

Nuevos datos sobre el comportamiento de las tuneladoras EPB en la ampliación 1995-99 del Metro de Madrid

Manuel J. Melis Maynar

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, M.Sc, MBA

Dir.Gral. Infraestructuras, Consejería de Obras Públicas, Comunidad de Madrid. Presidente, Metro de Madrid

RESUMEN

Se presenta en este artículo un resumen de los datos más importantes sobre la construcción de los 38 km de túneles de la reciente ampliación del Metro de Madrid, construidos en su mayor parte por medio de tuneladoras de frente cerrado. Los datos incluidos permitirán a futuros usuarios de equipos similares una mejor estimación de coste y plazos de ejecución de otros túneles.

ABSTRACT

A summary of facts and figures of the tunnelling work of Madrid Metro Extension project is presented in this paper. Details on cost and times included here could be of great use for cost estimating in future tunnels.

1. LA PROHIBICIÓN DEL MÉTODO AUSTRIACO, CLAVE DEL ÉXITO DE LOS TÚNELES DE LA AMPLIACIÓN DE METRO

No gustó en 1995 que para la construcción de los túneles de la ampliación se prohibieran los métodos de frente abierto. La polémica sobre el Nuevo Método Austríaco aún sigue demasiado viva en todo el mundo. Pero en la ampliación del Metro se tenían ideas claras al respecto; demasiados años viendo colapsos de túneles. Prohibidos los métodos de frente abierto. Sólo se construirían los túneles con tuneladoras de frente cerrado o por el método clásico de Madrid.

Pasados 40 meses y terminada la ampliación, todo el mundo reconoce que la decisión fue acertada. En efecto, los rendimientos medios en construcción de túnel en las grandes tune-

ladoras de 9.4 metros de diámetro han sido verdaderamente extraordinarios.

2. AVANCES Y RENDIMIENTOS DE LAS TUNELADORAS DE PRESIÓN DE TIERRAS

Se ha llegado a *10.4 metros por día de calendario* (Mitsubishi La Chata, Línea 4, de Dragados), *10.2 metros* (Mitsubishi La Adelantada, Línea 7 tramo Arroyofresno – Valdezarza, FCC), *8.1 metros* (Herrenknecht Almudena, Línea 9, ACS-NECSO) y *9.0 metros* (Herrenknecht Paloma, Línea 7 tramo Valdezarza – Islas Filipinas, FERROVIAL-NECSO). Pueden verse en las siguientes tablas. Dos de estas máquinas hicieron una segunda obra, el túnel desde el Campo de las Naciones al Aeropuerto de Barajas, y sus rendimientos aumentaron hasta *16.1 metros*

por día calendario (Adelantada) y 12.2 (La Chata). Al terminar este túnel, la tuneladora Adelantada, a petición del Ministerio de Obras Públicas, pasó a construir una tercera obra, un tramo del túnel de Cercanías de RENFE para el acceso a Alcobendas. Esta obra del Ministerio tenía dos túneles, y se había adjudicado a FCC con un método constructivo basado en una entibadora de lanzas de sección completa, similar a las que se utilizaban en Metro de Madrid en los años 70 y que naturalmente no funcionó y hubo que desmontar y terminar el túnel por el método clásico. En el segundo túnel, nuestra tuneladora Adelantada (del mismo contratista FCC y con el mismo equipo a bordo, equipo dirigido por el Ing. De Caminos D. Avelino Acero, D. Ricardo Gil y D. Juan Girón) obtuvo un extraordinario rendimiento de 22.9 metros por día de calendario. Estos rendimientos medios de las tuneladoras EPB de la Comunidad de Madrid son altísimos, ya que en todo momento se ha estado trabajando en zona urbana densamente poblada, y se ha dado, como es natural, máxima prioridad al control de subsidencias y a evitar el más mínimo daño a los edificios y estructuras de superficie. Todos los túneles han sido dotados de sistemas sumamente sofisticados de compensación de asentamientos, en general con inyecciones de compensación. La instrumentación y los sistemas de seguridad y control se describen en otro artículo, y constituyen un sistema único y pionero en grandes proyectos de excavaciones subterráneas de este tipo. Pese a estos sistemas y controles de seguridad, que naturalmente obligan a una velocidad de excavación lenta y controlada como se ha llevado, los avances obtenidos suponen para las obras citadas unos records mundiales de los que el Dr. Martin Herrenknecht, fabricante de "Paloma" y "Almudena" así como el fabricante NFM-Mitsubishi de "La Chata" y "Adelantada" dieron confirmación a la Comunidad de Madrid. Deben reseñarse especialmente para las tuneladoras "grandes" de 9.5 m de diámetro los records de avance en 31 días, obtenidos por "Adelantada", 609 metros en recta en su primer túnel, 792 metros en su segundo túnel y 852 metros en 31 días en su tercer túnel. "Almudena" hizo 582 metros en curva de radio 275 metros, y "Paloma" 618 metros en curva de 250 metros de radio. La "Chata" hizo 558 metros en 31 días en su primer túnel y 621 metros en su segundo túnel.

En las tuneladoras "pequeñas", para túneles de una sola vía, el record de avance fué obtenido por la tuneladora LOVAT "Cibeles", de 7.4 m de diámetro, que construyó el túnel norte de Línea 8, tramo Mar de Cristal - Campo de las Naciones, alcanzando un avance máximo de 728.4 metros en 31 días.

Recuerde el lector además que estas tuneladoras, diseñadas y especificadas en todos sus detalles para el terreno de Madrid, son las más potentes del mundo en su diámetro (9.40 metros), con un empuje total de 10.000 toneladas y un par motor de 2.000 tm. Este diámetro es un metro superior al de las 4 grandes que construyeron el túnel del Canal de la Mancha. Por ser tuneladoras de "suelos blandos", con tecnología de "presión equilibrada de tierras (EPB, Earth Pressure Balance)", el

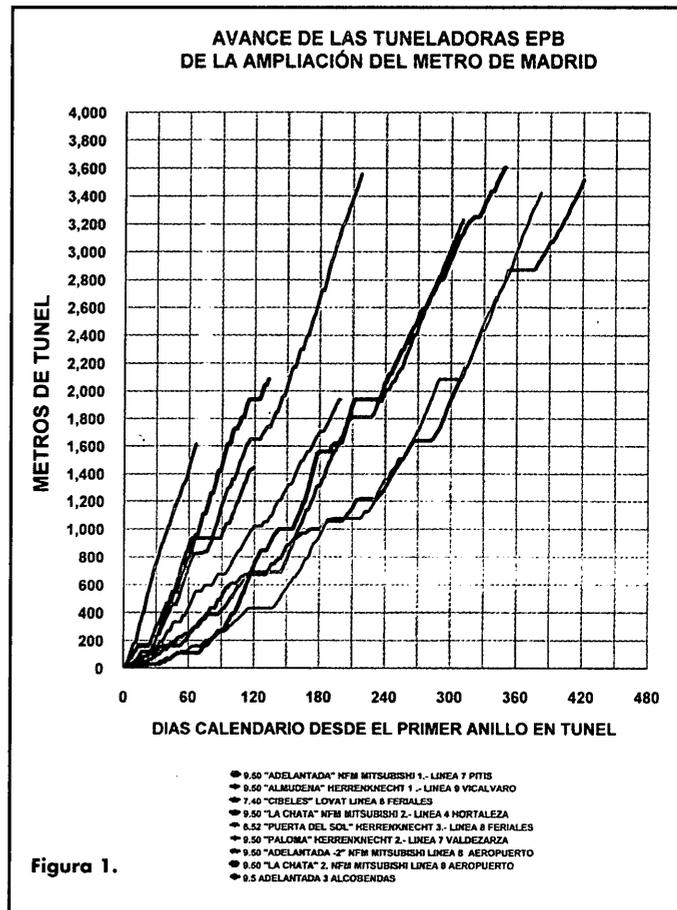


Figura 1.

empuje necesario para la excavación sólo puede obtenerse empujando contra el anillo de revestimiento que se acaba de colocar en cada momento. No puede la máquina apoyarse contra el terreno por la poca resistencia de éste. Ello quiere decir que en las 6 tuneladoras de Madrid, como en todas las EPB, el ciclo de avance consta de dos partes: la excavación de 1.5 metros de longitud, que dura aproximadamente 30 minutos, y a continuación se para la excavación y se coloca el correspondiente anillo, operación que consume unos 25 a 30 minutos (véanse los tiempos en las correspondientes figuras). Terminado de colocar el anillo, los grandes gatos de empuje vuelven a presionar contra éste último anillo y comienza un nuevo ciclo de excavación.

El máximo número de anillos colocados en 24 horas en la Ampliación del Metro de Madrid ha sido de 26. Este es otro récord mundial para este diámetro de tuneladoras (los records se relacionan con el diámetro de la máquina ya que, naturalmente, las máquinas más pequeñas tardan menos en excavar y colocar anillo), y ha sido obtenido por la "Adelantada" en el túnel Campo de las Naciones - Aeropuerto, superando al anterior de 25 anillos de "La Chata", en Línea 4. Observe el lector que construir 26 anillos en 24 horas supone superar incluso las más optimistas especificaciones de la máquina dadas por

Nuevos datos sobre el comportamiento de las tuneladoras EPB en la ampliación 1995-99 del Metro de Madrid

TABLA 1.

