Investigación y caracterización geológico-geotécnica para el proyecto de túneles

Benjamín CELADA TAMAMES. Geocontrol, S.A. Director General
José Miguel GALERA FERNÁNDEZ. Geocontrol, S.A. Director de Geotecnia

Palabras clave: GEOLOGÍA, GEOTÉCNIA, INVESTIGACIÓN, MECÁNICA DE ROCAS, SOSTENIMIENTO, TÚNEL.

En este trabajo se presenta una metodología sobre adquisición de datos para caracterización geotécnica de los terrenos, que ha sido aplicada con éxito en el proyecto de varios túneles en los últimos años, que concreta el planteamiento de los trabajos de campo y laboratorio y establece las bases teóricas para cuantificar las características tenso-deformacionales del terreno.

El proyecto de un túnel, en general, supone un grado de dificultad mayor que el resto de las estructuras que se integran en una obra lineal. Gran parte de esta mayor dificultad radica en que para proyectar un túnel hay que contar con un material natural *el terreno* cuyas propiedades resistentes y deformacionales no son bien conocidas y cuya investigación requiere esfuerzos económicos importantes.

Actualmente, los esfuerzos que exige la investigación del terreno se ven compensados con diseños realistas y afinados que permiten plantear soluciones cada vez menos costosas y más seguras.

A partir de los años 60 la Mecánica de Rocas tuvo un desarrollo muy importante; pero los intentos de aplicar los conceptos teóricos a la definición de soluciones concretas chocaban irremediablemente con la imposibilidad de realizar económicamente los cálculos necesarios.

El espectacular desarrollo, durante los últimos años, de la microinformática ha tenido una influencia muy beneficiosa en el abaratamiento de los cálculos que se necesitan para disponer de un proyecto constructivo afinado de un túnel.

En el momento actual, con casi 50 años de desarrollo efectivo de la Mecánica de Rocas, el panorama ha cambiado drásticamente y se puede afirmar que hoy es posible predecir el comportamiento tenso-deformacional de una excavación subterránea, de 15 m de ancho, con la precisión suficiente como para dimensionar, con un coeficiente de seguridad ajustado, el sostenimiento que debe colocarse en cualquier zona del perímetro de excavación.

En la ***Fig. 1*** se presenta la distribución de momentos flectores y esfuerzos axiales sobre bulones de anclaje y hormigón en un túnel carretero en cuyo cálculo se ha tenido en cuenta, tanto las características del terreno, como las del sostenimiento y las fases constructivas.

Para poder realizar los cálculos tenso-deformacionales con la debida representatividad resulta imprescindible disponer del modelo geológico del terreno en que se va a proyectar la excavación y conocer las propiedades geotécnicas de los materiales que están presentes.

En el reconocimiento geológico de un túnel o excavación subterránea siempre existirá un cierto grado de incertidumbre que debe ser minimizado de acuerdo con la fase del estudio (estudio previo, anteproyecto, proyecto) y de las características de la obra. No obstante viene a colación la frase de *Goodman* (1993) que resume este concepto: *con suficiente tiempo y dinero, se pueden conocer todos los detalles geológicos de un emplazamiento (personalmente estoy convencido de que en algunos lugares esto no será posible jamás).*

Con objeto de disminuir las incertidumbres y minimizar los gastos que supone una investigación geotécnica del terreno, en este trabajo se presenta la metodología que se ha seguido en ***Geocontrol*** en los últimos años y que ha

sido aplicada al proyecto de varios túneles que, posteriormente, se han construido con unos resultados muy acordes con los que se preveían en el proyecto de construcción.

Objetivos de la caracterización geotécnica

El objetivo final de todo reconocimiento geológico es conocer y cuantificar los atributos más relevantes en función de las características de la obra, en lo que se denomina ***modelo geotécnico*** del terreno, con objeto de definir los parámetros que deben ser utilizados en el análisis tenso-deformacional de las Secciones Tipo del túnel.

En principio, el modelo geotécnico debe contemplar los siguientes aspectos:

- estratigrafía
- estructura del macizo rocoso
- litología
- contactos y distribución de litologías
- geomorfología
- espesor y características del manto de alteración
- espesor de los materiales de recubrimiento
- posición y movilidad del agua

Todo ello debe tener reflejo en la elaboración del denominado ***perfil geológico-geotécnico*** de la excavación, que normalmente será longitudinal apoyado en perfiles transversales. Resulta muy interesante, en excavaciones subterráneas en general y en túneles de gran sección (anchura), la ejecución de una ***planta estructural-geotécnica*** a la cota de la excavación.

