

# Experiencia en Metro de Madrid



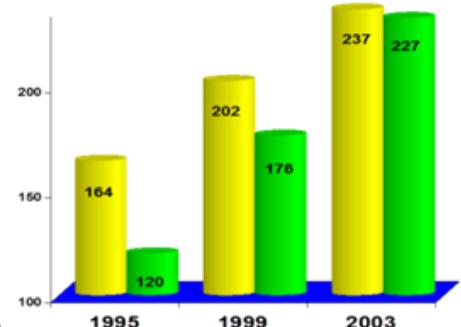
José Antonio Gallego Iglesias  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

# Metro de Madrid hoy



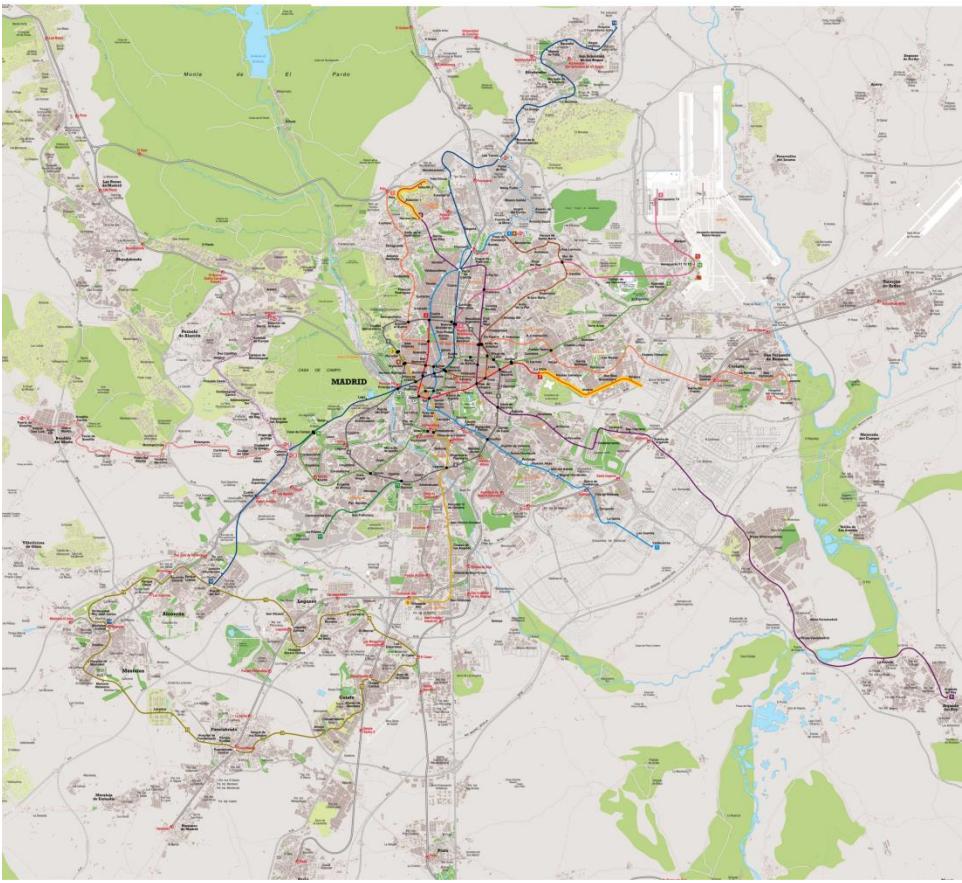
## LINEAS DE METRO

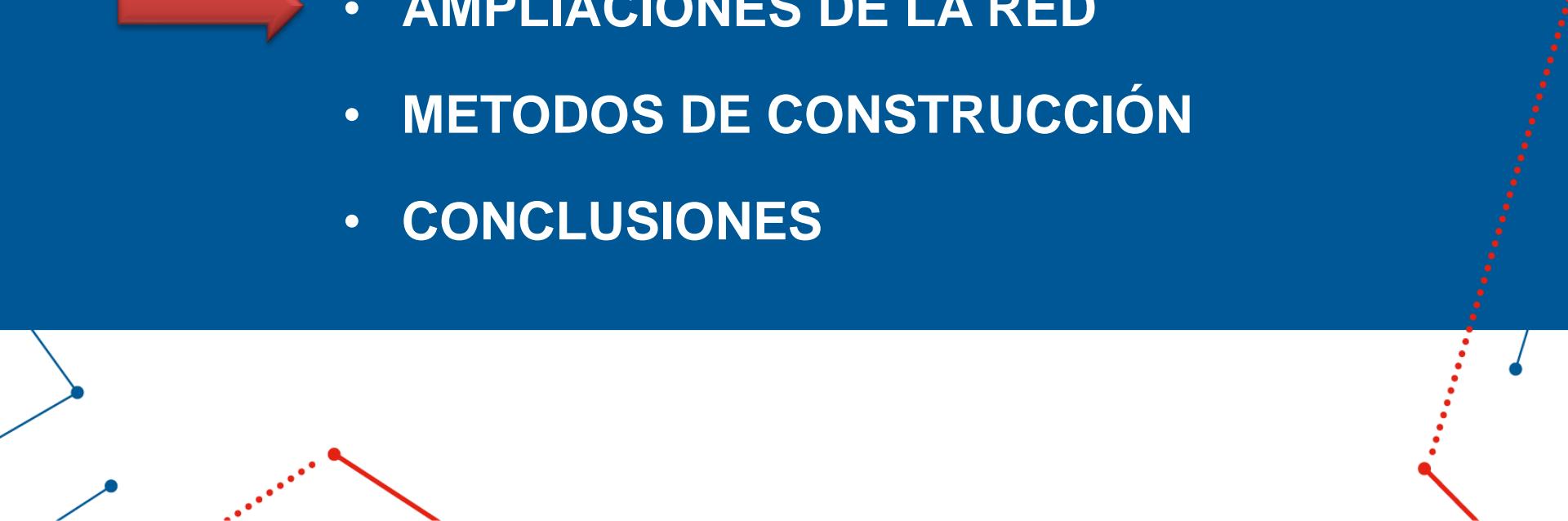
- 1 Pinar de Chamartín - Valdecarros
- 2 Las Rosas - Cuatro Caminos
- 3 Villaverde Alto - Moncloa
- 4 Argüelles - Pinar de Chamartín
- 5 Alameda de Osuna - Casa de Campo
- 6 Circular
- 7 Henares - Ptitis
- 8 Nuevos Ministerios - Aeropuerto T4
- 9 Mirasierra - Arganda del Rey
- 10 Hospital del Norte -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