LINEA	DIAMETRO (m)	MARCA	COMIENZO TÚNEL	FIN TÚNEL	METROS PERFORADOS	DIAS CALENDARIO	ESTACIONES ATRAVESADA	DIAS PASO ESTACIONES	DIAS CALENDARIO TUNEL	METROS/DIA CALENDARIO	METROS / DIA (TUNEL)	DIAS REALES TRABAJO EN TUNEL	METROS / DIA DE TRABAJO	AVANCES MAXIMOS	METROS / 1 DIA	METROS / 7 DIAS	METROS / 31 DIAS
La Chata	4	Mitsubishi	26-may-97	09-may-98	3.608	348	4	48	300	10.4	12.0	229	15.8	37.5	223.5	558.0	
Adelantada (I)	7	Mitsubishi	26-abr-97	09-mar-98	3.234	317	4	19	298	10.2	10.9	219	14.8	31.5	156.0	609.0	
Almudena	9	Herrenknecht	24-jun-97	13-ago-98	3.356	415	4	61	354	8.1	9.48	281	11.9	31.5	151.5	582.0	
Paloma	7	Herrenknecht	30-ago-97	15-sep-98	3.443	381	2	47	334	9.0	10.3	272	12.7	27.0	187.5	618.0	
Cibeles	8	Lovat	24-jul-97	3-dic-97	2.108	132	0				16.0	83	25.3	37.2	204.0	728.4	
Puerta del Sol	8	Herrenknecht	25-ago-97	10-mar-98	1.958	197221	0					141	13.8	37.2	153.6	438.0	
Adelantada (II)	8	Mitsubishi	17-jul-98	23-feb-99	3.567	117	0	0	221	12.2	16.1	175	20.3	39.0	229.5	792.0	
La Chata	8	Mitsubishi	16-oct-98	10-feb-99	1.436	80	0	0	117	20.3	12.2	80	18.0	34.5	225.0	621.0	
Adelantada (III)	9.4	RENFE Alcobendas	8-jun-99	27-ago-99	1.629		0	0	80		20.3	71		42.0	232.5	852.0	

el fabricante en cuanto a tiempos de excavación y de colocación del anillo de revestimiento.

Excavar los 609 metros al mes (Adelantada, Línea 7, del 13 de Enero 98 al 13 de Febrero de 1998) yendo en presión de tierras, con un continuo, exhaustivo y abrumador control de asientos en superficie, así como los 582 metros (Almudena, Línea 9, con el peor terreno, plástico, adherente, encontrado en toda la Ampliación) o los 558 de La Chata en Línea 4 supone también una óptima organización de los trabajos y de toda la intendencia que éstos acarrearán, especialmente en cuanto al suministro de las dovelas de hormigón (las 7 piezas que forman cada anillo) y al vertido adecuado de los residuos de excavación en los vertederos autorizados correspondientes, todo ello en una ciudad como Madrid y creando mínimas molestias a los ciudadanos.

Los datos relevantes de la construcción de los túneles son los indicados en la Tabla 1, agrupados por tuneladoras.

En la figura 1 pueden verse los diagramas de avance comparados de las tuneladoras. En el eje de abscisas aparecen los días calendario desde que cada tuneladora ha colocado su primer anillo en tierras, es decir, una vez que ha comenzado a excavar en túnel y ha colocado todos los anillos de fuera del mismo que transmiten el empuje a la estructura de empuje. Como la distancia entre el frente de ataque, la cabeza, y el anillo recién colocado es del orden de los 8 metros en todas las máquinas, quiere decir esta representación que el primer anillo que aparece en el gráfico es realmente el 5º ó 6º realmente colocado. En ordenadas aparecen los metros de túnel construídos.

De estos diagramas comparados de avance se deducen varias conclusiones importantes.

1.- El diagrama de avance metros-días de una tuneladora es una curva que puede asimilarse a una parábola de eje vertical y vértice en el origen para las primeras semanas de funcionamiento, que llamaremos parábola o curva de aprendizaje y una recta para el resto del período de trabajos, cuando el equipo ha llegado a obtener su velocidad de cruce o rendimiento sostenible.

2.- La parábola de aprendizaje puede representarse por la ecuación

$$y = a d^2$$

donde

y = metros construídos

d = días calendario, teniendo en cuenta todos los condicionantes (estaciones, averías, descarriles, etc)

a = constante que define el funcionamiento de máquina y equipo

a = 0.30 (excelente)

a = 0.01 (malo)

La EPB LOVAT de línea 10 que posteriormente ha construido el túnel norte de línea 8 (Recintos Feriales-Mar de Cristal) ha tenido un $a=0.1$. Con este valor ha batido un record mundial para su diámetro (7.40 m) en línea 8, construyendo 1938 metros de túnel en 115 días calendario hasta llegar al telescopio de entrada en la estación ($a=0.15$). Al continuar posteriormente con el tunelillo de maniobras entre líneas 4 y 8 ha construido en total 2100 metros en 134 días calendario ($a=0.12$). La tuneladora "Adelantada" Mitsubishi de línea 7 Tramo Arroyofresno-Valdezarza ha construido su túnel de 3.234 metros en 317 días calendario ($a=0.032$). Las tuneladoras que más problemas de arranque han tenido, las Herrenknecht "Paloma" Ø 9.40 metros de línea 7 (Valdezarza-Islas Filipinas) y "Almudena" línea 9 (Pavones-Puerta de Arganda) han construido sus túneles de 3.443 metros en 381 días calendario ($a=0.024$, línea 7) y 3.356 metros en 415 días calendario ($a=0.02$, línea 9). La tuneladora "Chata" Mitsubishi de línea 4 en Hortaleza ha construido su túnel de 3.608 metros en 348 días calendario ($a=0.03$).

En sus segundas obras, la tuneladora "Adelantada" Mitsubishi en línea 8 Tramo Campo de las Naciones - Barajas ha construido su túnel de 3.567 metros en 221 días calendario ($a=0.07$), y la "Chata" en el mismo tramo comenzando desde el lado opuesto construyó 1.436 metros en 117 días calendario ($a=0.11$). En su tercera obra, la tuneladora "Adelantada" Mitsubishi en un tramo que hizo para Cercanías en Alcobendas construyó el pequeño túnel de 1.629 metros en 80 días calendario ($a=0.25$).

2.- La experiencia de un equipo humano con una máquina determinada es básica para mejorar los rendimientos, consecuencia nada nueva por otra parte pero que no es suficiente para justificar un buen rendimiento. El día 134 de trabajo, la máquina LOVAT Ø 7.40 m "Cibeles" en línea 8 había construido 2100 metros, como hemos dicho. Ese mismo día de trabajo la HERRENKNECHT Ø 6.52 "Puerta del Sol" en línea 8 había construido sólo 1077 metros (es decir, el 51%), la HERRENKNECHT Ø 9.40 "Almudena" en línea 9 había construido 716 metros (el 34%), la HERRENKNECHT Ø 9.40 "Paloma" en línea 7 había construido 430 metros (el 20%), la MITSUBISHI Ø 9.40 m "Adelantada" en línea 7 había construido 700 metros (el 33%) y la MITSUBISHI Ø 9.40 m "Chata" en línea 4 había construido 885 metros (el 42%). No parece que el diámetro sea un factor determinante en el sentido de que a mayor diámetro menor avance, porque la Cibeles ha construido mucho más deprisa que la "Puerta del Sol" a pesar de tener 1 metro más de diámetro. Tampoco parece que sólo los kilómetros construidos previamente por una máquina y un equipo sean suficientes para garantizar un rendimiento, puesto que si la Cibeles había construido antes la línea del Pasillo Verde de Cercanías (2.500 metros de túnel) y la línea 10 de Metro entre Lago y Príncipe Pío (1600 metros), también la "Puerta del Sol" había construido la línea 5 del Metro de Valencia (3000 metros

de túnel). Es evidente que hay otros factores que influyen en el rendimiento.

A continuación se detallan algo más los comportamientos de las tuneladoras, seleccionando una Herrenknecht y una Mitsubishi.

