

Los túneles de Parpers de la autopista Mataró-Granollers

BORRAS I GABARRO, Xavier. GISA, Director General
OBRADORS I MELCIOR, Víctor. GISA, Gerente de la Obra
CELADA TAMAMES, Benjamín. Geocontrol, S.A., Director General
GALERA FERNANDEZ, José Miguel. Geocontrol, S.A., Director de Geotecnia
VELASCO TRIVIÑO, Eduardo. Geocontrol, S.A., Director de Cálculo Estructural

La autopista Mataró-Granollers atraviesa la Cordillera Litoral Catalana con objeto de enlazar la autopista del Maresme (A-19), actualmente construida entre Barcelona y Mataró, en construcción hasta las proximidades de Malgrat, con la autopista del Mediterráneo (A-7) que une Alicante con la Junquera, en la frontera francesa.

La obra en construcción tiene una longitud de unos 11 km, arranca al sur de Mataró y llega hasta las inmediaciones de la Roca del Valles.

Esta autopista debe atravesar al Coll de Parpers y el Turó de la Simona; para la cual se han proyectado y se están construyendo los *Túneles gemelos de Parpers* con una longitud, cada uno, de unos 2 km.

Características de los túneles

Los *Túneles de Parpers* están constituidos por dos túneles gemelos que, con una anchura de 12,3 m y una altura de excavación de 8,3 m, permiten disponer de dos arcones de 3,5 m, un arcén de 2,5 m y otro de 1 m, con una altura máxima de 5 m. Esto supone una sección de excavación entre 94 y 98 m²; según el tipo de terreno atravesado.

Palabras clave: AUTOPISTA. EXCAVACION. MACIZO ROCOSO. SOSTENIMIENTO. TUNEL.

La autopista Mataró-Granollers en la provincia de Barcelona atraviesa el Coll de Papers y el Turó de la Simona a través de los túneles gemelos de Parpers, de 2 km de longitud cada uno. El proyecto de construcción y el estado actual de las obras son el objeto de este artículo.

En la *Fig. 1*, se presentan las características geométricas de uno de los túneles de *Parpers*.

La longitud del Túnel Derecho de Parpers, referenciado viendo PK crecientes, es de 1997,4 m; mientras que la del Túnel Izquierdo es de 1995,4 m.

Dichos túneles están unidos, cada 300-400 m, por galerías de comunicación de 3 m de ancho y 2,8 m de alto.

Asimismo, se han proyectado dos zonas para detenciones de emergencia que suponen ensanchar la sección normal del túnel unos 1,2 m a lo largo de 20 m.

Proyecto del túnel

El *Proyecto del Túnel de Parpers* fue encargado, por la empresa pública Generalitat de Catalunya *Gestió D'Infraestructures S.A. (GISA)*, a *Geocontrol, S.A.* a finales de 1991 y fue realizado en 1992; incluyendo los trabajos de reconocimiento y diseño que se presentan en los apartados que siguen.

Método de trabajo seguido

En el proyecto de los Túneles de Parpers se han seguido los principios del

Diseño Estructural Activo (DEA), que puede considerarse como una evolución del *Nuevo Método Austriaco (NMA)* que apareció, éste último, a mediados de los años 50, y que se basa en evaluar y aprovechar la capacidad del terreno a contribuir en la estabilización de las excavaciones.

Al igual que el NMA, el DEA se basa en un buen conocimiento de las características del terreno solo que, en vez de utilizar la clasificación de *Lauffer* (1.958) como se hace con el NMA, para establecer los sostenimientos tipo, el DEA utiliza la clasificación de *Bieniawski* (1.979) para estimar las propiedades del macizo rocoso a partir de ensayos de laboratorio y, apoyándose en ellas, definir los sostenimientos tipo.

Los principios del DEA propugnan el diseño del túnel considerando la interacción entre el terreno y el sostenimiento, utilizando métodos numéricos de análisis para establecer los correspondientes equilibrios tenso-deformacionales. De esta forma se establecen de una forma realista, en función del terreno y de la secuencia de construcción, las cargas sobre el sostenimiento que puede ser adecuadamente dimensionado.

Durante la construcción de la obra sólo es necesario caracterizar el terreno para escoger el sostenimiento tipo que previamente se ha diseñado y realizar comprobaciones sencillas, normalmente medidas de convergencia, para constatar la situación real correspondiente con la del proyecto. En caso de que haya diferencias apreciables se modifican las características del sostenimiento para adaptarse al terreno.

El hecho de disponer de un diseño estructural realista, adaptado a las características del terreno y a las dimensiones de la obra, supone una ventaja muy importante respecto al NMA; ya que al aplicar los criterios del DEA, el papel de la auscultación en obra, que es caro y difícilmente apreciablemente las labores de avance, queda muy mitigado.

Esta es la diferencia esencial entre el NMA y el DEA; pues en el NMA se parte de un diseño empírico del sostenimiento, normalmente a partir de la clasificación de *Lauffer*, que debe ser optimizado durante la obra con un uso intensivo de la instrumentación.

En la **Fig. 2**, se presenta el esquema de trabajo siguiendo los principios del DEA.

