

PROBLEMATICA DE LOS ESCUDOS: ESCUDO DE PRESION DE TIERRA EN EL METRO DE TOULOUSE (1)

F. MENDAÑA (*)
S. ESTEFANIA (**)

RESUMEN. El objeto de esta conferencia dada en la Sesión de Sociedad Española de Mecánica del Suelo en Madrid, el 29-11-90, ha sido la de hacer una exposición del desarrollo de las obras efectuadas en Toulouse con motivo de la construcción de la línea A del Metro Mirail (Centre Ville-Jolimont).

A continuación se hace una breve descripción de los diferentes métodos de construcción utilizados en la ejecución de los distintos tramos del trazado.

La idea principal de este informe es la de exponer la problemática encontrada en la zona bajo el casco viejo de la ciudad (Pozo Garona-Jean Jaurés) ejecutada en túnel doble de simple vía por el sistema de escudo de presión de tierras.

La selección de dicho método fue decidida después de un estudio exhaustivo de las características geológico-geotécnicas del terreno atravesado.

ABSTRACT. The aim of this lecture, given at the section of the Spanish Society of Soil Mechanics in Madrid on the 29-11-90 was to explain the development of the work carried out in Toulouse concerning the construction of line A of the metro (Centre Ville-Jolimont). Below there is a brief description of the different construction methods used in carrying out the different stretches of the line. The main idea of this report is to give an account of the problems faced in the area below the old part of the city (Pozo Garona-Jean Jaurés), once the single-track double tunnel was built using the earth pressure shield system. The choice of this method was made after an exhausted study of the geological-geotechnical characteristics of the ground had been carried out.

1. INTRODUCCION

La ciudad de Toulouse, que cuenta hoy con cerca de 600.000 habitantes, tiene, junto a sus actividades históricas como centro turístico y polo comercial de una amplia zona agrícola, una importantísima industria aeronáutica. Los actuales problemas de la ciudad, y el crecimiento esperable de la misma, han creado la necesidad de construir una red de f.e. metropolitano.

De la citada red, se decidió comenzar en 1988 la construcción de la línea A, que cruzará la ciudad de Suroeste a Nordeste (ver figura 1). La longitud total de la línea es de unos 10 km (1 km en viaducto, 3 km en subterráneo excavado a cielo abierto y 6 km en túnel profundo), y consta de 16 estaciones (2 aéreas, 3 semienterradas y 11 profundas). Su terminación está prevista para 1992.

El trazado en túnel profundo es como sigue: desde la estación de Desbals hasta el río Garona, en sección de doble vía; el paso del río Garona más el trazado bajo el casco viejo de la ciudad, hasta la estación de Jean Jaurés, en túnel doble, de simple vía, continuando con la

sección de doble vía hasta la estación Jolimont (las secciones tipo pueden verse en la figura 2). Dentro de este trazado en túnel profundo, los llamados lotes 4 y 5 de la línea A (más el lote 5B que consiste en un simple pozo de ataque), fueron adjudicados, a finales de 1988, al grupo de empresas en que participa DRAGADOS.

Resumiendo con mayor detalle los tramos de nuestro contrato y la metodología de su construcción, podemos decir:

— **LOTE 4.** Corresponde al paso bajo el río Garona y atraviesa el casco antiguo de Toulouse, con edificios de los siglos XVII y XVIII.

Incluye la obra principal de ataque (el Pozo Garona de 14 m Ø y 30 m de profundidad), más tres tramos de doble túnel (sección para vía sencilla) que, partiendo de dicha obra, pasan el río y unen las estaciones denominadas ESQUIROL, CAPITOL Y JEAN JAURES. La longitud total (2) de los tramos entre estaciones es de 1.621 m para la vía 1 y de 1.431 para la vía 2, diferencia debida al trazado muy condicionado bajo el casco antiguo. Comprende también el pozo WILSON, situado en la vía 2 a unos 150 m de Jean Jaures, y destinado al enlace con una futura línea.

Los tramos entre estaciones se están haciendo con un escudo de presión de tierra de 5,60 m de diáme-

(1) Conferencia pronunciada en las primeras jornadas sobre «Obras de interés geotécnico ejecutadas por los constructores españoles», Noviembre 1990.

(*) Dr. Ingeniero C.C.P. Subdirector de Dragados y Construcciones, S. A.

(**) Geólogo. INTECSA.

(2) La longitud de cada tramo entre estaciones varía entre algo menos de 400 m y algo más de 700 m.

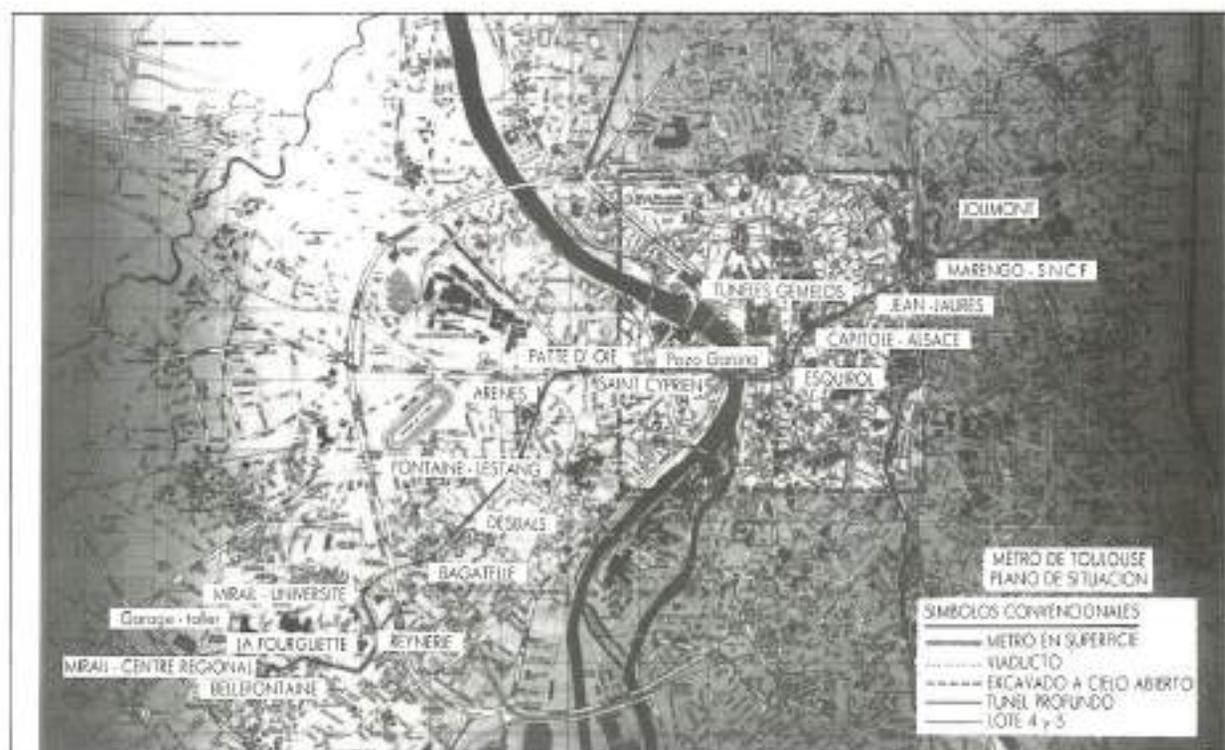


FIGURA 1. Metro de Toulouse, línea A.

tro de excavación y es la parte de la obra a la que nos referiremos con detalle. En cuanto a las estaciones, se construyen con preserrado de anillos de sostenimiento, al amparo de los cuales se completa, con métodos convencionales, tanto la excavación (rozadora y excavadora hidráulica), como el revestimiento.

— **LOTE 5B.** Corresponde al tramo entre las estaciones JEAN JAURES y MARENCO, bajo las instalaciones de la estación de la SNCF y el Canal de Midi.

La obra es un túnel para doble vía, de unos 450 m de longitud y 8 m de luz, a través de acarreos bajo un freático de 10-12 m, cuya excavación ha requerido congelación previa del terreno en unos 150 m. Se emplearon en la misma los métodos convencionales ya descritos (preserrado de anillos de sostenimiento, excavación con rozadora y revestimiento final convencional). Para desarrollar estos trabajos se construyeron dos pozos, uno de ataque denominado RIQUET y otro para la introducción de la perforadora llamado SEMARD.

Aparte de su condición de asociado del grupo constructor, la intervención de DRAGADOS tuvo especial relieve en todo lo referente a la ejecución del túnel con escudo (Lote 4). INTECSA fue encargada de asesorar los estudios geológicos y geotécnicos hechos por el grupo, y coordinarlos con el consultor, en lo relativo al Lote 4 citado. Intervino también en el diseño de los anillos de sostenimiento, conjuntamente con MOTT & MC. DONALD.

2. GEOLOGIA DEL TRAZADO

2.1. GENERALIDADES

El trazado del Proyecto discurre, en general, a través de la llanura de Toulouse. Se trata de una llanura aluvial, desarrollada en terrenos de edad Terciaria y correspondientes a facies detríticas de principios del ciclo Alpino. Genéricamente denominaremos a este macizo como **molasa** o **sustrato molásico** de Toulouse. Petrográficamente, esta molasa es una roca heterogénea, compuesta por arenisca feldespática de grano grueso con cemento calcáreo.