3. DATOS SOBRE LA TUNELADORA "PALOMA" EPB HERRENKNECHT Ø 9.4 LINEA 7, TRAMO VALDEZARZA A ISLAS FILIPINAS

La topografía de Madrid en toda la zona de Línea 7 al Norte es dura, y ha obligado a un trazado con muchas rampas y pendientes. La figura 2 son las estereofotos de la traza, en las que puede verse bien la topografía de la zona. El trazado comienza en la estación de Valdezarza, donde se situaron las instalaciones de carga de dovelas y extracción de tierras. Desde este punto sube hasta la estación de Francos Rodríguez. Toda esta intersección discurre en arenas tosquizas y toscos arenosos. Desde Francos Rodríguez hasta la siguiente estación, Guzmán el Bueno, el trazado baja mucho, también en arenas tosquizas y toscos arenosos, pasando bajo la vaguada de la Avenida de Pablo Iglesias. De Guzmán el Bueno hasta la estación de Islas Filipinas donde termina el tramo el trazado sigue bajando, y el terreno es similar, arenas tosquizas y toscos arenosos. En este último tramo la planta sigue una cerrada curva de radio 275 metros para ajustarse a los azimutes de las estaciones y librar el Tribunal Constitucional, que prohibió de forma inexplicable pasar bajo su jardín.

El pedido de la máquina se firmó entre Cubiertas (posteriormente NECSO) y Herrenknecht el 16 de Julio de 1996. El primer embarque se hizo en Rotterdam 11 meses después, el 16 de Junio de 1997. El primer anillo se construyó en la estructura de empuje de la estación de Valdezarza el día 23 de Agosto de 1997. Desde el pedido al primer anillo transcurrieron 13 meses y una semana.

El coste del equipo, con los trenes e instalaciones, según datos del Contratista principal (UTE Cubiertas-Ferrovial, posteriormente NECSO-Ferrovial), fue el especificado en la Tabla 2.

TABLA 2.

COSTE DE LA TUNELADORA HERRENKNECHT "PALOMA"

Componente	Coste, MPta
Equipo y backup.....	1.445
Locomotoras Schoma (3) 50 Tn.....	43 /ud
Tandem (3).....	24.8 /ud
Vagonetas Muhlhauser (21).....	2.7/ ud
Mesillas dovelas y mortero (9).....	1.8 / ud
Vagón de personal (1).....	1.7 / ud
Equipo trasero, pórticos, etc.....	70.5
Total.....	1.823,5

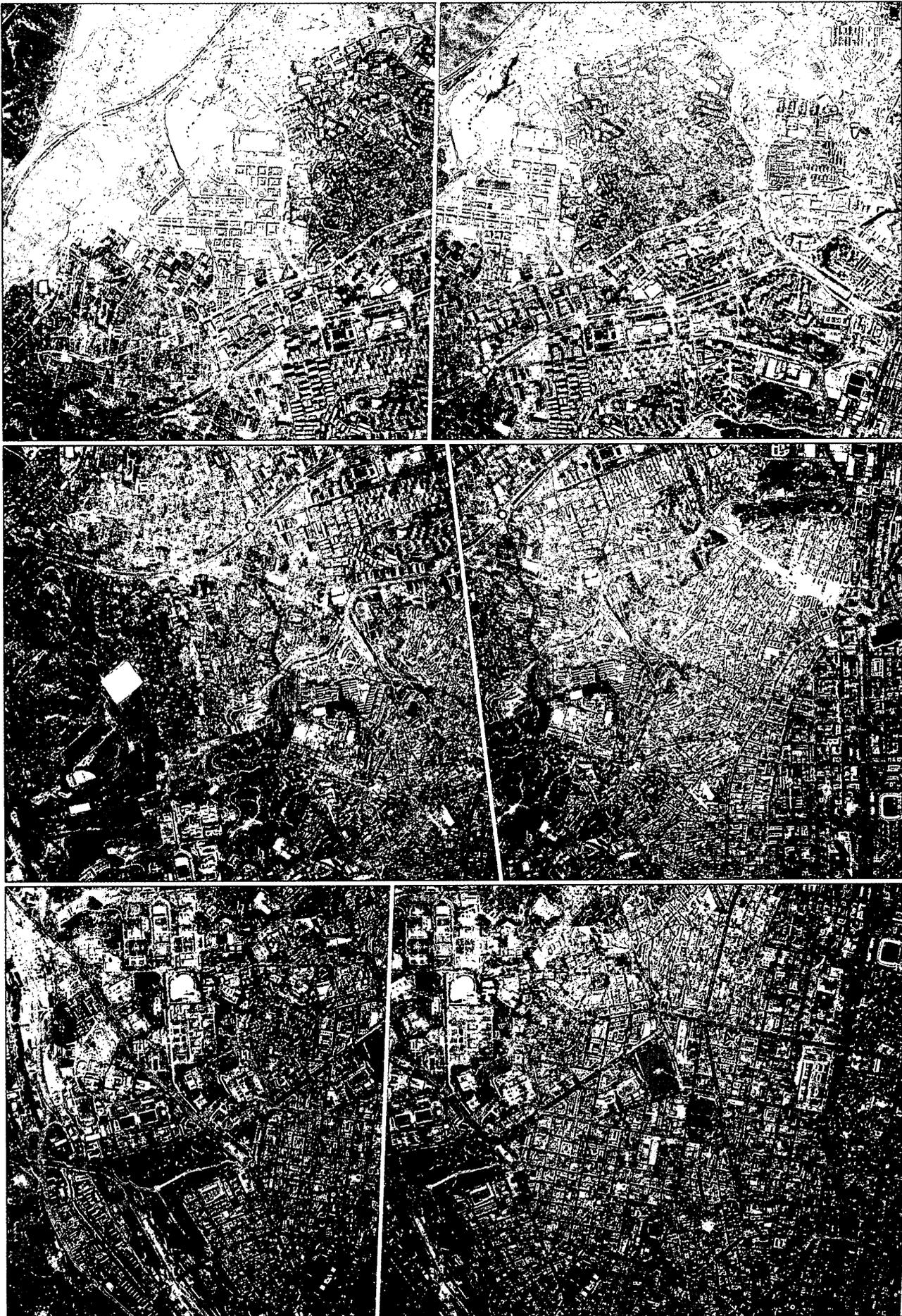


Figura 2.

Durante el período de aprendizaje las averías han sido numerosas, más de lo esperado. El día 28 de Enero de 1998 la máquina estaba en el anillo 397 y llevaba 151 días de trabajo, de forma que la media era en ese momento de 2.6 anillos (es decir, con anillos de 1.5 metros, 3.94 metros de longitud) por día de calendario. Rendimiento bajísimo que tenía sumamente preocupados al Contratista y a la Dirección General de Infraestructuras de la Comunidad. Esta máquina era la que se había tenido que situar en las peores condiciones de las 6 para sus trabajos de excavación, ya que hubo de montarse en el interior de la estación de Valdezarza, sumamente profunda, y no era posible la extracción de escombros por rampa. El sistema de extracción de escombros que se diseñó consistía en una cinta vertical de 30 metros de altura, de banda y canchales de goma, de Canadá, que era alimentada por un alimentador de banda metálica situado en el foso de descarga de trenes. Sin embargo, pronto se vió que no podría funcionar adecuadamente, ya que los materiales excavados tenían una alta plasticidad, se pegaban al alimentador y a la banda vertical y el sistema no funcionaba. Se decidió entonces ir a una solución más clásica. Se amplió el foso de descarga de los trenes y se construyó un túnel a través de las paredes de la estación, en el que se encajó la rampa de salida de camiones. De esta forma la extracción de escombros, aún con las dificultades de estar constreñido el sistema dentro de la estación de Valdezarza y a gran profundidad, comenzó a funcionar de forma adecuada. Los trenes de desescombro descargaban en el foso ampliado y allí una retroexcavadora con brazo de longitud adecuada cargaba sobre los camiones, que saliendo por la rampa y el túnel, llevaban las tierras a vertedero. El túnel de extracción se terminó en Enero de 1998, y los avances mensuales fueron los siguientes:

MES	ANILLOS	METROS
Ago 97	9	13,5
Sep 97	24	36,0
Oct 97	79	118,5
Nov 97	77	115,5
Dic 97	106	159,0
Ene 98	141	211,5
Feb 98	243	364,5
Mar 98	50	75,0
Abr 98	212	318,0
May 98	275	412,5
Jun 98	194	291,0
Jul 98	306	459,0
Ago 98	406	609,0
Sep 98	173	259,5
Total	2.295	3.443

La máquina llegó a la estación de Francos Rodríguez el día 6 de Marzo de 1998, a los 188 días calendario del comienzo.