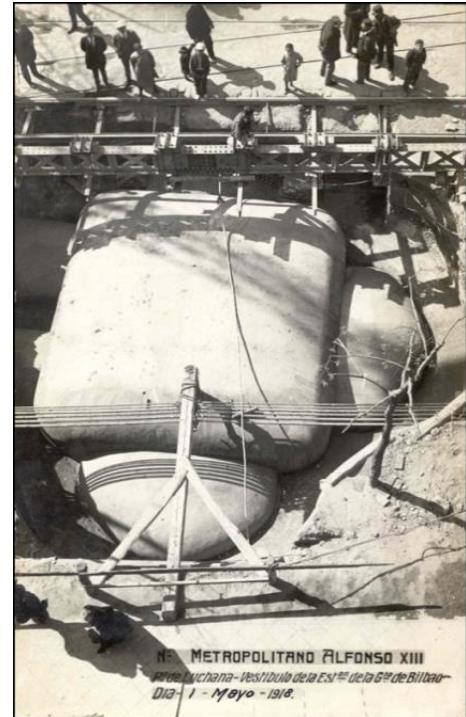
## LINEAS DE METRO LIGERO

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



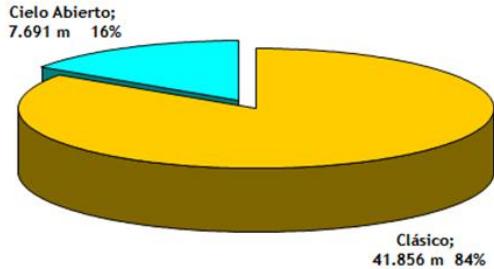
- 
- AMPLIACIONES DE LA RED
  - METODOS DE CONSTRUCCIÓN
  - CONCLUSIONES
- 

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)

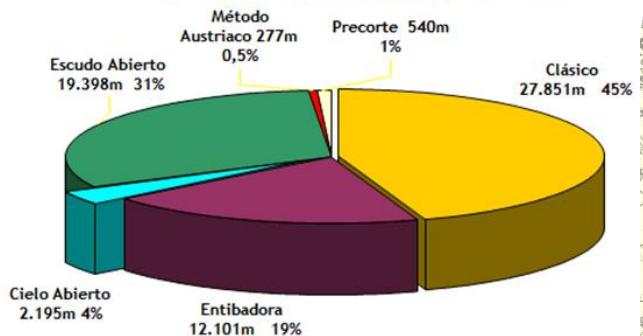


# El inicio: 1919 - 1995

Métodos Constructivos 1919-1970

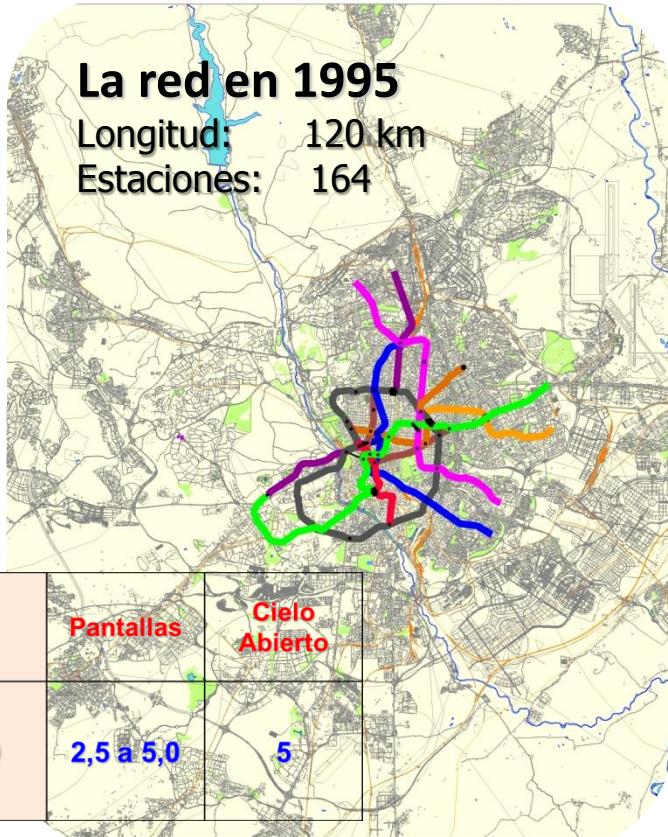


Métodos Constructivos 1970 - 1995



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



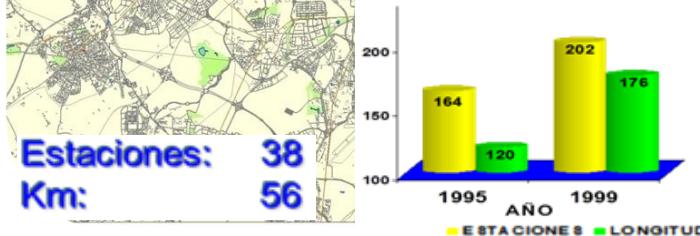
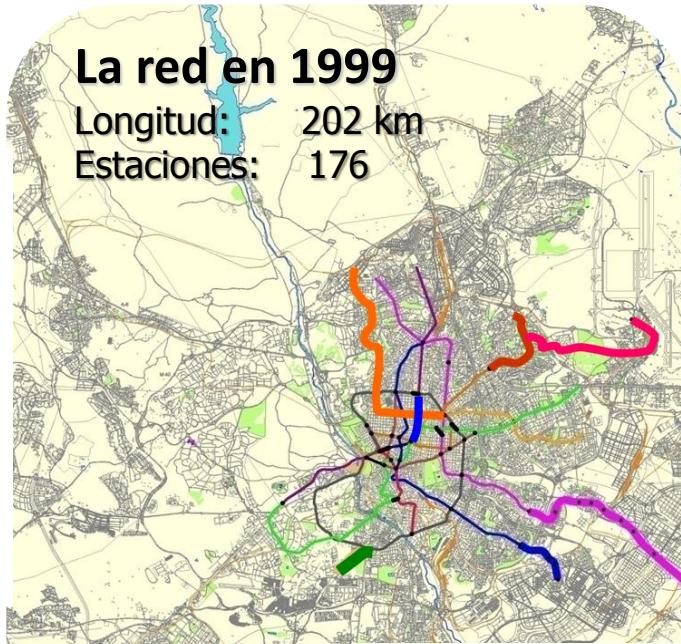
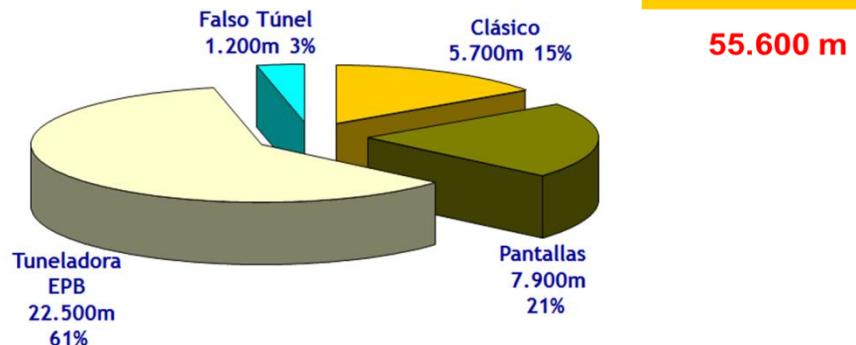
Alargamiento de Andenes de Línea 1 (1963)

