

## Los Túneles del Metro de Valencia en Venezuela

Gianfranco Perri <sup>a</sup>, Giuseppe Siciliano <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Profesor de la Universidad Central Venezuela – Ingeniero Consultor – Caracas Venezuela [gperri@cantv.net](mailto:gperri@cantv.net)

<sup>b</sup> Ghella Sogene C.A. – Caracas Venezuela [gsiciliano@ghellagroup.com](mailto:gsiciliano@ghellagroup.com)

### Riassunto

Si riassume l'esperienza maturata durante la costruzione della prima tappa della Línea 1 della Metropolitana della città de Valencia en Venezuela. I circa 5 Km di galleria in doppio binario con diametro interno di 9.42 metri, sono stati scavati con EPBS Lovat e rivestiti con conci (6+1) universali in calcestruzzo armato spessi 40 cm e lunghi 150 cm. I terreni scavati sotto falda e sotto coperture comprese tra i 7 ed i 20 metri erano costituiti da depositi alluviali e lacustri essenzialmente fini, composti da argille sabbiose con intercalazioni frequenti di orizzonti piú incoerenti di sabbie argillose. Si presentano dati riguardanti le caratteristiche della TBM ed i parametri di scavo, poi della produzione in fase di scavo e di rivestimento, quindi informazioni sugli assestamenti rilevati durante gli scavi.

### 1. El Metro de Valencia

La Línea 1 del Metro de Valencia está siendo construida por Ghella Sogene C.A., empresa integrante del Grupo Ghella, con proyecto de Geomecdata Ingeniería de Túneles C.A. El primer tramo inicia al Sur con la estación Monumental y se extiende a lo largo de la Avenida Bolívar hasta la estación Miranda, con un recorrido de doble vía de aproximadamente 5 km de longitud.

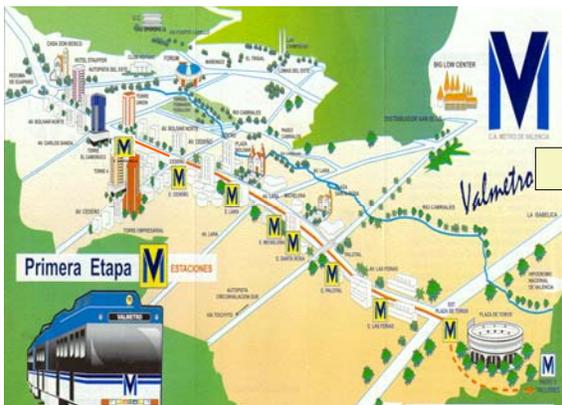


Fig 1: Línea 1 del Metro de Valencia

El sector entre las estaciones Monumental y Las Ferias está construido en trinchera cubierta y la parte restante está

siendo construida en subterráneo, mediante el uso de una máquina escudada tipo EPBS, con diámetro de excavación de 9519 m y sección de excavación de 71,166 m<sup>2</sup>.

Entre las estaciones Las Ferias y Miranda, del tramo en construcción, están previstas otras 5 estaciones (Palotal – Santa Rosa – Michelena – Lara – Cedeño), las cuales han sido construidas previamente a la excavación del túnel, con el sistema *Cut and Cover* invertido. La Línea 1 se completará en segunda etapa con otras 5 estaciones, hasta Guaparo, extremo Norte de la ciudad (Fig 1).

### 2. El Subsuelo

La ciudad de Valencia se desarrolla en la llanura del lago que lleva su mismo nombre y los terrenos interceptados por la excavación del túnel están constituidos por sedimentos cuaternarios de granulometría media-fina, compuestos por intercalaciones de arcillas, arcillas limosas, arenas de arcillosas a limosas, con esporádicos niveles de arenas limpias. Los niveles arcillosos son los más representativos a lo largo del trazado, mientras que las otras unidades están presentes con morfología de lentes (Fig 2).