Metodología de investigación

Para alcanzar los objetivos de una adecuada investigación geológica de un emplazamiento concreto se dispone de los siguientes medios:

- investigación bibliográfica
- cartografía geológico-geotécnica (superficie y/o excavaciones)
- estudio hidrogeológico
- clasificaciones geomecánicas
- levantamiento de discontinuidades
- técnicas geofísicas
- sondeos
- ensayos *in situ*
- ensayos de laboratorio.

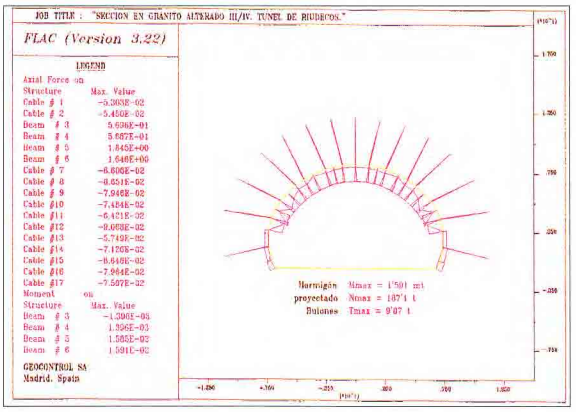


Fig.1.- Distribución de momentos flectores y esfuerzos axiales sobre bulones y hormigón.

Estas actividades están encaminadas a la realización del perfil geológico-geotécnico de la excavación y en su caso de la planta estructural-geotécnica.

En la ***Fig. 2*** se muestra un diagrama en el que todas estas actividades se relacionan entre sí ordenadamente. De esta forma, se podrían establecer las siguientes fases de investigación:

Fase 1.- Se trata de trabajos de campo, básicos, y que se realizan con carácter preliminar. Sin duda, estos trabajos son las actividades más importantes, no sólo porque condicionan económicamente el resto de la campaña de investigación sino, también, porque condicionan la calidad final del estudio.

Como resultado de esta fase se debe realizar una minuciosa planificación del resto de los trabajos de investigación, así como un detallado programa de ensayos *in situ* y de laboratorio.

Fase 2.- En esta fase se realizarán el resto de los trabajos de campo. No obstante éstos deben ejecutarse ordenadamente, de modo que la geofísica se realice en primer lugar, los sondeos en un segundo momento y, por último, los ensayos *in situ*.

Fase 3.- La tercera fase de investigación está constituida por los ensayos de laboratorio.

Fase 4.- La cuarta y última fase está constituida por todos los trabajos de gabinete, y que suponen la caracterización geomecánica de roca intacta, macizo rocoso y discontinuidades estructurales; así como la elaboración de un modelo geológico representativo del terreno en el que se ubica la obra.

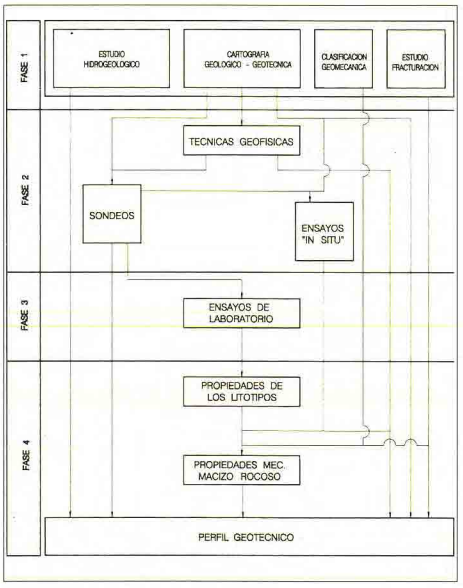


Fig.2.- Fases de la Investigación Geológico - Geotécnica de una excavación subterránea.

Cartografía geológica

El primer trabajo consistirá en la realización de una cartografía, cuya escala dependerá del nivel de reconocimiento. Así para estudios previos se puede emplear 1/10.000, aumentando esta escala a 1/5.000 en Anteproyecto y a 1/1.000 en Proyecto. En aquellos puntos singulares que se estime oportuno (emboquilles, zonas de cobertura escasa, etc.) se debe ampliar la escala de la cartografía. En esta cartografía se diferenciarán los materiales del substrato rocoso, y los materiales de recubrimiento cuaternario. El objetivo es la elaboración de un mapa de afloramientos. Los principales trabajos a realizar serán los siguientes:

a) Afloramientos

La cartografía a realizar diferenciará, claramente, los afloramientos rocosos del substrato rocoso y los depósitos de recubrimiento superficiales.

