

Estudio geológico geotécnico del túnel de Bracons

José Miguel GALERA FERNÁNDEZ, (*); David AGUADO NOGUERAS, (*);
Juan Manuel HURTADO SOLA (*) y Sergio SÁNCHEZ, (*)

(*) GEOCONTROL, S.A.

Palabras clave: CARACTERIZACIÓN, GEOLOGÍA, GEOMECÁNICA, HIDROFRACTURACIÓN, PRESIO-DILATOMERÍA, RECUBRIMIENTO, SONDEO, SOSTENIMIENTO, TENSIÓN, TÚNEL.

En este artículo se exponen los trabajos realizados que han permitido conocer razonablemente el perfil geológico y las características mecánicas, resistentes y deformacionales de los terrenos que se atravesarán durante la excavación del *Túnel de Bracons*. Se ha realizado un especial hincapié en la determinación del estado tensional natural existente en el macizo rocoso, ya que el túnel se encuentra situado en un área de compleja historia geotectónica. Los resultados obtenidos permiten dimensionar los sostenimientos más indicados para las condiciones y terrenos que se encontrarán durante la construcción del túnel.

El *Túnel de Bracons* forma parte del proyecto *Nueva Carretera Vic-Olot*, tramo *Torelló-Túnel de Bracons-La Vall d'en Bas*. La longitud del túnel es de unos 4.200 m, y el espesor máximo de recubrimiento 550 m, comunicando la comarca barcelonesa de Osona con la comarca de La Garrotxa, ya en la provincia de Girona.

En la actualidad se ha finalizado el estudio geológico-geotécnico, estando en fase de redacción el proyecto constructivo del túnel.

Geología

El túnel atraviesa el antepaís plegado del Pirineo Oriental, concretamente su estructura más meridional, el anticlinal de *Bellmunt*. De esta forma, la traza recorre desde el emboquille Sur formaciones sedimentarias cada vez más antiguas, hasta alcanzar el núcleo de la estructura anticlinal en el emboquille Norte.

El flanco del anticlinal queda constituido por cinco formaciones sedimentarias rocosas con litología muy variable, que buzan en torno a 40° verticalizándose conforme se acercan al núcleo de la estructura.

Estratigrafía

De Sur a Norte, las formaciones de edad eocena atravesadas por el túnel son:

- *Formación Puigsacalm medio (E5)*, compuesta por limolitas arenosas algo bioturbadas y muy monótonas, de coloración grisácea que se muestran homogéneas en cuanto al tamaño de grano, grado de cementación y fracturación.
- *Formación Areniscas del Cubet (E4)*, que se puede dividir litológicamente en 3 unidades principales, esto es, de base a techo: areniscas con niveles de conglomerados y microconglomerados (*E4¹*); areniscas de grano medio a grueso estratificadas en bancos métricos (*E4²*) y areniscas finas bioturbadas con niveles

limolíticos y margosos intercalados (*E4³*).

- *Formación Bellmunt (E3)*, caracterizada por lutitas rojizas, areniscas e intercalaciones de conglomerados.
- *Formación Bracons (E2)*, se compone litológicamente por areniscas grisáceas con intercalaciones margosas que se encuentran frecuentemente bioturbadas. El tramo con predominio arenoso se denomina en el perfil como *E2^a*.
- *Formación Banyolas (E1)*, constituyen el núcleo del anticlinal de *Bellmunt*, caracterizándose litológicamente como margas grises-azuladas con intercala-