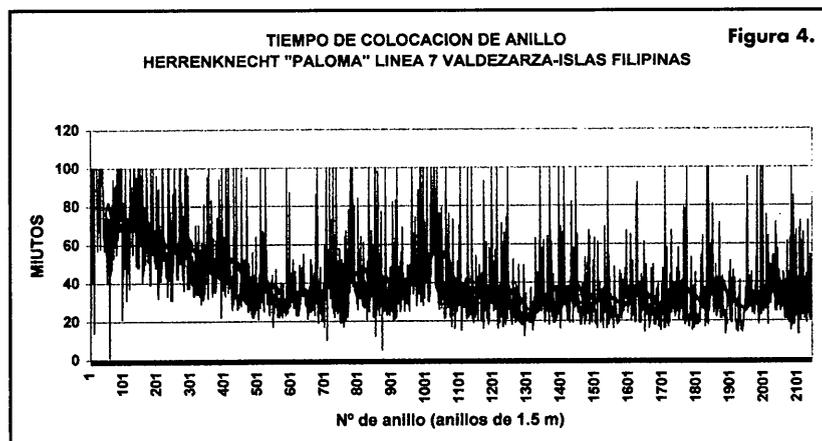
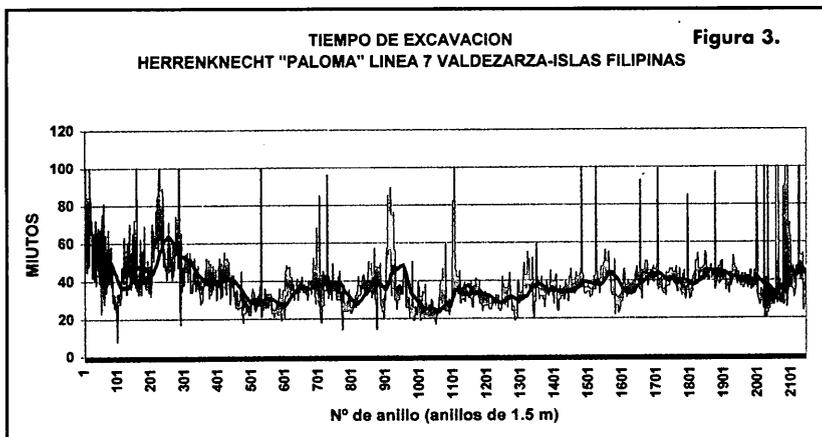
El rendimiento medio en este primer tramo fue de 5.69 metros/día calendario. Salió de esta estación de Francos Rodríguez el día 5 de Abril, de forma que tardó 30 días calendario, aunque el paso propiamente dicho por la estación fue bastante más rápido. Se aprovechó el que en la estación de Valdezarza no había trenes descargando para sacar por ella la tuneladora "La Adelantada" del tramo Pitis - Valdezarza que llegó a Valdezarza el día 10 de Marzo, donde se desmontó para sacarla y fue trasladada al Campo de las Naciones para comenzar el tramo Campo de las Naciones - Aeropuerto. La tuneladora analizada "Paloma" salió como decimos el 5 de Abril de 1998 de la estación de Francos Rodríguez, en el anillo 715, y llegó a la estación de Guzmán el Bueno, en el anillo 1391, el día 15 de Junio de 1998 tras construir 1003 metros de túnel en 71 días de calendario.

La estación de Guzmán el Bueno fué la única de todas las estaciones construida en caverna, por el método alemán. La máquina llegó con la caverna ya construida, si bien aún se estaban construyendo los cañones de acceso, lo que obligó a una complicada disposición de cintas para la extracción de escombros de estos cañones. Salió de la estación de Guzmán el Bueno el día 6 de Julio de 1998, es decir, que sólo se tardó 21 días en atravesarla. Desde esta estación hasta la última, de Islas Filipinas, el trazado describe una curva cerrada de radio 295 metros, obligada por los azimutes de ambas estaciones origen y fin. El radio de esta curva obligó a una complicada maniobra en la tuneladora, y pese a ello los avances fueron excelentes en ese tramo, llegando a batir el record mundial para una EPB de su diámetro. El anillo de salida de Guzmán el Bueno fué el 1400, y el de entrada en Islas Filipinas el número 2296, donde llegó la máquina el día 15 de Septiembre de 1998. En los 1328 metros de túnel se tardó tan sólo 71 días, igual que en el tramo anterior de 1003 metros. En este tramo en curva se llegó a hacer 618 metros en 31 días.

El desmontaje de la máquina se realizó dentro de la estación de Islas Filipinas, que ya estaba construida. Este desmontaje pieza a pieza fué otro verdadero record, y se realizó en 34 días de calendario. La máquina fué desmontándose, llevándose hacia atrás cada pieza por el túnel construido, y sacando las piezas por un pozo construido en la calle Juan XXIII.

Tiempos de excavación y colocación de anillo

En la figura 3 puede verse el diagrama de la duración de la excavación de cada anillo, en minutos. Se ha superpuesto en el diagrama una media móvil de 50 anillos, con lo que puede verse la tendencia. Comenzando con duraciones de casi hora y media en los primeros días de excavación, la duración se estabilizó a lo largo de la obra en unos 30 a 40 minutos. En los datos de máquina aparecen anillos con duraciones muy largas, que corresponden a retrasos en trenes o a alguna avería. En estos casos la duración se ha limitado en el gráfico, considerándola de 100 minutos.



Los tiempos de colocación de anillo se indican en la figura 4, limitando también en el gráfico la duración a 100 minutos. Se ha añadido una media móvil de 50 anillos, y puede verse que la obra comenzó con unas duraciones de 80 minutos en colocación de anillo, y que a lo largo de la misma la efectividad de los equipos y su ajuste paulatino fué reduciendo el tiempo hasta los 30-40 minutos.

Desgastes de dientes y rastrillos

La cabeza cortadora de la máquina tiene un total de 214 herramientas de corte.

Herramientas de corte. Herrenknecht "Paloma"

Herramienta	Número	Ancho de corte mm
Cuchillas	190	100
Pinocho central	1	580
Picas pinocho central	5	110
Copy-cutters (sobrecortadores)	2	170
Rastrillos perimetrales	16	420
Total	214	

TABLA 3.

EPB Paloma. Línea 7. Cambio de dientes y rastrillos por desgastes

Fecha	Anillo de cambio	Anillos construídos	Rastrillos sustituídos	Dientes sustituídos	
14 Nov 97	134	134	16	50	
15 Dic 97	246			90	
7 Ene 98	286	152	16	90	
3 Feb 98	437	151	16	10	
14 Feb 98	525			21	
21 Feb 98	596	159	16	78	
6 Mar 98	712	156	16	190	Estación Francos Rodríguez
14 Abr 98	763		1		
28 Abr 98	909	197	16	2	
10 May 98	1005	96	16	12	
27 May 98	1140	135	16	18	
8 Jun 98	1296	156	16		
15 Jun 98	1390	94	16	190	Estación Guzmán el Bueno
11 Jul 98	1463	73	16	16	
23 Jul 98	1631	168	16		
15 Ago 98	1874	234	16	10	
1 Sep 98	2116	242	16		
Total			225	777	

Además la máquina está provista de 22 huecos para la colocación de cortadores de disco doble, que pueden ser utilizados también para la colocación de cinceles basculantes.

La arena sílicea de Madrid causa un gran desgaste en las picas y dientes cortadores. Se han cambiado todas las picas en las estaciones de Francos Rodríguez y Guzmán el Bueno, y en ocasiones, como en el anillo 286, en terreno era tan abrasivo que en tan sólo cuarenta anillos fué necesario cambiar 90 dientes. (Tabla 3).

Consumo de energía eléctrica

La potencia instalada en la máquina, de motores hi-

Nuevos datos sobre el comportamiento de las tuneladoras EPB en la ampliación 1995-99 del Metro de Madrid

dráulicos servidos por una central hidráulica a bordo, es la siguiente:

Herrenknecht "Paloma". Relación de potencias eléctricas

Accionamiento rueda de corte	5 x 400 Kw	2.000 Kw
Accionamiento tornillo sinfín	1 x 400 Kw	400 Kw
Resto de bombas hidráulicas		
Cintas transportadoras	3 x 30 Kw	90 Kw
Ventilación	2 x 55 Kw	110 Kw
Grúa pórtico	1 x 200 Kw	200 Kw
Bombeo		100 Kw
Iluminación		50 Kw
Total:		2.950 Kw

TABLA 4.

EPB Paloma. Línea 7. Consumo de energía eléctrica

Periodo		Kwh	Pta	Pta./Kwh	Anillos excavados	
Desde	Hasta				excavados	Pta/anillo
17/09/97	16/10/97	230.400	3.875.874	16,82	47	82465
16/10/97	18/11/97	282.150	4.345.394	15,40	80	54317
18/11/97	16/12/97	381.150	5.083.196	13,33	109	46635
16/12/97	20/01/98	277.650	3.797.944	13,68	78	48692
20/01/98	17/02/98	477.000	5.691.474	11,93	216	26349
17/02/98	17/03/98	374.400	4.967.676	13,27	172	28882
17/03/98	20/04/98	267.750	3.640.958	13,60	106	34349
20/04/98	20/05/98	485.100	5.658.959	11,66	248	22818
20/05/98	16/06/98	514.800	6.051.095	11,75	320	18910
16/06/98	16/07/98	284.850	3.941.072	13,84	125	31528
16/07/98	18/08/98	686.250	8.009.939	11,67	354	22627