En cuanto a su génesis, importante para explicar los perfiles geológicos, puede definirse como una tectofacies, es decir, se trata de sedimentos originados inmediatamente después (o en los últimos momentos) de una fase tectónica. En el caso concreto de Toulouse, se atribuye su génesis al período en el que los Pirineos estaban afectados por un movimiento de elevación y la Cuenca de Aquitania por una subsidencia. En dicho período, se forman importantes cursos fluviales que depositan las facies detríticas que constituyen las molasas de Toulouse, de edad Stampiense Superior. Esta génesis explica la naturaleza de los materiales atravesados, con presencia de niveles de arenas y gravas, de distribución totalmente errática, que vamos a describir seguidamente.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES EXISTENTES

Antes de pasar a comentar el perfil geológico del tramo, se describen brevemente los materiales que aparecen,

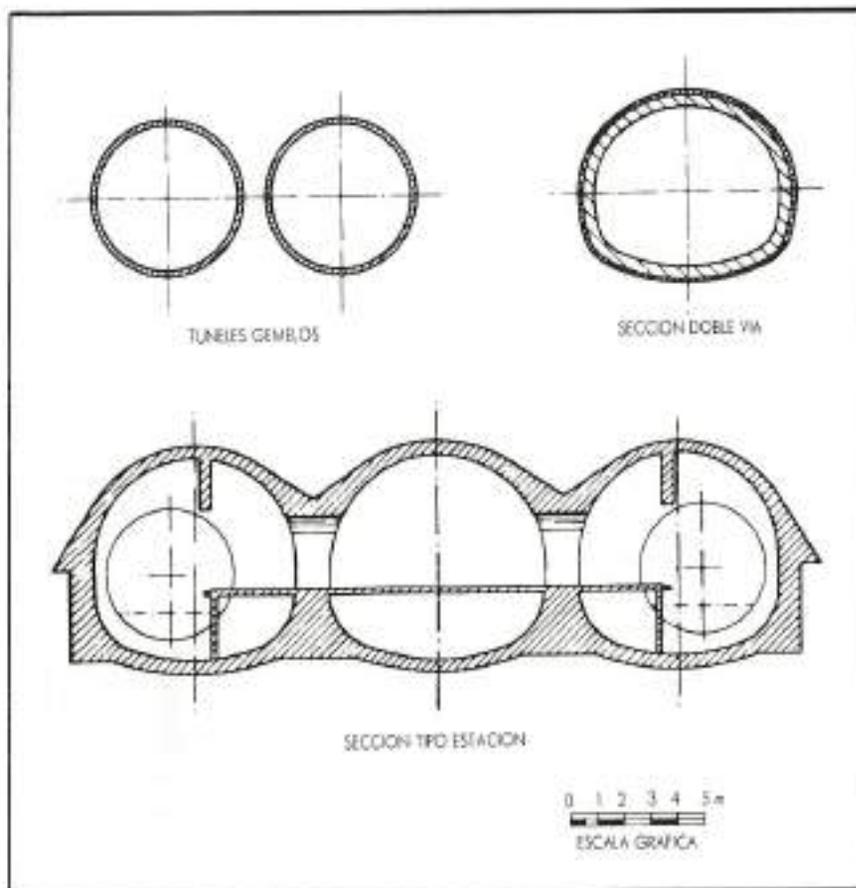


FIGURA 2. Metro de Toulouse. Secciones tipo en túnel.

A. Formaciones superficiales

- Rellenos antrópicos heterogéneos de espesor variable.
- Aluviones, predominantemente arenosos, con niveles de grava depositados por el río Garona. En general, son bastante permeables. Su potencia oscila normalmente entre 5 y 8 m.

B. Sustrato molásico

Pueden distinguirse los siguientes tipos:

- Molasa arcillosa (aproximadamente el 49 % de las muestras).
- Molasa arenosa (aproximadamente el 28 % de las muestras).
- Molasa limosa.
- Molasa calcárea.
- Molasa arcillo-arenosa.
- Molasa arcillo-limosa.
- Molasa arcillo-calcárea.
- Molasa limo-arenosa.

Además, intercaladas dentro de la formación, aparecen niveles de arena molásica, de distribución y geometría muy irregular. En general se trata de arenas de grano fino y raramente de grano grueso, con todas las gradaciones intermedias. Los niveles detectados en los reconocimientos son generalmente de potencia inferior

a 1 m, aunque pueden alcanzar (hacia el PK 1100 y en la llegada al parking de Jean Jaurés), hasta 8 m.

Finalmente citaremos, aunque su importancia para la excavación es pequeña, la existencia de arcillas, limos y nivelillos de caliza y arenisca. En el punto 2.4 se darán las características geotécnicas fundamentales de los materiales con mayor incidencia en el trazado.

2.3. PERFIL GEOLOGICO

El perfil geológico ha sido elaborado a partir de sucesivas campañas de reconocimientos que han puesto claramente de manifiesto las mencionadas características de irregularidad de las **bolsadas de arenas**, cuya localización exacta es de suma importancia para la operativa de la excavación.

Hasta la fecha se han realizado seis campañas de reconocimiento, correspondiendo cuatro de ellas a la fase de proyecto. En la actualidad se siguen realizando sondeos en las zonas que se consideran dudosas.

Se han inventariado, además, pozos antiguos de suministro de agua, algunos de ellos rellenos con arenas, gravas y escombros, por los problemas que pueden ocasionar al ser afectados por la excavación. Desgraciadamente, no todos los pozos existentes han podido ser localizados, ya que algunos de ellos no son accesibles,

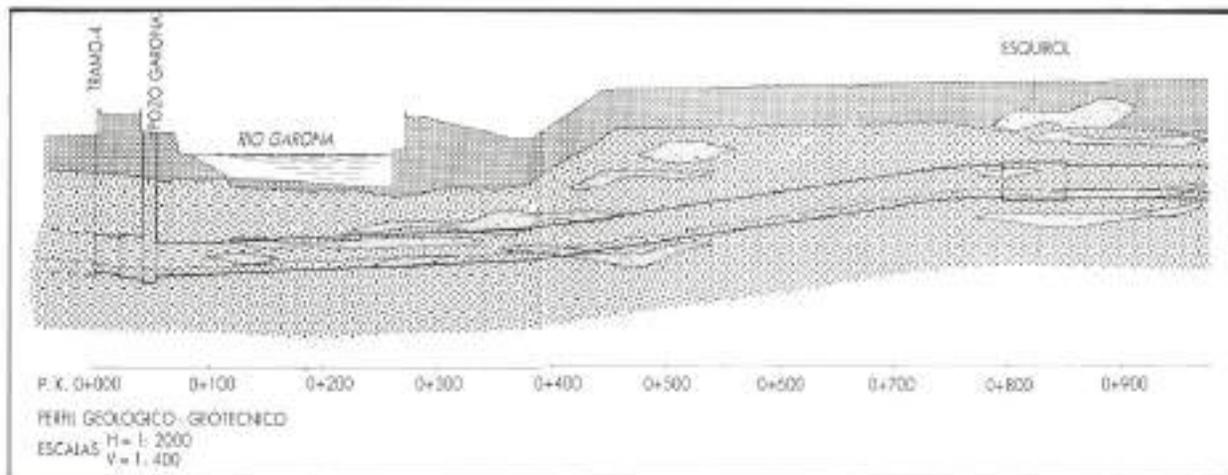


FIGURA 3. Metro de Toulouse. Perfil geológico. (Tramo Garona-E. Esquirol).

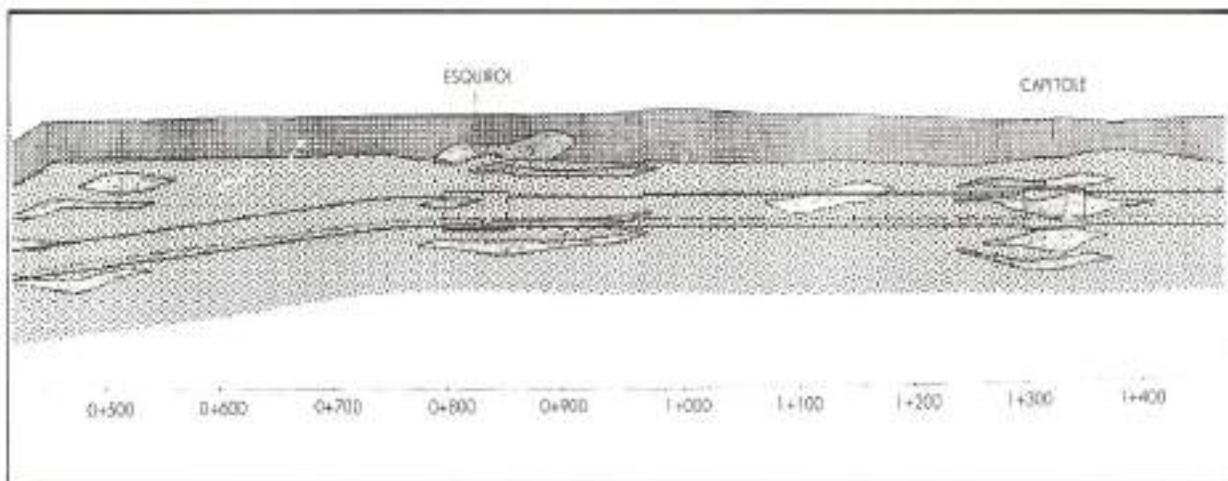


FIGURA 4. Metro de Toulouse. Perfil geológico. (Tramo E. Esquirol-E. Capitol).

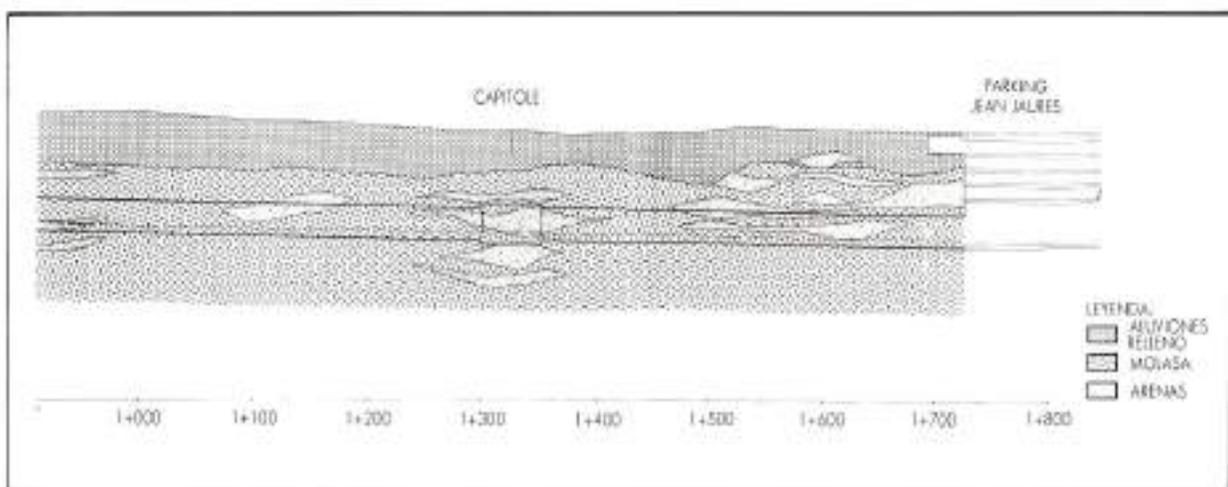


FIGURA 5. Metro de Toulouse. Perfil geológico. (Tramo E. Capitol-E. Jean Jaurés).

por abrirse directamente desde sótanos de edificios antiguos.