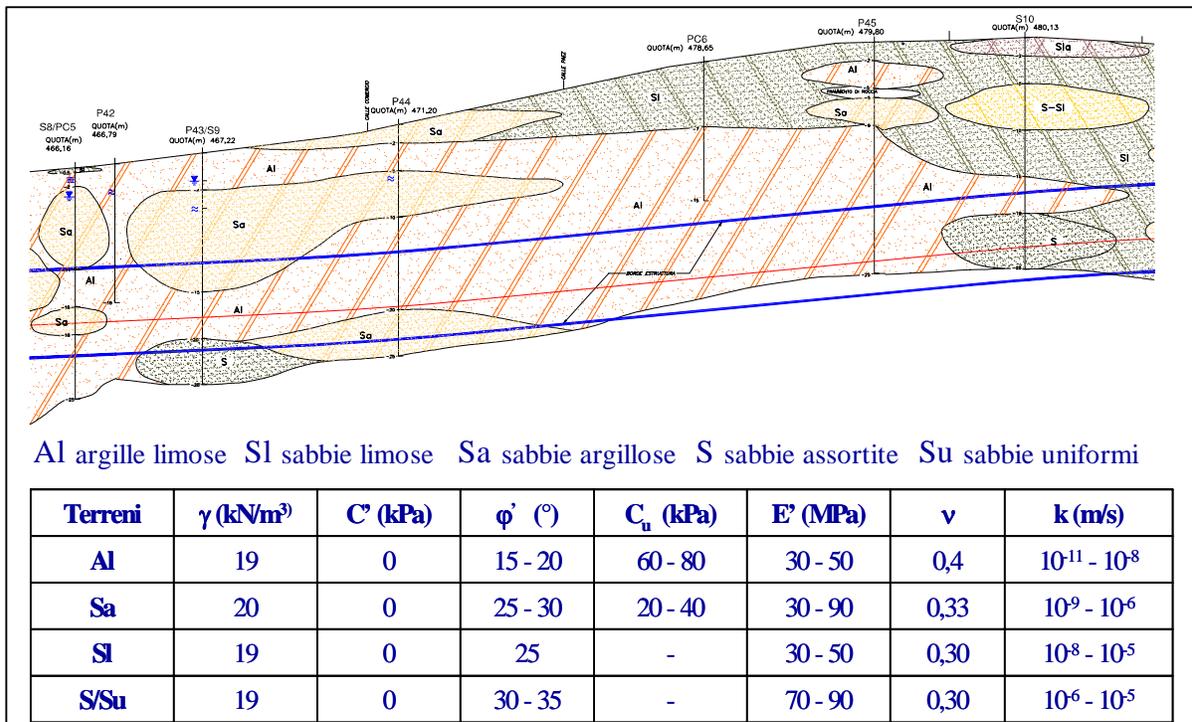


Fig 2: Caracterización Geotécnica del Subsuelo de la Línea 1 del Metro de Valencia

El nivel freático de los acuíferos superficiales presentes en los depósitos cuaternarios a lo largo del alineamiento se recarga constantemente, por las lluvias y en por los cursos de agua presentes en el área y los piezómetros instalados a lo largo del trazado muestran que la tabla de agua se encuentra a profundidad entre 3 y 8 m a lo largo de los tramos de línea en construcción .

Dentro del marco geotécnico descrito, ha sido bastante natural seleccionar la metodología de excavación mecanizada según el método EPBS el cual efectivamente posee el principal campo de aplicación en terrenos de limitada a ninguna capacidad de auto soporte, con granulometrías típicas de arcillas y limos con arenas, iguales a los que caracterizaban al subsuelo a excavar.

Por otro lado, problemas geotécnicos (contraindicaciones) que se podían presentar durante la fase de excavación con EPBS estaban los ligados a una eventual tendencia al comportamiento pegajoso *sticky behaviour* y en este caso pudieron ser descartados.

### 3. El Túnel

El túnel de 4221 mm de radio interno neto (Fig 3) está siendo construido de manera totalmente mecanizada, mediante el uso de una maquina TBM de fabricación LOVAT escudada y con la posibilidad de controlar las presiones en el frente de excavación mediante la adecuada aplicación de presiones de estabilización y control (EPBS).