La energía eléctrica consumida en la obra en total fué de 5.179.050 Kwh, lo que representa un costo de 69.961.099 Pta. Dado que el transporte interior y posterior evacuación de las tierras se ha efectuado con maquinaria diesel, es obvio que la mayor parte del consumo eléctrico ha correspondido a la tuneladora, pues otras necesidades eléctricas tales como la grúa pórtico, la ventilación, el bombeo y alumbrado han representado, de acuerdo a un simple cálculo de potencias instaladas, un 15% de la potencia total consumida. Por tanto a efectos de excavación propiamente dicha puede decirse que en la ejecución de los 3.440 metros de túnel se han consumido un total de 5.197.950 Kwh X 0,85 = 4.418.257 Kwh. De acuerdo con el planteamiento y con los datos disponibles se obtienen los siguientes resultados:

Consumo eléctrico medio por m. de túnel excavado:
5 197.950 Kwh / 3.440 m. = 1.511 Kwh /m

Teniendo en cuenta que el precio de un Kw/h es de 13,459 Pta, el costo de un metro de túnel excavado resulta:

$$1.511 \text{ kwh} \times 13,459 \text{ Pta./Kwh} = 20,338 \text{ Pta./m.}$$

y el de un anillo:

$$20,338 \text{ Pta./m.} \times 1,5 \text{ m./anillo} = 30,511 \text{ Pta./anillo.}$$

El consumo eléctrico medio correspondiente a la excavación propiamente dicha ha sido:

$$4,418,257 \text{ Kwh} / 3.440 \text{ m.} = 1.284 \text{ Kwh/m.}$$

$$4\ 418,257 \text{ Kwh} / 2.293 \text{ anillos} = 1.926 \text{ Kwh /anillo}$$

Estos valores medios varían positiva o negativamente en función de los rendimientos alcanzados. En la Tabla 4 se han relacionado los consumos y los anillos excavados en el mismo periodo de tiempo.

Consumo de espuma

La máquina tiene 6 orificios para inyección de agua con espumas tensoactivas o con otro tipo de polímeros por la cabeza de corte. La adición de estos materiales al suelo excavado es prácticamente obligatoria para poder excavar con facilidad.

A lo largo de toda la obra se ha experimentado con materiales tensoactivos de distintas marcas, con resultados en ocasiones parecidos. Ha sido CONDAT, con un precio sensiblemente menor, el mayor suministrador. En este resumen sólo se tienen en cuenta los litros de tensoactivo consumidos por metro cúbico excavado y su repercusión económica por metro de túnel ejecutado.

EPB Paloma. Línea 7. Litros de tensoactivos consumidos y costes

Marca	Litros	Pta
CLB F4/L (CONDAT)	128.000	25.200.000
CLB F4 (CONDAT)	33.000	12.375.000
AN45 (RHODIA)	10.993	3.627.690
TOTAL	171.993	41.202.690

Los índices de consumo han sido los siguientes:

Por metro cúbico excavado en banco:

$$171,993 \text{ litros} / 236,672 \text{ m}^3 = 0,726 \text{ litros /m}^3$$

El costo por metro de túnel excavado es de:

$$41,202,690 \text{ Pta} / 3440 \text{ m.} = 19,978 \text{ Pta /m.}$$

y por anillo:
 $19.978 \text{ Pta/m.} \times 1,5 \text{ m/anillo} = 29.967 \text{ Pta/anillo.}$

Consumo de grasa en junta de cola

Tres anillos de cepillos metálicos cierran el hueco entre el escudo y el anillo de dovelas, y entre cada anillo de cepillos se inyecta un volumen de grasa muy consistente que realiza el sellado.

La grasa de cola consumida durante toda la obra ha tenido un suministrador único, CONDAT. Se han consumido dos tipos de grasa, la WR - 90 para rellenar los espacios libres entre cepillos bien en los pasos de estación o cuando se montan los cepillos nuevos y la WR-89 durante la excavación.

El consumo de grasa se suele medir por m² de superficie sellada o engrasada, referida al diámetro exterior de las dovelas (9,07 m.) que es la superficie sobre la que se deslizan los cepillos de cola. En este caso la superficie ha sido $3.440 \text{ m} \times \pi D = 3.440 \times 3,14 \times 9,07 = 3.440 \times 28,48 = 97.981 \text{ m}^2$. El consumo de grasa ha sido el que se detalla en la siguiente tabla:

**EPB Paloma. Línea 7.
 Grasa de cola consumida y coste**

Fecha	Kg WR-89	Kg WR-89	Kg WR-90	Pta
31 Jul 97	18.860	1.610	690	4.349.875
19 Nov 97	9.430	690		2.098.175
30 Ene 98	13.570	1.150		3.019.325
12 Mar 98	16.560	1.380	2.300	4.196.350
19 May 98	15.870	1.610		3.531.075
16 Jun 98	16.560	1.380	2.300	4.196.350
22 Jul 98	15.870	1.610		3.531.075
5 Ago 98	15.870	1.610		3.531.075
19 Ago 98	18.630	1.610		4.145.175
Total	141.220	12.650	5.290	32.598.475

El valor final de la factura fué de 33.038.005 Pta. El consumo medio de grasa ha sido de 153.870 Kg. / 97.870 m² = 1,57 Kg / m², que por anillo representa $1,57 \times 28,48 \times 1,5 = 67,82 \text{ Kg / anillo}$. La repercusión económica por metro de túnel excavado ha sido de $33.038.005 \text{ Pta} / 3.440 \text{ ml} = 9.604 \text{ Pta / m}$.

Presión de tierras en la cámara.

Una vez excavado el terreno y mezclado con la espuma, dentro de la cámara de excavación se mezcla formando un fluido espeso, en pura teoría del funcionamiento EPB (Earth

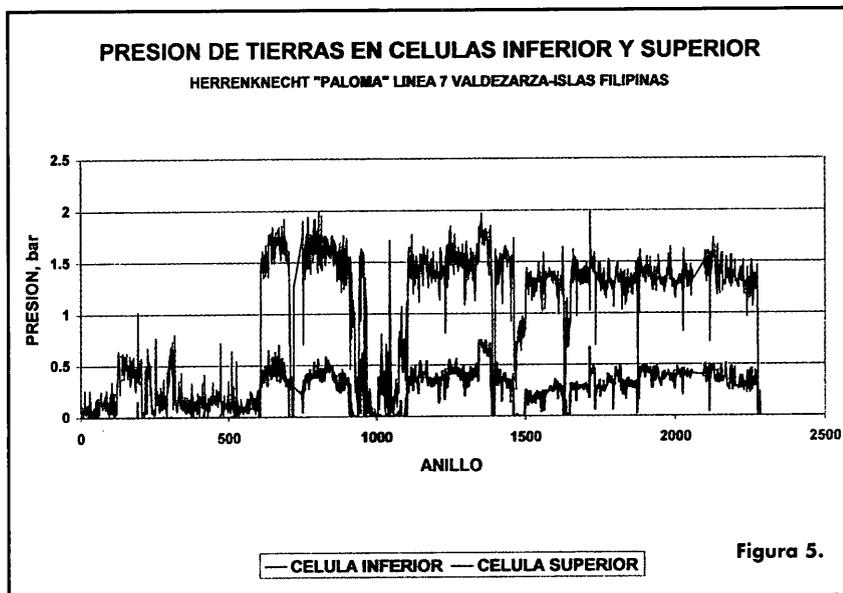


Figura 5.

Pressure Balance, presión de tierras). Las presiones de esta mezcla se miden por medio de las 7 células de medida de presión total que la máquina lleva instaladas en la cámara. La disposición es por parejas, dos en la parte inferior, dos en la zona media, dos más arriba y una superior.

En la figura 5 pueden verse las presiones medidas a lo largo de la construcción del túnel. Se han graficado las presiones de las células inferiores, que oscilan entre los 1.5 y 2.0 bares, y la superior, del orden normalmente de 0.5 bares.

4. DATOS SOBRE LA TUNELADORA EPB MITSUBISHI Ø 9.4 LINEA 7 "ADELANTADA" ARROYOFRESNO A VALDEZARZA

La topografía de Madrid en esa zona ha obligado también, como se ve, a un trazado malo para la explotación de Metro, con rampas y pendientes del 4% (máximo admisible para los trenes de Metro). En la misma figura 2 anterior, estereofotos de la traza, puede verse bien la topografía de la zona. El trazado comienza en la estación de Pitis, donde se ha construido un intercambiador con Cercanías de RENFE. Desde este punto baja hasta la estación de ArroyoFresno, situada en el PAU del mismo nombre, y que se construyó pero no se ha puesto en servicio hasta que las viviendas del PAU estén terminadas. Toda esta interestación discurre en arenas tosquizas y toscos arenosos. Desde ArroyoFresno hasta las siguiente estación, Lacoma, el trazado sube con la máxima pendiente, también en arenas tosquizas y toscos arenosos. De Lacoma hasta la estación de Avenida Ilustración el trazado es casi horizontal, y el terreno ves similar, arenas tosquizas y toscos arenosos. Desde la estación de Avda. Ilustración hasta la de Peñagrande el trazado sube con el mismo perfil geotécnico. Desde Peñagrande hasta la siguiente estación, Antonio Machado, el trazado vuel-

ve a bajar, cruzando bajo la vaguada de la calle casi en superficie y atravesando zonas de rellenos antrópicos. Desde Antonio Machado hasta la estación de Valdezarza (que pertenece al siguiente Contrato) el trazado vuelve a subir en arenas tosquizas y toscos.