Estos pozos servían a uno o unos pocos edificios, o bien a una manzana completa, en cuyo caso pueden existir, además, las correspondientes galerías o cavernas de almacenamiento, conectados con ellos.

El nivel freático se encuentra por encima del techo de la molasa en el nivel de aluviones.

En cuanto al **perfil geológico** (ver figuras 3, 4 y 5), su descripción es la siguiente:

Pozo Garona - Estación de Esquirol

En este tramo se atraviesa en primer lugar el río Garona, que tiene una anchura de unos 200 m. Los recubrimientos de molasa sobre clave oscilan entre 6 m (bajo el Garona y en la llegada a la Estación) y 15 m.

En esta parte, la molasa era predominantemente arcillosa y los niveles de arena detectados son del orden de 1 m, excepto en una zona, situada hacia el PM 350 en el que existe un descenso en el techo de la molasa que se encuentra por debajo de la clave del túnel. Precisamente en este punto se produjo el incidente más grave acaecido hasta la fecha al incidir la excavación en dicha masa arenosa, que resultó extensa y conectada con el freático, lo que originó importantes afluencias de agua y arena, debiéndose interrumpir el avance del escudo.

Estación Esquirol - Estación Capitol

Se caracteriza este tramo por un menor recubrimiento de molasa sobre la clave del túnel, muy regular entre 5 y 6 m. Los niveles arenosos siguen la tónica general de escaso espesor, excepto una zona situada hacia el PM 1100, en el que se localizaron varios estratos arenosos que afectaban prácticamente a toda la sección. Hay que decir, sin embargo, que algunos niveles que aparecen como arenas en los sondeos son, en realidad, tramos de molasa arenosa con débil cohesión que son desagregados por el sondeo. Concretamente en esta zona, el 60 ó 70 % de los niveles arenosos parecían responder a esta tónica, mientras que el porcentaje restante correspondía a arenas de grano más grueso. En este tramo que discurre bajo el casco antiguo de la ciudad se detectaron hasta 17 pozos.

Estación Capitol - Parking Jean Jaurés

En este tramo los recubrimientos de molasa sobre clave oscilan entre 5 y 9 m. Los niveles arenosos son aquí más escasos, excepto en las inmediaciones del parking Jean Jaurés donde aparecen en contacto con la pantalla de cierre del Parking. Precisamente este contacto ha sido objeto de inyecciones químicas para permitir el cale del escudo.

Para precisar la extensión de estas bolsas de arena se han realizado recientemente sondeos que han reforzado más, si cabe, la idea de irregularidad que se tenía sobre la geometría de estos niveles. Así, en sondeos separados entre sí 10 m no existe continuidad entre niveles de arenas de 5 ó más metros de potencia. Sobre la naturaleza de estas arenas puede decirse lo mismo

que en el tramo anterior, en el sentido de que parece tratarse, predominantemente, de molasas arenosas de baja cohesión.

Los ensayos de bombeo realizados indican que la transmisividad entre niveles es muy baja o inexistente. La permeabilidad de las arenas oscila entre 10^{-3} y 10^{-4} cm/seg, lo que pone de manifiesto su elevado contenido en finos. Salvo puntos singulares, esta permeabilidad es bastante constante en las arenas existentes a lo largo de la traza, siendo un valor típico de arenas finas de baja permeabilidad.

2.4 CARACTERÍSTICAS GEOTECNICAS DE LOS MATERIALES

Una vez descrita la disposición de los materiales a lo largo del trazado, se incluyen a continuación las características geotécnicas fundamentales de los materiales con mayor incidencia en la excavación, es decir: arenas molásicas, molasas arenosas y molasas arcillosas que representan, respectivamente, el 17, 28 y 49 % del total de los existentes (3).

Arenas molásicas:

- $\gamma = 20,3 \text{ KN/m}^3$
- $C' = 0$
- $\phi' = 33^\circ 5'$
- $R_v = 215 \text{ KPa}$
- $35 < E_m < 60 \text{ MPa}$
- $K_0 = 0,5$
- $K = 3 \times 10^{-6} \text{ a } 2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

Molasas arenosas

- $\gamma = 21,3 \text{ KN/m}^3$
- $C' = 0 \text{ a } 30 \text{ KPa}$
- $\phi' = 32-33^\circ$
- $80 < E_m < 200 \text{ MPa}$
- $K = 1,4$
- $K = 2 \times 10^{-6} \text{ a } 2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$

Molasas arcillosas

- $\gamma = 21,4 \text{ KN/m}^3$
- $C' = 0$
- $\phi' = 26-32^\circ$
- $100 < E_m < 280 \text{ MPa}$
- $K_0 = 1$
- $K = 10^{-9} \text{ m/s}$

2.5. CONTROL DE ASIENTOS

Dado que la obra se sitúa en un entorno urbano, parte del cual constituye, además, el centro histórico de la ciudad, el control de asentamientos en superficie es de capital importancia, estando el valor de los mismos drásticamente limitado en el Pliego de Bases.

En consecuencia, y puesto que uno de los motivos principales para la elección de los sistemas de excavación y revestimiento ha sido precisamente la limitación

(3) $1 \text{ Tn/cm}^3 = 10 \text{ KN/m}^3 / 1 \text{ kg/cm}^2 = 100 \text{ kPa} / 10 \text{ kg/cm}^2 = \text{MPa}$.

de los asientos en superficie, vamos a comentar brevemente el resultado de las medidas realizadas.

Para su seguimiento y control se colocaron hitos topográficos, de los cuales se han podido controlar efectivamente 438, descontando los que fueron arrancados o inutilizados.

De ellos 365 (el 83,34 %) revelaron asientos menores de 5 mm; 56 (el 12,65 %), entre 5 y 10 mm; 15 (el 3,4 %), entre 10 y 20 mm y únicamente 3 (el 0,68 %), superiores a 20 mm, siendo el máximo absoluto registrado de 23,7 mm, en un punto de la zona de la calle Garonnette.

2.6. RESUMEN

1. La **constitución de la molasa** cambia con frecuencia y es difícilmente predecible, incluso con una alta proporción de sondeos, como se ha comprobado en el ejemplo descrito del parking Jean Jaurés.

2. Las **bolsas de arena**, intercaladas en dicha formación, tienen una distribución errática, lo que dificultó muy notablemente el trabajo de la máquina.

3. El trazado bajo el viejo casco de la ciudad ha atravesado (o se ha aproximado en exceso) a la **red de antiguos pozos** de suministro de agua, cuyas paredes, lógicamente, certan las capas arenosas, por lo que su mera existencia define una zona de riesgo.

4. Los asientos registrados son pequeños, estando el 83,34% de los medidos por debajo de 5 mm, lo cual confirma la adecuación de los sistemas de excavación y revestimiento utilizados.

3. SELECCION DEL METODO DE EJECUCION

De acuerdo con lo expuesto hasta ahora sobre las características del macizo, podemos decir que nuestra hipótesis inicial se resumía así: se trata de una formación de molasas con una $R_c < 50 \text{ kg/cm}^2$ como cifra indicativa, salvo pequeñas zonas donde aparecen intercalaciones

duras ($R_c = 1.500 \text{ kg/cm}^2$), que no representan más del 6-8 % de la longitud total del Lote 4. Al atravesar capas de molasa arenosa, más o menos claramente en contacto con el freático de la zona, cabría esperar una presión de agua del orden de 1,2 a 1,4 Bar. Estas capas estaban evaluadas en unos pocos puntos de riesgo, lo que equivalía a un porcentaje muy reducido del trazado, si bien con cierto grado de incertidumbre, en cuanto a su localización.

Nunca tuvimos duda alguna de que el tramo del Lote 4 había de hacerse con un escudo, si bien, a medida que la información geológica del proyecto aumentó, tanto por nuestros reconocimientos, como por la ejecución de los diversos pozos de ataque, hubo de desecharse cualquier tipo de **máquina de cabeza abierta**.

En la actual tecnología de las TBM para suelos o rocas blandas, podemos distinguir, muy simplificada-mente, los cinco tipos descritos en el Cuadro 1.

Podemos decir que hace 25 años se utilizaban, exclusivamente, los dos primeros tipos y, en los casos de rueda cerrada, ni siquiera puede hablarse, hasta fechas recientes, de un cierre mecánico activo, es decir, compatible con el trabajo de la máquina.

Hay que admitir que esta vieja tipología responde a una demanda energética mínima, tanto para el empuje total como, sobre todo, para el par torsor de la máquina si es de rueda. Por esto nació y por ello continúa empleándose todavía en ciertas obras. En los casos límites de suelos no cohesivos, o excavación en freáticos, se recurría a la **presurización total** del túnel con aire comprimido, técnica que existía desde mucho antes y se había aplicado a «escudos» de avance manual que trabajaron en multitud de proyectos (hay referencias clásicas como las de la ciudad de Méjico).

Pues bien, en Toulouse se tuvo en cuenta inicialmente una solución de este tipo, adaptando un **escudo BADE de rueda abierta**, cuyas características mecáni-

TIPOLOGIA		CONTENCION DEL FRENTE	SISTEMA USUAL DE CARGA ESCOMBRO	REVESTIMIENTO (DOVELAS)	ENTIBACION ORDINARIA
(1) SEMIMECANIZADO	BRAZO EXCAVADOR	Solo de tipo pasivos	Cintas	- Ordinarios inyectados - Expandidos - Atomizados - Mecados	Posible
	BRAZO ROZADOR				
(2) DE RUEDA (sin presión)	ABIERTA	Cierre mecánico activo			
	CERRADA				
(3) DE RUEDA (cerrada) CON PRESION DE AIRE		la del propio sistema de presión	Containers o tomillo sin fin	- Atomizados inyectados	No posible
(4) DE RUEDA (cerrada) CON PRESION DE LÍQUIDOS (HIDROESCUDO)			Bombas		
(5) DE RUEDA (cerrada) CON PRESION DE TIERRA			Tomillo sin fin		

CUADRO 1. Tipos de escudos.

cas básicas eran empuje de 2.250 Tn y par torsor de 165 T x m. Las posibles intercalaciones duras se resolvían con ayudas a la máquina por métodos manuales convencionales y los casos de acúfferos en zonas arenosas con tratamientos previos de inyecciones.

Cuando nuestros reconocimientos complementarios fueron denunciando el carácter errático de las zonas de arenas y los frecuentes cambios en la formación de molasa, se vio claramente que los tratamientos previos eran imposibles de señalar y programar, por lo que el empleo de la máquina abierta sólo era viable con **presurización total del túnel**.