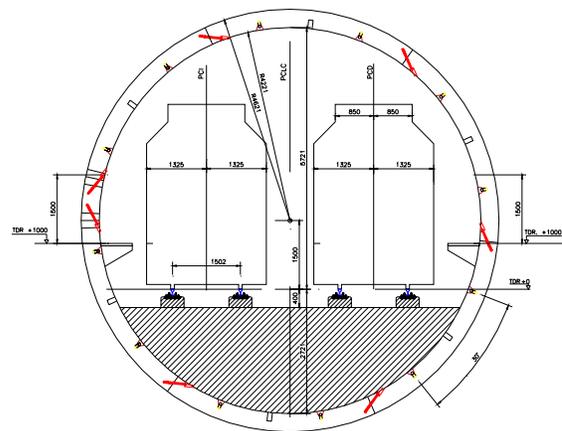


Fig 3: Geometría de la sección del túnel

El túnel esta siendo soportado y revestido mediante secuencia única integrada a la excavación, con anillos prefabricados en concreto armado largos 1,5 m, compuestos de 7 (6+1 clave) elementos de espesor igual a 40 cm y diámetro interno igual a 8,442 m.

**MEZCLA CONCRETO ANILLOS (1 m<sup>3</sup>)**

<i>Materiales</i>	<i>Cantidades</i>
<i>Cemento</i>	<i>360 Kgs</i>
<i>Arena (Máx. 3/8")</i>	<i>953 Kgs</i>
<i>Piedra (Máx. 1")</i>	<i>1075 Kgs</i>
<i>Aditivo</i>	<i>3,60 Lts</i>
<i>Agua</i>	<i>135 Lts</i>

**Características del diseño**

<i>agua / cemento</i>	<i>0,38</i>
<i>Densidad (Kgs/m<sup>3</sup>)</i>	<i>2526</i>

El anillo diseñado es de tipo universal, es decir idóneo ya sea para seguir el curso de las curvas verticales y horizontales eventualmente presentes a lo largo del trazado (hasta con un Rmin = 300 m), ya sea para continuar la excavación en línea recta, con la posibilidad también de corregir eventuales desviaciones propias de la máquina de excavación.

El confinamiento del terreno circundante la excavación está garantizado en general por el escudo de acero de la TBM, luego al frente por la presión ejercida por la cabeza de la TBM en presión (EPB) y en la cola, a través de una inyección a presión de mezcla de cemento que se ejecuta contemporáneamente con el avance de la máquina a la salida de cada anillo con el propósito de garantizar el llenado del vacío anular existente entre la parte externa del anillo de revestimiento y el perfil de excavación logrando al mismo tiempo el confinamiento total del anillo de revestimiento.

**MEZCLA MORTERO INYECCIÓN (1 m<sup>3</sup>)**

<i>Materiales</i>	<i>Cantidades</i>
<i>Cemento</i>	<i>200 Kgs</i>
<i>Arena Extra Fina (Máx. N° 8)</i>	<i>1010 Kgs</i>
<i>Polvillo (Máx. 1/4")</i>	<i>433 Kgs</i>
<i>Aditivo</i>	<i>1,60 Lts</i>
<i>Agua</i>	<i>380 Lts</i>

**Características del diseño**

<i>agua / cemento</i>	<i>1,90</i>
<i>Densidad (Kgs/m<sup>3</sup>)</i>	<i>2025</i>

**Equipo de inyección**

*PUTZMEISTER WERK  
D 72629 AICHTAL 2 / STUTTGART  
TIPO KOV 1020 DUO  
PRESION MÁXIMA: 95 bar*

La impermeabilidad del revestimiento se garantiza mediante sellos plásticos ubicados en los alojamientos dispuestos para este fin sobre el contorno, en proximidad de la cara externa, de cada elemento.