El pedido de la máquina se firmó entre FCC y la empresa NFM, constructora del equipo bajo licencia de Mitsubishi, el 2 de Abril de 1996. El primer embarque se hizo el 2 de Diciembre de 1996, llevando por transporte fluvial y marítimo las piezas al Puerto de Sagunto, donde la última llegada fue el 19 de Enero de 1997. Problemas con el transporte terrestre de Sagunto a Madrid hicieron que las piezas llegaran a obra el 14 de Marzo de 1997. El autor de este capítulo no puede resistir la tentación de contar al lector una anécdota. Dos meses de arduas gestiones hicieron falta para tener todos los permisos de transporte, de las Demarcaciones de Carreteras de Valencia y Castilla La Mancha, por los estudios que hubo que hacer sobre la resistencia de las obras de fábrica, porque la pieza más pesada pesaba más de 80 Tn. Se decidió finalmente que en la estructura del km 61 en Fuentidueña de Tajo la pieza no podía pasar por la estructura de sentido a Valencia, y que sería necesario desviar el tráfico para que pasara por el nuevo viaducto de la otra calzada. El autor, que estaba filmando en vídeo este transporte, no filmó el paso sobre la estructura en cuestión, porque una reunión en Madrid le hizo volver a la oficina. Se enteró el día siguiente que por un error de coordinación entre los distintos organismos y el transportista la pieza pesada pasó por la estructura vieja sin que ocurriera nada. Son las cosas de nuestro país. El primer anillo se construyó en la estructura de empuje de la estación Arroyofresno el día 23 de Abril de 1997. Desde el pedido al primer anillo transcurrieron 12 meses y medio, con dos meses perdidos en el transporte por carretera. El autor de estas páginas no puso demasiado énfasis en evitar estos retrasos en los transportes, que se hubieran resuelto fácilmente, porque el pozo de ataque aún no estaba terminado.

El coste del equipo, con los trenes e instalaciones, según datos del Contratista principal FCC, fué el reflejado en la Tabla 5.

Paso de Estaciones

La tuneladora salió de la Estación de Arroyofresno. La siguiente estación, Lacoma, se atravesó en túnel, poniendo anillos, ya que aún no se había terminado de excavar el recinto entre pantallas. La siguiente estación, Avenida de la Ilustración, se atravesó también en túnel. La siguiente, Peñagrande, estaba ya excavada, y se llegó a ella el 27 de Noviembre, a los 1.811 metros y 208 días ca-

TABLA 5.

EQUIPO	Millones Pta 1996
Escudo EPB Mitsubishi - NFM1,354.0	
Backup	382.0
Locomotoras y Tandem Schoma 50 Tn (4+4)	357.0
Vagonetas Muhlhauser (31)	107.0
Pórtico 25 Tn	23.1
Cintas transportadoras C4-C5-C6	18.3
Silo mortero	9.2
Ventilador Korfmann	5.6
Bomba inyectora	1.2
Locomotora Schoma CFL 180	18.3
Ventilador Korfmann	5.6
Total	2,287.0
Otros costes adicionales	
Transporte	60.0
Seguros	50.0
Mejoras y equipos adicionales	81.0

lendario del comienzo. El paso se hizo, como en todos los pasos de máquina de la actual ampliación, preparando en la solera de la estación la cuna de paso, con forma circular. En la cuna se dejaron embebidos dos perfiles doble T de ala ancha sobre los que iba deslizando el escudo, que avanzaba empujado por sus propios gatos, colocando las 3 dovelas inferiores. El paso de la estación terminó el 16 de Diciembre de 1997, a los 19 días de entrar, sin ninguna incidencia. La siguiente estación, Antonio Machado, que se acababa de cambiar de posición por petición de los vecinos del inmueble sobre la que estaba situada, tampoco estaba excavada, y se pasó en túnel. Finalmente, la máquina salió en el pozo de la estación de Valdezarza entre los días 10 y 20 de Marzo, siendo desmontada para su extracción y transportada al pozo de ataque situado en los recintos Feriales del Campo de las Naciones, donde comenzó el nuevo tramo Feriales - Aeropuerto de Barajas que se había adjudicado a la UTE FCC - Dragados el 24 de Febrero de 1998.

Las fechas de llegada y salida de cada estación fueron las consignadas en la Tabla 6.

TABLA 6.

ESTACIÓN	DISTANCIA Metros	FECHA ENTRADA	FECHA SALIDA	FORMA DE PASO
ARROYOFRESNO		COMIENZO	5 May 97	
LACOMA	588	16 Ago 97	26 Sep 97	En túnel, con dovelas
ILUSTRACIÓN	560	26 Oct 97	3 Nov 97	En túnel, con dovelas
PEÑAGRANDE	431	27 Nov 97	16 Dic 97	Arrastre
ANTONIO MACHADO	536	21 Ene 98	28 Ene 98	En túnel, con dovelas
VALDEZARZA	771	10 Mar 98	FIN OBRA	

Rendimientos

El túnel comenzó el 23 de Abril de 1997 y terminó sus 3.231 metros el 9 de Marzo de 1998, a los 310 días de calendario. El avance medio a origen es de 10.42 metros/día calendario. Se colocaron en total 2.154 anillos durante los 216 días de trabajo de la máquina, lo que da un rendimiento medio de 10 anillos por día de trabajo, 15 metros de túnel terminado. El rendimiento, pues, ha sido excelente.

MES	ANILLOS	METROS
May 97	77	115,5
Jun 97	67	100,5
Jul 97	133	199,5
Ago 97	187	280,5
Sep 97	82	123,0
Oct 97	363	544,5
Nov 97	300	450,0
Dic 97	148	222,0
Ene 98	343	514,5
Feb 98	354	531,0
Mar 98	102	153,0
TOTAL	2.155	3.233,0

Desgastes

El suelo de Madrid, por ser de origen granítico y tener mucho cuarzo, es sumamente abrasivo. Los desgastes han sido grandes. Los elementos cortadores de la cabeza de esta máquina son 265 en total, 152 cuchillas y 113 picas, de las que 25 sustituyen a los 25 cortadores de disco cuando éstos no están instalados. Son los siguientes:

- ▼ 128 Cuchillas de corte normales (C3), situadas en los radios y semirradios de la cabeza, junto a las aberturas de entrada, y que son las básicas para la excavación.
- ▼ 16 Cuchillas de corte de gálbo (C1), situadas en los extremos de los radios y semirradios de la cabeza, y que son las básicas para la excavación perimetral y que el escudo pueda avanzar.

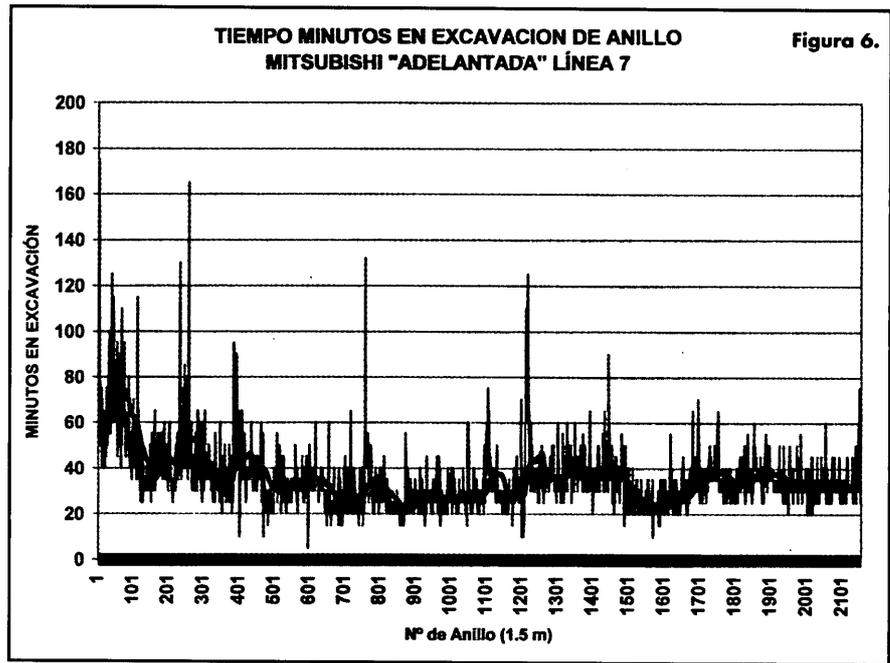


Figura 6.

- ▼ 8 Cuchillas de corte largas (C2), situadas en los puntos medios de los radios de la cabeza, y que deberían haber sido situadas más abajo, ya que la zona en que los semirradios acaban es una gran longitud sin dientes de corte donde se han producido graves desgastes.
- ▼ 26 Picas de corte (P1) situadas en el pinocho o parte central de la cabeza.
- ▼ 25 Picas de corte (P2) situadas en los alojamientos de los cortadores de discos cuando éstos no están instalados.
- ▼ 62 Picas de corte (P3) situadas en la parte central de los radios y semirradios de la cabeza.