Dicha presurización fue debidamente estudiada, teniendo en cuenta que todavía se viene empleando en ciertos países (podemos citar como ejemplo varios tramos del modernísimo metro de Singapur). No obstante, enseguida comprobamos que la actual reglamentación francesa sobre seguridad e higiene del trabajo hacía económicamente prohibitiva dicha tecnología. Puede decirse que hoy día, en Europa, sucedería lo mismo en cualquiera de los países y por el mismo tipo de razones.

En vista de lo anterior, y pese a lo estricto del plazo disponible, se decidió definitivamente seleccionar opciones de **TBM de nueva construcción y adaptadas a las necesidades de la obra de Toulouse**. Como veremos, la tecnología actual permite salvar este tipo de situaciones, pero no deja de presentar todavía dificultades de importancia, que también comentaremos.

4. LAS OPCIONES DE TBM PARA TOULOUSE

Las opciones existentes, de acuerdo con lo antes expuesto, eran las 3 últimas del cuadro, es decir, las **TBM de cabeza presurizada**, bien sea con **presión de aire**, con lodos (**hidroescudos**) o con la propia masa de terreno excavado (**escudos de presión de tierra**).

En nuestra opinión, una TBM de **presurización neumática en cabeza** no es más que un prototipo, por el momento. Una cosa es que haya diseños, que, según referencias, llegaron a trabajar, pero sobre esquemas básicos de hidroescudo, a los que podía pasarse en caso necesario, que fue lo sucedido, al menos en algún caso del que tenemos referencia.

Una fuga de aire a través de la máquina, o más bien de la junta máquina-dovela de revestimiento, es imposible de reducir con garantía y puede llevar a una verdadera catástrofe, mientras que no sucede así en los otros tipos de presurización de cabeza. Análogo riesgo supone la pérdida de presión a través del macizo, como es de temer en rocas blandas fracturadas o arenosas, y en zonas de arenas, o gravas, cuando los trazados son próximos a la superficie.

En cualquier caso, en Toulouse consideramos viables solamente las opciones de **hidroescudo** o de **escudo de presión de tierra**, siendo esta última la adoptada. La decisión respondió a razones puramente técnicas. Las dificultades que presentaba un «hidroescudo» eran las siguientes:

- A. Alto porcentaje de molasa rica en limos o arcillas.
- B. Práctica imposibilidad de emplear **dovelas expandidas** en el revestimiento, con adopción obligada de dovelas atornilladas e inyectadas en el 100 % del trazado.

En cuanto al punto A es conocido el dispositivo de evacuación de escombros de un hidroescudo: lo esquematizamos en la figura 6. Una vez transportada por bombeo al exterior la mezcla bentonita-terreno su separación es posible mientras el terreno no presente exceso de finos (tamaños menores de 0,8 ó 0,6 mm). Recurrimos al esquema presentado por Mr. Babendererde que reseña obras concretas, en algunas de las cuales hubo serias dificultades. Ver la figura 7.

En cuanto se rebasa un 10 % de finos, la solución es difícil. En general, hay que forzar hasta el extremo la **instalación de separación** de lodo-terreno (con grave repercusión económica) y combinarla frecuentemente con **pérdida de los lodos**, lo que, aparte de su elevado costo, puede ser rechazada por **motivos ecológicos**. Este último riesgo, fundamentalmente, y también las razones económicas, siempre difíciles de cifrar a priori, fueron la base de nuestra decisión a favor de un escudo de **presión de tierra**.

En cuanto al punto B, las exigencias del Pliego de Condiciones de Toulouse, referentes a los asentos del terreno en superficie, son muy estrictas (en zonas del casco antiguo se llegan a exigir máximos de 5 mm).

Pues bien, en la tecnología de los escudos está generalmente aceptado que revestimiento prefabricado de **dovelas expandidas** es la mejor respuesta a una alta exigencia de control de asentos, siempre que la máquina pueda colocar este tipo de dovelas, lo que va contra el sistema de estanqueidad que requiere, en general, un hidroescudo. Por el contrario, no es imposible, como veremos, diseñar un escudo de presión de tierra, con esta posibilidad.

La decisión, en resumen, fue a favor de este último tipo, dado que lo esperable en Toulouse era la posibilidad de **empleo de dovelas expandidas en más del 90 % de la obra**, lo que, por otra parte, **era lo recomendable para los objetivos del Pliego**.

5. CARACTERÍSTICAS DEL ESCUDO DE PRESIÓN DE TIERRA DE TOULOUSE

La máquina finalmente construida fue una TBM, marca LOVAT, Modelo 220 SE, con un diámetro de excavación de 5,60 m y una longitud total de 6,80 m, dividida en tres secciones: cabeza, cuerpo central y cola. Al ser diseñada para esta obra, la máquina es capaz de pasar terrenos de dureza medio-alta, si bien responde perfectamente a la calidad media de la molasa de Toulouse. No vamos a entrar en el detalle de sus características técnicas, sino señalar específicamente los aspectos esenciales de diseño, en relación con las dos hipótesis de su empleo:

1. Trabajo como escudo de presión de tierra.
2. Trabajo con dovelas expandidas.

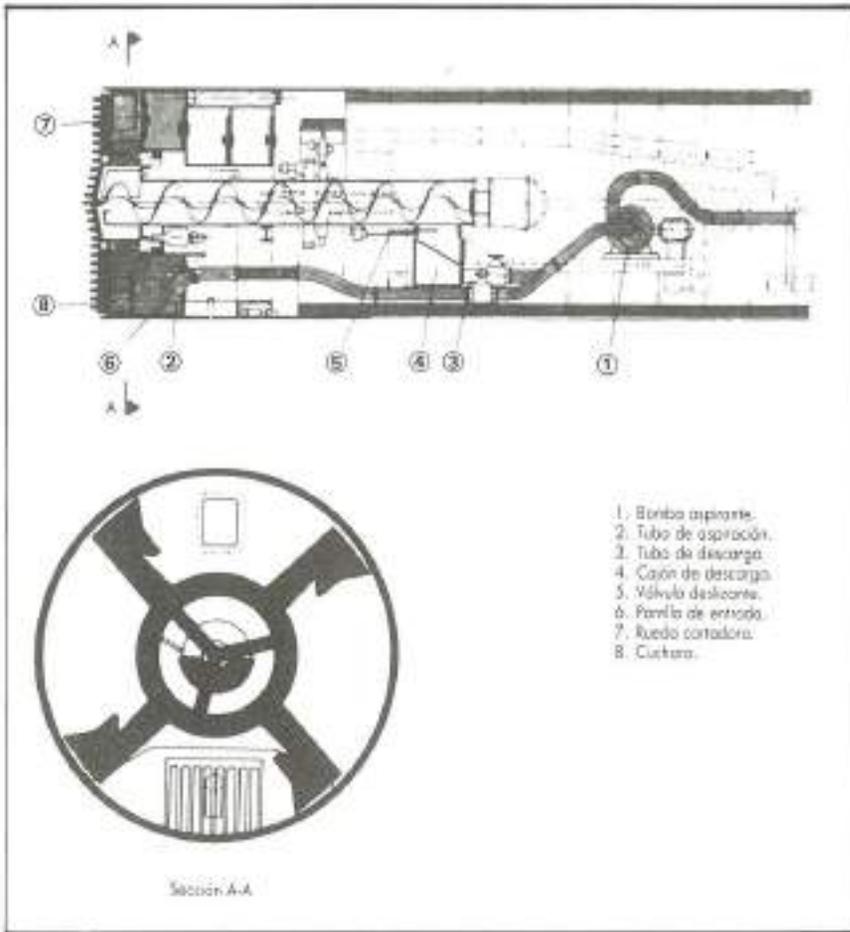


FIGURA 6. Hidroescudos. Sistema de transporte de escombros.

En primer lugar, hay que dejar bien claro que **si se trabaja a presión**, al igual en un hidroescudo, la impermeabilidad perimetral exige **dovelas atornilladas**. Dicho de otro modo, si el carácter altamente inestable del frente exige la presurización de la cabeza, sea cual fue-

re el método de dicha presurización, las dovelas han de ser totalmente estancas, es decir, **dovelas atornilladas, cuyo trasdós se inyecta posteriormente**. Los distintos fabricantes procuran disminuir al máximo el ciclo de inyección para conseguir los asentamientos menores posibles.

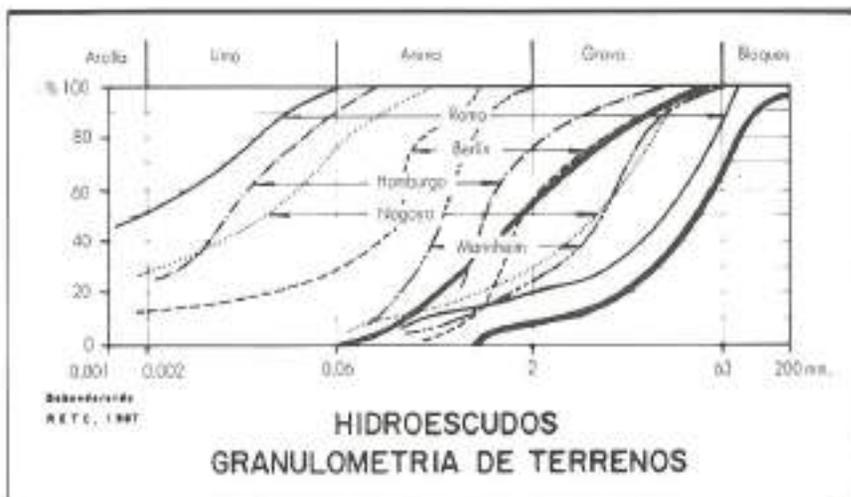


FIGURA 7. Hidroescudos. Granulometría de terrenos.

Así pues, por lo que a este punto 1 se refiere, cuando la máquina de Toulouse hubo de trabajar como escudo de presión de tierra, utilizó dovelas metálicas atornilladas. Ello fue imprescindible en los tramos arenosos más o menos directamente conectados al freático (máximo de 1,5 Bar de presión), lo que ha supuesto en la vía 1, recién terminada, un total de poco más de 100 m (menos del 10 % del total), siendo de esperar cifras análogas para la vía 2, aunque su trazado se llega a apartar casi 100 m en planta respecto de la primera (4).