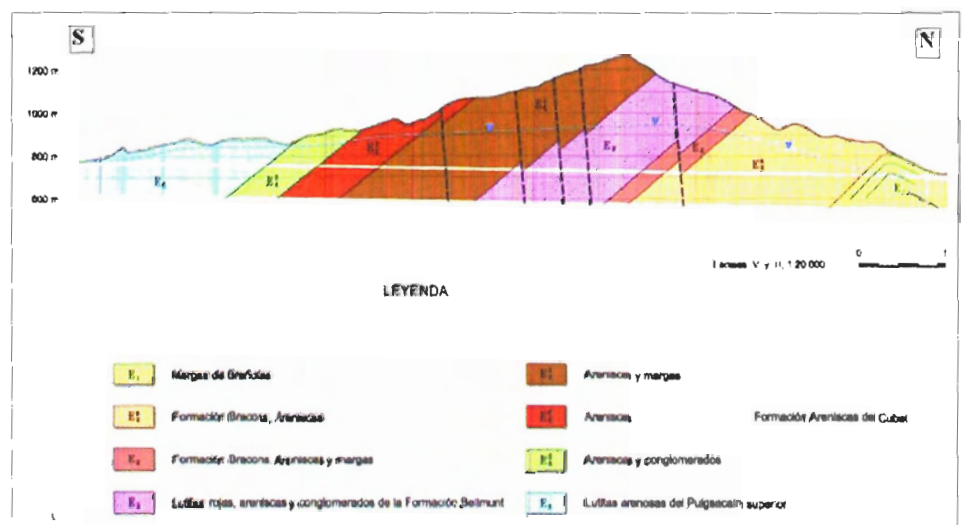


Fig. 1.- Perfil geológico del Túnel de Bracons.

ciones limolíticas. Presentan una fracturación muy variable, desde niveles masivos, hasta zonas con fuerte esquistosidad de plano axial en las inmediaciones del eje del pliegue.

En la **Fig. 1** se muestra el perfil geológico del **Túnel de Bracons**.

Tectónica

La zona de estudio corresponde al dominio estructural de la cuenca del antepaís del Ebro, caracterizada por un conjunto de pliegues y cabalgamientos que afectan a la serie sedimentaria de edad Eoceno medio y superior, depositada sintectónicamente en la orogenia alpina.

La estructura más meridional del antepaís es el anticlinal de **Bellmunt**, con buzamiento en torno a los 40°, llegándose a encontrar en los materiales del núcleo, las margas de Banyolas, una incipiente esquistosidad subvertical, donde los planos de estratificación muestran superficies de deslizamiento capa a capa, relacionadas con el desarrollo del anticlinal, y que deforman la esquistosidad axial. Los buzamientos de los flancos del anticlinal se sitúan próximos a N-S, indicando una compresión máxima horizontal S_H con dirección N-S, y situaciones de $K_0 > 1$ en el Eoceno.

Posteriormente, ya en el Cuaternario, se desarrollan fallas normales con direcciones N-S y hundimiento del bloque oriental que cortan la estructura anticlinal, manteniendo el esfuerzo horizontal máximo próximo a la dirección N-S, pero con situaciones de $K_0 < 1$.

El núcleo del anticlinal se ha visto fuertemente erosionado, de forma que los valores reales de la tensión vertical σ_v han sido mayores a los teóricos, debido a las tensiones residuales generadas por la carga de las rocas ya erosionadas.

Además de los condicionantes tectónicos, el estado tensional de la zona debe estar controlado localmente por la abrupta topografía existente.

Campaña geológica-geotécnica

En una primera fase se realizó una cartografía geológica de detalle a escala 1:2000, mediante recorridos por el campo y fotointerpretación, con el fin de realizar un perfil geológico preliminar del túnel, además de la realización de estaciones geomecánicas donde se obtuvo el índice **RMR** para cada formación en superficie.

Una vez conocida someramente la es-

tructura geológica y características geomecánicas de las formaciones existentes se diseñó la campaña propiamente dicha, resumida a continuación:

- **Sondeos:** se realizaron un total de diez sondeos mecánicos a rotación con recuperación de testigo, con profundidades que oscilan entre los 24,80 m y los 450 m, alcanzando una longitud total de 1.392 m perforados. En la testificación realizada se obtuvo sistemáticamente el **R.Q.D.**, **J₃₀**, **RMR**, y **Q** de **Barton**, además de un muestreo representativo de las distintas formaciones y litotipos.

En la **Foto 1**, se muestra una máquina de sondeos **Longyear 44**, empleada para la perforación de los sondeos más profundos.

- **Presio-dilatometría:** en el interior de los sondeos se realizaron veintidós ensayos presiométricos y dilatométricos, lo que permitió calcular el módulo elástico *in situ* del macizo rocoso para todas las formaciones y a diversas profundidades.

- **Registro sísmico de onda completa:** la testificación geofísica en sondeo mediante sonda sísmica de onda completa tiene por objeto determinar la distribución de las capas intersectadas por el sondeo a partir del estudio de las velocidades V_p y V_s que las caracterizan. A partir de estos valores se puede calcular el Coeficiente de **Poisson** y los módulos dinámicos del terreno investigado (Módulo de Corte, Módulo de **Young** y Módulo Volumétrico). Estos valores se

han comparado con los módulos estáticos obtenidos en los ensayos presio-dilatométricos.