# Las Bases: 1995 - 1999

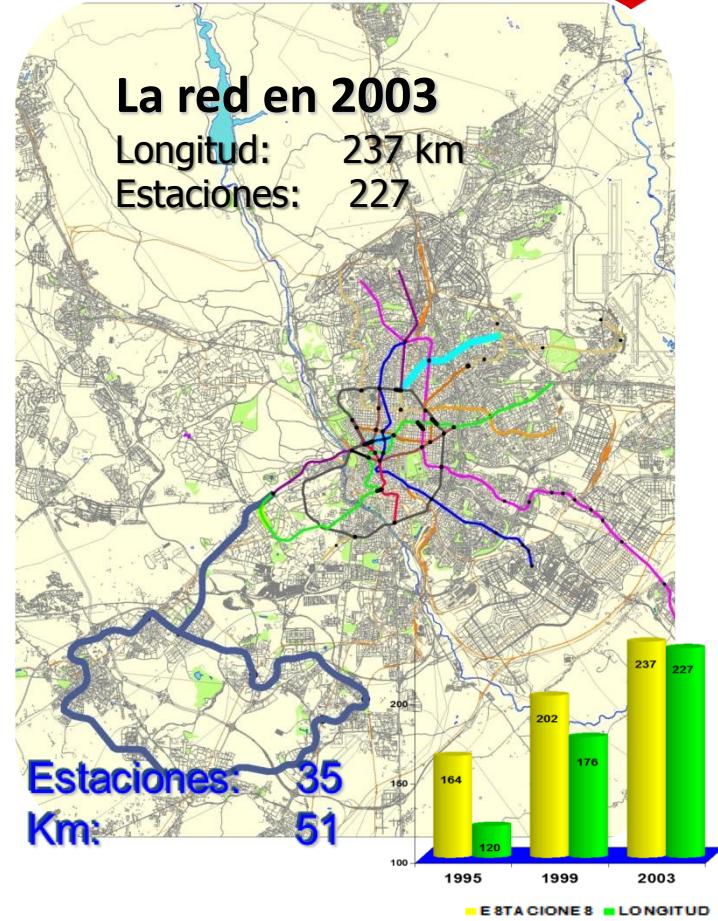
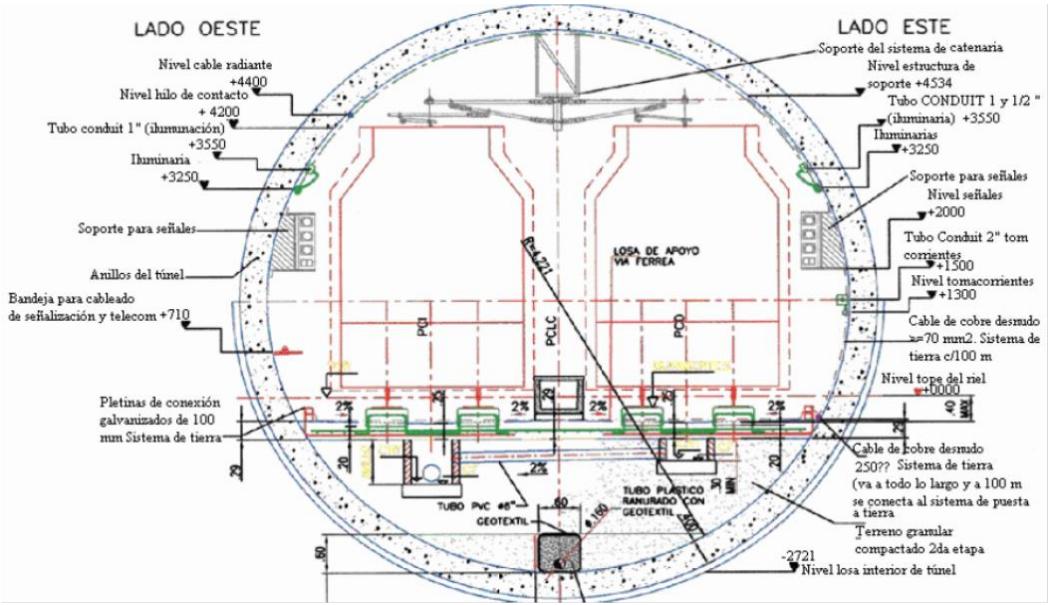
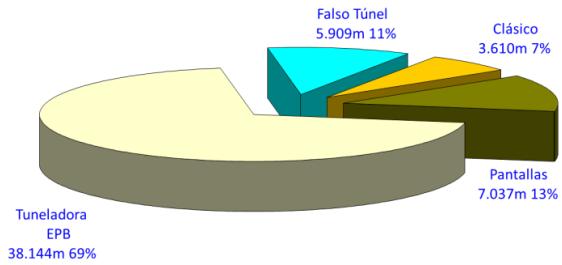


- PRIORIDAD: MÁXIMA **SEGURIDAD** EN TODOS LOS TRABAJOS.
- MÉTODOS DE SECCIÓN ABIERTA (NATM, Precorte, SCL, ...) → **RECHAZADOS**
- SECCIONES DE EXCAVACIÓN **NO MAYORES DE 5 m<sup>2</sup>**

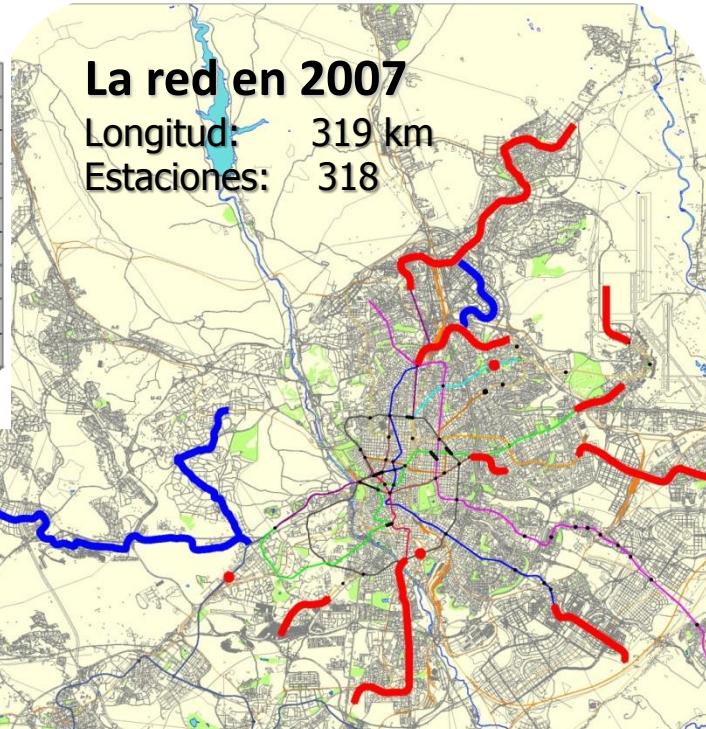
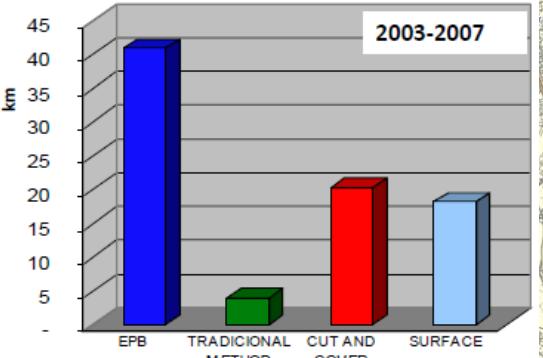
MÉTODO	ELEMENTO	LONGITUD 1995-1999
TUNELADORA EPB <small>(Earth Pressure Balance Shield)</small>	TUNEL	22.500 m 60.32%
PANTALLAS <small>(Cut and Cover)</small>	TUNEL Y ESTACIONES	7.900 m 21.18%
MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID <small>(Excavación manual por fases)</small>	TUNEL y 1 ESTACION <small>(Guzmán el Bueno Amp. 95-99)</small>	5.700 m 15.28%
FALSO TÚNEL	TUNEL	1.200 3.22%
SUPERFICIE		18.300