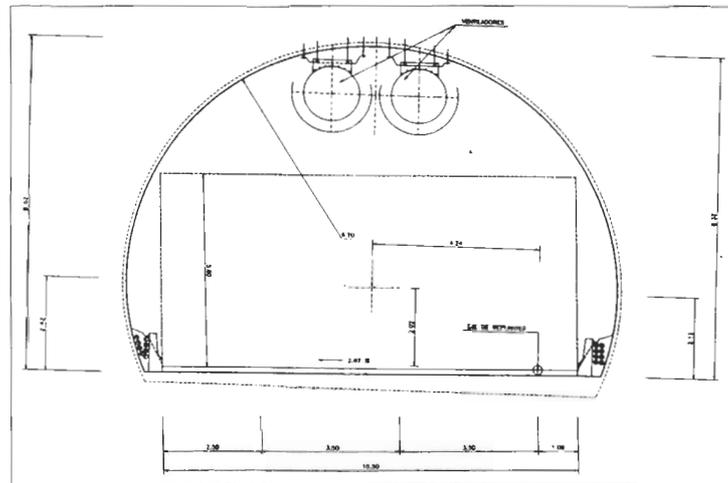


Fig. 1.- Definición geométrica de los túneles de Parpers

Básicamente la ventaja de este método estriba en que un diseño realizado siguiendo los principios de DEA debe estar mucho más próximo a la realidad que el realizado siguiendo los principios del NMA, con lo cual la fiabilidad es mayor y las posibles desviaciones del proyecto respecto a la realidad, menores.

La aplicación del DEA se basa en tres aspectos fundamentales:

- Caracterización del terreno mediante trabajos de campo complementados con ensayos de laboratorio.
- Definición de las Secciones Tipo mediante cálculos tenso-deformacionales.
- Control de la estabilidad de la excavación mediante medidas de convergencia.

Caracterización geotécnica

En los apartados siguientes se presentan los trabajos realizados y los resultados obtenidos en la caracterización geotécnica del terreno que debe ser atravesado durante la construcción de los Túneles de Parpers que, básicamente, está formado por materiales graníticos.

Trabajos de campo

Los trabajos de campo se iniciaron con una cartografía geológica a escala 1:1000 en una franja de 250 m que contiene la traza de los túneles.

A continuación se realizaron diez perfiles de sísmica de refracción, de alta definición, que totalizaron 407 ml y que, básicamente, estaban concentrados en los emboquilles.

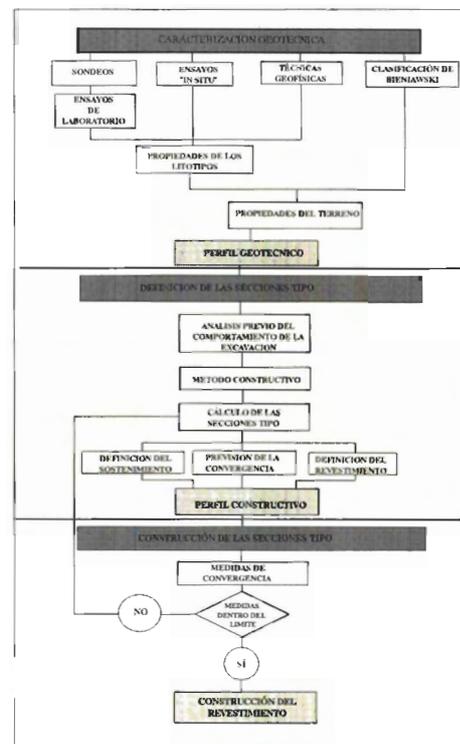


Fig. 2.- Organigrama del Diseño Estructural Activo

Una vez efectuados estos trabajos se realizó una campaña de sondeos de reconocimiento, perforándose un total de 675 m distribuidos en 9 sondeos.

La longitud media de los sondeos perforados ha sido de 75 m. Para una altura de recubrimiento media de 70 m, con una longitud de túnel de unos 2.000 m resulta una superficie vertical a investigar de

