

Caracterización geotécnica de las zonas débiles del Túnel de Le Perthus

En este artículo se presenta la metodología empleada para caracterizar las zonas de baja calidad geotécnica del Túnel de Le Perthus. Esta metodología tiene dos fases. La primera se ha basado en clasificaciones geomecánicas y en ensayos tanto *in situ* como de laboratorio. La segunda ha consistido en la construcción del Pozo y Galería Experimental de Le Boulou, extensamente instrumentada y en el análisis numérico de todos los resultados.

B. CELADA y J.M. GALERA. GEOCONTROL S.A.
A. GONZÁLEZ. RENFE.
A. ROLLAND. SNCF (Francia).

Palabras clave: ALTA VELOCIDAD, CARACTERIZACIÓN, GEOTECNIA, TREN, TÚNEL.

En la unión mediante un Tren de Alta Velocidad, entre Barcelona y Montpellier, el paso de los Pirineos está previsto mediante el Túnel de Le Perthus, que con unos 8.200 m atravesará la cadena montañosa que limita España y Francia.

Los estudios técnicos de este túnel pertenecen al denominado Tramo Binacional Figueras-Perpignan de unos 42 km, y están dirigidos por el Grupo de Interés Económico AEIE/GEIE Sur Europa Mediterráneo/Sud Europe Méditerranée, coordinado por técnicos de las compañías RENFE y SNCF, así como por técnicos de los Ministerios de ambas naciones.

**Fig. 1.-
Situación del
Túnel Le
Perthus.**



Antecedentes

Los estudios del Túnel de Le Perthus tienen sus antecedentes en los trabajos dirigidos sucesivamente desde 1989 por SNCF y los Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya.

Desde entonces se han barajado varias situaciones para este túnel, pero finalmente el cruce de los Pirineos se realizará bajo la

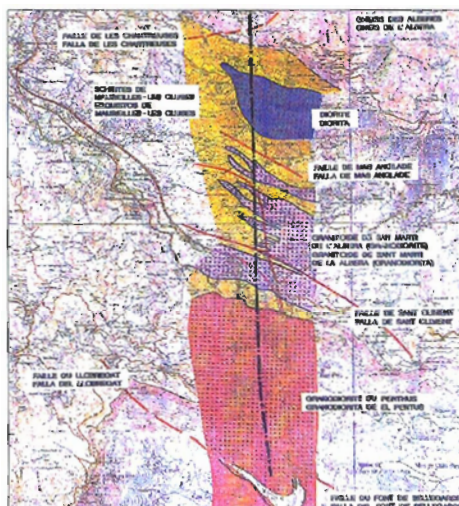
localidad de Le Perthus, entre la Jonquera en España y Le Boulou en Francia. En la **Fig. 1**, se muestra la situación final del Túnel.

Como se ha indicado anteriormente se han realizado numerosos estudios geológicos y geotécnicos. (Sicsol, 1989, 1994; Burgeap, 1994; Geocontrol, 1989, 1990), pero el estudio definitivo se ha llevado a cabo

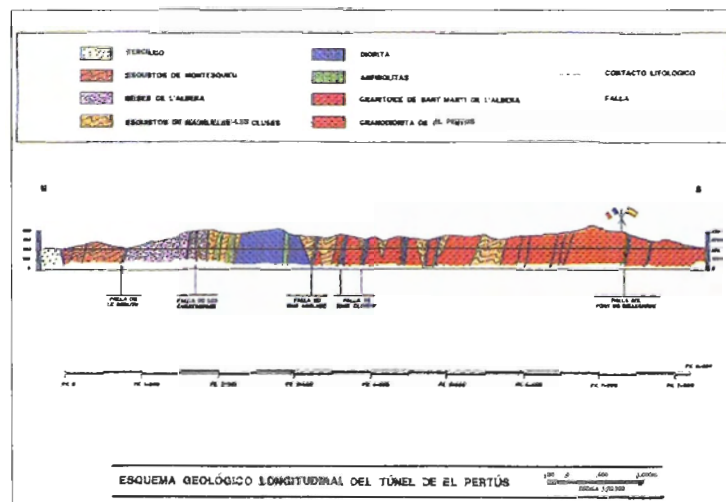
por Geocontrol en 1996. Este estudio puede resumirse en los siguientes datos:

- Cartografía geológica de detalle.
- Geofísica (132 m de sísmica, 3.030 m de perfiles eléctricos, 3 SEV, y 6.340 m de VLF).
- 7.795 m de sondeos con recuperación de testigo.