En las formaciones del substrato rocoso se evaluarán los siguientes aspectos:

- clasificación geomecánica (RMR y Q)
- resistencia de la matriz rocosa (escala ISRM)
- grado de meteorización y su espesor (escala ISRM).

En las formaciones cuaternarias se evaluará la morfología, litología y espesor de estos depósitos.

b) Tectónica y estructura

Además de los datos acerca de los materiales existentes, la cartografía incluirá todos los datos necesarios para definir la estructura del macizo rocoso, tanto en lo que se refiere a la estratificación de los terrenos como también a las discontinuidades estructurales existentes en el macizo rocoso.

c) Hidrogeología

Durante estos trabajos se realizará un exhaustivo inventario de surgencias de agua, fuentes, etc.; evaluando las características hidrogeológicas del terreno.

d) Definición de litotipos

Se definirán los diferentes litotipos de características mecánicas y litológicas similares que existan en el área de estudio.

De cada uno de estos litotipos se deben efectuar ensayos de carga puntual con una prensa Franklin, para estimar su resistencia a compresión simple.

e) Clasificación mecánica del macizo rocoso

Con objeto de valorar la calidad geotécnica del macizo rocoso, se procederá a su clasificación. Para ello se empleará la clasificación de Bieniawski (***Rock Mass Ratio***) y la clasificación de Barton (***Índice Q***).

Estudio de la fracturación

El estudio de la fracturación del macizo rocoso se efectuará como parte integrante de la cartografía geológico-geotécnica, si bien debido a su importancia, en el caso de las formaciones rocosas, se ha optado por individualizarlo en este apartado.

El estudio de la fracturación contemplará los siguientes aspectos:

- levantamiento de discontinuidades estructurales,
- correlación diaclasas-fracturación regional,
- análisis de microestructuras para la estimación del estado tensional.

El levantamiento de discontinuidades se efectuará siguiendo las directrices y recomendaciones de la ISRM y de la AFTES.

De cada plano de discontinuidad que se identifique se obtendrán los siguientes parámetros:

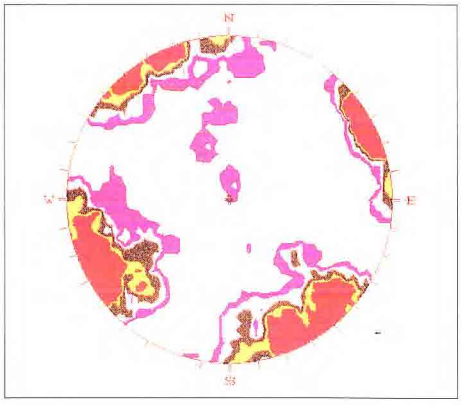


Fig. 3.- Estereograma de fracturación.

- tipo de plano,
- orientación (dirección de buzamiento y buzamiento),
- espaciado,
- continuidad (según rumbo y buzamiento),
- rugosidad (JRC),
- resistencia a compresión simple de los labios de discontinuidad (JCS),
- relleno,
- presencia de agua.

Una vez establecidas las principales familias de diaclasas, se obtendrán estereogramas o diagramas de rosetas de las mismas y se efectuará un estudio de correlación de estas discontinuidades con la fracturación regional. En la ***Fig. 3*** se muestra un ejemplo de estudio estereográfico.

Durante los trabajos de obtención de datos de campo se prestará atención al análisis de las microestructuras que pudieran servir para la estimación del estado tensional. En este orden de ideas se dedicará especial atención a las fracturas rellenas de tipo distensivo, fracturas subhorizontales y, en general, a cualquier tipo de elemento estructural lineal o planar que pudiera indicar criterios cinemáticos y tensionales (reorientación de minerales, foliaciones, diaclasas, grietas en relevo, ganchos asociados en zonas de cizalla, etc.).

Se intentará hacer una estimación aproximada del elipsoide de esfuerzos (σ_1, σ_2, σ_3) en tantos puntos como sea posible, para tratar de evaluar el estado tensional local asociado a los dominios estructurales existentes.

Estudio hidrogeológico

El objetivo del estudio hidrogeológico es determinar los acuíferos que afecten a la excavación. Esto incluye conocer:

- número y extensión de los acuíferos
- conductividad hidráulica de las formaciones
- isopiezas
- accidentes hidrogeológicos (barreras impermeables, huecos de disolución, etc.).

Técnicas geofísicas

Las técnicas geofísicas se aplican habitualmente para el estudio de puntos singulares.