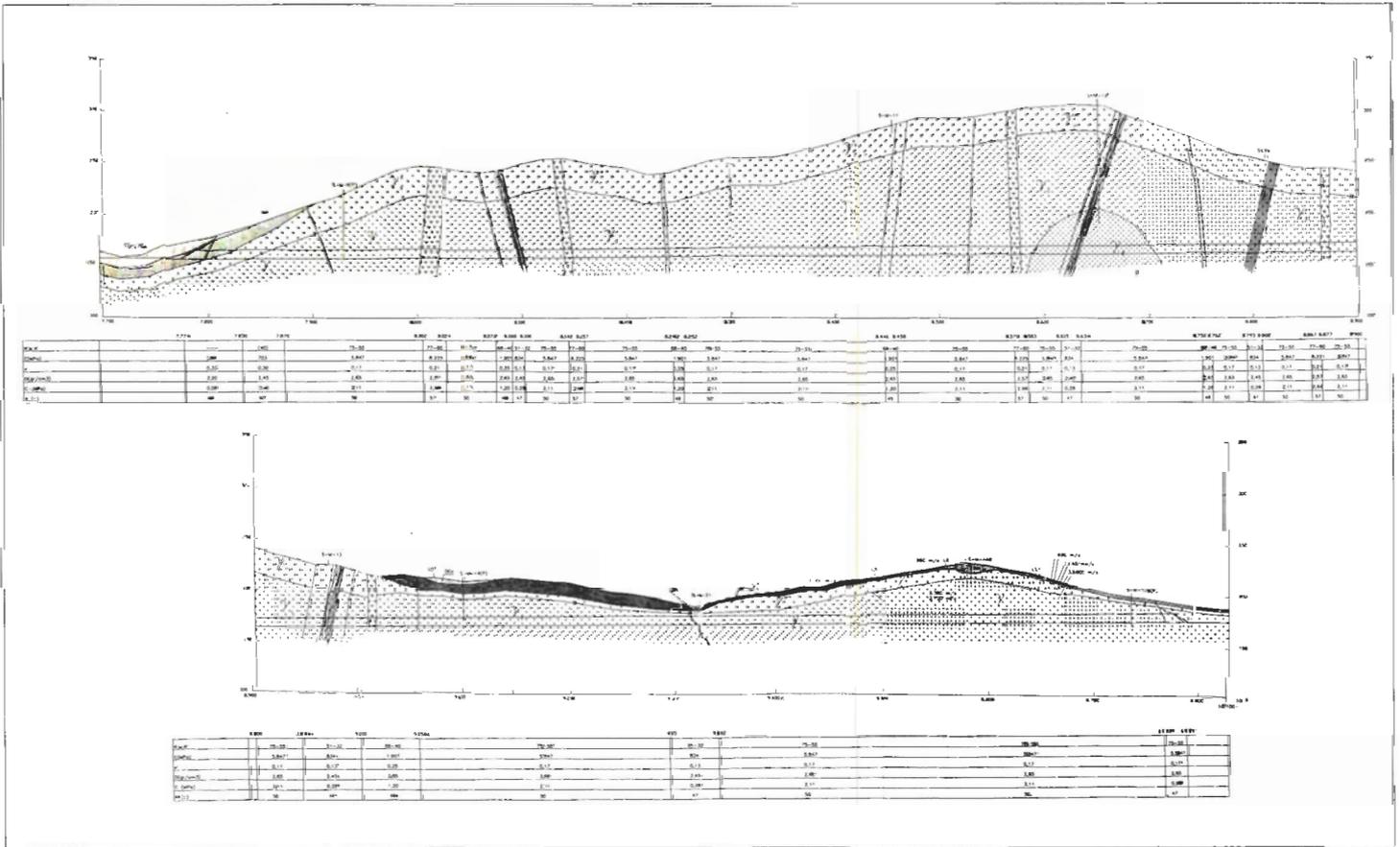


Fig. 3.- Perfiles geotécnicos de los túnel de Parpers

140.000 m². Teniendo en cuenta esta superficie y la longitud total de los sondeos; resulta un ratio de 4,8 mm de sondeo / m² de perfil longitudinal.

La campaña de trabajos de campo se ha complementado con los siguientes ensayos:

- 2 Ensayos de permeabilidad tipo Gilg-Gavard.
- 11 Ensayos de permeabilidad tipo Lugeon.
- 3 Ensayos de permeabilidad tipo Lefranc.
- 47 Ensayos presiométricos
- 109 Ensayos de rotura baja carga puntual

Ensayos de laboratorio

Básicamente los ensayos de laboratorio se han realizado para determinar las

características geotécnicas de los litotipos y discontinuidades identificados en el macizo rocoso. En concreto se realizaron los siguientes ensayos:

- 47 Roturas a compresión simple con medida de paráme-tros elásticos.
- 49 Roturas de tracción indirecta.
- 43 Roturas a compresión triaxial.
- 41 Roturas al corte sobre discontinuidades.
- 12 Análisis petrográficos

En los terrenos de emboquille se han realizado los siguientes ensayos sobre muestra de suelo:

- 8 Ensayos de identificación
- 7 Roturas a compresión simple.
- 5 Ensayos de corte directo.
- 5 Ensayos de compresión triaxial, consolidados y sin drenaje.

Finalmente se han realizado cuatro ensayos de la calidad del agua obtenida en los sondeos para evaluar su posible agresividad.

Propiedades mecánicas del macizo rocoso

Los ensayos de laboratorio proporcionan los parámetros geotécnicos que definen al comportamiento de las rocas intactas de las que se hayan obtenido probetas para realizar los correspondientes ensayos.

Para valorar la plastificación del terreno se utilizó el criterio de Hoek y Brown que está definido por la expresión: donde:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_r \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s_r \cdot \sigma_c^2} \quad (1)$$

donde:

σ_1 = Tensión principal mayor
 σ_3 = Tensión principal menor
 σ_c = Resistencia a compresión simple de la roca intacta

m_r y s_r = Parámetros que dependen de las características del macizo rocoso excavado.

Los parámetros m_r y s_r del macizo rocoso pueden calcularse por medio de las expresiones de Priest y Brown (1.983)

$$m = m_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{28}} \quad (2)$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{9}} \quad (3)$$

donde:

m_i = parámetro relativo a la roca intacta (por definición $s_i = 1$).

RMR = Rock Mass Ratio (según Bieniawski) del macizo rocoso.

El criterio de Hoek-Brown refleja con bastante fidelidad el comportamiento mecánico de las rocas y, con la ayuda del RMR, se pueden estimar con una precisión razonable las propiedades mecánicas de un macizo rocoso determinado. Sin embargo existe una dificultad apreciable al aplicar este método, que deriva del hecho de que la mayoría de los programas de cálculo todavía utilizan el criterio de Mohr-Coulomb que está definido en función de la cohesión (C) y del ángulo de fricción (ϕ).