**Fig. 2.-
Mapa
geológico
del Túnel Le
Perthus.**



**Fig. 3.-
Perfil geológico
del Túnel Le
Perthus.**



- 387 m de sondeos presiométricos.
- 208 presiómetros y dilatómetros.
- 30 ensayos de hidrofracturación en 3 sondeos.
- 1.527 ensayos de laboratorio.

Se puede aceptar que el modelo geológico del túnel se conoce con una buena precisión. En las **Figs. 2 y 3** se muestran un perfil y planta sintéticos.

Asimismo se dispone de un excelente conocimiento de las propiedades resistentes y deformacionales del macizo rocoso y de la situación y conductividad del agua. Como ejemplo, en la **Fig. 4**, se muestran los datos relativos a un tramo del túnel.

Resumen geológico del túnel

Como se observa en el perfil de la *Fig. 3* el túnel se puede tramificar del siguiente modo:

- De 0 a 0+800 m: esquistos negros de Montesquieu. Falla de Le Boulou.
- De 800 a 1.830 m: Neises de Las Albe-
ras.
- De 1.830 a 2.130 m: Esquistos verdes y
neises anfibólicos. Dioritas y mármoles
subordinados.
- De 2.130 a 3.290 m: Dioritas y cuarzo-
dioritas con diques de cuarzo y perma-
tita.
- De 329 a 5.630 m: Esquistos verdes

afectados por numerosas intrusiones de granodiorita. (Granito de Sant Martí de l'Albera). Milonitas.

- De 5.630 a 8.200 m: Granodiorita de El Pertús afectada por una deformación tardi-hercínica. Milonitas.

De acuerdo con este perfil, el túnel se puede resumir geotécnicamente, del siguiente modo:

- Clase geotécnica II (80 > RMR (60): 2.455 m (29,8 %).
- Clase geotécnica III (60 > RMR (40): 3.910 m (47,7 %).
- Clase geotécnica IV (40 > RMR (20): 1.835 m (22,5 %).

Zonas de baja calidad geotécnica del túnel

Tras la investigación realizada se conocen las zonas de peor calidad geotécnica. Estas son:

- Ampelitas. (Esquistos negros de Le Boulou).
- Falla de Le Boulou.
- Falla y zonas tectonizadas de Mas Anglade y Sant Climent.
- Falla del fuerte de Bellegarde.

Con objeto de caracterizar y conocer el comportamiento de estas zonas, se decidió la construcción de un pozo y galería experimentales en Les Chartreuses de Le Boulou, que ha permitido investigar, a escala real, el comportamiento de las ampelitas y de las milonitas de la falla de Le Boulou.

A continuación se presentan las acciones encaminadas a caracterizar estos materiales.

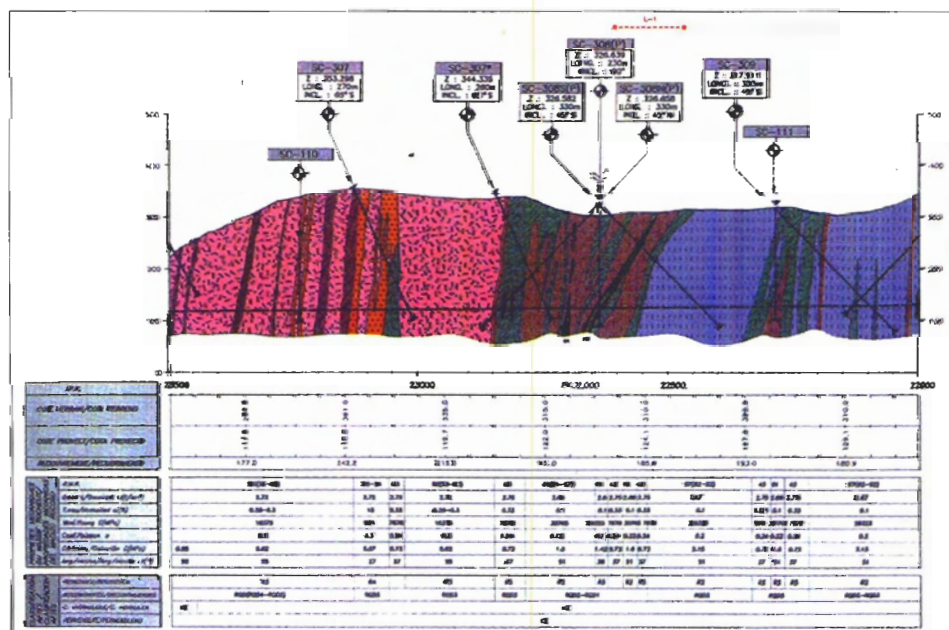


Fig 4.- Ejemplo del perfil geológico.