En la **Fotos 2**, se muestra un momento de la realización de las diagráfiyas; y en la **Fig. 2**, un ejemplo del registro obtenido.

- **Ensayos de hidrofracturación:** dada la compleja historia tensional del macizo, descrita anteriormente, se estimó necesario realizar ensayos de hidrofracturación en el sondeo de 453 m a distintas profundidades, para definir no sólo la orientación de las tensiones principales, sino también su magnitud.

El ensayo de hidrofracturación consiste en introducir un sistema de doble obturación e inducir fracturas en el terreno, midiéndose la presión y caudal, a los cuales tiene lugar dichas fracturas. En las **Fotos 4 y 5** se muestran un momento en la ejecución de estos ensayos. En la **Fig. 3** se puede observar un esquema del equipo de hidrofracturación. El ensayo asume que la tensión menor horizontal (S_h) se sitúa perpendicularmente a las fracturas abiertas por la presión hidráulica (P_{si}). De este modo, en el momento que se abre la fractura:

$$S_h = P_{si}$$

Calculando la tensión máxima horizontal (S_H), mediante la expresión:

$$S_H = 3 P_{si} - P_r - P_p$$

donde:

P_r = presión hidráulica.

P_p = presión de poro en el macizo rocoso.

Una vez calculada la magnitud de los esfuerzos se determina la orientación de las juntas con un packer de impresión orientado respecto al norte magnético. El tensor de esfuerzos que afecta al macizo resulta ser:

Profundidad (m)	S_v (MPa)	S_h (MPa)	S_H (MPa)
288,4 ± 85,9	7,1 ± 2,1	4,6 ± 0,2	8,2 ± 0,4
414,3 ± 16,3	10,2 ± 0,4	6,9 ± 0,6	13 ± 1,9

Donde S_h y S_H son el esfuerzo mínimo y máximo horizontal y S_v el esfuerzo vertical principal. La dirección de esfuerzo máximo horizontal S_H es de N 116 + 20.

En las **Fig. 4** se muestra el registro gráfico del ensayo realizado a 202, 5 m, mientras que en la **Fig. 5** se muestra el resultado final donde se aprecia la distribución del estado tensional natural en el rango de profundidades comprendido entre 150 y 450 MPa.



Foto 1.- Emplazamiento de la máquina de sondeos **Longyear 44**, para sondeos de hasta 450 m de profundidad.



Foto 2.- Introducción de la sonda sónica en uno de los sondeos.

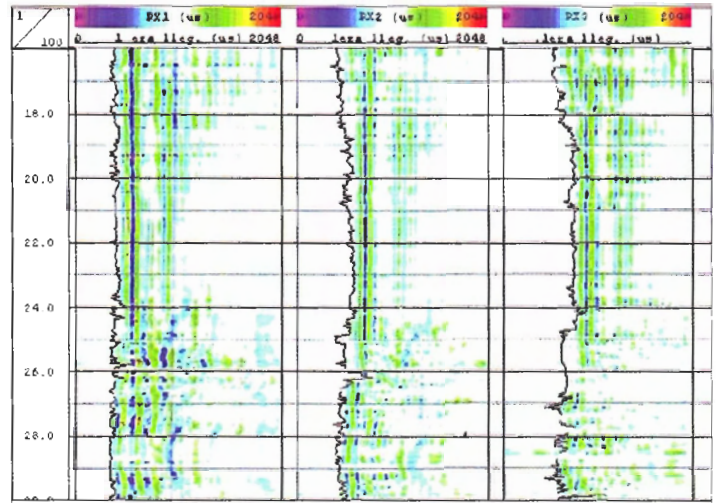


Fig. 2.- Registro sónico de onda completa.



Fotos 3 y 4.- Momentos de la realización de los ensayos de hidrofracturación.

