

Experiencia en Metro de Madrid



José Antonio Gallego Iglesias
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos



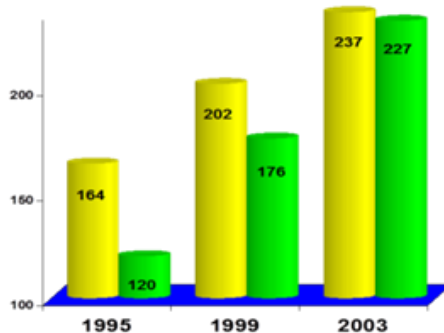
V ENCUENTRO
INTERNACIONAL DE METROS
"Implementación de Metros Subterráneos"

Metro de Madrid hoy



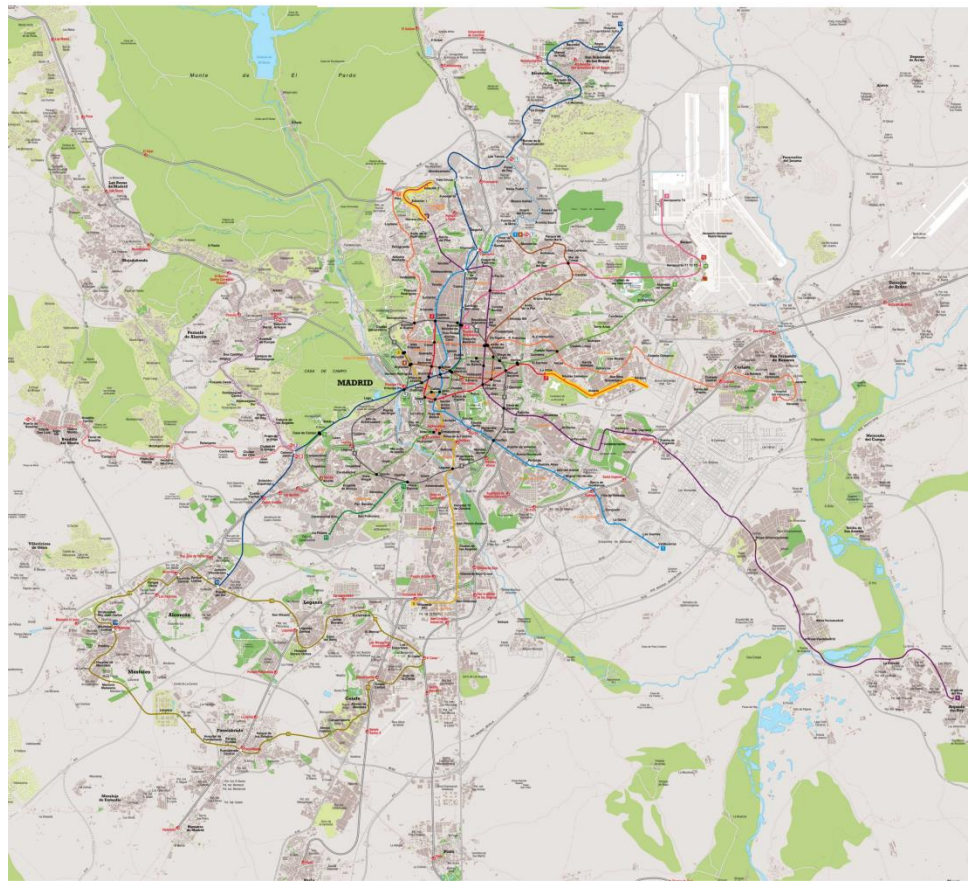
LINEAS DE METRO

- 1** Pinar de Chamartín - Valdecarros
- 2** Las Rosas - Cuatro Caminos
- 3** Villaverde Alto - Moncloa
- 4** Argüelles - Pinar de Chamartín
- 5** Alameda de Osuna - Casa de Campo
- 6** Circular
- 7** Henares - Pitis
- 8** Nuevos Ministerios - Aeropuerto T4
- 9** Mirasierra - Arganda del Rey
- 10** Hospital del Norte - Puerta del Sur
- 11** Plaza Elíptica - La Peseta
- 12** MetroSur
- R** R Ópera - Príncipe Pío



LINEAS DE METRO LIGERO

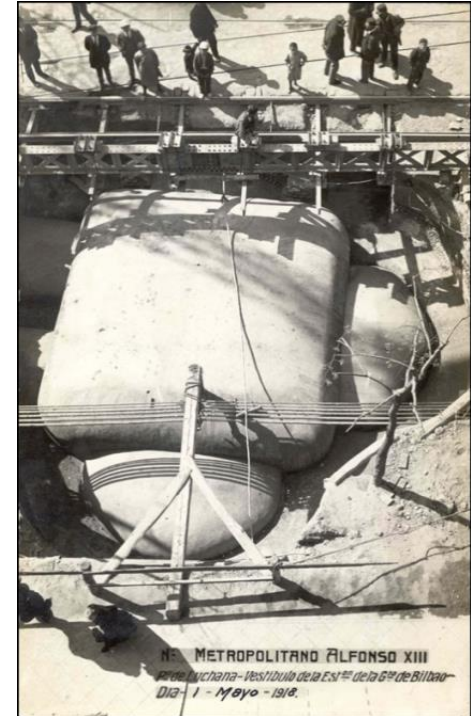
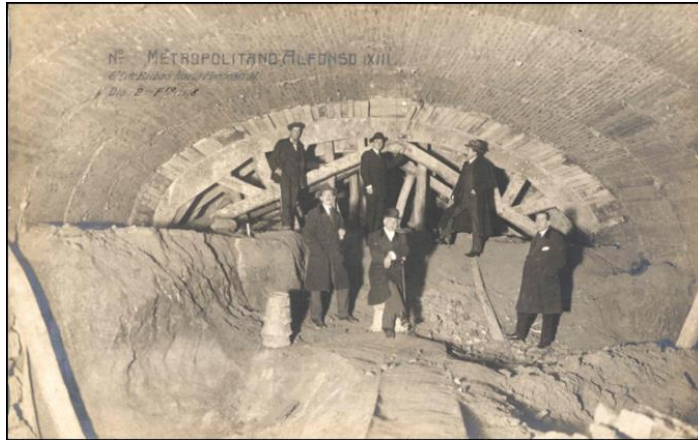
- 1** Pinar de Chamartín - Las Tablas
 - 2** Colonia Jardín - Estación de Aravaca
 - 3** Colonia Jardín - Puerta de Boadilla
- TranParla





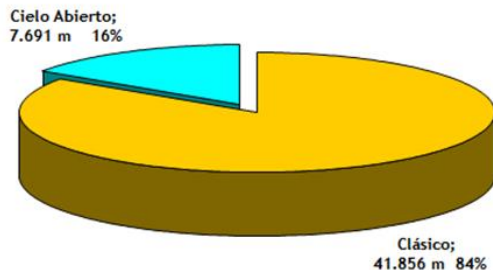
- **AMPLIACIONES DE LA RED**
- **METODOS DE CONSTRUCCIÓN**
- **CONCLUSIONES**

La explotación de Metro de Madrid comenzó en 1919 con la LÍNEA 1: Cuatro Caminos-Puerta del Sol (3.5 Km, 21 trenes y 8 estaciones)