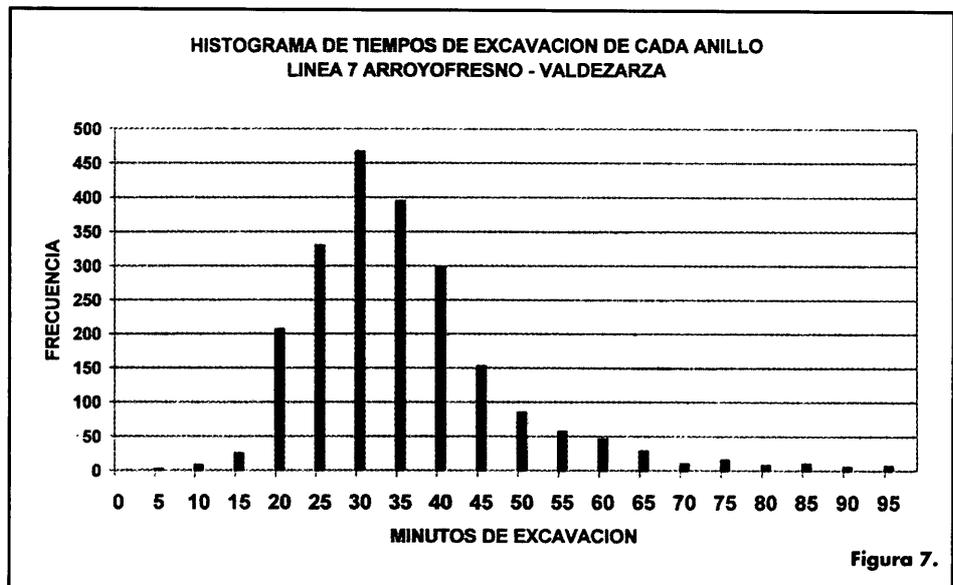
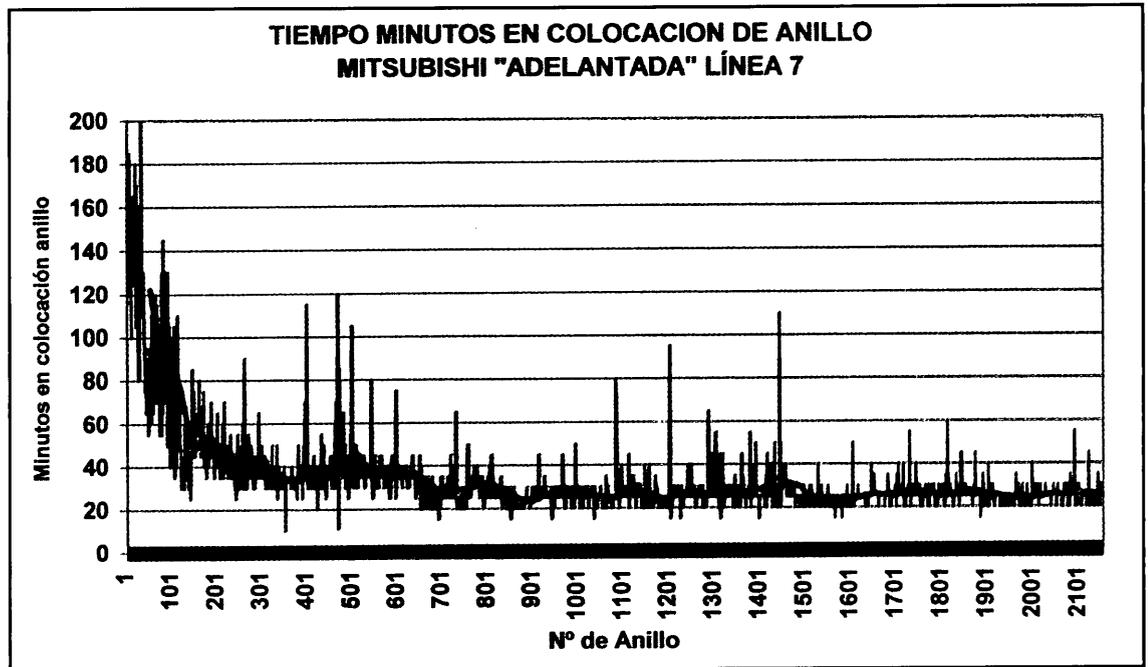


Figura 7.

Figura 8.



Los desgastes han hecho necesario realizar 344 cambios de los C1, 120 de los C2 y 1203 de los dientes C3. En 1514 anillos (2271 metros), ha habido que cambiar 1923 elementos de corte, fundamentalmente las cuchillas tipo C3, que son las más abundantes y que más trabajan, y de las que ha habido que cambiar 1.203

uds. Los cambios necesarios han dado los desgastes medios siguientes:

**MITSUBISHI LINEA 7.
DESGASTES MEDIOS DE LAS HERRAMIENTAS**

Herramienta	Número	Desgaste, uds / ml de túnel
Cuchillas de corte de gálbo (C1)	16	0,15
Cuchillas de corte largas (C2)	8	0,053
Cuchillas de corte normales (C3)	128	0,53
Picas de corte (P1)	26	0,0211
Picas de corte (P2)	25	0,0511
Picas de corte (P3)	62	0,04

Los tiempos de excavación de los 2.153 anillos han variado desde 25 a 175 minutos, con una media de 35,6 minutos y una moda de 30 minutos. La desviación típica es de 14.2 minutos.

En la figura 6 se observa perfectamente cómo el tiempo de excavación va disminuyendo conforme va aumentando el número de anillos construídos, al ir avanzando la curva de aprendizaje del equipo. El histograma de los tiempos de excavación es el dado en la figura 7.

El tiempo de colocación del anillo de dovelas varía de 10 a 245 minutos, con una media de 33,5 minutos, una moda

de 25 minutos y una desviación típica de 20.5 minutos. El gráfico de tiempos de colocación de cada anillo es el de la figura 8. El tiempo de colocación de dovelas también va disminuyendo al ir aumentando el número de anillos construídos, hasta llegar a un valor cercano a los 25 minutos. El tiempo especificado para el equipo era de 21 minutos. El histograma de los tiempos de colocación de los anillos de revestimiento es el que aparece en la figura 9.

Las presiones de tierras utilizadas durante la construcción del túnel se indican en la figura 10. En ella aparecen las presiones medidas en las células inferior y superior de la cámara de suelo.

El empuje total aplicado al escudo aparece en la figura 11, y el par aplicado a la cabeza de corte se indica en la figura 12. ■

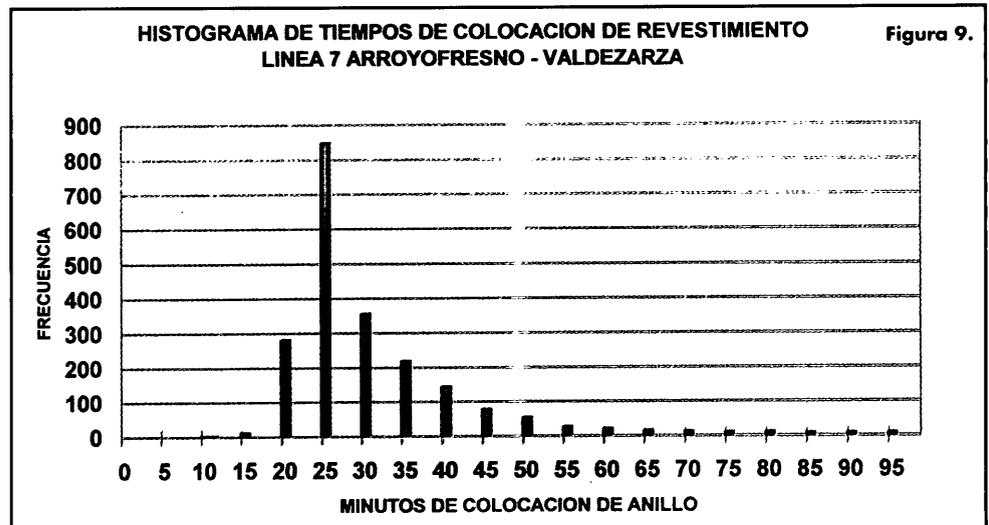


Figura 9.