# Se confirma: 1999 - 2003



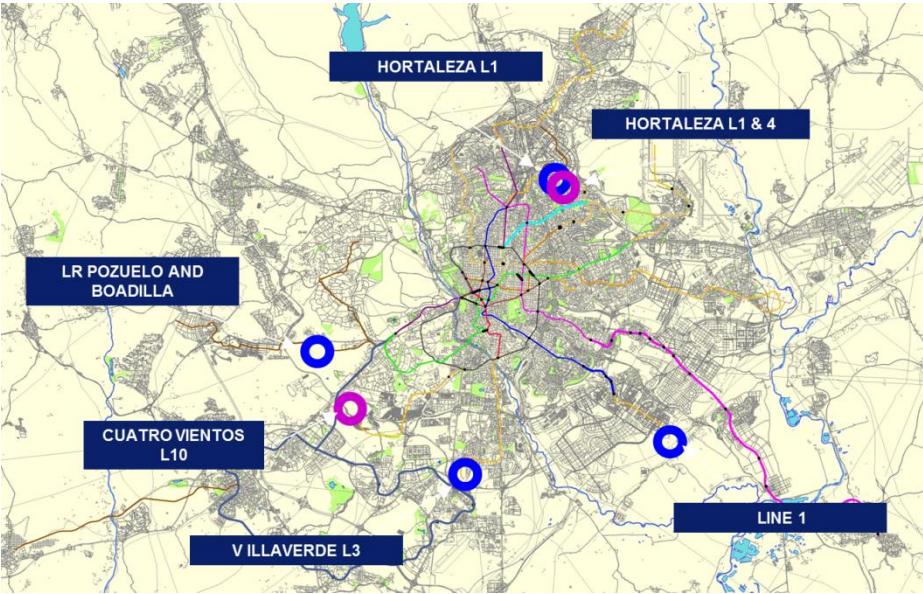
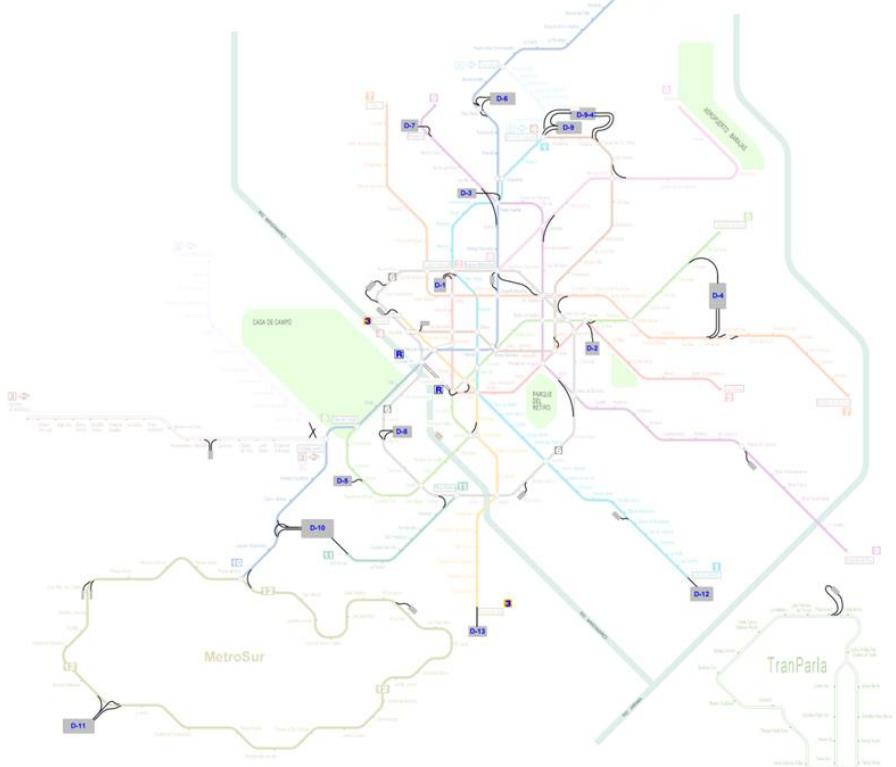
# Se reafirma: 2003 - 2007



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



## 2003-2007 EXTENSIÓN DEPÓSITOS DE LA RED



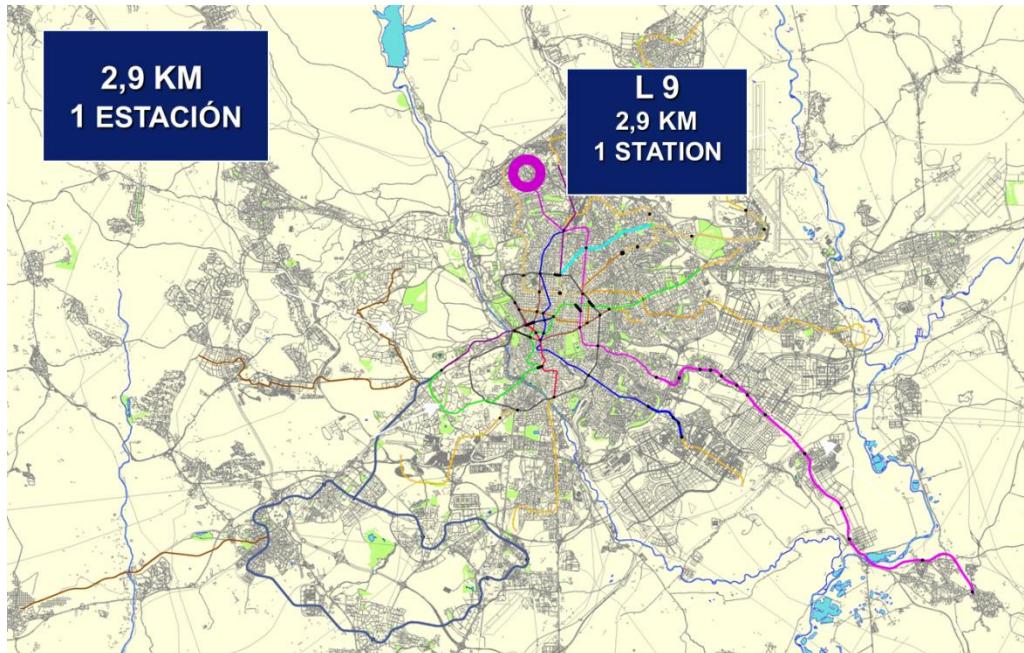
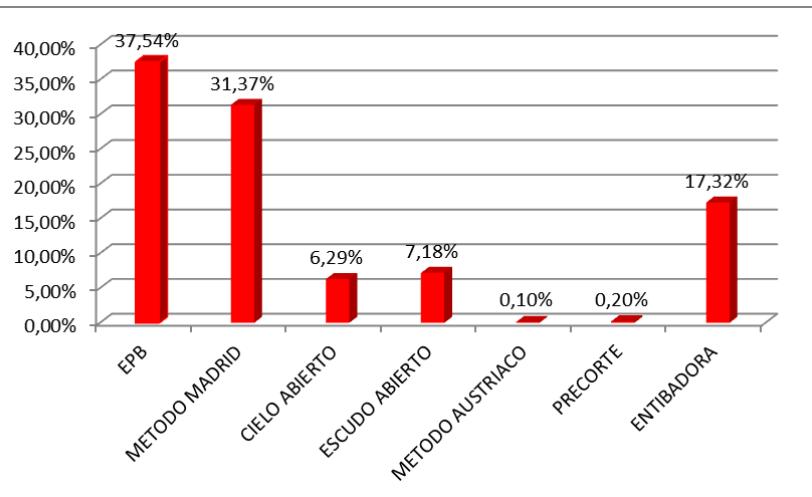
**4 NUEVOS  
DEPOSITOS**  
**2 MEJORAS  
EN DEPOSITOS  
EXISTENTES**