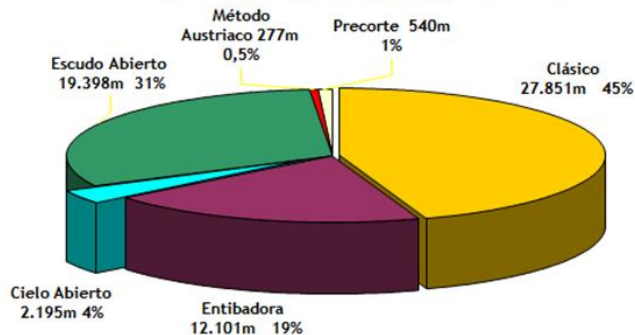


El inicio: 1919 - 1995

Métodos Constructivos 1919-1970

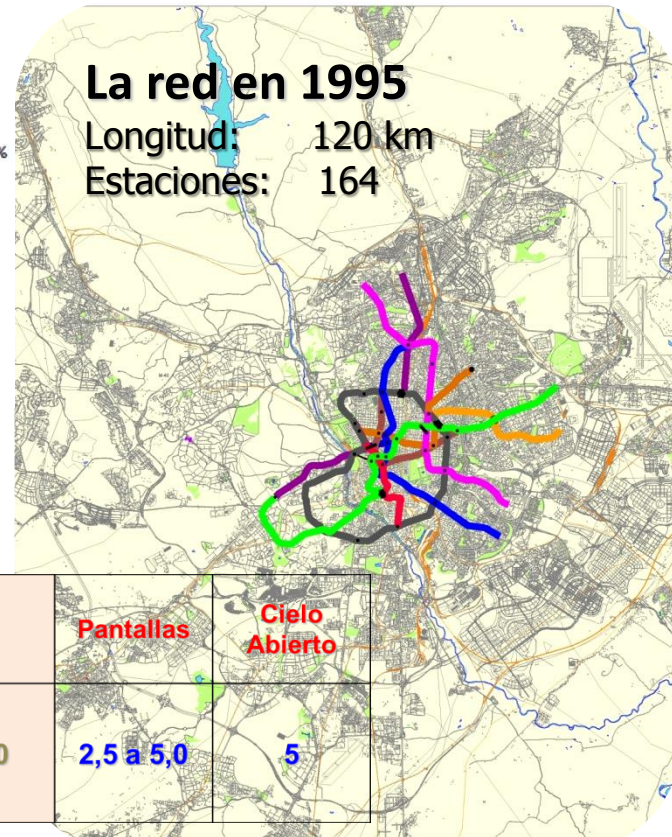


Métodos Constructivos 1970 - 1995



La red en 1995

Longitud: 120 km
Estaciones: 164



AVANCES DIARIOS

Método	Clásico	EPB	Pantallas	Cielo Abierto
Avances Diarios (metros)	2,5 por frente	10 a 20	2,5 a 5,0	5



Alargamiento de Andenes de Línea 1 (1963)

Las Bases: 1995 - 1999

- PRIORIDAD: MÁXIMA **SEGURIDAD** EN TODOS LOS TRABAJOS.
- MÉTODOS DE SECCIÓN ABIERTA (NATM, Precorte, SCL, ...) → **RECHAZADOS**
- SECCIONES DE EXCAVACIÓN **NO MAYORES DE 5 m²**

METODO

ELEMENTO

LONGITUD

1995-1999

TUNELADORA EPB

(Earth Pressure Balance Shield)

TUNEL

22.500 m

PANTALLAS

(Cut and Cover)

TUNEL Y ESTACIONES

60.32%

7.900 m

21.18%

METODO TRADICIONAL DE MADRID

(Excavación manual por fases)

TUNEL y 1 ESTACION

(Guzmán el Bueno Amp. 95-99)