**4. Las Características de la TBM**

La máquina excavadora (TBM) de escudo completo de fabricación LOVAT utilizada para este proyecto, el Modelo RME375SE/12500, tiene un diseño de su cabeza cortadora (Fig 4) para trabajar con frente cerrado y está equipada para la extracción del material mediante un tornillo sin fin, ubicado dentro de la sección para permitir la excavación en modo de presión balanceada en el frente (EPB).

La estructura básica de la cabeza cortante prevé aberturas que son capaces de cerrarse a través de una válvula que controla las puertas de entrada permitiéndose al operador ajustar la cantidad de abertura de la cabeza cortadora dependiendo de las condiciones del terreno: en arenas bajo el

nivel freático, las aberturas pueden ser reducidas para controlar el flujo entrante del terreno, mientras que en arcillas las aberturas pueden ser agrandadas para facilitar la entrada libre de material dentro de la cámara de la cabeza cortadora.

Dentro del perímetro cortante están alojadas las diferentes herramientas cortantes, distribuidas para maximizar la efectividad de excavación: 228 dientes de rastrillos y 88 escarificadores.

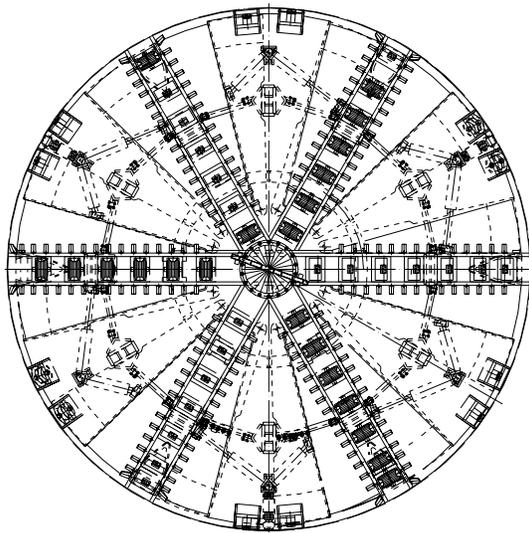


Fig. 4: Cabeza cortadora de la TBM - EPBS

Adicionalmente a los dientes de rastrillos y a los dientes escarificadores se pueden alojar también discos cortadores intercambiables que pueden ser instalados en las mismas aberturas que se usan para los dientes escarificadores. Estos discos serían usados para romper los eventuales cantos (no previstos a ser encontrados en esta obra).

Tan importante como las herramientas que cortan el terreno, son los agentes acondicionadores que son agregados al terreno en la cámara del frente para aplicar y mantener la presión necesaria y para ello es fundamental la presencia y el buen funcionamiento de la junta para el fluido de rotación cuya función es transferir este fluido

desde el escudo fijo a la cabeza cortadora rotante.

El operador puede inyectar a presión y dosificar: espuma, polímeros, agua, o cualquier combinación de acondicionadores del terreno, a cualquiera o todos los puertos de inyección.

El adecuado uso del acondicionamiento del terreno es la llave al éxito de la operación de EPB en la TBM ya que mediante la regulación de la inyección de los agentes acondicionadores del terreno en el frente, el operador puede mantener un mayor tiempo de mezclado el cual asegurará que habrá una buena distribución de los agentes a través de la masa terrosa recién excavada. También se puede acondicionar el terreno a lo largo de la longitud del sinfín.

Otra fundamental variable de control de la operación de la TBM es la velocidad de rotación (de 0,0 rpm a 2,07 rpm). El torque de la cabeza cortadora es constante para velocidades desde 0,0 rpm a 1,03 rpm a una rata de 2542 toneladas metro. El torque a la velocidad máxima de la cabeza cortadora de 2,07 rpm es 1271 toneladas metro. Se puede obtener un pico máximo de torque inicial de 3050 toneladas metro.

Un centro de control automático (PLC) de las operaciones de la TBM está localizado dentro del equipo, próximo a la cabeza rotante. Monitorea y suministra toda la información relativa a la mecánica hidráulica y electricidad del equipo y a la geometría y volumetría de la excavación, en tiempo real y gravando de manera digitalizada para conformar un detallado registro histórico de todo el proceso.