Según el problema a investigar se aplicará un método u otro. Los métodos más empleados en la investigación geológico-

MÉTODO	PARÁMETRO MEDIDO	PARÁMETRO DE INTERPRETACIÓN	ALCANCE (m)	APLICACIÓN	COSTE
Sísmica de refracción	t (μs)	Contraste vertical de velocidades	20	espesor recubrimiento y alteración (módulos dinámicos)	Medio
Eléctrico (SEV)	ρ (Ω)	Contraste vertical de resisitividades	100	freático, litologías	Bajo
Eléctrico (calicatas)	ρ (Ω)	Contrate horizontal de reistividades	75	fracturas	Bajo
Electromagnéticos	VEM (μV/A)	Resistividad aparente	100	fracturas, freático	Medio
Georadar	t (μs)	Relexión ondas EM	35	fracturas, oquedades, litologías	Medio
Diagrafías	depende de la herramienta		—	fracturas, módulos dinamicos, litologías	Alto

CUADRO I.- Principales características de los métodos geofísicos mas empleados

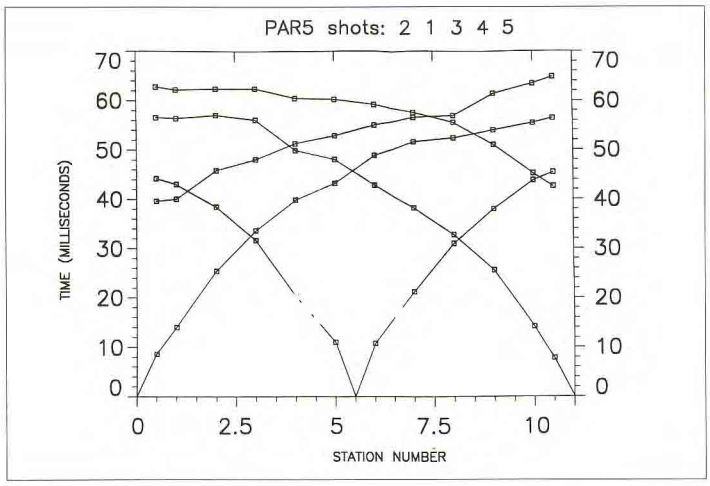


Fig. 4.- Perfil sísmico de refracción.

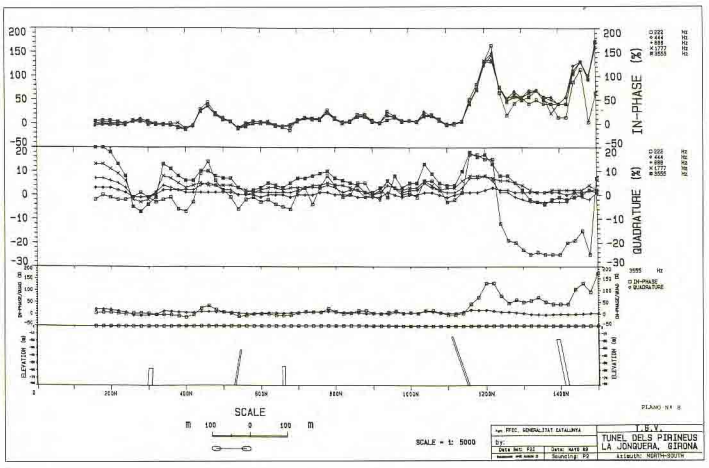


Fig. 5.- Calicata electromagnética en el dominio de la frecuencia.

geotécnica de una obra subterránea son los siguientes:

- **Métodos eléctricos.-** En general se emplean siguiendo un dispositivo SEV o calicata.
- **Métodos electromagnéticos.-** Los más aplicados son el VLF y las calicatas o sondeos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia. Recientemente, se ha desarrollado el georradar.
- **Métodos sísmicos.-** Sin duda el más empleado es la sísmica de refracción.
- **Métodos tomográficos.-** La inversión tomográfica se puede realizar sobre ondas acústicas (tomografía sísmica) o sobre ondas electromagnéticas (tomografía de radar).

En el **Cuadro I** se muestran las principales características de estos métodos.

A su vez, en las ***Figs. 4, 5*** y ***6*** se muestran algunos ejemplos de aplicación de estas técnicas.