5.700 m

15.28%

FALSO TUNEL

TUNEL

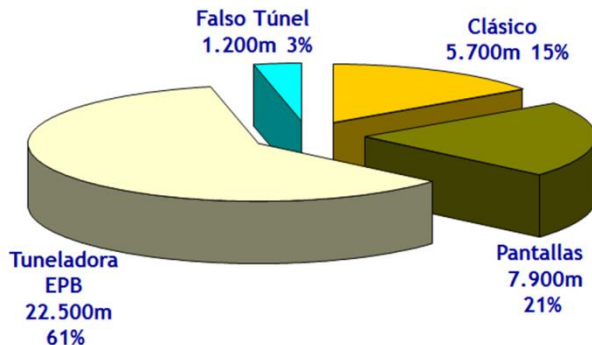
1.200

3.22%

SUPERFICIE

18.300

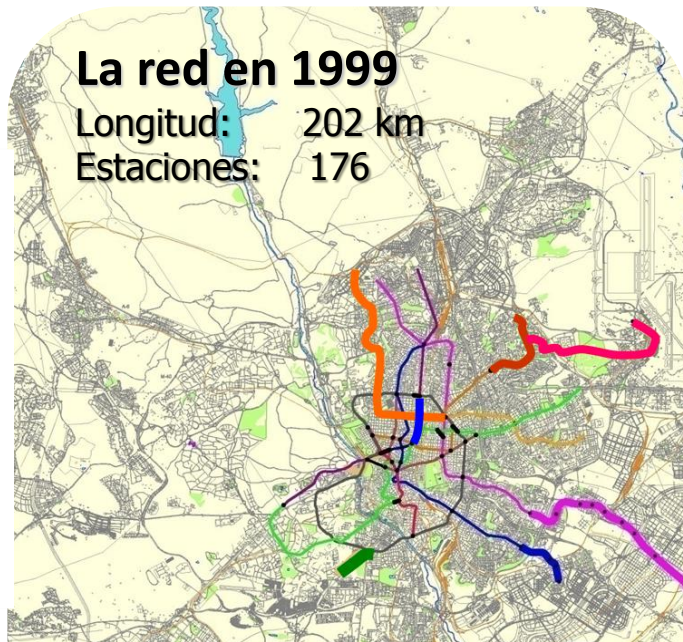
55.600 m



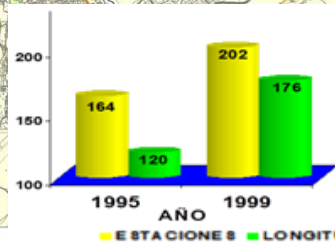
La red en 1999

Longitud: 202 km

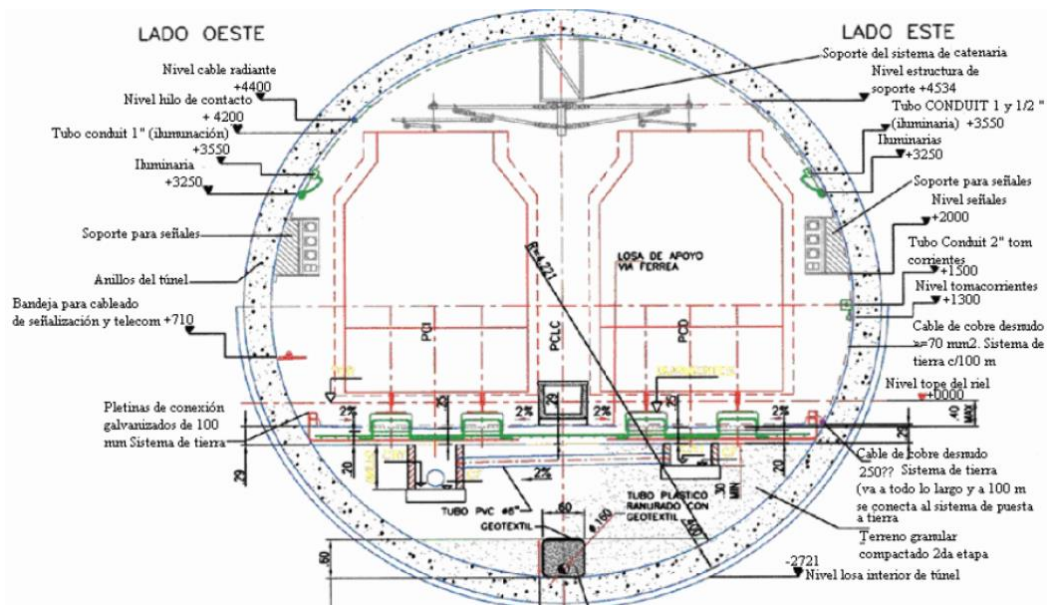
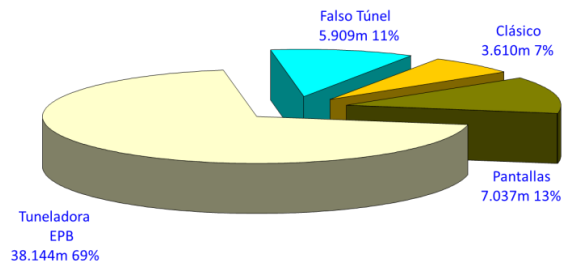
Estaciones: 176