Todos los datos monitoreados están disponibles a la vista del operador el cual, coadyuvado por todo un sistema de señalizaciones de umbrales y de alarmas, puede intervenir instantáneamente en el control de las operaciones y del proceso mismo.

El operador está asistido por otros pocos técnicos (3 a 4) que intervienen esencialmente durante las etapas del montaje de los segmentos del anillo de revestimiento (unos 20 minutos a cada ciclo de aproximadamente 1 hora), esencialmente para el izado e impernado temporal de los 7 elementos de concreto armado que conforman cada anillo.

Se reportan en la tabla que sigue, algunas de las especificaciones básicas más características de la TBM y en la página final (Fig 9) se muestran la sección longitudinal y algunas de las transversales del conjunto Cabeza – Escudo – Backup.

*Especificaciones Básicas del EPBS (LOVAT)*

Diámetro excavación	9.519m
Longitud del escudo + Backup	180 m
Peso de la TBM + Backup	990 ton est.
Velocidad de avance de diseño	8 cm/min
Mínimo radio de curvatura	300 m
Conicidad del escudo	13 mm
Potencia total instalada	5100 kw
Torque de la cabeza	1022 t.m @ 1,97 rpm
Torque máximo	2043 t.m @ 0,98 rpm
Torque pico	2 452 t.m
Presión de diseño sello estático	8Kg/cm <sup>2</sup>
Potencia de la cabeza cortadora	2700 kw
Diámetro de tornillo sin fin	1,1 m
Potencia del tornillo sin fin	300 kw
Numero gatos de empuje	30
Empuje por gato a 340 Kg/cm <sup>2</sup>	180 t/gato
Empuje máximo total a 340 Kg/cm <sup>2</sup>	5400 t
Empuje por gato a 408 Kg/cm <sup>2</sup>	215 t/gato
Empuje máximo total a 408 Kg/cm <sup>2</sup>	6450 t
Carrera de los gatos	2.250 m
Zapatas de empuje	813 mm * 311 mm
Área zapatas de empuje	2445 cm <sup>2</sup>
Radio cilindro de empuje	4437 mm

**5. Los Rendimientos y Los Consumos**

En la siguiente página se reporta, a manera de ejemplo (Fig 7), un conjunto de gráficos relativos a los principales parámetros de la excavación con el EPBS, registrados a lo largo de un tramo de aproximadamente unos 500 metros lineales

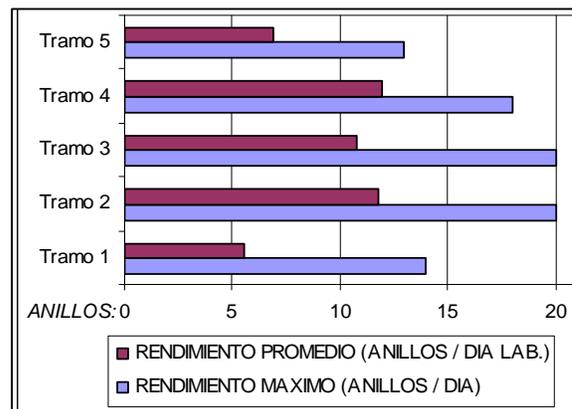
de túnel, mientras los consumos de las espumas acondicionadoras se resumen para todos los 5 tramos construidos en la tabla que sigue (Fig 5).

	Longitud Excavación (m)	Volumen Excavación (m3)	Consumo medio de Jabon Tipo CONDAT (CLBF4/TM) (lt/m3)	Total Consumo de Jabon Tipo CONDAT (CLBF4/TM) (lt)
Tramo 1	541.71	38,551.05	1.26	48,574.32
Tramo 2	475.97	33,872.81	1.17	39,631.19
Tramo 3	544.65	38,760.28	1.22	47,287.54
Tramo 4	555.33	39,520.40	1.07	42,286.83
Tramo 5	981.18	69,826.37	1.02	71,222.90

*Fig. 5 : Consumos de excavación*

En cuanto a los rendimientos de excavación, que reportados (Fig 6) para cada uno de los 5 tramos, debe señalarse que en los tramos 2 - 3 y 4 se trabajó 24 horas al día, mientras en el tramo 5 solamente 12 horas al día y en el tramo 1, en parte 12 y en parte 24 horas al día.