En este caso, para determinar los parámetros de Mohr Coulomb correspondientes al macizo rocoso se pueden utilizar las expresiones siguientes:

$$\phi^m = (2 \cdot a \cdot tg \sqrt{\lambda \cdot m}) - 90 \quad (4)$$

$$Cm = \sigma_c \cdot \sqrt{s} \cdot \frac{1 - \text{sen } \phi^m}{2 \cos \phi^m} \quad (5)$$

Siguiendo esta metodología se han obtenido las propiedades mecánicas, a nivel de macizo rocoso, que se indican en el Cuadro I para cada uno de los seis litotipos identificados.

Propiedades mecánicas de las discontinuidades

A partir de los resultados de los ensayos de corte se han determinado, siguiendo la

metodología de Barton, las propiedades mecánicas de las discontinuidades identificadas que se indican en el Cuadro II.

Perfil geotécnico

A partir de los resultados de la campaña de campo y de los ensayos de laboratorio se ha elaborado el perfil geotécnico de los Túneles de Parpers. En la Fig. 3, se representa el correspondiente al eje del Túnel derecho.

Proyecto de construcción

En los apartados siguientes se presentan los trabajos realizados para redactar el proyecto de construcción de los Túneles de Parpers.

Definición de las secciones tipo

A partir del perfil geotécnico previsto se establecieron las Seis Secciones Tipo que se definen a continuación.

Sección Tipo I.- Frente excavado en granito con recubrimiento mínimo de 6 m de granito sobre clave. RMR superior a 60.

Esta sección Tipo no se ha incluido en el perfil constructivo ya que solo se ha proyectado ante la eventualidad de que el comportamiento del terreno fuera mejor que lo previsto.

Sección Tipo II.- Frente excavado en granito con recubrimiento mínimo de 3 m de granito sobre clave. RMR comprendido entre 50 y 40.

Sección Tipo III.- Frente excavado en granito con recubrimiento de granito sobre clave inferior a 3 m o con el RMR del frente menor de 40. Esta situación se da en los emboquilles y bajo la Riera de Guaschs.

Sección Tipo IV.- Corresponde al tramo reforzado con cerchas próximo a los emboquilles.

Sección Tipo V.- Corresponde al tramo de falso túnel construido a cielo abierto.

Además se han proyectado la Sección Tipo VI, que corresponde a las zonas de detención previamente excavadas aplicando la Sección Tipo II, y la Sección Tipo IV que corresponde a las galerías de comunicación.

En el Cuadro III se presenta la distribu-

LITOTIPO	E (kg/cm ²)	ν	Y (t/cm ³)	C (kg/cm ²)	ϕ (°)	RMR
MANTO DE ALTERACIÓN	2860	0,33	2,2	---	---	---
GRANITO ALTERADO	7043	0,3	2,45	4	47	(40)
GRANITO SANO	58472	0,17	2,65	21,1	50	75-55
MILONITAS	8340	0,13	2,45	3	46	51-32
GRANITOS FRACTURADOS	19011	0,25	2,65	12,6	48	68-40
DIQUES	82252	0,21	2,57	31,9	55	77-60

CUADRO I.- Propiedades mecánicas del macizo rocoso.

ORIENTACIÓN DE LA DISCONTINUIDAD	RELLENO	JRC	PARÁMETROS MECÁNICOS				
			C (kg/cm ²)	ϕ_p (°)	ϕ_s (°)	Ks (MPa/m)	Kn (MPa/m)
N-40°-E/54° S	Carbonato	6-12	2,6	26	22	2219	3017
N-125°-E/75° S	Carbonato	14-16	0,9	36	32	4142	5633
N-56°-E/70° S	Sulfuros	4-6	1,9	38	37	3268	4445
N-180°-E/84°W	Cuarzo	8-10	7,9	50	38	2157	2933

CUADRO II.- Propiedades mecánicas de las discontinuidades.

SECCIÓN TIPO	TÚNEL DERECHO		TÚNEL IZQUIERDO	
	LONGITUD DE APLICACIÓN	%	LONGITUD DE APLICACIÓN	%
I	1612,4	80,7	1548,9	77,8
III	246	12,3	284	14,2
IV	91	4,5	117	5,8
V	48	2,4	45,5	2,2
TOTAL	1997,4	100,0	1995,4	100,0

CUADRO III.-
Distribución de las secciones tipo

ción de las Secciones Tipo previstas en los dos Túneles de Parpers.

Análisis previo del comportamiento de la excavación

Para realizar el análisis previo del comportamiento de la excavación se estudiaron las dos situaciones que, "a priori", resultaban más desfavorables: la zona próxima al emboquille lado Mataró y la posibilidad de que uno de los túneles se tuviera que excavar en una zona enteramente milonitizada.

Ambos estudios previos se realizaron confeccionando sendos modelos de elementos finitos que fueron resueltos con el programa FLAC.

El programa FLAC utiliza el algoritmo de diferencias finitas, trabaja en elasto-plasticidad y permite asignar a cada ele-

mento del mallado las propiedades mecánicas que se desee a fin de poder simular las condiciones más variadas de presencia de materiales distintos en el modelo.

En los apartados siguientes se resumen los resultados de los cálculos realizados.

Excavación en una zona milonitizada

Para estudiar el comportamiento de la excavación en el caso de que esta se tuviera que realizar en una zona milonitizada, se confeccionó el modelo, que se muestra en la Fig. 4.

En la Fig. 5 se muestra la distribución de desplazamientos, en torno a la excavación, y en ella puede apreciarse que el mayor movimiento se debe al ascenso de la solera que puede cifrarse en unos 1,9 cm.