Estaciones: 38
Km: 56



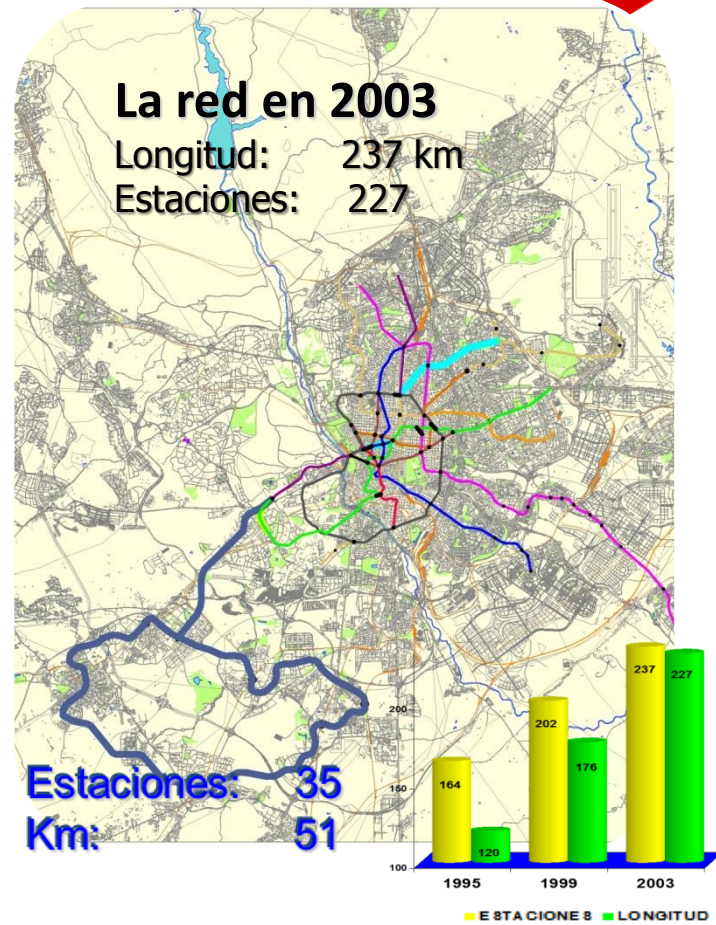
Se confirma: 1999 - 2003



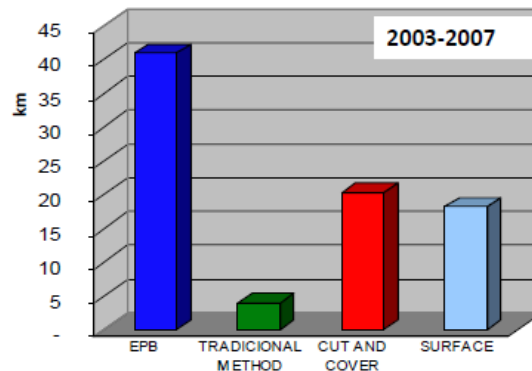
La red en 2003

Longitud: 237 km

Estaciones: 227



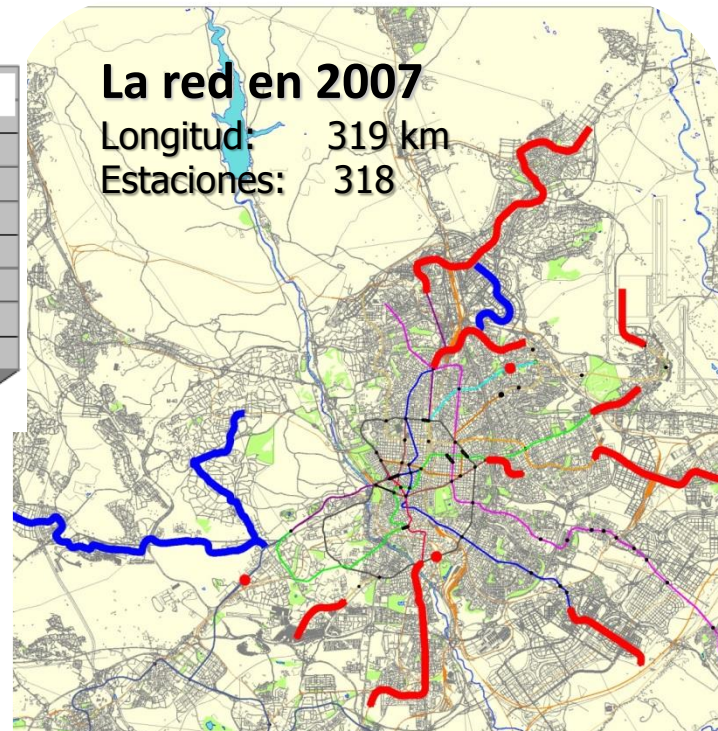
Se reafirma: 2003 - 2007



La red en 2007

Longitud: 319 km

Estaciones: 318

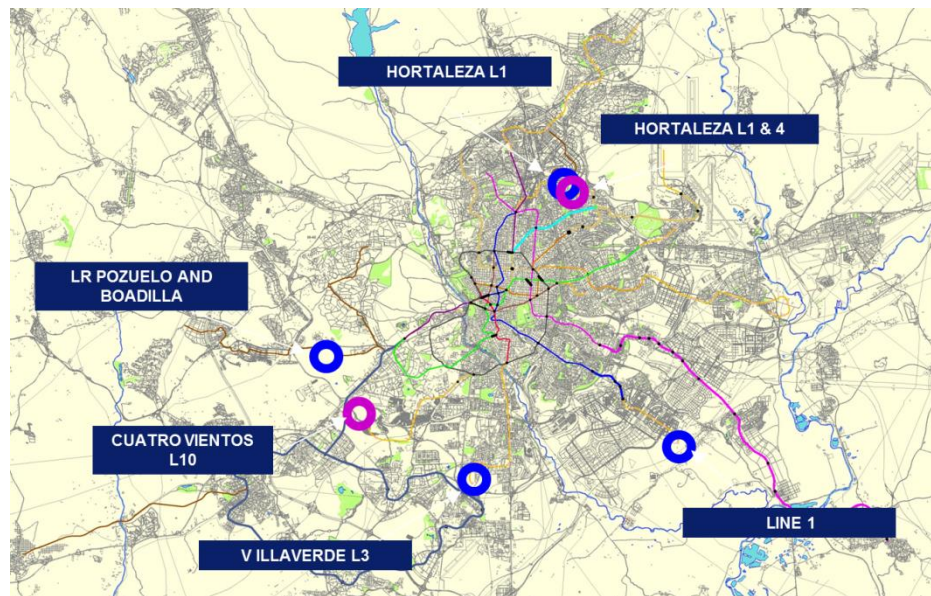
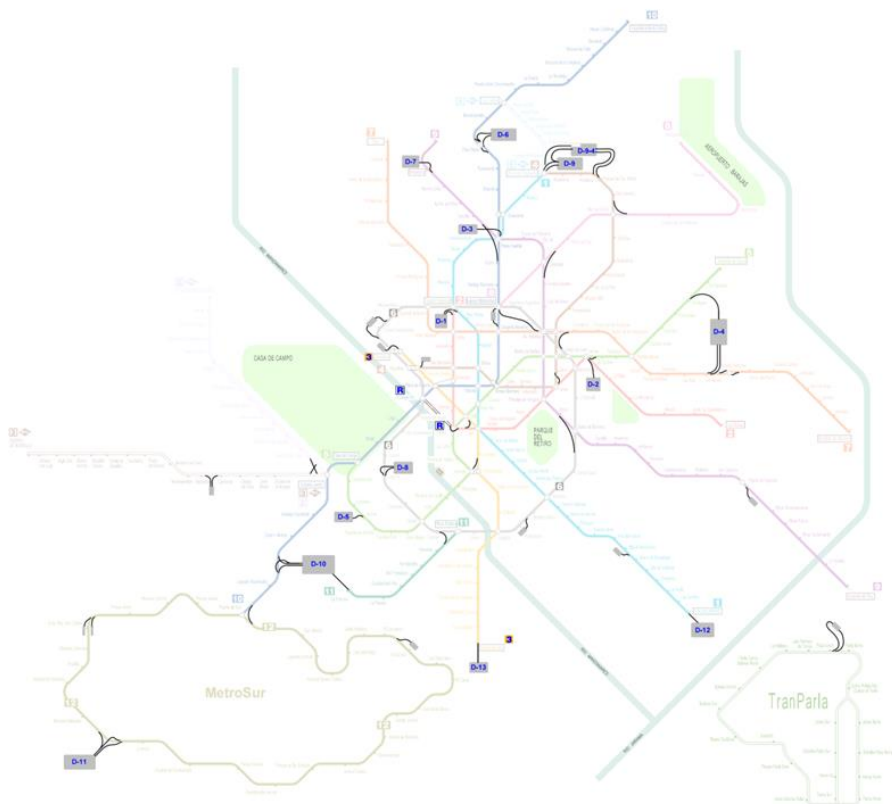


	Estaciones	Kilómetros
METRO	45	49,7
LIGHT RAIL	46	28,9
TOTAL	91	78,6



V ENCUENTRO
INTERNACIONAL DE METROS
"Implementación de Metros Subterráneos"

2003-2007 EXTENSIÓN DEPÓSITOS DE LA RED



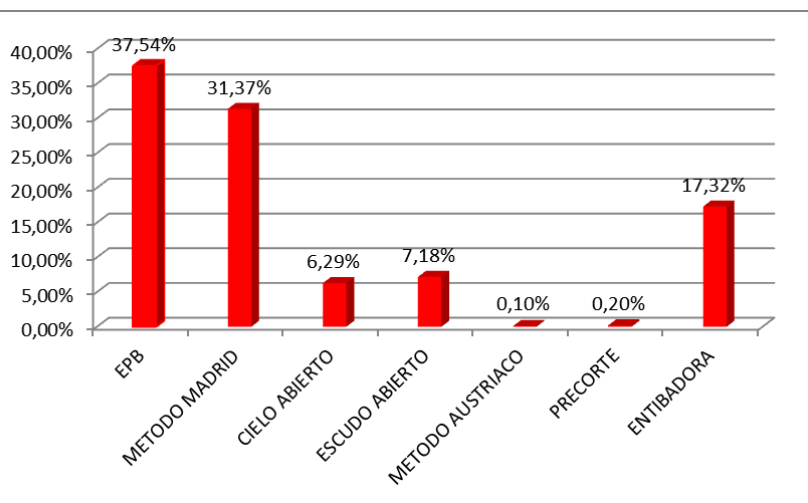
**4 NUEVOS
DEPOSITOS**
**2 MEJORAS
EN DEPOSITOS
EXISTENTES**

**IDEA: LA RED DEBE ESTAR
INTERCONEXIONADA**

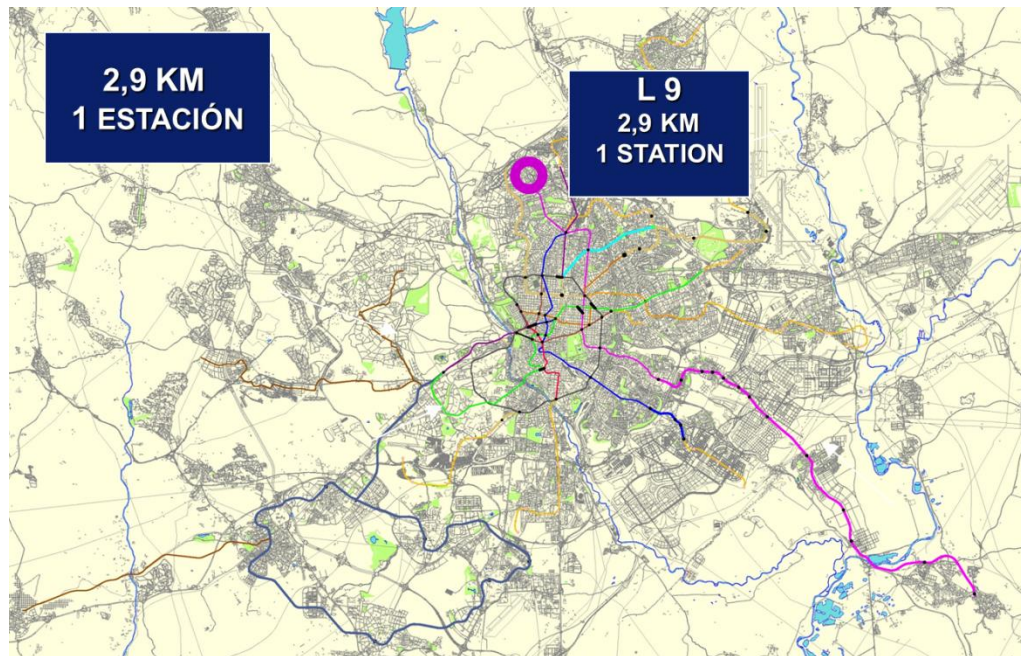
La red en 2015

Longitud: 322 km

Estaciones: 319



**DISTRIBUCIÓN HISTÓRICA DE MÉTODOS CONSTRUCTIVOS
EN EL METRO DE MADRID**



- AMPLIACIONES DE LA RED
- METODOS DE CONSTRUCCIÓN
- CONCLUSIONES



METODO ENTRE PANTALLAS



- En zona urbana donde el trazado es superficial y no hay edificaciones próximas
- El zonas interurbanas donde no es posible ejecutar el túnel en trinchera
- Utilizadas diversas variantes constructivas: losa superior plana, bóveda ejecutada sobre el terreno, etc.
- Con losa plana, el método es competitivo frente a TBM o Método Madrid para recubrimientos menores a 4 m; con bóveda in situ, recubrimientos menores a 9 m