Además es importante señalar que la organización del trabajo previó la utilización de 2 trenes para el desescombro de cada ciclo de avance (de 1,5 m) con lo cual el rendimiento resultaba sistemáticamente penalizado en cada ciclo de avance, de los aproximadamente 15 minutos empleados en la espera de la llegada segundo tren.



*Fig. 6 : Rendimientos de excavación*

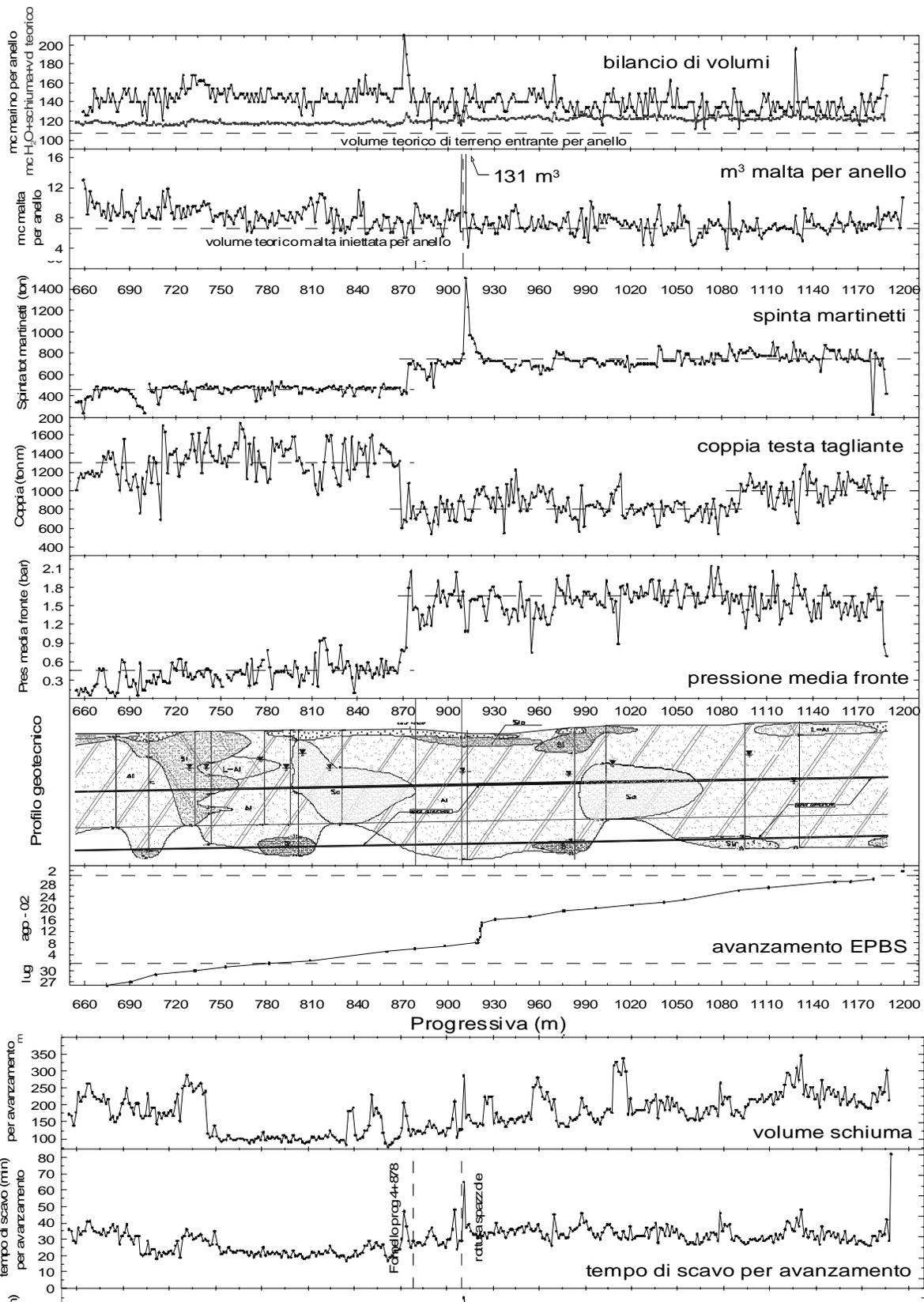


Fig. 7 : Parámetros básicos de la excavación con el EPBS – LOVAT

Por otro lado, la prefabricación de los anillos en ningún momento llegó a penalizar los rendimientos de excavación, manteniendo para ello una producción media global de unos 10 anillos prefabricados por cada día, disponiéndose de 21 unidades de encofrado para los segmentos de 3 anillos completos y realizándose medianamente unos 3,3 ciclos de fabricación cada 24 horas.

## 6. Los Asentamientos en Superficie

El primer tramo excavado con TBM en este proyecto (entre Las Ferias y Palotal) ha representado de alguna manera la ocasión para calibrar los procesos de definición y control de presión EPB en el frente y de presión de inyección en la cola del escudo, de manera que los resultados logrados en términos de control de las deformaciones no han podido ser considerados totalmente satisfactorios, habiéndose registrado en superficie unos asentamientos máximos localizados del orden de los 9 cm y luego más en general, del orden de los 3 cm en correspondencia del eje del túnel.