- **Sondeos eléctricos verticales (SEV):** los sondeos eléctricos tienen por objetivo estudiar distribución de los materiales del subsuelo en la vertical del punto de medida, basándose en la existencia de contrastes entre los valores de resistividad característicos de las diversas capas del terreno. Se realizaron cuatro S.E.V. con AB/2 entre 150 y 300 m. con los que se complementó la información estratigráfica obtenida en los sondeos mecánicos y se detectaron zonas de falla, cubriendo una profundidad de investigación de hasta 200 m.
- **Sísmica de refracción:** la finalidad de las líneas sísmicas consiste en determinar el espesor del suelo, manto de alteración y posición del sustrato rocoso, mediante la velocidad de propagación de las ondas compresionales en estos medios. Se han realizado un total de ocho líneas sísmicas de refracción de

55 m de longitud, en las zonas de emboquille, donde la velocidad de las ondas

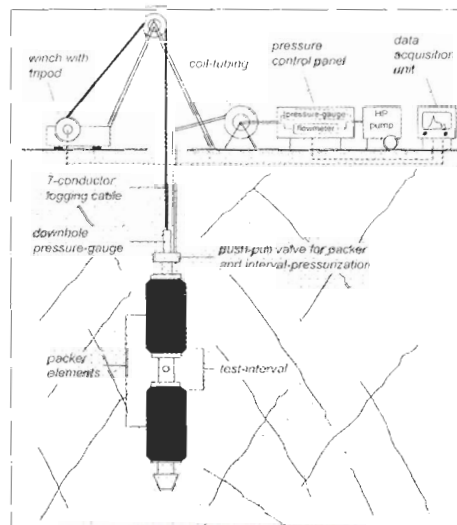


Fig. 3.- Esquema del ensayo de hidrofracturación.

sísmicas es un buen indicador de los espesores de los depósitos de recubrimiento que pueden existir. En la Foto 5 se observa la realización de una línea sísmica en el campo.

Aspectos hidrogeológicos

El macizo rocoso estudiado presenta una cierta permeabilidad de tipo secundario a favor de las fracturas. Como el patrón de fracturación varía sustancialmente entre distintas formaciones, pero se mantiene constante para una misma formación, el problema radica en conocer suficientemente las distintas permeabilidades y la posición del nivel freático a lo largo del túnel.

En todos los sondeos perforados se instalaron piezómetros con lo que se pudieron medir los niveles freáticos y sus variaciones estacionales.

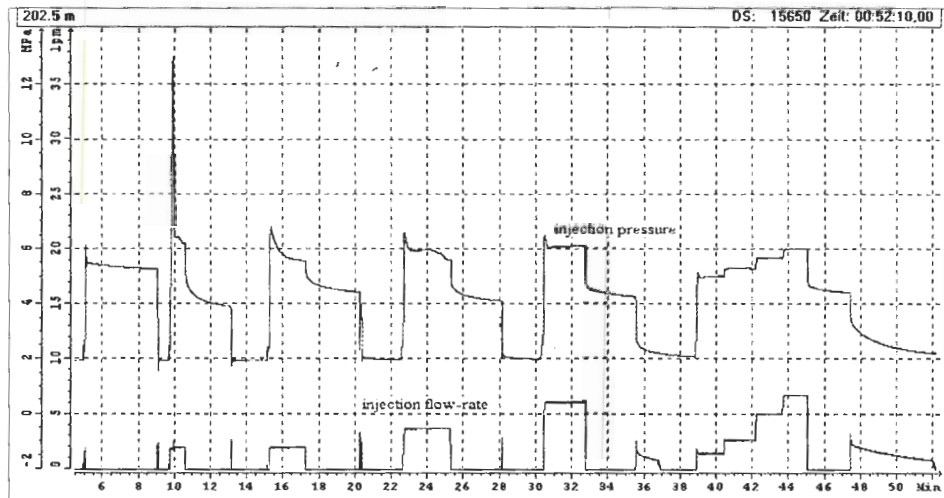


Fig. 4.- Registro del ensayo realizado a 202, 5 m de profundidad, donde se aprecia una presión de cierre (shut-in pressure) de 4,6 MPa.

Se han realizado diez ensayos tipo *Lugeon*, a profundidades comprendidas entre 38 y 202 m, con lo que se ha podido estimar la permeabilidad en ciertos tramos para cada formación.

Mediante la comparación de la fracturación en los tramos indicados y la fracturación media de la formación (registrada en la testificación), y cotejando los resultados con los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos de hidrofracturación se ha estimado la permeabilidad media para cada formación, como se muestra en el **Cuadro I**.

Conociendo la permeabilidad y la posición del nivel freático se estimó la infiltración de agua en cada tramo del túnel, utilizando el método de *Goodman*.