METODO TRADICIONAL DE MADRID



- **Mínima inversión Inicial en instalaciones**
- **Posibilidad de avance en varios frentes**
- **Adaptabilidad a casi cualquier tipo de terreno**
- **Gran flexibilidad de actuación frente a imprevistos**
- **Buen control de asientos**
- **Precio competitivo**

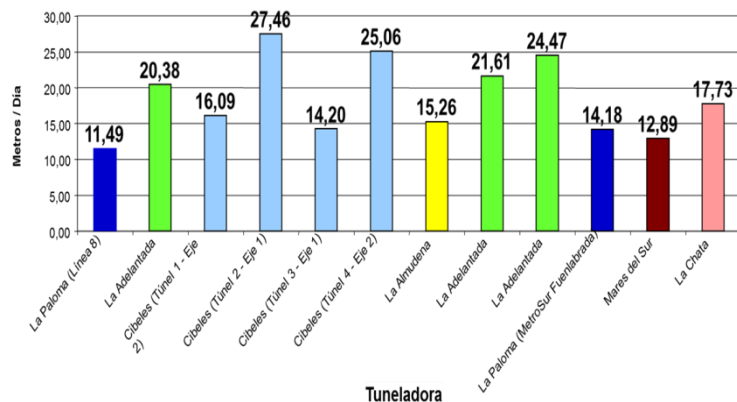
METODO CIELO ABIERTO



METODO EPB (TUNELADORA)



Promedio (Metros/Día) Tuneladoras Ampliación
1999-2003



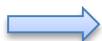
Parámetros Fundamentales en las Tuneladoras EPM



- 1.- Diámetro exterior de la excavación
- 2.- Par motor necesario en la cabeza de corte
- 3.- Empuje de la tuneladora contra el terreno
- 4.- Longitud del escudo para que pueda negociar las curvas del túnel
- 5.- Rodamiento principal
- 6.- Cola del escudo. Inyección de mortero por cola y cepillos de cierre
- 7.- Cambio de picas, cortadores y dientes
- 8.- Modos abiertos (cinta) y cerrado (epb, tornillo)
- 9.- Tiempos de excavación y de colocación de anillos

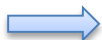
Diámetro exterior de la excavación

Sobreancho en curvas y
gálibo dinámico



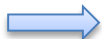
DIAMETRO DE LA SECCIÓN

Sección circular



OPTIMA PARA TUNELES
HIDRAULICOS

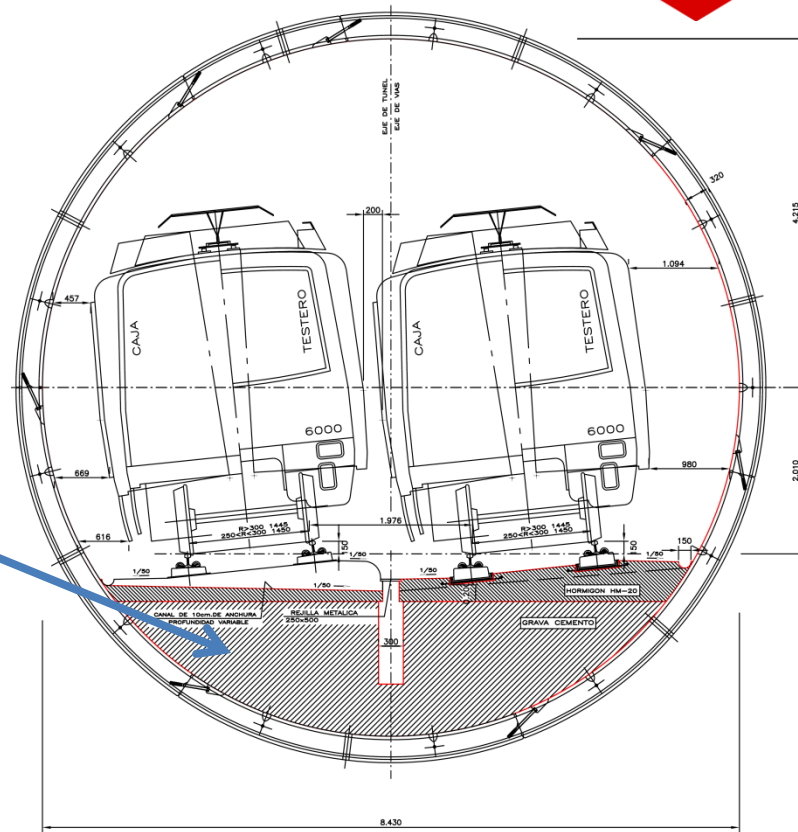
En Infraestructuras
para el transporte



SE PIERDE CASI 25%
SECCIÓN EXCAVADA



Galerías de cables
Drenaje



Par motor necesario en la cabeza de corte

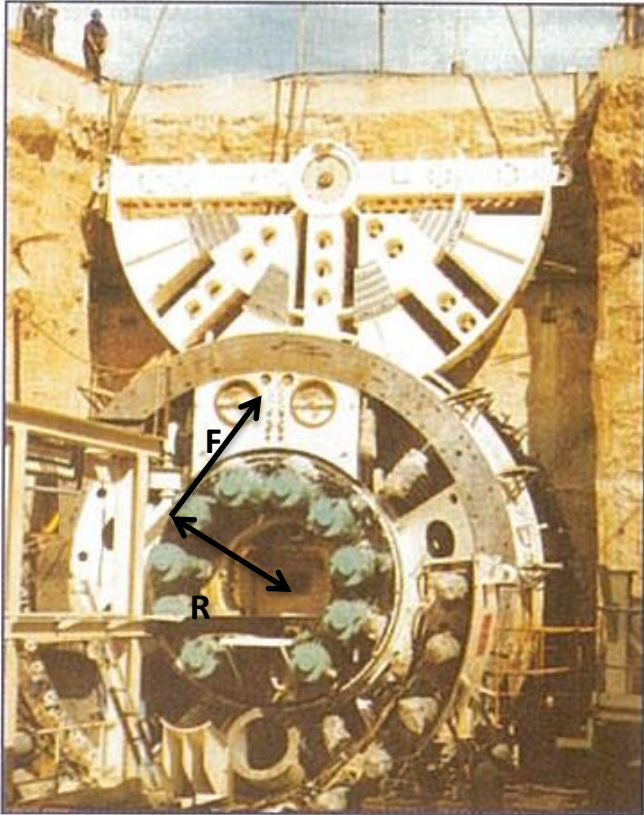


<i>Par TEORICO necesario Diametro = 9,40 m</i>	m.KN	
Corte del terreno con las picas	146,50	1,14%
Rozamiento entre terreno y cabeza	12.467,10	97,36%
Esfuerzos radiales en el rodamiento	2,90	0,02%
Esfuerzos longitudinales en el rodamiento	19,40	0,15%
Rozamientos de los sellos	27,20	0,21%
Mezclado del suelo en la cámara	141,80	1,11%
<i>Par total necesario</i>	12.804,90	100,00%