## IDEA: LA RED DEBE ESTAR INTERCONEXIONADA

# EXTENSIÓN DE LA RED EN 2007-2015

## 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

- En zona urbana donde el trazado es superficial y no hay edificaciones próximas
- En 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

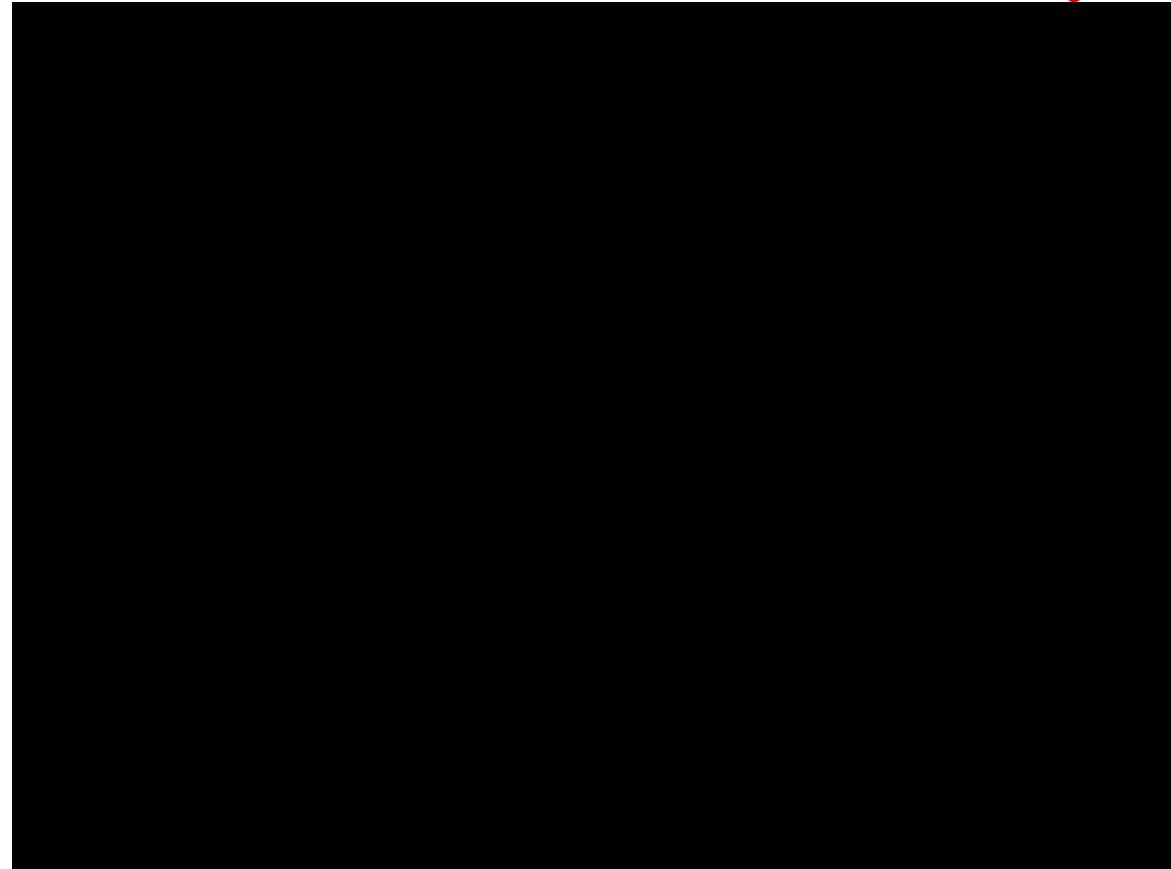
## METODO ENTRE PANTALLAS



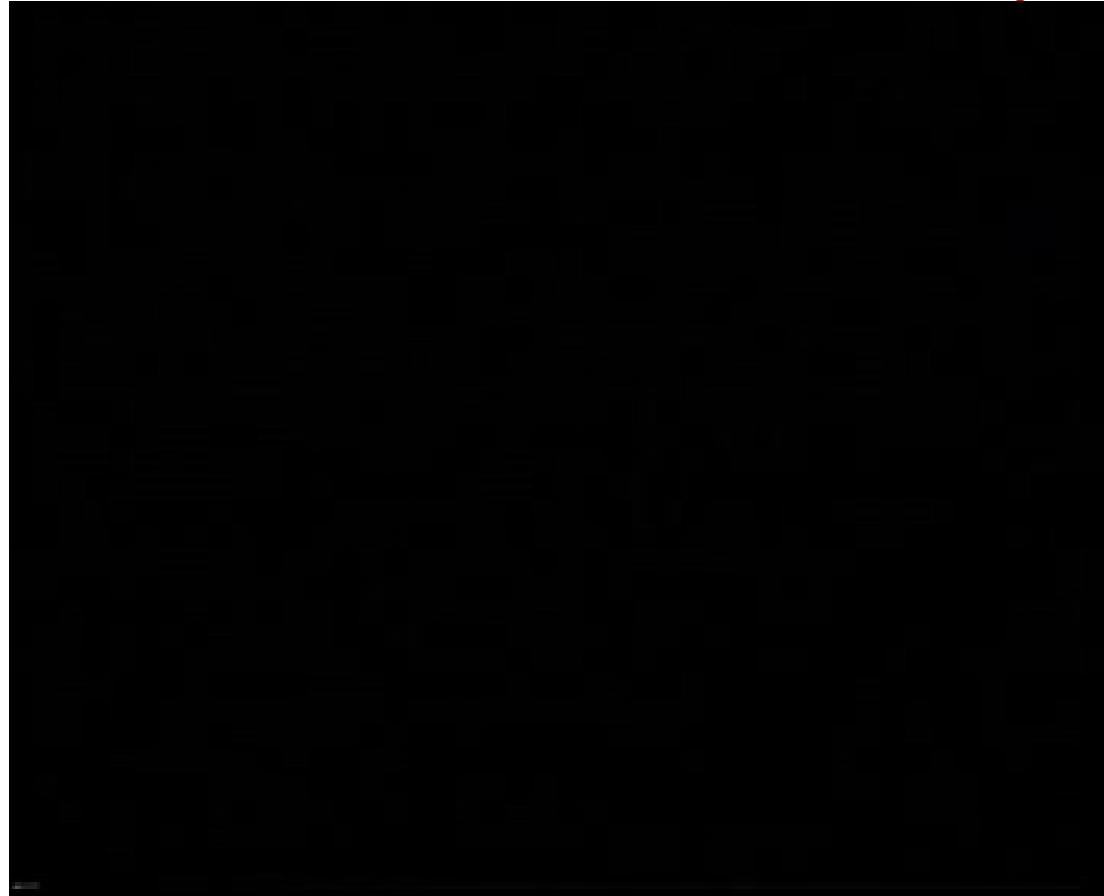
## METODO TRADICIONAL DE MADRID



- **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**



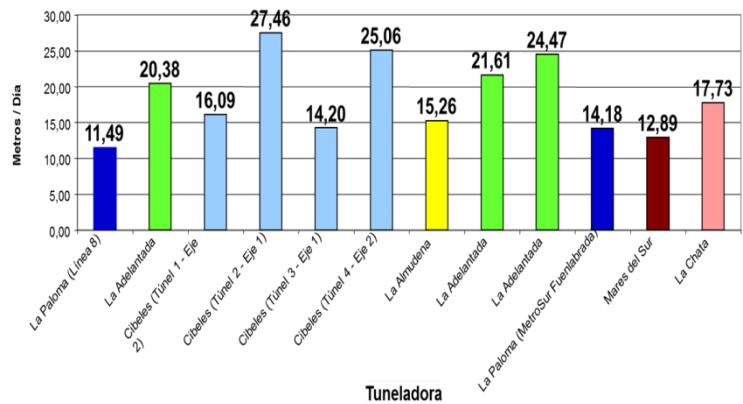
## METODO CIELO ABIERTO



## 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

## Sección circular

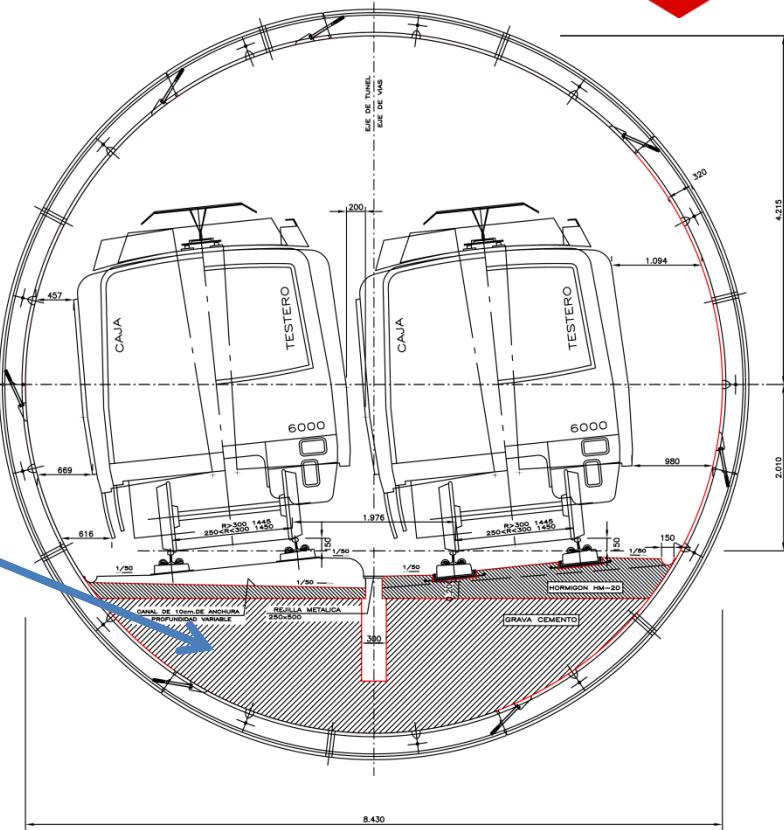