En la Fig. 6 se presenta la distribución

de los elementos plastificados en el modelo y las cargas sobre los bulones de sostenimiento. Puede apreciarse que, en la etapa final de los cálculos, no hay elementos plastificados lo cual indica que el comportamiento de la excavación es prácticamente elástico.

Análisis del emboquille lado Mataró

Para analizar la estabilidad de los Túneles de Parpers, en las proximidades del emboquille lado Mataró, se confeccionó el modelo de elementos finitos que se muestra en la Fig. 7.

Después de 12.292 iteraciones de cálculo, en la Fig. 8 se muestra la distribución de desplazamientos en el modelo analizado. Puede apreciarse que los mayores desplazamientos se producen en el perímetro del Túnel Derecho, que es el más superficial, en el que se alcanza un descenso de 7,4 mm. En cualquier caso, la escasa magnitud de los desplazamientos calculados confirma que el comportamiento de la excavación es prácticamente elástico.

Método constructivo

A la vista de que el comportamiento de los Túneles de Parpers, en las condiciones consideradas más desfavorables, es prácticamente elástico se escogió como método constructivo el Nuevo Método Austriaco, aplicado en avance y destroza, confiando

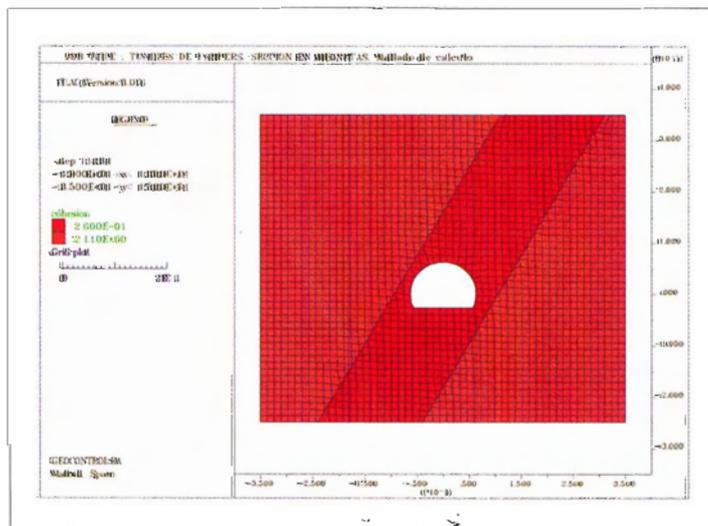


Fig. 4.- Mallado en la zona milonitizada

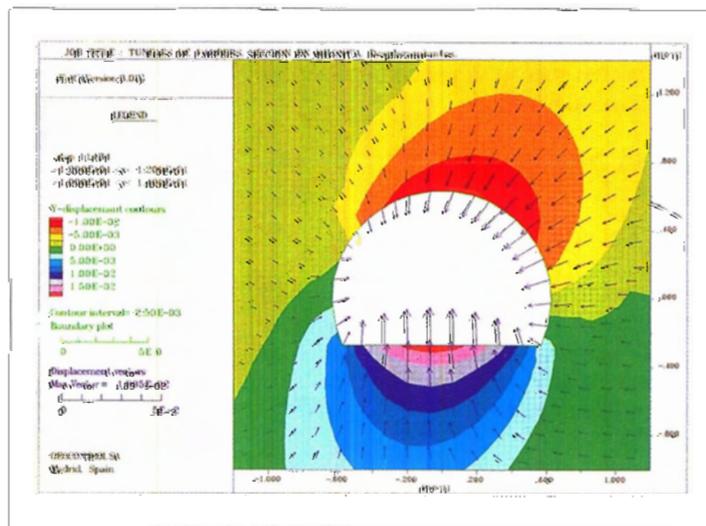


Fig. 5.- Desplazamientos en la sección en milonitas

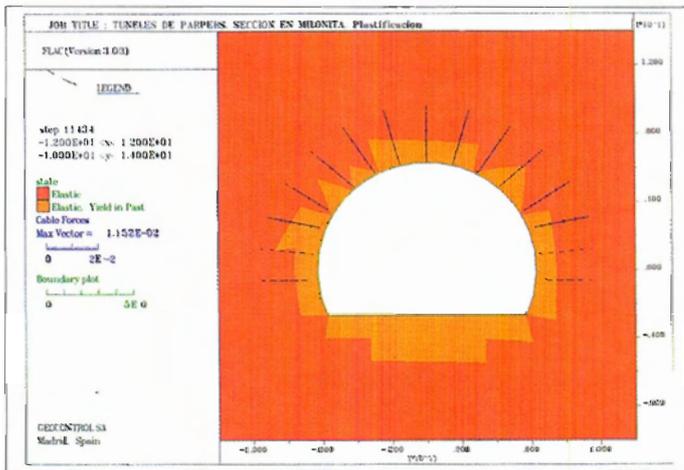


Fig. 6. - Plastificación del terreno y cargas sobre los bulones en la sección en milonitas.