Ahora bien, la característica especial de la máquina es que también puede trabajar con **dovelas expandidas**: como acabamos de comentar, ha trabajado así en más del 90 % del trazado. Esto es tanto como decir que el escudo ha de operar como **máquina de cabeza abierta** y disponer de un **mecanismo de colocación** de dovelas, compatible con los dos tipos que se manejan, dovelas atornilladas o dovelas expandidas, más un **mecanismo de expansión** de estas últimas. Todo ello nos lleva a detallar algo más las tres características técnicas más importantes de una máquina como la que comentamos, a saber:

1. Posibilidad de trabajar sin presión en la cabeza.
2. Colocación de dovelas.
3. Expansión de dovelas.

En nuestro escudo de presión de tierra la cabeza tiene una parte anterior giratoria y una parte posterior fija: entre ambas queda el espacio o **cámara** donde se mantiene a presión el **terreno excavado**, gracias al empuje de la máquina. Al poder actuar sobre la apertura frontal de la parte giratoria, y sobre el caudal de salida, es posible variar la presión. En resumen, el escudo permite crear la necesaria **presión de contención del frente** usando el propio material excavado: de ahí el nombre de escudo de presión de tierra (5). La salida de material es por medio de un tornillo sin fin.

La parte anterior de la cabeza está dividida en 6 sectores. Cada sector tiene, su vez, una estructura de soporte (uno de los «*ardios*» de la rueda) y una parte móvil que, como ya hemos dicho, permite variar la alimentación de terreno a la cámara. Cuando no se trabaja a presión, los sectores de la cabeza están totalmente abiertos. Se usa entonces otra salida, diferente del tornillo sin fin, que consiste en una compuerta de doble hoja, de accionamiento hidráulico, que se alimenta por gravedad, ya que cada uno de los sectores frontales está, a su vez, compartimentado a modo de un gran cangilón.

Refiriéndonos a las otras características, el **colocador de dovelas** es único para uno u otro tipo de revestimiento, lo que exigió un cuidadoso diseño del fabri-

cante, en contacto directo con el proyectista y el constructor.

El **mecanismo de expansión** es una estructura anular con diversas articulaciones para el cambio de diámetro, que trabaja en dos posiciones: dentro y fuera de la cola del escudo. Situado en el interior de la cola, el erector coloca sobre ella los segmentos de la dovela y se procede a una primera fase de expansión, hasta aproximarse al diámetro de la cola del escudo. Hecho esto, la máquina, que ha recogido previamente los gatos de empuje, comienza su trabajo de avance, con lo que la cola va dejando libre el terreno justo enfrente del anillo pre-expandido. El ciclo es muy rápido (10 a 15 minutos por carrera del orden de 1,0 a 1,2 m) y en cuanto la cola lo permite, se procede a la expansión total del anillo contra el terreno, con maniobras conjuntas del expansor y de las piezas llave, para lo que se usan algunos gatos de la máquina.

El diseño de las **dovelas expandidas** está representado en la figura 8. Como puede verse, está formada por 6 anillos o piezas principales y dos piezas llave. Una de las piezas principales, la de solera, tiene espesor diferente, con el fin de recibir un revestimiento final de hormigón convencional, que está previsto para alcanzar el elevado grado de impermeabilidad que exige el Pliego.

Las dovelas atornilladas se construyeron con chapa, según un diseño similar a las anteriores, es decir, con seis piezas principales (en este caso sin llaves), de las cuales la inferior lleva una parte de hormigón, compatible con la de la pieza análoga de la solución anterior.

6. EJECUCION DE LA OBRA

El encargo de la máquina se hizo en el mes de mayo de 1989, terminándose su construcción a finales de dicho año. Su montaje, dentro del pozo Garona, comenzó a mediados de enero de 1990, iniciándose las primeras maniobras para el avance a principios de febrero de 1990. Como puede verse en la figura 9, los avances medios mensuales fueron francamente aceptables durante los meses de febrero y marzo, teniendo en cuenta que el tajo se inició con el cruce bajo el río y que los equipos de personal hubieron de ser entrenados adecuadamente.

El paso bajo el río Garona se hizo sin problemas; por el contrario, al llegar al perfil PM-335, aproximadamente, sufrimos un serio incidente que anuló, prácticamente, los avances en los meses de abril y mayo. Pese al cambio inmediato a dovelas atornilladas, no fue posible el avance normal de la máquina por la enorme afluencia de agua y la irregular aportación de arena que se producía en la cámara de cabeza. La interpretación más verosímil del incidente fue que se trataba de una gran masa arenosa de alta permeabilidad, en contacto con el freático.

El avance se detuvo para proceder al tratamiento con inyecciones del terreno alrededor de la traza en tramos sucesivos, cuya excavación se realizaba a continuación. El trabajo fue lento y penoso: basta decir que el

(4) Esto, que sería irrelevante en otros casos, no lo es en el caso de Toulouse, como ya hemos visto al tratar la geología del trazado.

(5) Hay que añadir, a veces, una pequeña proporción de lodo arcilloso, que se incorpora a la cámara, si el terreno carece de finos, para lograr una mezcla suficientemente plástica.

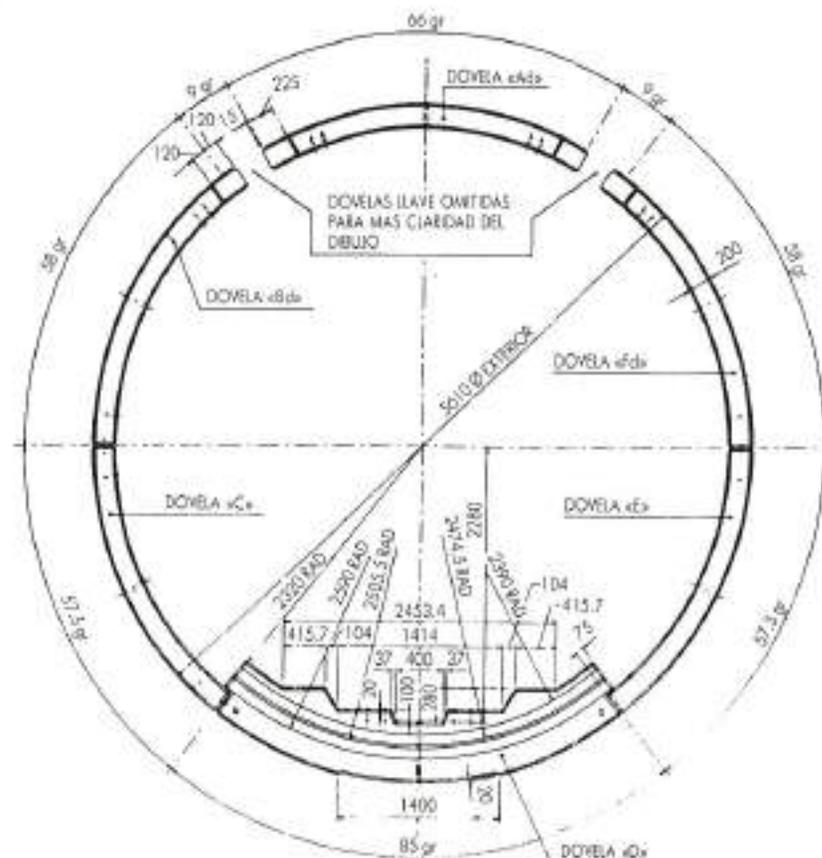


FIGURA 8. Sección tipo de la dovela espondida de Toulouse.

avance de algo menos de 50 m con dovelas atornilladas precisó un plazo de dos meses, con el sobrecooste correspondiente, tanto por el bajo ritmo de producción, como por los tratamientos citados.

Resuelto el incidente, los avances diarios volvieron a normalizarse. En el resto de la vía 1, por tres veces se pensó en cambiar nuevamente a dovelas atornilladas: la constante vigilancia del frente permitió evitar el cambio en una ocasión, limitándonos a llevarlo a cabo para la aproximación y cale a la estación de Jean Jaurés, atravesando una formación de arenas previamente tratadas, ya descritas anteriormente, así como en el PM 970 donde se atravesó un pozo no detectado en los reconocimientos previos.

En resumen, la excavación de la vía 1 se terminó el 18 de octubre de 1990, con un avance diario medio a origen de algo más de 9 m, como refleja la figura antes citada. Consideramos que la extrema vigilancia a que nos vimos obligados afectó a los avances posibles en otras circunstancias. Basta examinar las figuras 10 y 11, que resumen la operatividad media del escudo que, como puede verse, rebasa el 60 % del tiempo total útil, cifra calificable de óptima, pero esa disponibilidad se utilizó, a propósito, de forma limitada, anteponiendo las normas de seguridad establecidas. Nuestra evaluación es que, de no tener que trabajar así, los avances medios

podrían haber sido superiores a los conseguidos en un 40 % a 50 %.

7. DIFICULTADES ESPERABLES EN LA EXCAVACION DE LA VIA 2

Terminada la excavación de la vía 1, se ha completado una fase de reconocimientos, previa a la excavación de la vía 2. El Informe final acerca de la geología esperable del trazado y las medidas a tomar es como sigue:

«A partir de sondeos realizados a lo largo de la vía 2, y de las experiencias adquiridas en la excavación de la vía 1, este Informe tiene por objeto situar las zonas potencialmente conflictivas y proponer las medidas necesarias para atravesarlas. Hay que señalar, no obstante, que la irregularidad de los niveles de arena impide establecer correlaciones fiables entre sondeos y, por tanto, siempre pueden aparecer bolsas de arena no previstas.»

Garonnette

La posibilidad de repetición de un incidente como el sucedido al excavar la vía 1 (PM 335), recomienda un cuidadoso estudio de la zona de la calle Garonnette.