## En Infraestructuras para el transporte

## DIÁMETRO DE LA SECCIÓN

## OPTIMA PARA TUNELES HIDRAULICOS

## SE PIERDE CASI 25% SECCIÓN EXCAVADA

## Galerias de cables Drenaje



## Par motor necesario en la cabeza de corte

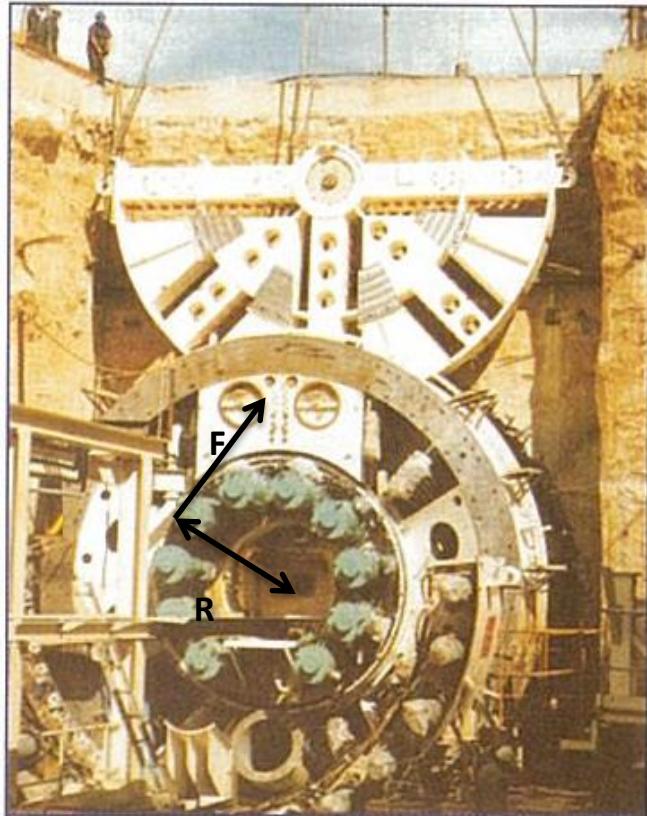


<i>Par TEORICO necesario Diametro = 9,40 m</i>	<i>m.KN</i>	
Corte del terreno con las picas	146,50	1,14%
Rozamiento entre terreno y cabeza	12.467,10	97,36%
Esfuerzos radiales en el rodamiento	2,90	0,02%
Esfuerzos longitudinales en el rodamiento	19,40	0,15%
Rozamientos de los sellos	27,20	0,21%
Mezclado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