También pudo observarse que los asentamientos iniciaban a producirse en coincidencia con el paso del frente de excavación (no antes) incrementándose luego durante los 2-3 días inmediatamente siguientes al paso del frente y manteniéndose luego estabilizados, pareciendo lo anterior una clara señal de un buen control del frente mediante la presión EPB y de un mas deficiente control en la cola mediante las inyecciones del relleno anular.

A partir del segundo tramo excavado (entre Palotal y Santa Rosa), los resultados logrados han mejorado decididamente, registrándose mediante el sistemático monitoreo superficial unos asentamientos máximos puntuales del orden de los 6 cm, con valores mas frecuentes cercanos al par de centímetros, en coincidencia del eje de la vía.

Terr.	$w_{max}$ (m m)	$V_p$ (%)	k	H (m)
A 1	61	1,2	0,4	13,77
A 1	37	0,76	0,4	13,77
	33	0,65	0,4	13,77
	21	0,4	0,4	12,77
	26	0,46	0,4	12,77
	23	0,43	0,4	12,77
	21	0,5	0,4	13,08
S 1	26	0,63	0,5	13,08

Fig. 8 : Asentamientos en Superficie

Finalmente, ninguna importante estructura superficial o sub-superficial ha sufrido daño alguno, incluyendo un tubo de gas-ducto, de más de 30 cm de diámetro, interceptado pseudo-transversalmente por la excavación del túnel con una distancia entre la clave del túnel y la base del tubo del orden de los 3 metros.

## Referencias

Perri, G., 2004. Proyecto y Construcción de Túneles con "EPBS" para el Metro de Valencia – Venezuela. 1° Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterráneas. Sao Paulo do Brazil.

Nenna, A., 2004. Scavo meccanizzato della metropolitana di Valencia in Venezuela: Analisi della risposta all'avanzamento dello scudo EPB sulla base di dati di monitoraggio. Università degli Studi di Roma "Tor Vergata".