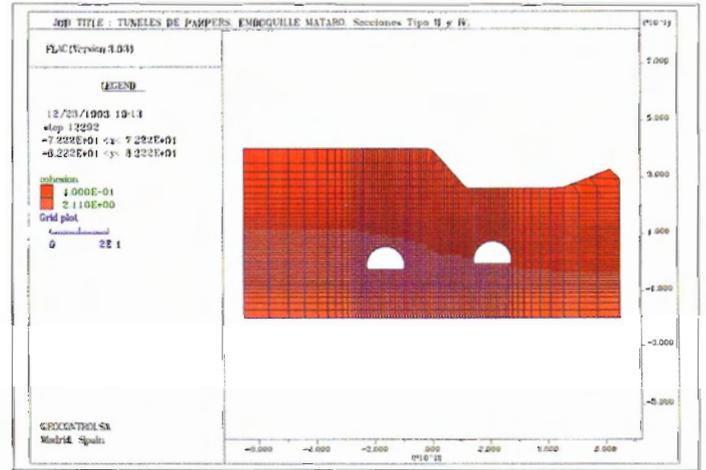


Fig. 7 - Modelo del emboquillado, lado Mataró

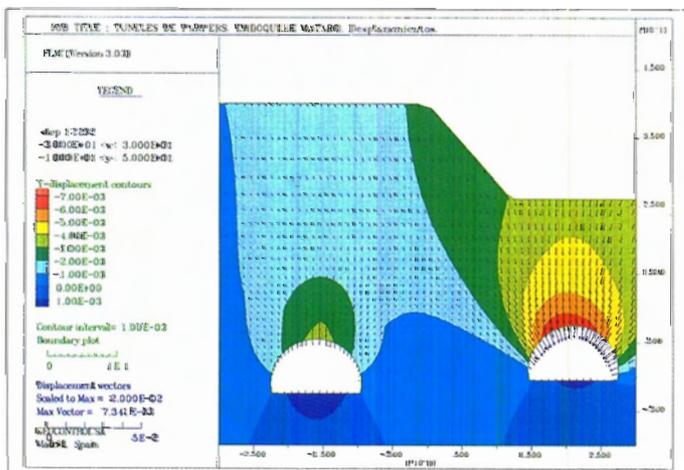


Fig. 8. - Detalle de los desplazamientos en el emboquillado, lado Mataró.

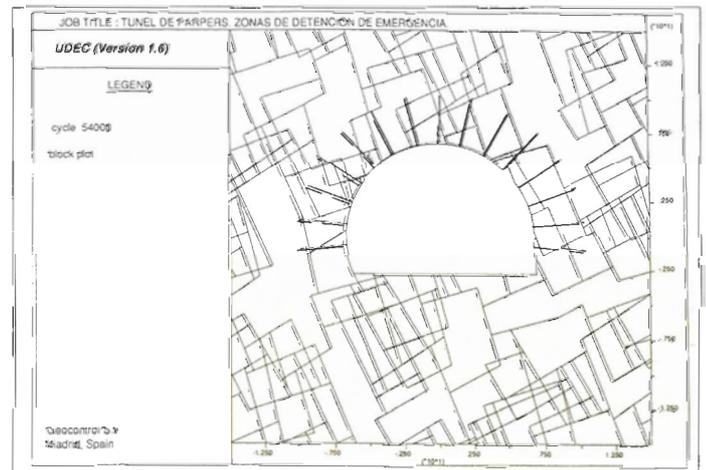


Fig. 9. - Modelo de bloques para el análisis de los anclajes de detención.

el sostenimiento a bulones de anclaje repartido y hormigón proyectado.

Como revestimiento se ha previsto aplicar una capa de hormigón proyectado que, prácticamente hará el efecto de regularizar la sección excavada.

Cálculo de las Secciones Tipo

De acuerdo con el análisis previo de la estabilidad de las excavaciones que se ha realizado ha quedado de manifiesto que el comportamiento esperado era prácticamente elástico; por lo que el cálculo de las Secciones Tipo se debe centrar en valorar el posible movimiento de bloques sobre el perímetro de las excavaciones.

Para estudiar el comportamiento de los bloques, sobre el perímetro de los Túneles de Pappers, se ha utilizado el programa UDEC que, al igual que el programa FLAC, utiliza el algoritmo de diferencias finitas.

La diferencia básica entre ambos programas estriba en que el programa FLAC considera el terreno como un medio continuo; mientras que el programa UDEC analiza el comportamiento del terreno considerando que la rotura puede producirse tanto a través de la matriz rocosa como por alojamiento de la capacidad resistente de las discontinuidades.

De acuerdo con todo lo anterior se ha realizado un análisis tensodeformacional

de las cuatro Secciones Tipo que serán de aplicación en la construcción de los Túneles de Pappers.

En la Fig. 9 se presenta el modelo utilizado para analizar la sección más desfavorable que corresponde a las zonas de detención de emergencia.

En la Fig. 10 se presenta la distribución de desplazamientos en el modelo, después de 34.000 iteraciones de cálculo. El máximo desplazamiento previsto es de 2,18 cm, situado en el arranque izquierdo de la bóveda, lo cual confirma el comportamiento elástico de esta excavación.