Para ello se han hecho nuevos sondeos que permiten establecer, en principio, un perfil recogido en la figura 12. Como puede verse el **techo de molasas desciende**,

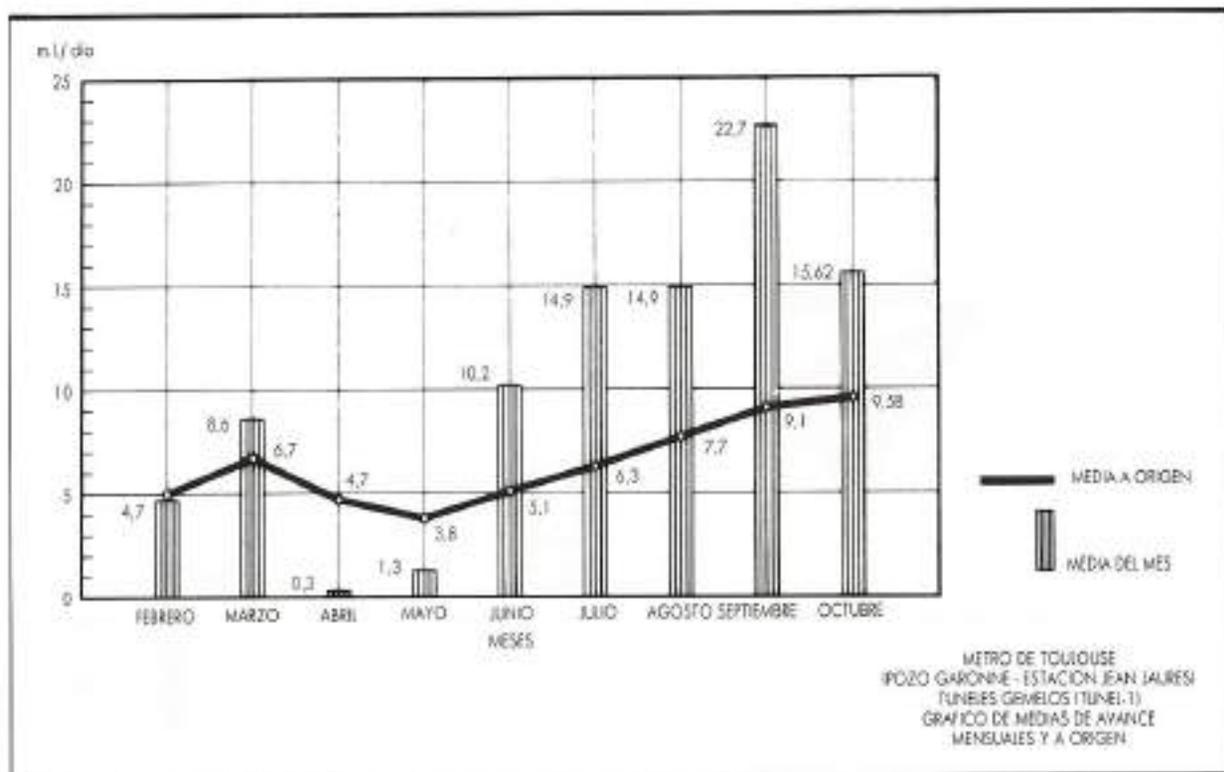


FIGURA 9. Avances diarios medios.

aproximadamente en el PM 335, hasta el nivel de la bóveda del túnel. El contacto aluviones-molasa que se deduce del sondeo SC 5-7, situado entre las vías 1 y 2, así como lo que recogen los SC 5-8; SC 5-2, y SS 1-20, permiten esperar un punto bajo (puede ser un antiguo cauce o meandro del Garona), cuya situación en planta se recoge en la figura 13. Por último, las figuras 14 y 15 señalan, respectivamente, un perfil de la calle Garonnette según los sondeos SC 2-12; 5-4 y SC 5-2 y un perfil transversal que en la Planta (figura 13) se señala como 1-1.

PM-1100

El sondeo 5-12, situado al lado de la vía 1, muestra la presencia de niveles de arena inmediatamente debajo de la bóveda del túnel de la vía 2. Por tanto, y teniendo en cuenta la irregularidad de las capas arenosas, se puede suponer que existe un alto grado de probabilidad de que suceda lo mismo en la vía 2.

Llegada a Jean Jaurés

El perfil de la figura 16 se ha dibujado a partir de datos de sondeos ya utilizados para la vía 1, dada la proximidad de ambos en esta zona.

Dicho perfil muestra que en los 50 últimos metros antes de llegar al parking, la cobertura de molasa sobre la bóveda es del orden de 1 a 1,50 m.

7.1. OTROS PUNTOS DE INTERES

Aparte de las zonas que se acaban de describir, los sondeos realizados en el truzado de la vía 2 no revelan zonas que «a priori» presenten un riesgo para el avance.

No obstante, se deben señalar los niveles de arena de débil espesor (0,6 a 0,8 m) que existe sobre la bóveda en los sondeos SC 1-7 y 5-7 (PM 440 y PM 475 respectivamente).

SW87.2. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA NATURALEZA DEL TERRENO

Antes de hablar de medidas a tomar, parece conveniente insistir sobre la naturaleza de los terrenos, de acuerdo con la experiencia disponible hasta ahora.

1.º La arena es un material que puede llevar a errores de interpretación observada en las cajas de los sondeos. Así, una arena molásica de baja cohesión puede estar desagregada por los útiles de perforación, y parecer una arena, mientras que no se comporta como tal, confinada en el macizo.

2.º Los ensayos de bombeo y permeabilidad ejecutados comprenden terrenos de permeabilidades bien diferentes; tomando el valor medio de todo el corte debería ser superior, en general, al de los tramos más permeables.

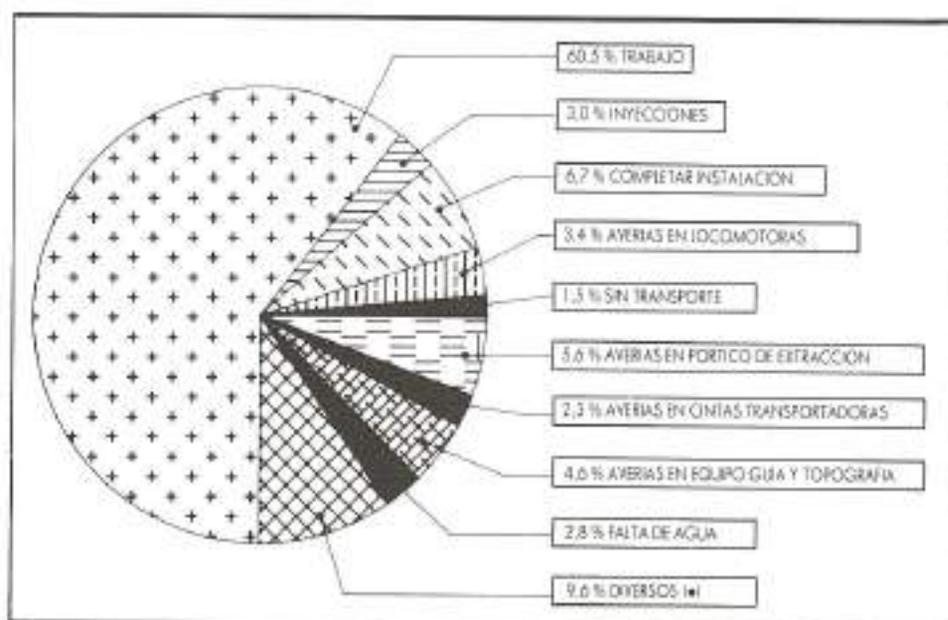


FIGURA 10. Disponibilidad media del escudo.

De todas formas, las cifras halladas (10^{-3} y 10^{-4} cm/s) corresponden a permeabilidades bajas.

3.º La influencia de los ensayos de bombeo sobre los piezómetros próximos señala que, o bien no hay comunicación entre niveles (lo cual no es extraño dada la irregularidad de la distribución), o bien que esa comunicación es, en general, baja. Por ejemplo, el nivel en sondeos SC 5-2 y SC 5-7 no está afectado por el bombeo hecho en el SC 5-1.

4.º Por el contrario, el peligro mayor aparece si las capas se comunican con un pozo antiguo, esté o no relleno, lo que producirá una descarga brusca sobre el túnel. Este hecho se comprobó ya por dos veces (Garonnette y PM 770), durante la ejecución de la vía 1. Pues bien,

pese a los últimos reconocimientos efectuados, este tipo de riesgo existe y hay que tenerlo en cuenta, sobre todo en el tramo bajo el casco antiguo.

7.3. MEDIDAS A TOMAR

Sobre la base de todo lo anterior, sería deseable tomar las siguientes medidas:

- A. Rellenar con inyección todos los pozos conocidos, próximos a la vía 2, que no hayan recibido este tratamiento al excavar la vía 1.
- B. Prever anillos metálicos inyectados, en principio en los siguientes tramos:
 - Calle Garonnette. En unos 40 m a partir del sondeo SC 5-8 (PM 315). Es evidente que no se puede con-

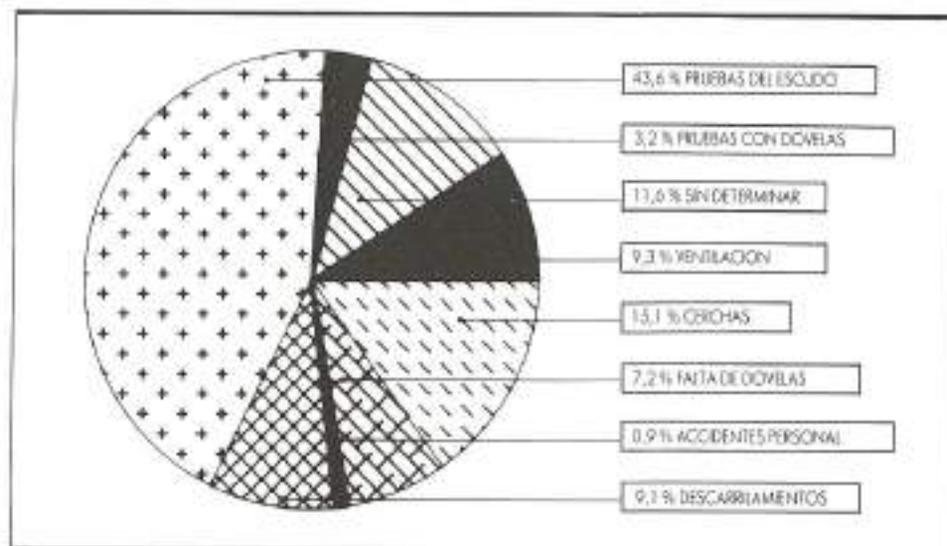


FIGURA 11. Análisis de los tiempos muertos diversos.

