formación de bloques** de arcilla (o yeso) en la cámara.
- **Erector de dovelas de 2 mesas de vacío.** Permite **optimizar la selección de dovelas** o bien disponer de una alternativa para el caso de avería en una de las mesas.
- **TRANSPORTE DE ESCOMBRO:** Por cinta a lo largo de todo el túnel.
- **TRANSPORTE DE DOVELAS Y OTROS MATERIALES:** Por trenes (doble vía sobre pieza de H.A. de solera)

ROCAS BLANDAS Y SUELOS

17

♦ TÚNELES DE CARRETERA BAJO EL YANGTZE (SHANGHAI)



Situación y sección transversal tipo de los Túneles de $\varnothing 15,43$ m de Shanghai

- Enlace bajo el río Yangtze con una de las islas en la zona de expansión de la ciudad de Sanghai.
- Dos túneles gemelos de 7,2 km. de longitud y $\varnothing_{exc} = 15,43$ m contruidos con escudos “mixshield” (“EPB” / “Hidro”) HERRENKNECHT.
- **TERRENO:** Suelos y rocas blandas arcillosos con trazado profundo (65 m bajo el río) y alta presión de agua (6 Bar).
- **SECCIÓN TRANSVERSAL:** Nivel superior de 3 carriles de 3,50 m / Nivel inferior con carril de rescate y pasarela de seguridad / Galerías de conexión. **REVESTIMIENTO:** anillos prefabricados (9+1 dovelas) de 700 mm de espesor.
- **PROGRAMA:** Inicio obra Octubre 2005 / Fin túneles: Enero 2009 / Entrada en operación: 2010.

ROCAS BLANDAS Y SUELOS

18

♦ LOS ESCUDOS “MIXSHIELD” HERRENKNECHT DE SHANGHAI



- **CABEZA DE CORTE:** Rueda única con 6 grandes radios y configuración “mixta” (68 herramientas de suelo y 7 grandes cortadores).
- **GRANDES ABERTURAS Y CIRCUITO DE INYECCIÓN DE ADITIVOS** a la zona central del frente (Pegajosidad de las arcillas)

• DISEÑO ESPECIAL DE LA RUEDA.

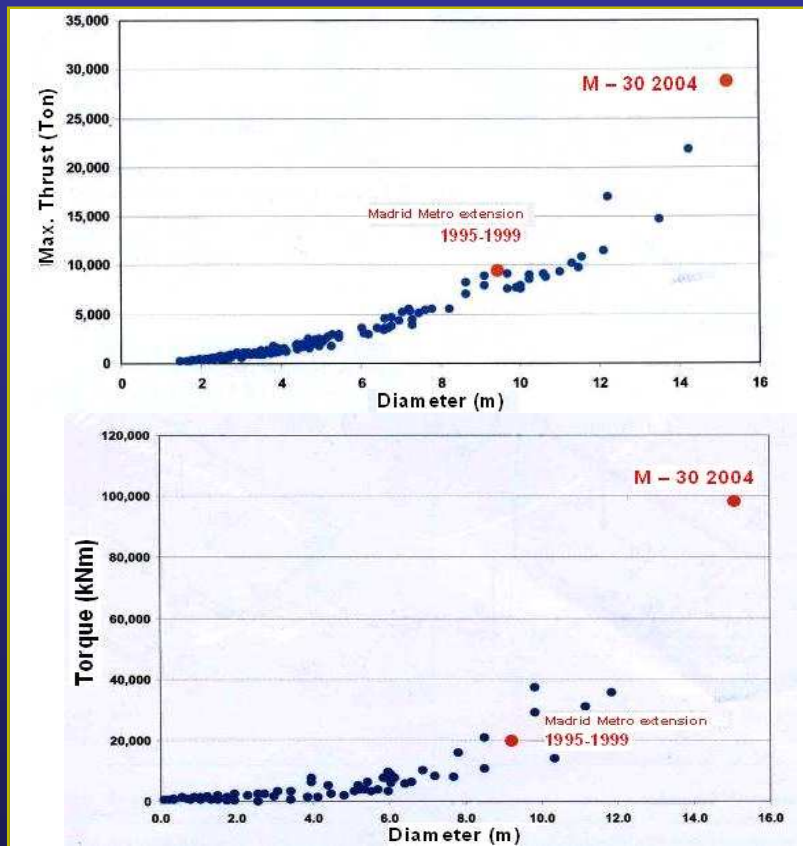
- 6 recintos sellados contra la presión de agua. Accesibles por esclusa desde el interior del “mixshield”. Sus mamparos coinciden con los bordes de los radios.
- Desde cada recinto es accesible el frente a presión atmosférica.
- Sirven también de almacenes de herramientas y llevan equipos para su manejo.

• SISTEMA DE DETECCIÓN DE DESGASTES.

- Sensor electrónico integrado en el soporte de las herramientas.
- Se instrumentaron 2 cangilones y 8 herramientas de suelos.
- Permite planificar mejor las reposiciones, reduciendo el número de los costosos procesos de acceso a los recintos estancos.

CONCLUSIONES

19



- ◆ Hay una **tendencia general** (2000-2008) a proyectar **túneles de diámetros cada vez mayores**. (Gráficos de los parámetros crecientes).
- ◆ El **diseño de tuneladoras de gran diámetro no está limitada a tipos especiales de terreno**.
- ◆ Las tuneladoras de gran $\varnothing$ **pueden excavar tanto en roca dura, como en suelos o en condiciones mixtas**.
- ◆ De las experiencias actuales se deducen algunas **recomendaciones a seguir y variaciones del diseño**.
- ◆ Con ello, en breve pueden perfeccionarse los logros existentes que ya han rebasado los 15 m de **diámetro** y operan en condiciones de seguridad, con costes y plazos mejores que usando métodos convencionales.