Programa de caracterización

El objeto del programa de caracterización diseñado es conocer el comportamiento tenso-deformacional de la *Galería Experimental de Le Boulou*, basándose en la instrumentación y en la modelización numérica.

Programa de instrumentación

En la *Fig. 5* se muestra el programa de instrumentación diseñado que, básicamente, consiste en:

- Perforación de dos sondeos desde la superficie, para medidas de deformación usando un extensómetro incremental *Extensofor*.
- Perforación de un sondeo en el frente de la galería equipado con el mismo extensómetro.
- Estaciones de convergencia en la galería.

Predicción ciega

Con objeto de definir el rango y tipo de instrumentación más adecuado, se ha realizado un análisis numérico de la galería.

Esta predicción *ciega* se ha realizado mediante un modelo numérico 3D, resuelto con el programa *FLAC-3D v.2.0*.

En la *Fig. 6* se muestra el modelo empleado, donde se han considerado 8 tipos de terreno: *Neis*, *esquistos negros*, *esquistos negros fracturados*, *neis fracturado*, *falla de Le Boulou*, *esquistos alterados*, *neises alterados*, y *coluvial*.

En el *Cuadro I* se muestran las propiedades de estos ocho terrenos. El modelo ha sido resuelto empleando tres distintas hipó-

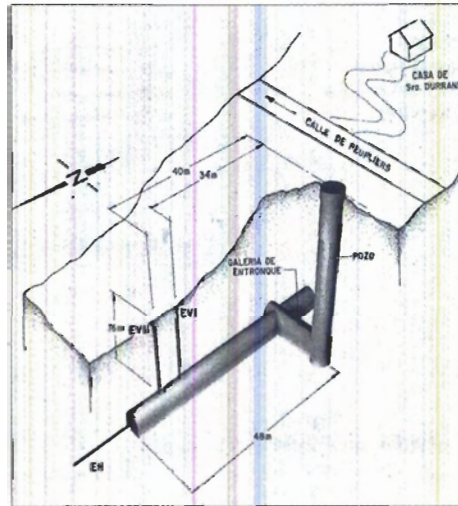


Fig. 5.- Instrumentación propuesta.

tesis (0,7; 1 y 2) para el K_0 (relación entre las tensiones horizontales y verticales).

Los resultados obtenidos han sido:

a) Subsistencia

El valor más elevado de subsistencia de 0,5 mm se obtiene en el caso de $K_0 = 0,7$, mientras que para $K_0 = 2$ tan sólo se obtiene una subsistencia de 0,3 mm. En cualquier caso estos valores no se consideran medibles, sin que además proporcionen información alguna acerca del estado tensional.

b) Convergencia

En la *Fig. 7* se muestra la convergencia que se obtiene para $K_0 = 1$ y en el *Cuadro II* se muestran todos los valores estimados en todos los casos analizados. Considerando que la convergencia

realmente medida sea el 60% de la calculada, se puede concluir que en la falla y esquistos, estas medidas pueden proporcionar una gran cantidad de información acerca del comportamiento mecánico y el estado natural de tensiones existentes.

c) Extensómetro vertical

A partir de los datos del modelo 3D, en el *Cuadro III* se muestran los valores de deformación unitaria esperables en el extensómetro EV-I, mientras que como muestra, en la *Fig. 8*, se muestra el perfil de deformación con $K_0 = 0,7$. La mínima predicción se ha realizado para el extensómetro EV-2.

d) Extensómetro horizontal

En el *Cuadro IV* se muestra la deformación unitaria estimada para el extensómetro EHI, mientras que en la *Fig. 9* se muestra la deformación esperable en función de la distancia al eje del pozo, en caso de $K_0 = 1$.

Predicciones principales

Del análisis efectuado se deduce:

- La subsistencia no es un parámetro crítico a medir.
- La convergencia será significativa sólo en los esquistos negros en la Falla de Le Boulou.
- La transición elasto-plástica se sitúa a 5,6 m del frente de la galería.
- El rango esperable para las deformaciones en los extensómetros verticales y horizontales puede ser perfectamente medido.