$$\text{Par Motor} = 19.600 \text{ mKN} = 2.000 \text{ mTon}$$

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

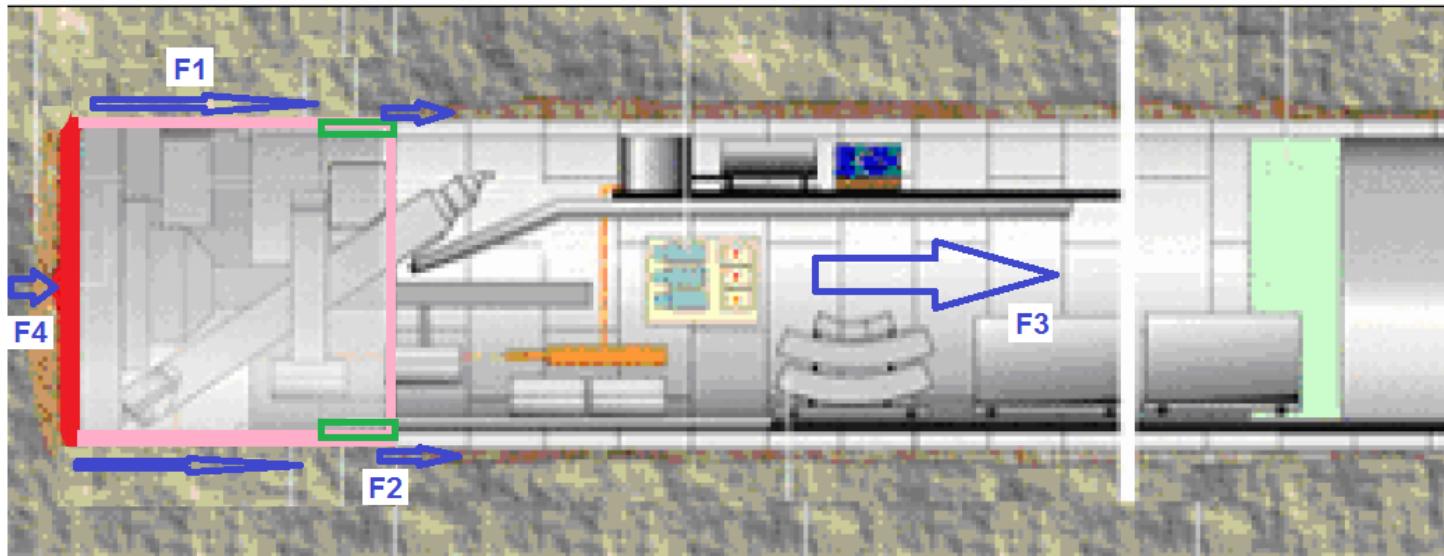
$$\text{Potencia Necesaria} = 19.600 * (2\pi/60) = 2053 \text{ Kw}$$

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 m<sup>2</sup> de Superficie**

#### Tuneladora de Diámetro 9,40 metros.

#### EMPUJE HORIZONTAL NECESARIO

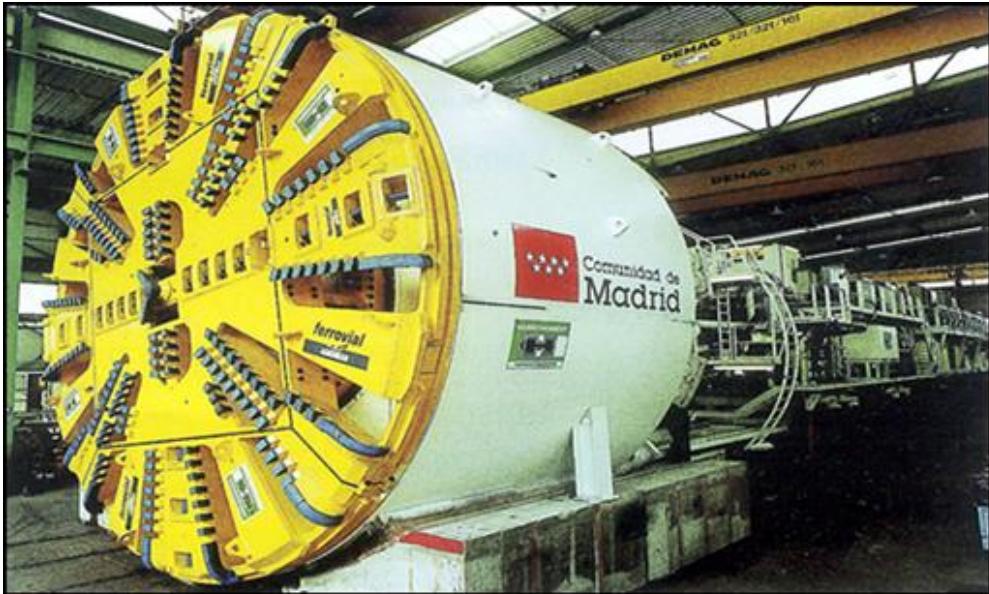
Altura de tierras sobre le eje	30,0	m
Densidad sumergida	1,2	t/m <sup>3</sup>
Presión efectiva vertical	36,0	t/m <sup>2</sup>
K, Coeficiente empuje pasivo	3,0	
Presión efectiva horizontal	108,0	t/m <sup>2</sup>
Presión intersticial	30,0	t/m <sup>2</sup>
Presión horizontal total	138,0	t/m <sup>2</sup>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

Cohesión	10,0	t/m <sup>2</sup>
Adhesión	6,0	t/m <sup>2</sup>
Perímetro Escudo	29,8	m
Longitud Escudo	10,0	m
Superficie total	298,5	m <sup>2</sup>
Fuerza Rozamiento	1.791	t/m <sup>2</sup>

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

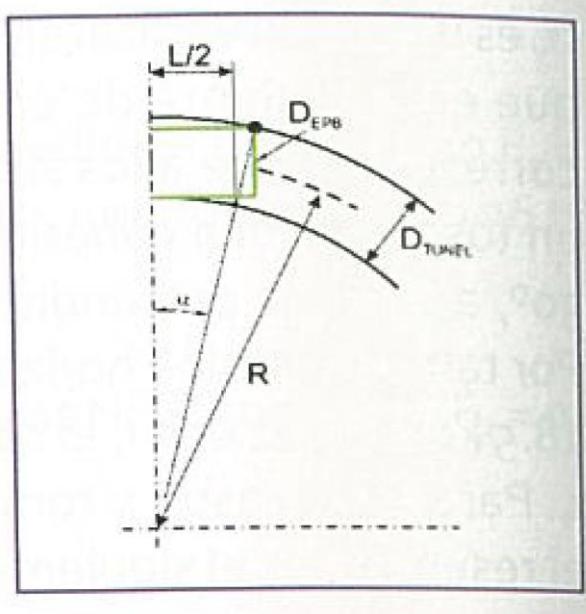
Número de Gatos	26	
Empuje necesario por gato	534	t

## Longitud del escudo para que pueda negociar las curvas del túnel



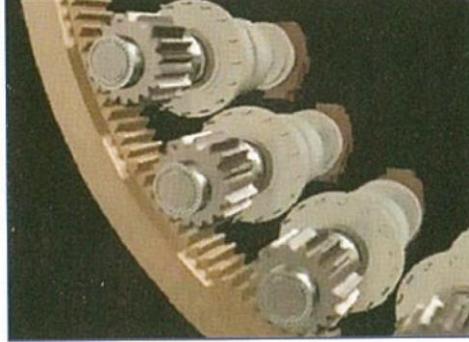
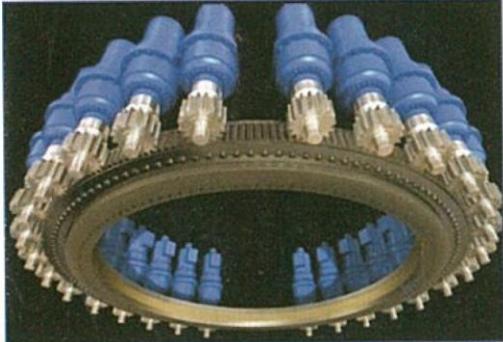
- $D_{EPB} < D_{TUNEL}$ . Para avanzar por el túnel excavado
- Forma escudo: Trococónica.  $D_{initial} = D_{final} + 10\text{ cm}$
- Ejemplo real: sobrecorte de la cabeza del escudo en 5 cm
  - $D_{TUNEL} = 9,40\text{ m}$
  - $D_{EPB} = D_{TUNEL} - 2 * 0,05 = 9,30\text{ m}$
  - $R = \text{rango del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

$$\left( R + \frac{D_{TUNEL}}{2} \right) \sin \alpha = \frac{L}{2} \quad \left( R + \frac{D_{TUNEL}}{2} \right) \cos \alpha = R - \frac{D_{TUNEL}}{2} + D_{EPB}$$



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.