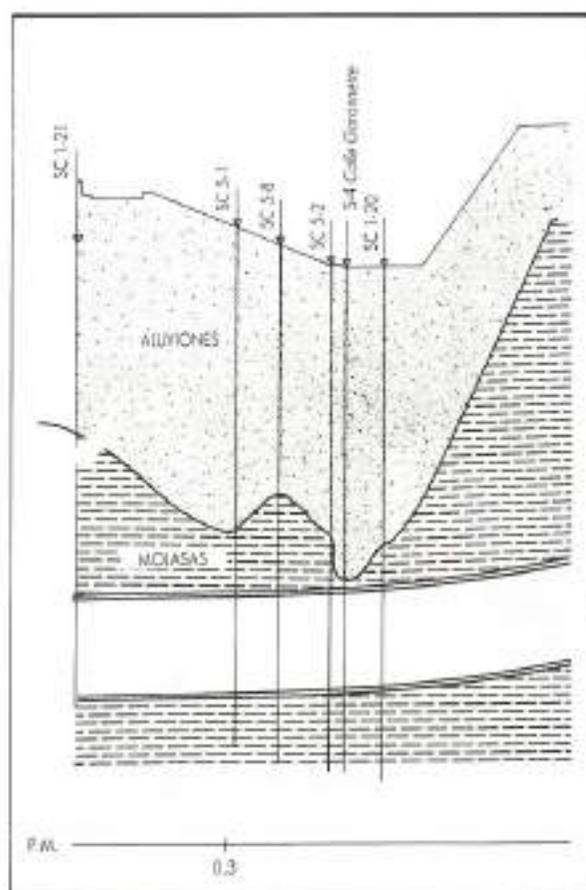


FIGURA 12. Perfil de la zona del P.M. 300.

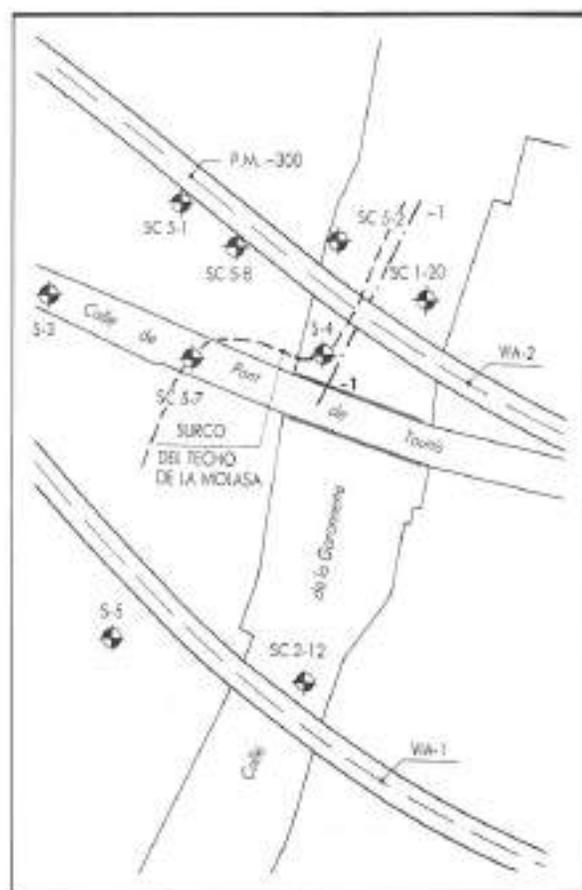


FIGURA 13. Planta de la zona del P.M. 300.

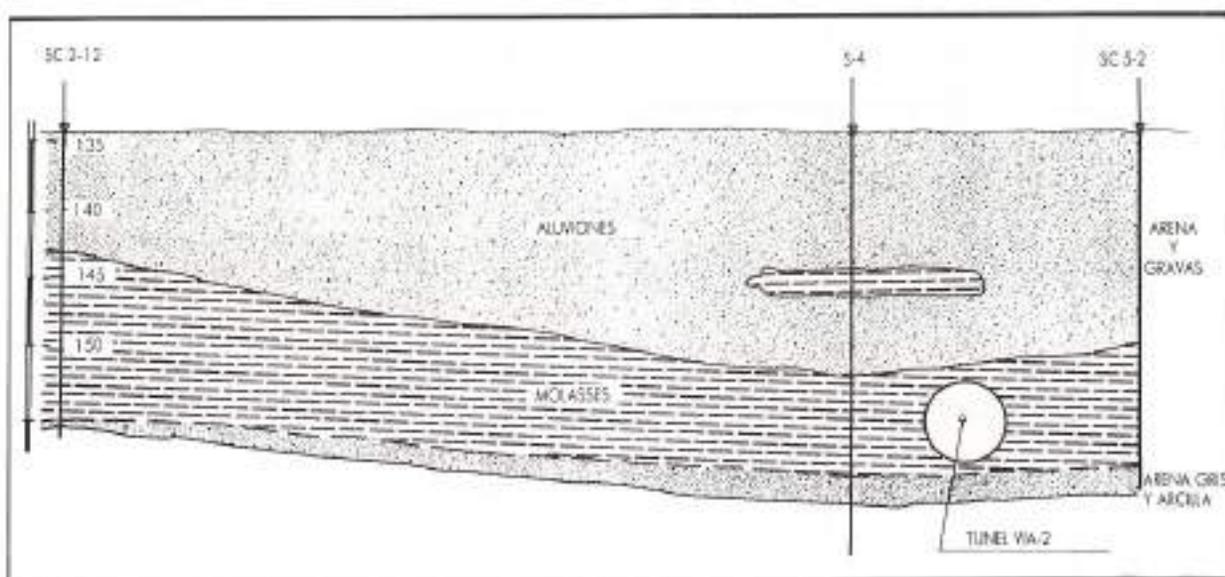


FIGURA 14. Perfil por la calle Garamante.

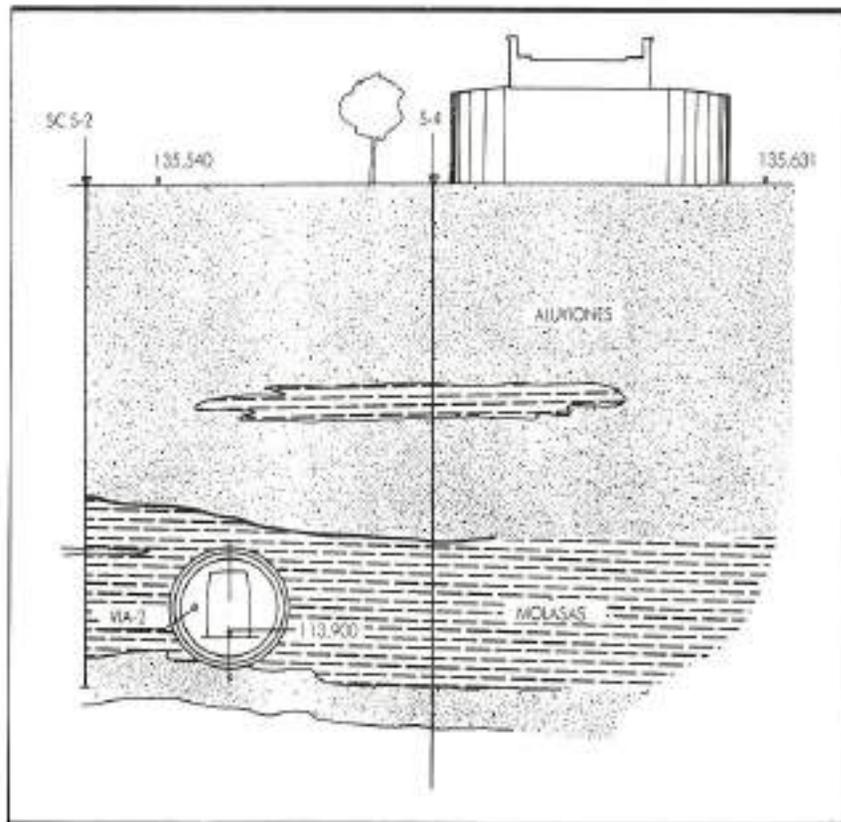


FIGURA 15. Prolongación del perfil según la calle Garamette.

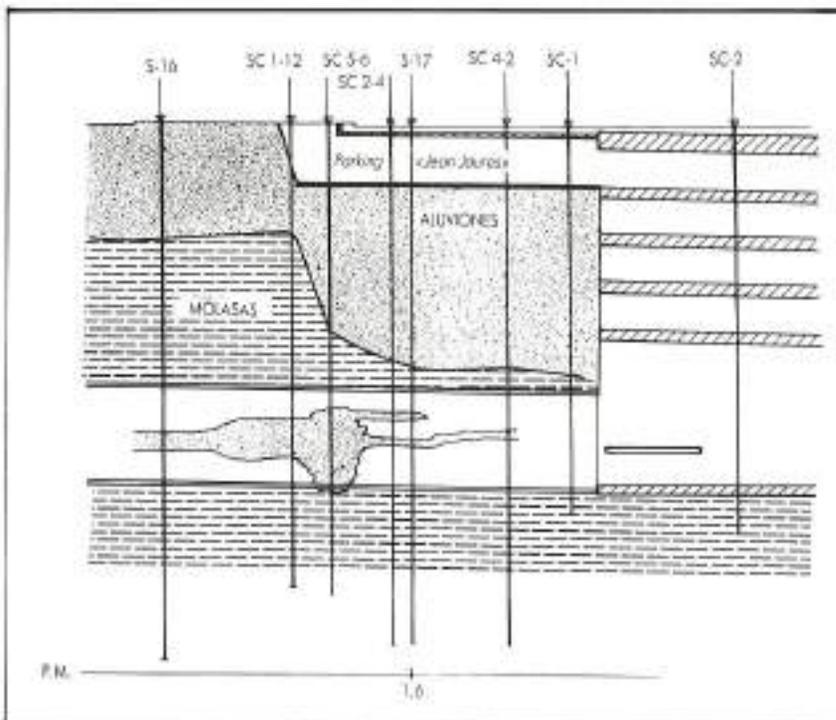


FIGURA 16. Perfil longitudinal de la legada a la estación Jean Jaures.

tar con una precisión absoluta, por lo que hay que establecer una fuerte vigilancia del frente y la decisión para el comienzo de este tipo de revestimiento debe adelantarse en caso de duda.

- Parking Jean Jaurés. Se debe adoptar la misma metodología usada en la vía 1, es decir, pasar a anillos metálicos en los 40 m precedentes al último tramo de anillos de forma especial (20 piezas).
- Además, es conveniente una reserva adicional de anillos metálicos, y muy conveniente hacer una observación sistemática del frente después de cada carrera de avance.

8. CONCLUSIONES

La elección de un escudo de presión de tierra de diseño especial, para excavar los túneles de simple vía del Metro de Toulouse, ha sido plenamente acertada.