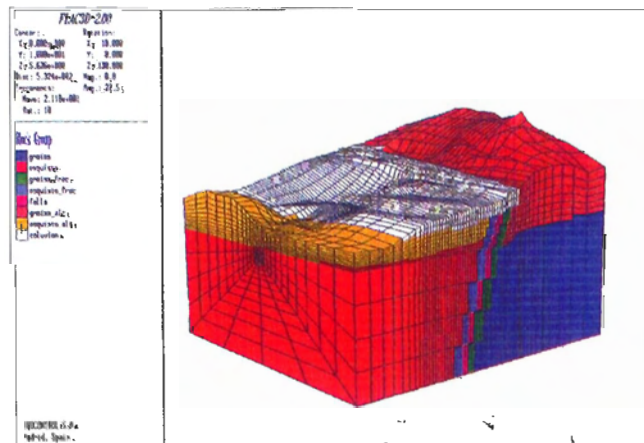


Fig. Nº 6.- Modelo numérico de la Galería Boulou.

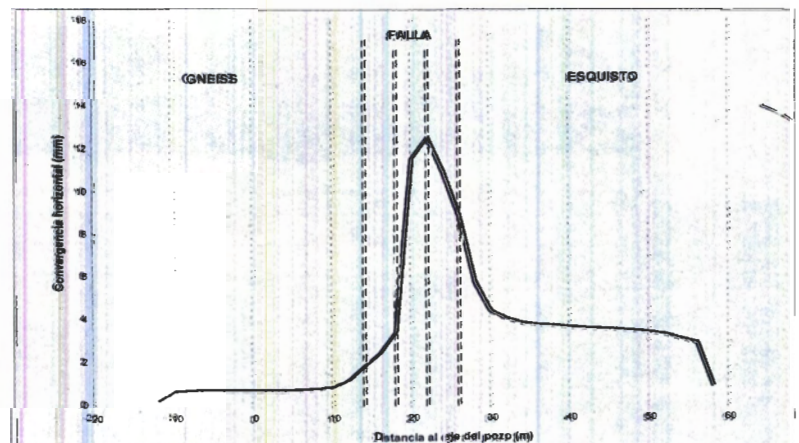


Fig 7.- Perfil de convergencia para $K_0 = 1$.

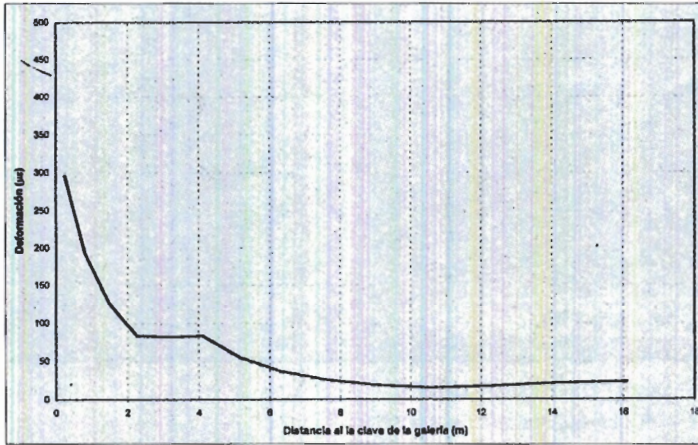


Fig. 8.- Perfil de deformación del extensómetro vertical para $K_0 = 0,7$

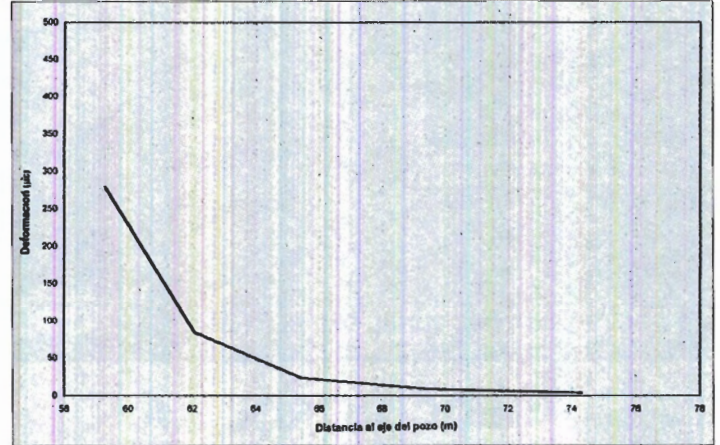


Fig. 9.- Deformación vs distancia para los extensómetros horizontales.