Formación	Litología	Permeabilidad estimada (K) (m/s)
E1	Margas de bañolas	$7 \cdot 10^{-8}$
E2	Areniscas y margas	$8 \cdot 10^{-7}$
E3	Conglomerados, areniscas y lutitas	$9 \cdot 10^{-7}$
E4	Areniscas	$5 \cdot 10^{-7}$
E5	Limolitas	$3 \cdot 10^{-7}$

Cuadro I.- Permeabilidad estimada de las formaciones presentes.

Caracterización del macizo rocoso

En el túnel de Bracons se han diferenciado seis litotipos correspondientes a la diferentes formaciones que aparecen.

Para caracterizar mecánicamente estos

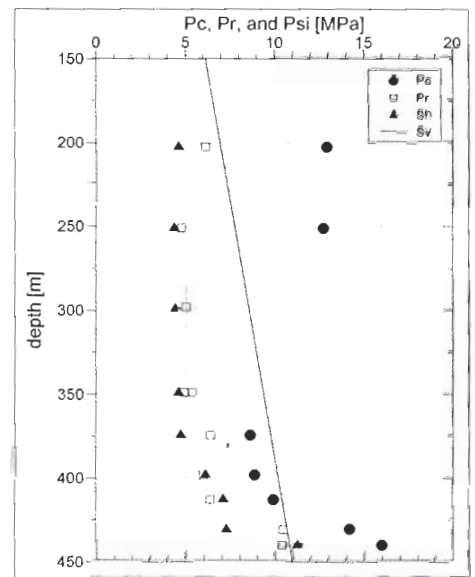


Figura 5.- Perfil de tensiones naturales obtenido en el sondeo S-15+650.

materiales se ha partido de los resultados de los ensayos de laboratorio, con los cuales se han ajustado las envolventes de rotura con los criterios de *Mohr-Coulomb* y de *Hoek-Brown*, para la roca intacta.

El número de ensayos realizados, sobre cada formación se recoge en el **Cuadro II**.

A partir de los resultados obtenidos en estos ensayos, se realizó una regresión lineal sobre los valores de σ_1 y σ_3 obtenidos que proporcionó los valores de los parámetros geomecánicos que se exponen en el **Cuadro III**. Así mismo, en las **Figs. 6 y 7** se incluyen gráficamente en el plano $\sigma_1 - \sigma_3$ y, los resultados de los ajustes realizados para los litotipos de margas y lutitas; donde r^2 es un valor entre 0 y 1 que expresa la



Foto 5.- Equipo utilizado para la sismica de refracción.

FORMACIÓN	COMPRESIÓN SIMPLE	COMPRESIÓN TRIAXIAL	BRASILEÑO
E1, Margas de Banyoles	6	4	8
E2, Formación Bracons	10	6	6
E3, Conglomerados de Bellmunt	8	9	6
E4, Areniscas de Cubet	4	5	2
E5, Puigsacalm medio, limolitas	42	13	10

CUADRO II.- Ensayos realizados.

LITOTIPO	HOEK-BROWN			MOHR-COULOMB			
	mi	σ_c^e (MPa)	r^2	c_i (MPa)	ϕ_i (°)	σ_c^e (MPa)	r^2
E1 Margas	6,59	26,47	0,68	5,93	39,59	25,19	0,81
E2 Lutitas y areniscas	6,44	43,84	0,73	10,15	38,18	41,8	0,85
E3 Lutitas	8,07	16,12	0,75	4,29	35,13	16,54	0,81
E3 Areniscas	7	75,0	0,78	15,03	44,62	71,91	0,84
E4 Areniscas	20,73	59,69	0,56	9,01	55,04	57,23	0,53
E5 Limolitas	7,3	45,77	0,43	9,62	43,08	44,34	0,61

CUADRO III.- Caracterización geomecánica a nivel de roca intacta.