El par motor en m.KN es proporcional al cubo del diámetro de corte de la cabeza en metros.

$$M \text{ (m.KN)} = 25 * D \text{ (m)}^3$$

$$M \text{ (m.KN)} = 25 * D \text{ (m)}^3 = 25 * 9,40^3 = 20.764 \text{ m.KN}$$



Par motor necesario en la cabeza de corte

DECISIÓN:

Par Motor = 19.600 mKN = 2.000 mTon

Velocidad de giro del Par = 1 rpm ($2\pi/60$) (1/seg)

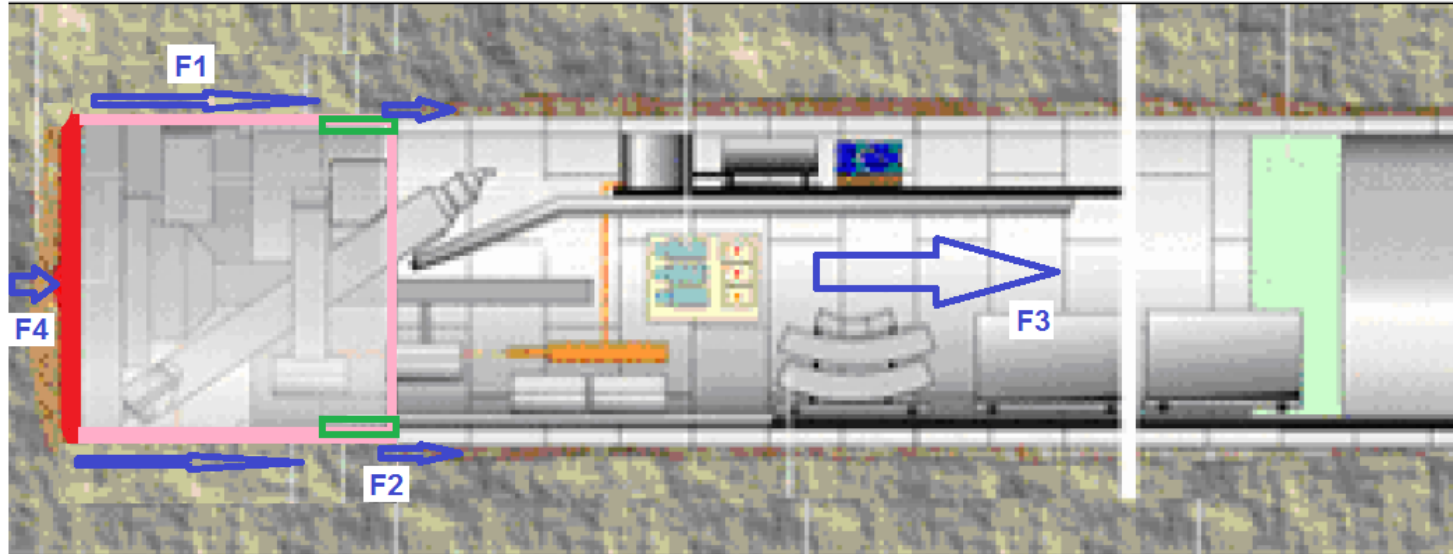
Potencia Necesaria = $19.600 * (2\pi/60) = 2053$ Kw

10 motores eléctricos con 200 Kw cada uno, con 5 variadores de frecuencia que permiten variar su velocidad de 750 a 1.850 rpm.

OBSERVACIÓN:

Una misma máquina que desarrolle un par de 2.000 mTon, con solo aumentar el radio del rodamiento principal un 12% (del orden de 25 cm) se obtiene un par de 2.240 mTon

Empuje de la tuneladora contra el terreno



F1 = rozamiento entre el suelo y el escudo
F2 = rozamiento entre el anillo y el escudo
F3 = resistencia debida al arrastre del backup
F4 = resistencia debida a la presión del frente

ESTIMACIÓN EMPÍRICA:

$F = F1 + F2 + F3 + F4 = 100 \text{ Ton por m}^2 \text{ de Superficie}$

$F = 100 * (\pi * 9,4^2) / 4 = 6.940 \text{ Ton}$

Empuje de la tuneladora contra el terreno

A VECES PODRIA SER NECESARIO:

1. **Eliminar las deformaciones horizontales** del terreno en el frente del túnel
2. Sostener el empuje **efectivo** horizontal del suelo (No solo activo, en reposo, incluso el pasivo)
3. Sostener la presión intersticial del **agua** en el terreno
4. A veces es conveniente poder empujar al terreno en cabeza para anular las deformaciones verticales en el eje del túnel, delante de la máquina, incluso **crear levantamientos**

F = 196 Ton por m2 de Superficie

Tuneladora de Diámetro 9,40 metros.

EMPUJE HORIZONTAL NECESARIO

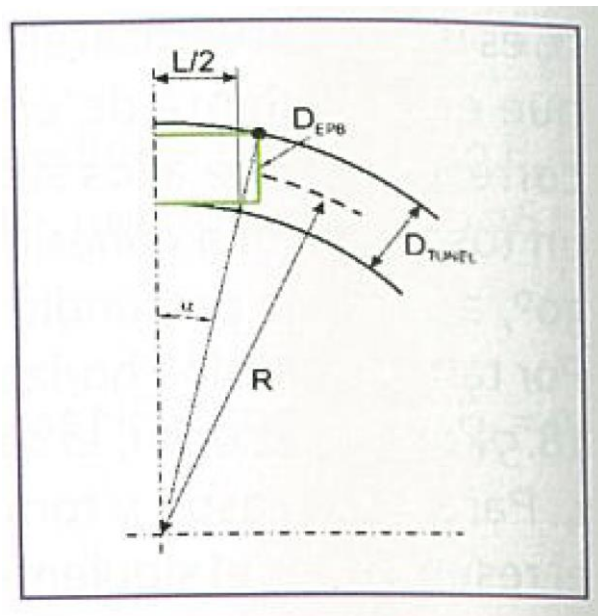
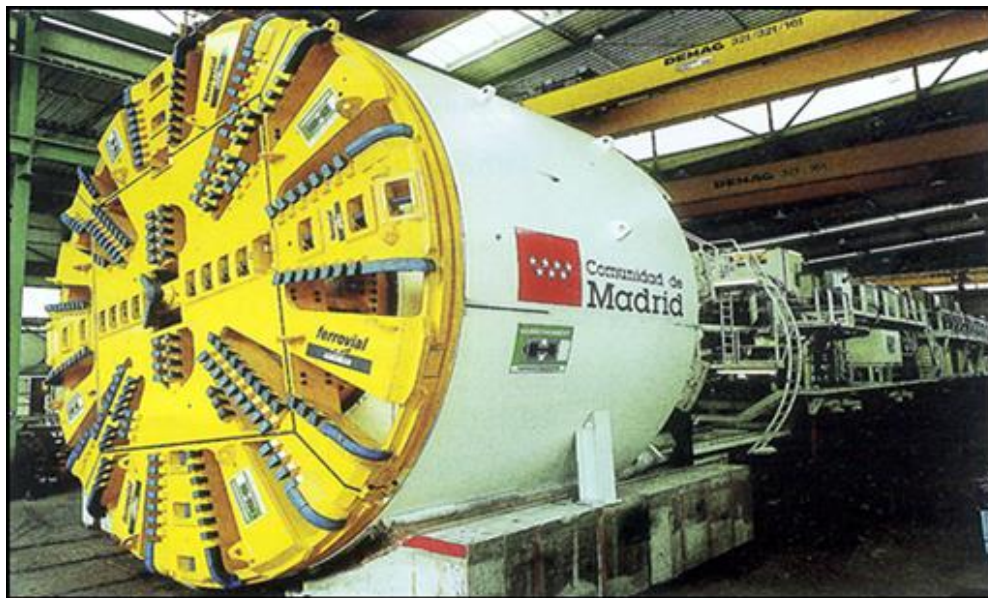
Altura de tierras sobre le eje	30,0	m
Densidad sumergida	1,2	t/m3
Presión efectiva vertical	36,0	t/m2
K, Coeficiente empuje pasivo	3,0	
Presión efectiva horizontal	108,0	t/m2
Presión intersticial	30,0	t/m2
Presión horizontal total	138,0	t/m2
Diámetro Escudo	9,5	m
Area de corte	70,9	m2
Fuerza Horizontal	9.782,0	t