TERRENO	DENSIDAD (g/cm ³)	MODULO DE YOUNG (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON	COHESION (MPa)	ANGULO DE FRICCIÓN (°)
NEIS	2,69	7878	0,3	0,5	50
ESQUISTOS NEGROS	2,60	1267	0,3	0,08	30
NEIS FRACTURADO	2,69	1904	0,3	0,3	48
ESQUISTOS FRACTURADOS	2,50	383	0,3	0,05	25
FALLA	2,60	500	0,3	0	26
NEISES ALTERADOS	2,69	1904	0,3	0,3	48
ESQUISTOS ALTERADOS	2,50	383	0,3	0,05	25
COLUVIAL	2,00	30	0,33	0,03	22

CUADRO I.- Propiedades de los terrenos en la predicción ciega.

ZONA DE LA GALERÍA	DIRECCIÓN DE MEDIDA	VALORES DE CONVERGENCIA (mm)		
		$K_0=0,7$	$K_0=1$	$K_0=2$
NEIS	HORIZONTAL	0,4	0,7	1,6
	VERTICAL	0,9	0,9	0,8
FALLA	HORIZONTAL	9,1	12,4	28,9
	VERTICAL	12,5	15,4	38,8
ESQUISTO NEGRO	HORIZONTAL	2,4	3,8	10,8
	VERTICAL	3,6	3,8	7,3

CUADRO II.- Valores de convergencia.

CUADRO IV.- Valores de deformación unitaria (Extensómetro EH-1).

DISTANCIA AL POZO (m)		LONGITUD DE MEDIDA (m)	DEFORMACION UNITARIA (μm)		
INICIAL	FINAL		$K_0=0,7$	$K_0=1$	$K_0=2$
2,30	2,80	0,50	296	430	1016
2,80	3,41	0,60	193	198	275
3,41	4,13	0,72	127	119	105
4,13	5,00	0,87	84	75	78
5,00	5,91	0,91	82	64	22
5,91	6,91	1,00	83	52	-46
6,91	8,01	1,20	55	33	-38
8,01	9,21	1,21	37	22	-28
9,21	10,54	1,33	26	16	-16
10,54	12,01	1,46	19	13	-5
12,01	13,62	1,61	15	12	5
13,62	15,38	1,77	17	15	11
15,38	17,33	1,95	21	16	-1
17,33	19,47	2,14	23	20	6

CUADRO III.- Valores de deformación unitaria (Extensómetro EV-1).

DISTANCIA AL POZO (m)		LONGITUD DE MEDIDA (m)	DEFORMACION UNITARIA (μm)		
INICIAL	FINAL		$K_0=0,7$	$K_0=1$	$K_0=2$
58,00	60,55	2,55	194	279	679
60,55	63,60	3,05	51	84	237
63,60	67,27	3,67	12	24	84
67,27	71,67	4,40	4	9	34
71,67	76,94	5,28	2	4	17

- Las deformaciones unitarias son muy sensibles al valor del K_0 .

Análisis retrospectivo

Una vez que finalice la construcción de la Galería Experimental de Le Boulou, y se complete el programa de medidas de la instrumentación, se realizará un análisis retrospectivo.

Este análisis permitirá conocer mejor el comportamiento tenso-deformacional del macizo rocoso y el estado tensional existente en la zona de estudio.

Conclusiones

Los estudios geológico-geotécnicos que están siendo realizados para el Túnel de Le Perthus, permiten las siguientes conclusiones:

- Se conoce la situación de las zonas de peor calidad geotécnica.
- La caracterización basada en clasificaciones geomecánicas y ensayos de laboratorio y *in situ*, han permitido definir el rango de los parámetros mecánicos de los esquistos negros y milonitas.
- Se está excavando la Galería Experi-

mental de Le Boulou, que está siendo exhaustivamente instrumentada y analizada numéricamente.

- Se ha realizado una predicción ciega para definir los parámetros y rango de las medidas a efectuar.
- Una vez que se concluyan estos trabajos, se espera obtener un conocimiento preciso del comportamiento tenso-deformacional y del estado tensional, alrededor de la Galería Experimental de Le Boulou.