La idea de trabajar en lo posible con dovelas expandidas (más del 90 % del trazado de la vía 1), ha sido muy satisfactoria. La práctica totalidad de los asentamientos controlados han sido inferiores a los 5 mm, salvo un tramo entre Capitol y Esquirol, en que se aproximaron a 8 mm, aunque siempre con diferenciales mínimos en las medidas próximas.

En el caso del terreno de Toulouse, ha sido imposible, prácticamente, prever el cambio de terreno —y por ello, el del sistema— con una anticipación razonable, por lo que el contratista hubo de limitar las posibilidades de avance de la máquina.

Aunque pudiera parecer exagerado, es una realidad que en la formación de Toulouse, el paso de una molasa arcillosa impermeable, que se comporta perfectamente con la dovela expandida, a otra arenosa y permeable, suele producirse de repente y en forma errática. Por ello, y pese a la información de los reconocimientos previos, no hay más remedio que recurrir a la constante observación del frente, en cada «carrera» o módulo de avance de la máquina.

Finalmente cabe añadir que la obra de la vía 1 es de esperar nos sirva como un gran sondeo de reconocimiento para la vía 2. No obstante, y aunque se han realizado nuevos trabajos de reconocimiento a lo largo de su trazado, en este peculiar caso las previsiones no tienen la fiabilidad que sería usual en otros macizos.

Para terminar, queremos manifestar y agradecer la ayuda inestimable que para este Proyecto hemos recibido del Profesor Oteo, así como la colaboración prestada por los especialistas de los Servicios Técnicos de Obras Subterráneas y Geotecnia de nuestras empresas.

Premio Internacional Puente de Alcántara

(Convocatoria 1989-1990)

OBRA PREMIADA

*PUENTE SAN ROQUE GONZALEZ DE SANTA CRUZ
sobre el río Paraná (Argentina-Paraguay).*

*Promotor: Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de
Obras y Servicios Públicos del Gobierno Argentino.*

Constructor: Consorcio Puente POSADAS-ENCARNACION.

Autores: Ingenieros Consultores CABJOLSKY y HECKHAUSEN.

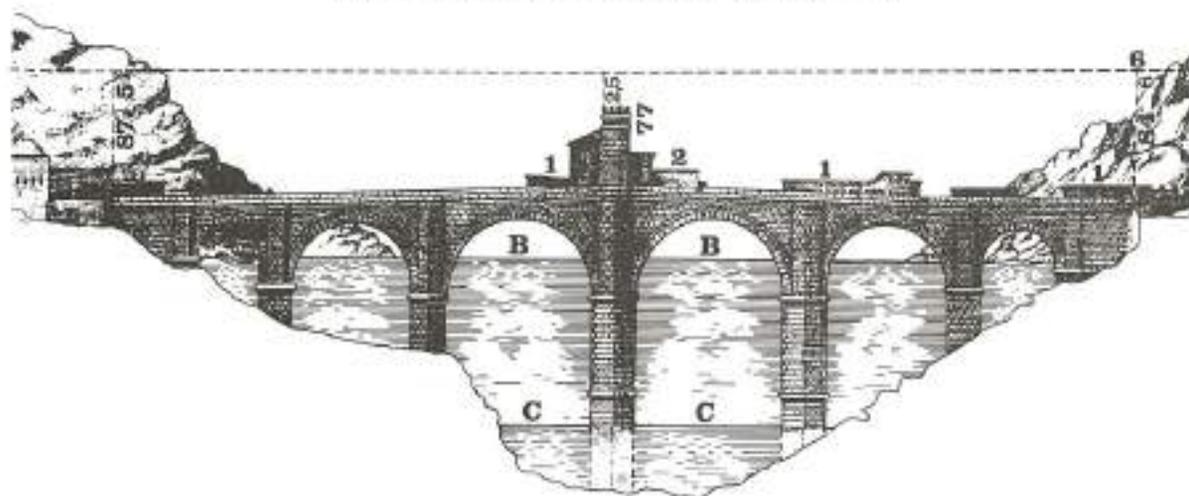
MENCION HONORIFICA

PRESA DE LA SERENA (Badajoz).

Promotor: Confederación Hidrográfica del Guadiana.

Constructor: Agrupación Presa de La Serena.

Autor: Manuel Barragán Sebastián.



Fundación San Benito de Alcántara

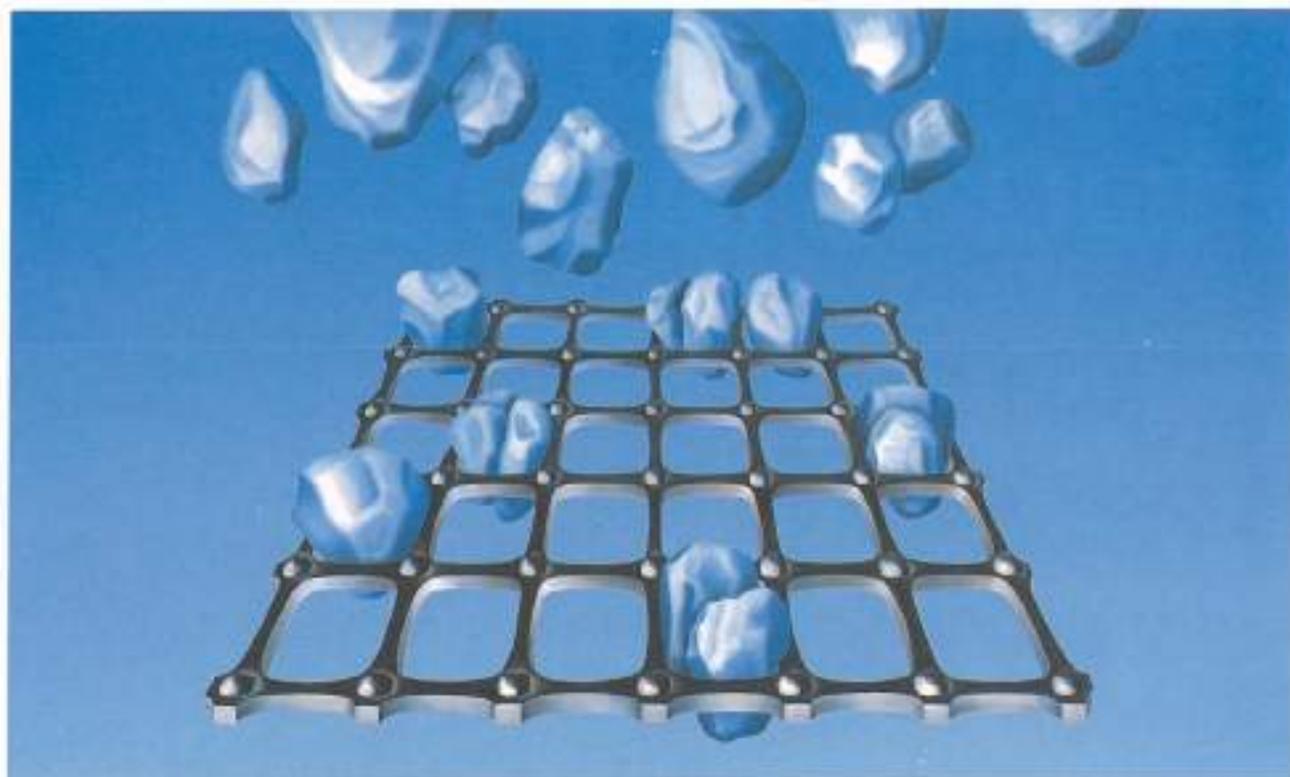
Sede en Alcántara: Convento de San Benito - 10980 Alcántara - CACERES

Sede en Madrid: Serrano, 27 - 28001 MADRID - Telf. (91) 431 99 80



FUNDACION SAN BENITO DE ALCANTARA





Nueva creación en ingeniería civil

Sencillo y extraordinario: La combinación de las georedes **Tensar** y el relleno granular.

La extraordinaria interacción entre ambas, aumenta la capacidad portante de la capa de áridos.

El resultado es una cimentación firme y de gran duración. Una buena idea para poner en práctica: ¡Esto es creatividad!

Estabilidad y Seguridad máximas

En firmes de tráfico intenso, por ejemplo, autopistas y aeropuertos, la seguridad es fundamental en todo momento. Las georedes **Tensar**

contribuyen a aumentar al máximo la capacidad de carga dinámica y por eso

se consigue gran estabilidad y seguridad; y su ejecución es posible con menos materiales de relleno y en un plazo más corto.

Eficaz y de bajo costo

Por ejemplo, el efecto de reparto de fuerzas, de las georedes **Tensar**, impide la propagación de grietas y reduce los efectos de rodera en carreteras de tráfico intenso. Las georedes **Tensar** son la solución de refuerzo más económica y eficaz para resolver estos problemas.

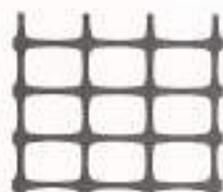
Máximo rendimiento bajo control constante

Los métodos de investigación y de ensayos técnicamente desarrollados, garantizan la seguridad, eficacia y bajo costo de las georedes **Tensar**. Para conseguir resultados permanentes de alto nivel y calidad, las georedes **Tensar** se las someten a continuos y rigurosos procedimientos de control. Sólo las que superen estos controles, pueden ser aplicadas en Ingeniería Civil.

Los trabajos que para esta información visiten a:



Geoliner Systems, S.A.
C/Chloé, Nº 1, Ind. 3ª-1
28220-Majadahonda
(Madrid), España
Tel.: 6 39 67 11, 6 39 68 50,
6 38 84 30
Fax: 6 39 24 87



Tensar

Tensar y "Geoliner" son marcas registradas de Tensar Limited en España e internacionales.

Seguridad a todas luces.

A photograph of a car driving at night on a road. The car's headlights are on, illuminating the road ahead. The road has reflective white markings that are glowing. The background is a dark sky with some orange light, possibly from a sunset or sunrise.

Stamark. Marcaje de Pavimentos.

Mayor visibilidad aún en las horas más oscuras.

Stamark es el nuevo marcaje de pavimentos, exclusivo de 3M, que hace más seguros, visibles y duraderos los marcajes realizados en calles y carreteras.

Posee una superficie retro-reflectante y antideslizante que aumenta su visibilidad, aún en las horas más oscuras, proporcionando una total identificación del marcaje, en cualquier situación meteorológica y sea cual sea la intensidad de la luz emitida.

Ofrece una gran duración al ser especialmente resistente al desgaste. Y su aplicación es fácil e instantánea, al no tener tiempo de secado.

Si desea más información sobre **Stamark**, marcaje de pavimentos, póngase en contacto con nosotros.