Cohesión	10,0	t/m2
Adhesión	6,0	t/m2
Perímetro Escudo	29,8	m
Longitud Escudo	10,0	m
Superficie total	298,5	m2
Fuerza Rozamiento	1.791	t/m2

Fuerza Total	11.572	t
Empuje necesario con RESERVA 20 %	13.887	t

Número de Gatos	26	
Empuje necesario por gato	534	t

Longitud del escudo para que pueda negociar las curvas del túnel



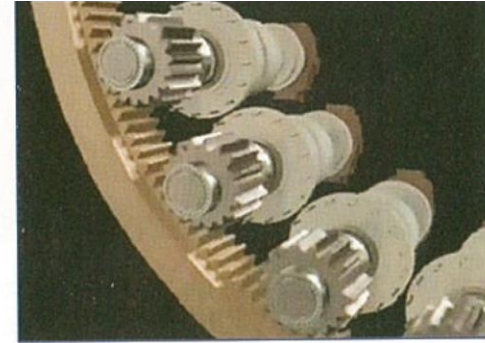
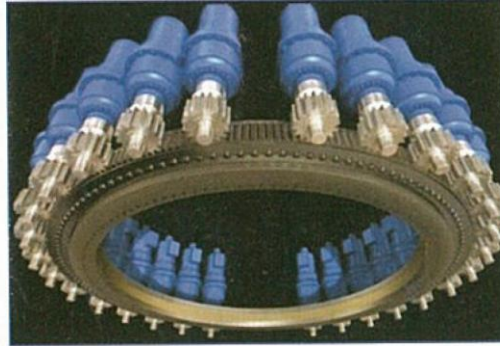
- $D_{epb} < D_{tunnel}$. Para avanzar por el túnel excavado
- Forma escudo: Trococónica. Dinicial = Dfinal + 10 cm
- Ejemplo real: sobrecorte de la cabeza del escudo en 5 cm
 - $D_{tunnel} = 9,40$ m
 - $D_{epb} = D_{tunnel} - 2 * 0,05 = 9,30$ m
 - R = rango del trazado (200 a 1000 m)

$$\left(R + \frac{D_{tunnel}}{2}\right) \sin \alpha = \frac{L}{2}$$

$$\left(R + \frac{D_{tunnel}}{2}\right) \cos \alpha = R - \frac{D_{tunnel}}{2} + D_{epb}$$

Sobrecorte 5 cm radio	
Radio túnel planta, m	L máxima escudo, m
1000	28.35
500	20.09
300	15.61
250	14.27
200	12.8

Rodamiento principal



Se recomienda poner el máximo cuidado en el dimensionamiento holgado y generoso de los elementos clave:

- Motores
- Reductores
- Bombas
- Variadores de frecuencia (velocidad de giro de los motores)

Reparación del rodamiento principal

- Rotura de 20 dientes de la corona del rodamiento, y de los piñones del accionamiento
- Trazado en curva ($R= 300$ m) con desviaciones en fase de corrección
- Tramo de túnel ejecutado : 975 m
- Distancia hasta la siguiente estación : 390 m

- Solución provisional para llegar hasta la siguiente estación y sustituir el rodamiento por uno nuevo.

Total tiempo parada : 40 días

- Excavación de los 390 m hasta la Estación con los parámetros limitados.

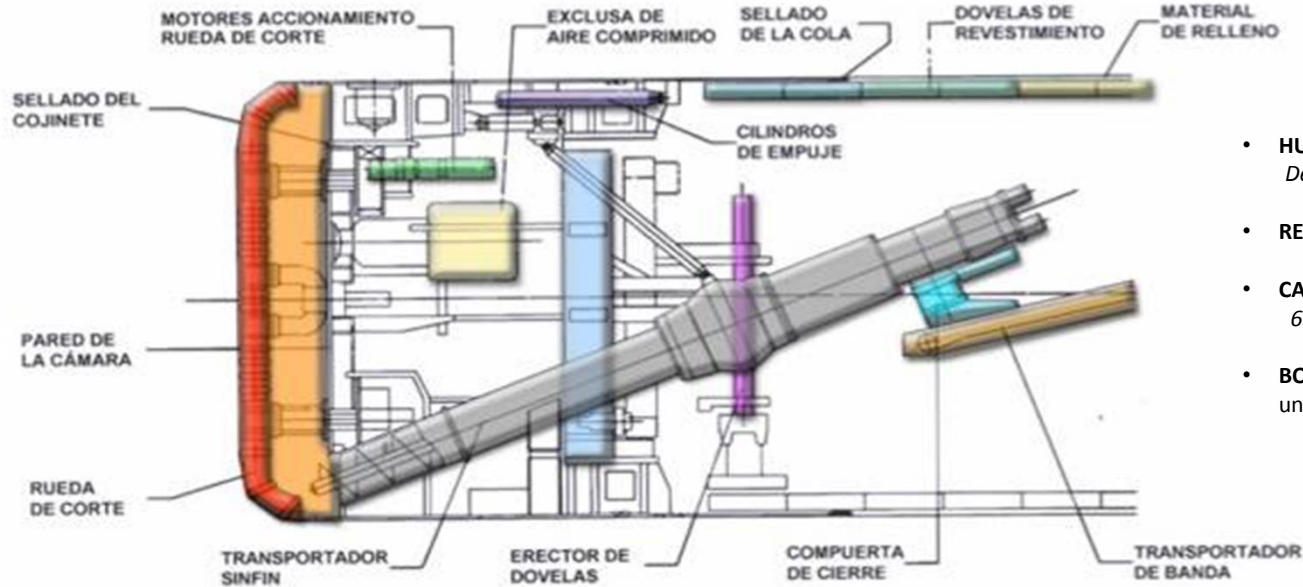
Rendimientos 8m/día

- Estación5. Sustitución del rodamiento principal por uno nuevo.