En base a los cálculos realizados se han dimensionado las Secciones Tipo a emplear

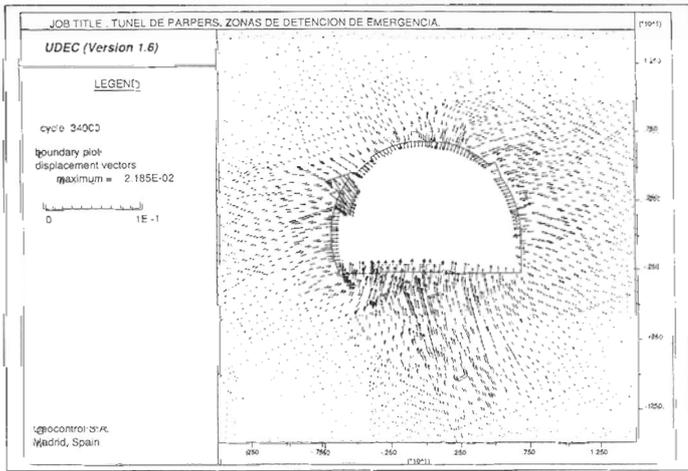


Fig. 10.- Distribución de desplazamientos en los anclajes de detención

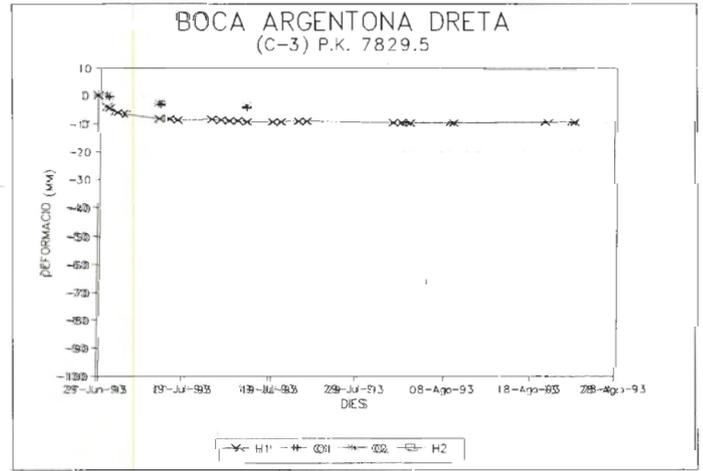


Fig. 12.- Evolución de la convergencia en la estación C-3.

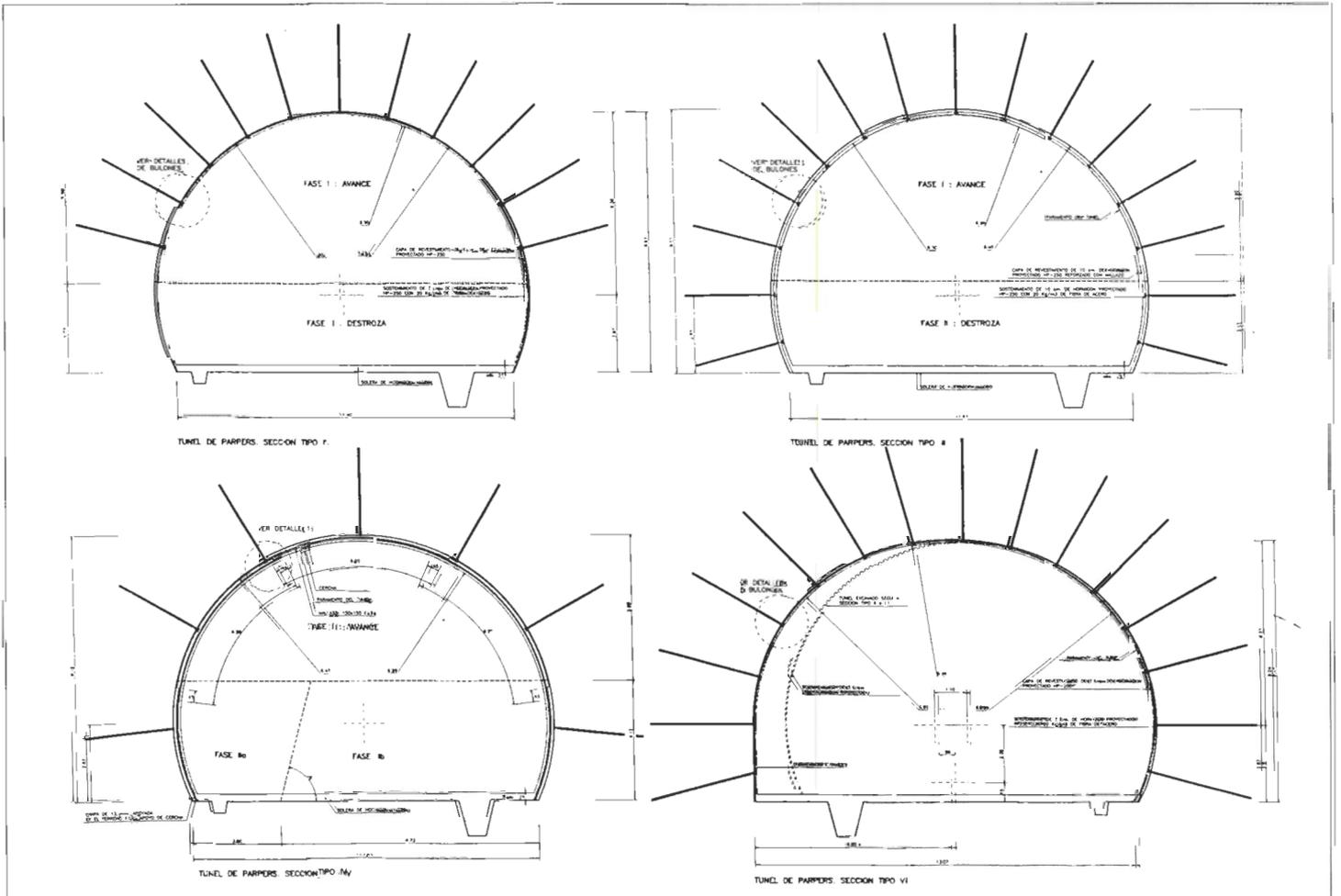


Fig. 11.- Definición de la sección tipo.