GEOMECÁNICA

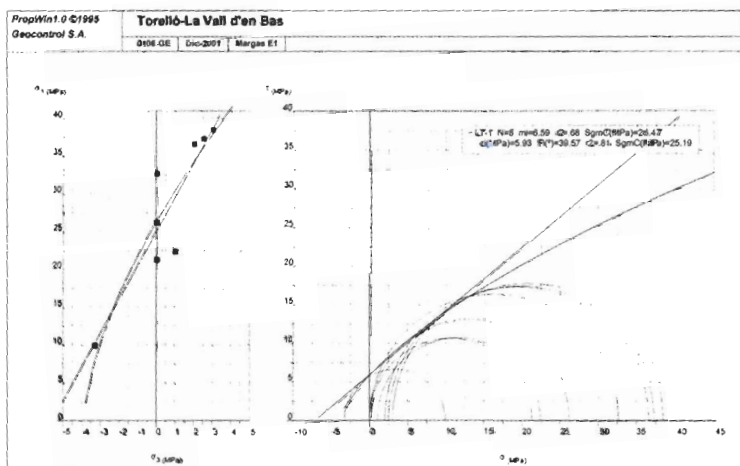


Fig. 6.- Ajuste realizado sobre las margas.

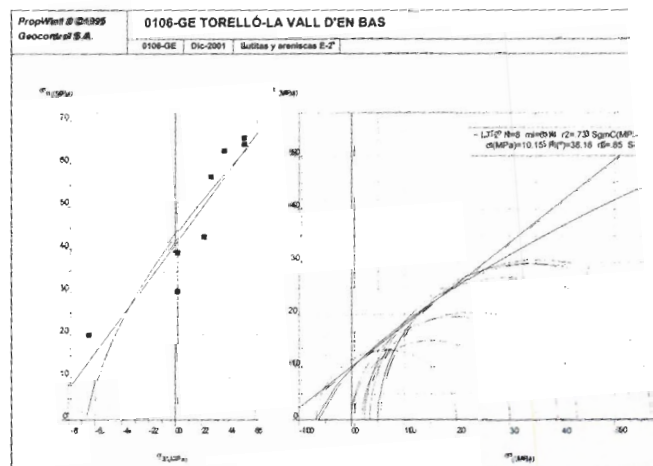


Fig. 7.- Ajuste realizado sobre las lutitas.

TÚNEL DE BRACONS										
LITOTIPO	E_m (MPa)	ν	m_i	σ_c^i (MPa)	RMR **	m	s	RECUBRIMIENTO (m)	C^m (MPa)	ϕ^m (°)
E1 MARGAS	2.578	0,3	6,59	26,47	38	0,72	0,00162	50 100 154 184*	0,2 0,2 0,2 0,2	37 32 29 28
E1 MARGAS (ZONA EJE DEL PLIEGUE)	1.825	0,3	6,59	26,47	32	0,58	0,00052 3	50 100 154 184*	0,1 0,1 0,1 0,1	36 31 28 26
E2 LUTITAS Y ARENISCAS	11.773	0,3	6,44	43,48	60	1,543	0,01174	100 200 300 380*	1,1 1,1 1,2 1,3	39 35 32 31
E3 LUTITAS	10.902	0,3	8,07	16,12	54	1,56	0,00603	100 200 300 400 500 546*	0,3 0,3 0,3 0,4 0,4 0,4	34 29 26 24 22 22
E3 ARENISCAS	10.902	0,3	7,0	75	54	1,353	0,00603	100 200 300 400 500 546*	1,2 1,3 1,4 1,5 1,5 1,6	43 38 36 34 32 32
E4 MARGAS	13.738	0,3	20,73	59,69	60	4,967	0,11743	50 100 150 200*	0,9 1,0 1,1 1,1	57 53 51 49
E5 LIMOLITAS	10.721	0,3	7,3	45,77	58	1,628	0,00940 3	50 100 124*	0,9 1,0 1,0	45 41 39

*Cota de la rasante

** Corregido según la orientación

CUADRO IV. - Caracterización del macizo rocoso.

bondad del ajuste, y m_i un parámetro dependiente de la litología que permitirá caracterizar el macizo rocoso.

Los valores a nivel de roca intacta anteriormente expuestos se han minorado a nivel del macizo rocoso a través del índice **RMR**.

En base a lo anterior se llegó a los resultados que se recogen en el **Cuadro IV**.

Los parámetros m y s se obtienen a partir del **RMR** y del m_i , permitiendo obtener los valores de c^m y ϕ^m (cohesión y ángulo de fricción a nivel del macizo rocoso) para cada nivel de confinamiento.

Por lo que respecta a los parámetros formacionales, se ha realizado un estudio comparativo de los obtenidos mediante ensayos dilatométricos y en las diagramas sónicas realizadas con los resultantes de expresión de *Hoek et al* (1996).