Total tiempo parada: 31 días



Cola del escudo. Inyección de mortero por cola y cepillos de cierre



- **HUECO CREADO** (aprox 65 mm) por:
 $D_{ext_dovela} < D_{ext_cola_escudo}$
- **RELLENO:** mortero de cemento
- **CAUDAL MINIMO BOMBEO:**
 $65\text{ mm} * 1,86\text{ m}^2 * 8\text{ cm/min} = 8,95\text{ m}^3/\text{h}$
- **BOMBA ADOPTADA:** 2 ud. de 15 m³/h a 60 bars cada una

Tiempos de excavación y colocación de anillo

Valores típicos del fabricante

Velocidad de gatos a plena carga	0 - 8 cm/min
Avance en vacío	198 cm/min
Recogida de cilindros	275 cm/min

Tiempo excavación

Ancho anillo	1,50 m
Velocidad máxima de los gatos	8 cm/min
Tiempo excavación	20 min

(aprox 150 cm/8 cm/min)

Tiempo de colocación del anillo

Dato estadístico obtenido	20 min
---------------------------	--------

Avance máximo por mes

Horas de 50 min (bocadillo)

días de 20 h (4 h. reservadas a mantenimiento)

$$(50/60) * (20/24) * 24 * 60 / 40 = 25 \text{ anillos}$$

Longitud del anillo 1,50 m

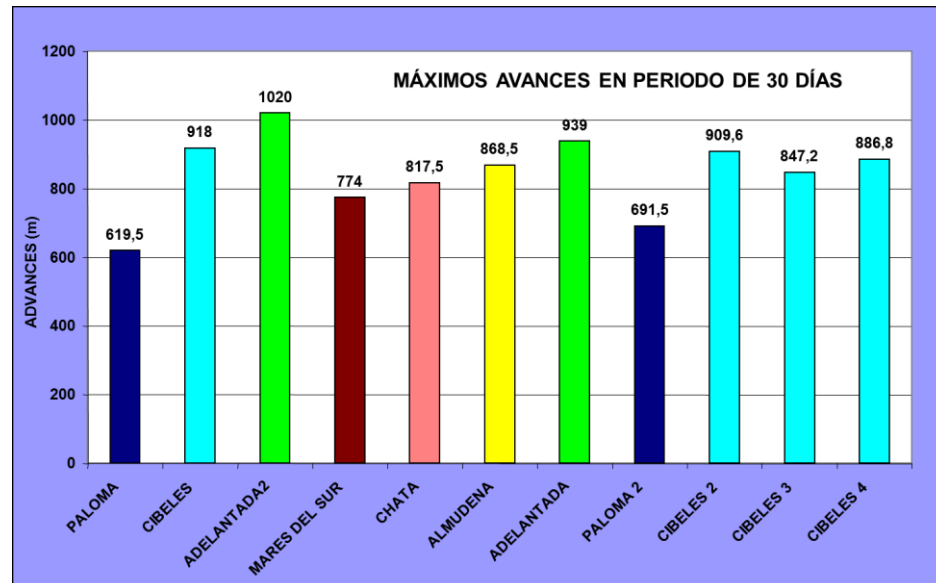
Avance máximo por día (25 * 1,50) 37,50 m

Nº días a la semana 6

Nº semanas al mes 4

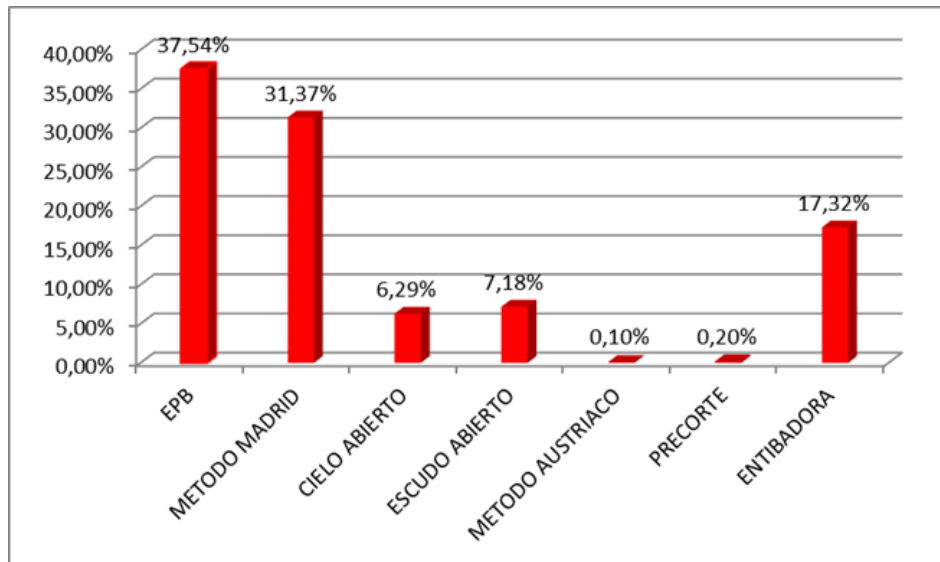
Avance por mes 900 metros

(colocados en un día)



LA NECESIDAD DE AUMENTAR AL MÁXIMO LA POTENCIA Y EL EMPUJE DE LA MÁQUINA SOLAMENTE PARACE EVIDENTE CUANDO ESTA PUDIERA QUEDAR ATASCADA VARIOS DÍAS EN EL TÚNEL.

Madrid vs Lima



TUNELADORA	PK inicial	PK final	Longitud (m)
Línea 2	0 + 120	5+461,797	5.341,78
Línea 2	6+087,401	10+342,054	4.254,65
Línea 2	10+964,284	17+421,152	6.456,87
Línea 4	0+125,355	7+621,000	7.620,87
LONGITUD TUNELADORA			23.674,17

69,44%

MÉTODO CUT&COVER	PK inicial	PK final	Longitud (m)
Línea 2	5+456.80	5+931.00	474,20
Línea 2	10+493.25	10+969.28	476,03
LONGITUD PANTALLAS			950,23

2,79%

MÉTODO NATM	PK inicial	PK final	Longitud (m)
Línea 2	17+575,382	19+000,000	1.424,62
Línea 2	23+900,000	27+045,934	3.145,93
Línea 2	19+000,000	23+900,000	4.900,00
LONGITUD MINA			9.470,55

27,78%

LONGITUD TOTAL	34.094,95
-----------------------	------------------

- AMPLIACIONES DE LA RED
- METODOS DE CONSTRUCCIÓN
- CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

- EL FRENTE ABIERTO EN TUNEL DEBE SER TAN PEQUEÑO COMO SEA POSIBLE
- LOS COLAPSOS SE PRODUCEN POR NO USAR MÉTODOS CONSTRUCTIVOS APROPIADOS
- LOS RETRASOS Y SOBRECOSTES OCURREN POR ACEPTAR PROYECTOS DIFÍCILES Y COMPLEJOS
- POR QUE CUANDO SE TRABAJA BAJO UNA CIUDAD, NO ES NECESARIO ASUMIR MAS RIESGOS DE LOS NECESARIOS.....

**HAY QUE CONVENCER A LAS
AUTORIDADES DE QUE SE DEBEN
APLICAR SIEMPRE SOLUCIONES SIMPLES
Y SEGURAS CUANDO SE REALIZAN
GRANDES INFRAESTRUCTURAS
SUBTERRÁNEAS**



V ENCUESTRO
INTERNACIONAL DE METROS
“Implementación de Metros Subterráneos”



GRACIAS POR SU ATENCIÓN