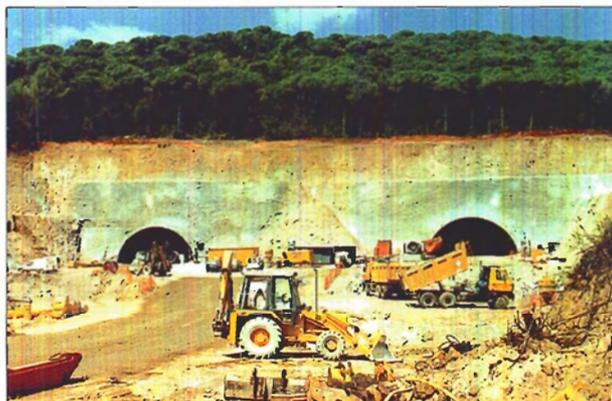


Foto 1.-
Emboquille
lado
Argentona

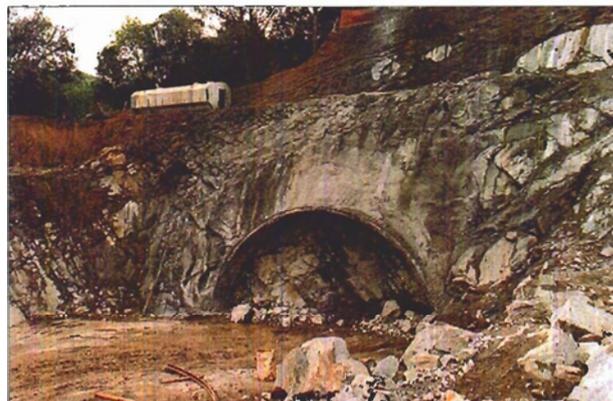


Foto 2.-
Emboquille
Túnel
Derecho
lado de la
roca.



Foto 3.-
Perforación
de uno de
los
frentes.

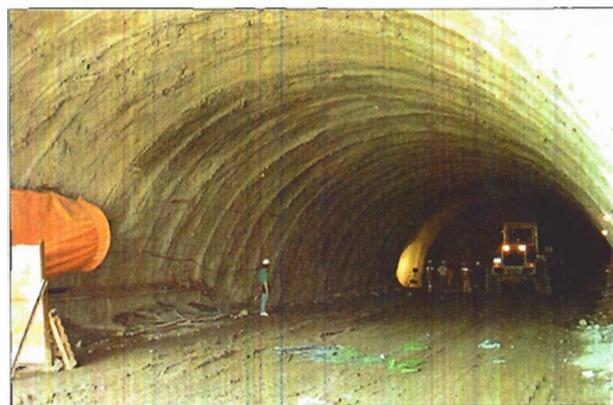


Foto 4.-
Detalle de
un tramo
de la fase
de avance.

BOCA	AVANCES (m)	
	TÚNEL DERECHO	TÚNEL IZQUIERDO
ARGENTONA	534	359
LA ROCA	130	133

CUADRO IV.- Avances obtenidos hasta principios de Diciembre de 1993.

BOCA	AVANCE MEDIO EN DICIEMBRE (m/día)	
	TÚNEL DERECHO	TÚNEL IZQUIERDO
ARGENTONA	5,3	4,9
LA ROCA	4,9	4,9

CUADRO V.- Avances medios obtenidos en Diciembre.

en la construcción de los Túneles de Parpers que se muestran en la **Fig. 11**.

Desarrollo de las obras

Las obras se iniciaron, con la construcción del paraguas del Túnel Derecho del emboquille lado Argentona, en el mes de mayo de 1993.

La utilización del refuerzo con paraguas, previo al inicio de los túneles propiamente dichos, se generalizó en las cuatro bocas de estos túneles lo cual ha permitido comenzar la excavación de los Túneles de Parpers sin ningún tipo de incidentes.

En la **Foto 1** se muestra una vista de las dos bocas del lado Argentona; mientras

que en la **Foto 2** se presenta un detalle del emboquille del Túnel Derecho del lado La Roca.

Hasta principios del mes de diciembre de 1993 los avances alcanzados en las cuatro bocas en excavación son los que se indican en el **Cuadro IV**.

En la **Foto 3** se muestra un detalle de la perforación de uno de los frentes, y en la **Foto 4** la vista de uno de los tramos acabados en la fase de avance.

Durante el mes de diciembre los avances obtenidos son los que se indican en el **Cuadro V**.

En la **Fig. 12** se muestra la evolución de la convergencia en la estación C-3 colocada en el PK 7829,5 de la boca derecha del lado Argentona. En ella puede apreciarse que la convergencia

horizontal está totalmente estabilizada en un valor de 10 mm; que coincide sensiblemente con las previsiones del Proyecto para la Sección Tipo III, que es la de aplicación en ese tramo.

En general se ha encontrado una buena correlación entre las previsiones del Proyecto; tanto en lo que se refiere a la distribución del terreno en el perfil longitudinal de los túneles como al comportamiento de las distintas Secciones Tipo que, hasta ahora, es excelente.

De acuerdo con la marcha de los trabajos se prevé el cese del Túnel Derecho hacia el mes de junio de 1994, la finalización de la excavación de estos túneles en el mes de octubre de 1995. La inauguración de la Autopista Mataró-Granollers está prevista por el mes de enero de 1994.