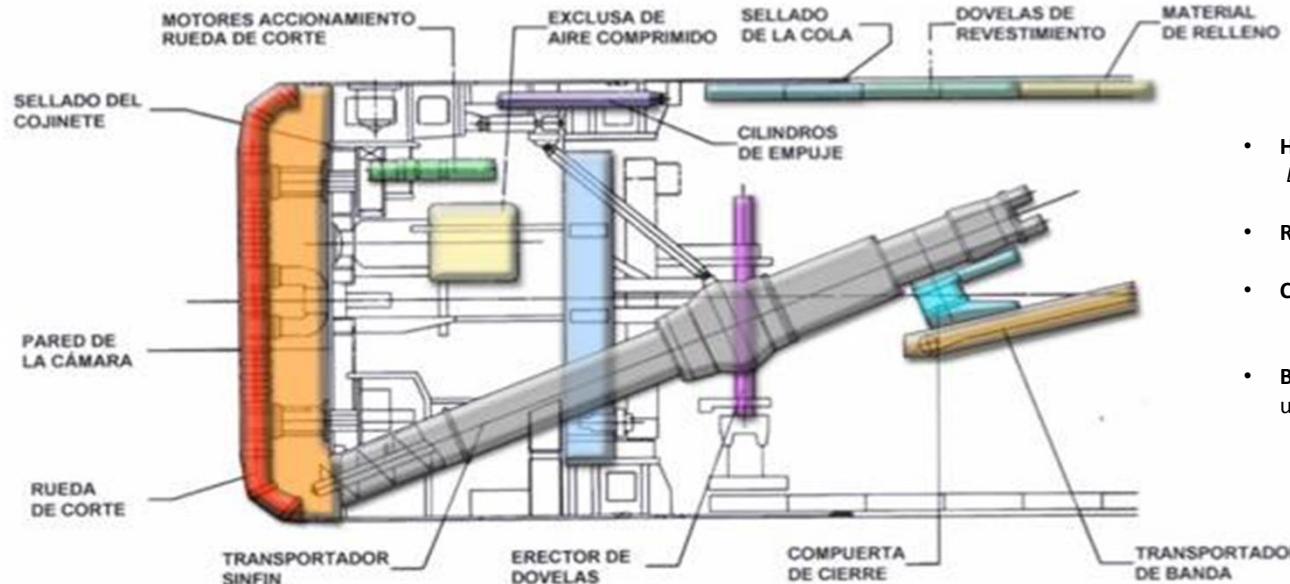
**Rendimientos 8m/día**

- Estación 5. 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:  $D_{ext\_dovel} < D_{ext\_cola\_escudo}$
- **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 m<sup>3</sup>/h a 60 baras 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

### Tiempo de colocación del anillo

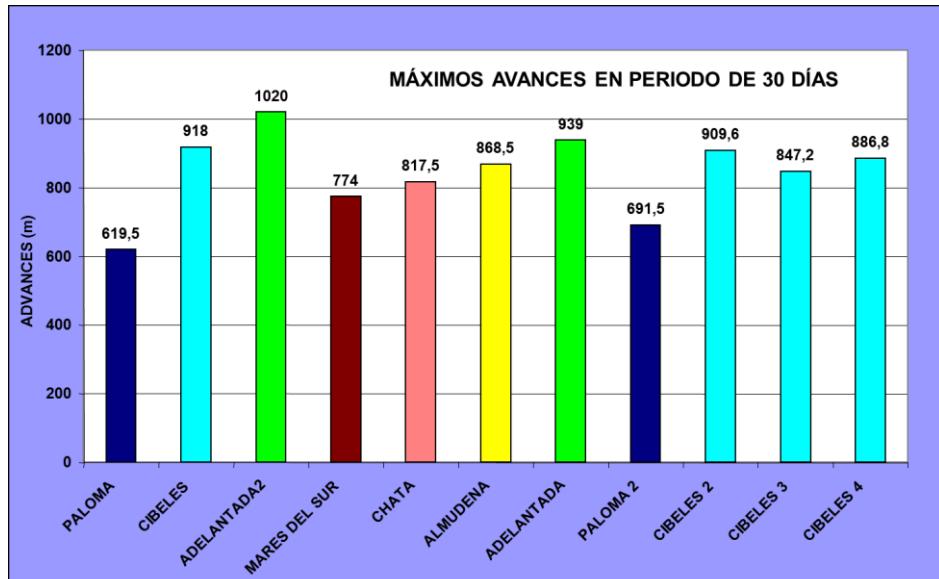
Dato estadístico obtenido	20 mim
---------------------------	--------

### Avance maximo por mes

Horas de 50 min (bocadillo)	
días de 20 h (4 h. reservadas a mantenimiento)	
$(50/60) * (20/24) * 24 * 60 / 40 =$	25 anillos
Longitud del anillo	1,50 m
Avance máximo por dia (25 * 1,50)	37,50 m
Nº días a la semana	6
Nº semanas al mes	4
<b>Avance por mes</b>	<b>900 metros</b>

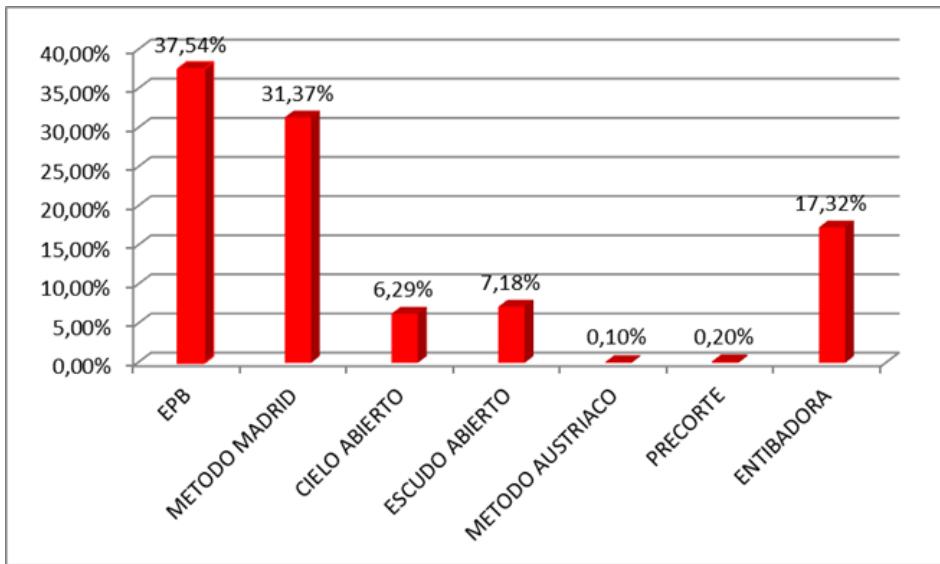
(aprox 150 cm/8 cm/min)

(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
<b>LONGITUD TUNELADORA</b>			<b>23.674,17</b>

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
<b>LONGITUD PANTALLAS</b>			<b>950,23</b>

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
<b>LONGITUD MINA</b>			<b>9.470,55</b>

27,78%

**LONTITUD 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 DIFICILES 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 ENCUENTRO  
INTERNACIONAL DE METROS**  
"Implementación de Metros Subterráneos"



**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**