**PRESIONES DE TIERRAS
LINEA 7 ARROYOFRESNO-VALDEZARZA**

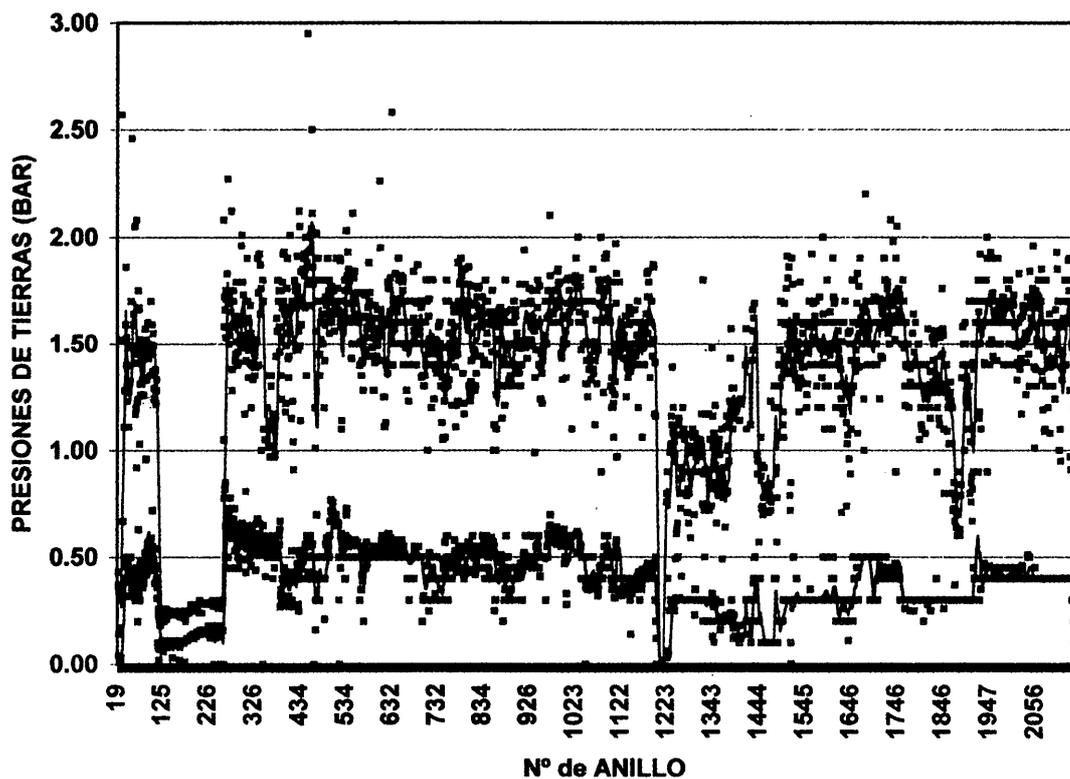


Figura 10.

**EMPUJE TOTAL DEL ESCUDO
LINEA 7 ARROYOFRESNO-VALDEZARZA**

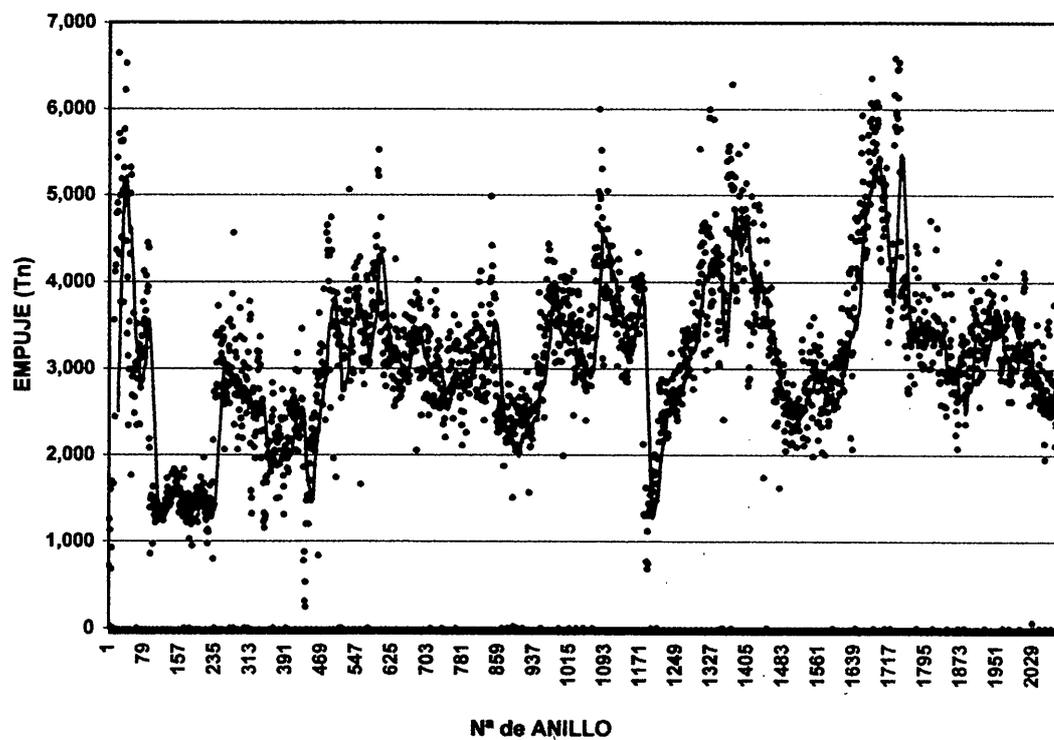
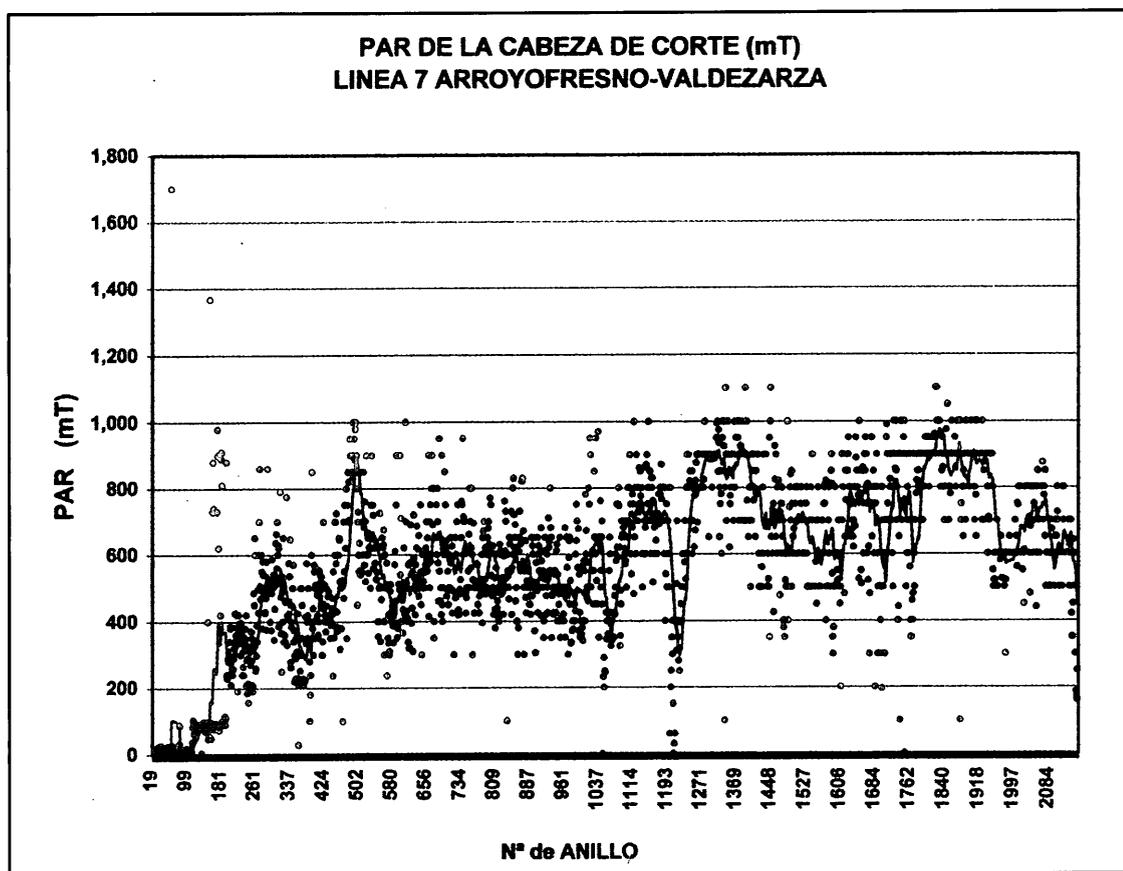


Figura 11.

Figura 12.



Inmateinsa
INGENIERÍA Y MATERIALES TÉCNICOS INDUSTRIALES, S.A.

Pablo Serrano, 13, Posterior
Tels.: 91 381 36 30 - 91 381 34 50
Fax: 91 381 29 10
28043 MADRID

“25 AÑOS DE EXPERIENCIA”
EN AUSCULTACIÓN DE OBRAS DE INGENIERÍA

- SISTEMAS DE DETECCIÓN DE CALOR (FUEGO)
“SECURITON”
- CO-OPACIDAD-METEOROLOGÍA
- SISTEMAS C C T V “COMERSON”
- SISTEMAS DE TELECONTROL Y TELEGESTIÓN
“CECOM”