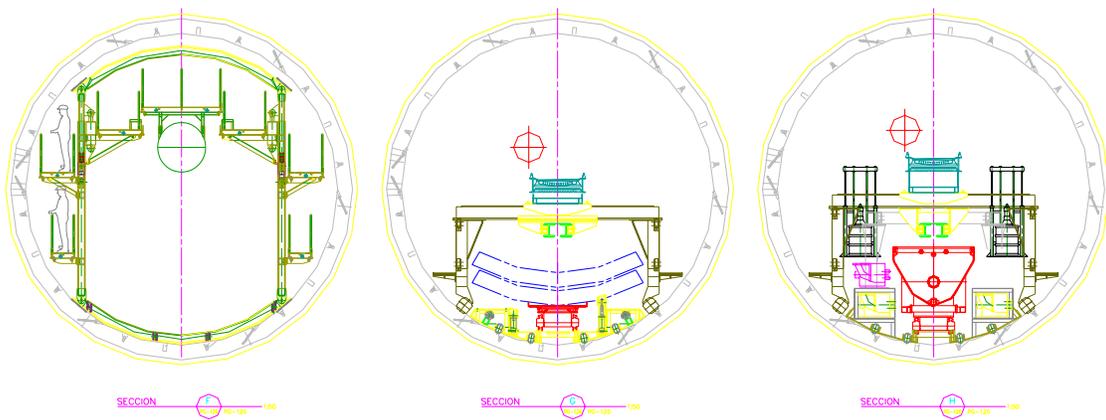
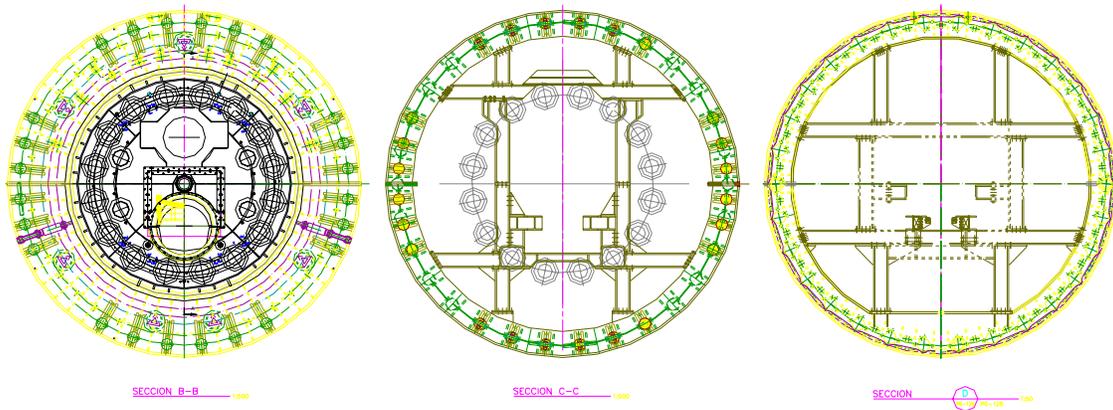
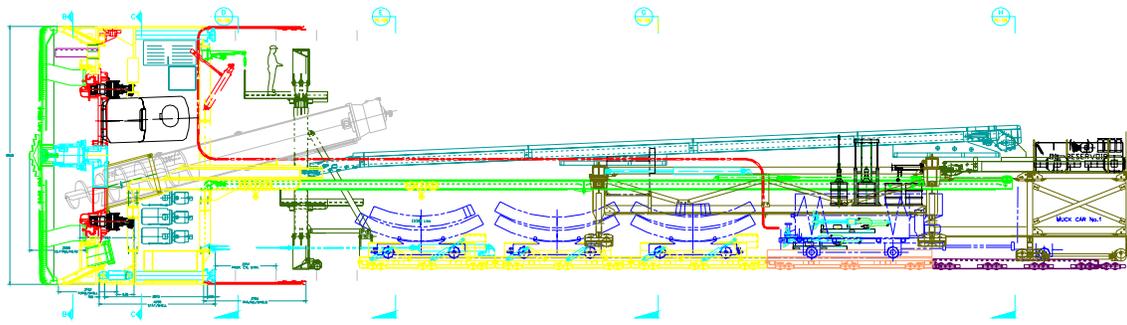


Fig. 9 : Cabeza – Escudo – Backup (parcial) de la TBM EPBS LOVAT