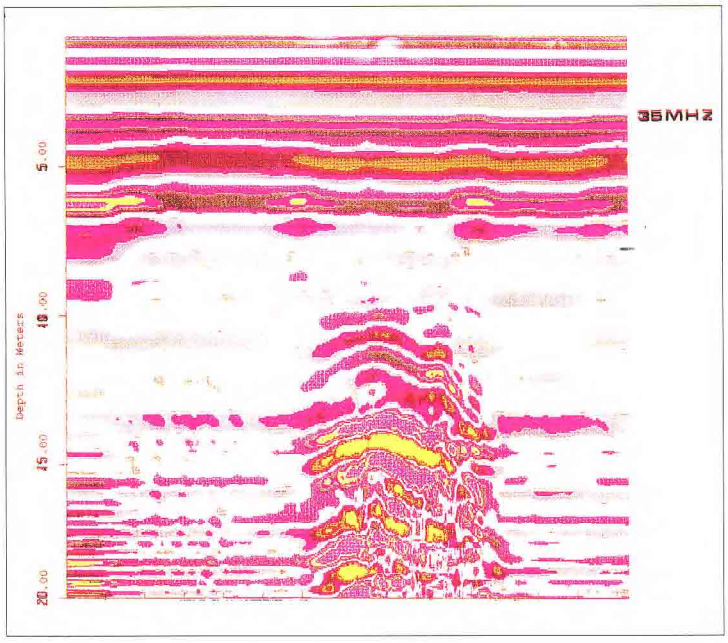


Fig. 6.- Perfil de Georradar con antena de 35 MHz.

Sondeos

Los sondeos mecánicos constituyen el apartado económicamente más costoso de una investigación, proporcionando una información muy valiosa.

En general, la perforación más empleada es mediante el sistema *wireline* empleando batería sencilla, doble o inclusive triple en función del tipo de terreno, para la toma de muestras.

Los sondeos deben ser supervisados por un geólogo-geotécnico que:

- testifique el sondeo,
- dirija la toma de muestras,
- supervise los ensayos in situ,
- controle los parámetros de perforación de relevancia geotécnica,
- realice ensayos in situ sobre el testigo (ensayos de carga puntual, *tilt-test*, *vane-test*, penetrometría o esclerometría).

Para la descripción del testigo se deben emplear las normas de la ISRM.

Ensayos *in situ*

A pesar de su elevado coste, hoy en día existe una clara tendencia a la realización de ensayos *in situ* en detrimento de los ensayos de laboratorio. Fundamentalmente existen dos claras razones para explicar esta tendencia:

- dificultad de obtención de muestras inalteradas (de especial aplicación a rocas blandas)
- efecto escala claramente evidenciado en macizos rocosos convencionales (parámetros de resistencia, deformacionales, discontinuidades y estado tensional).

Los ensayos *in situ* se refieren a dos tipos:

- ensayos realizados *in situ* sobre muestras de testigo

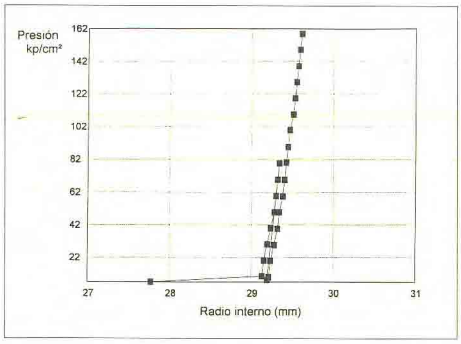


Fig. 7.- Curva presiométrica.

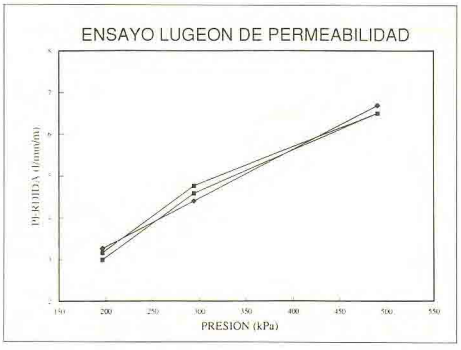


Fig. 8.- Ensayo Lugeon.

- ensayos realizados en el sondeo (presio-dilatometría, permeabilidad, fracturación hidráulica).

En el ***Cuadro II*** se presentan las principales características de los ensayos.

Otros ensayos in situ tales como carga de placa, penetraciones estáticas o dinámicas, *Vane test*, tienen una aplicación limitada en obras subterráneas debido al escaso alcance que éstos poseen.

En las ***Figs. 7, 8, y 9*** se muestran ejemplos de algunos ensayos in situ.

Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio más habituales en obras subterráneas se pueden dividir en ensayos de identificación, mecánicos, hidráulicos y otros ensayos. En el ***Cuadro III*** se muestran los principales ensayos habitualmente realizados, y otros de ejecución más reducida.

Metodología de caracterización

Ya se ha indicado, anteriormente, que el objetivo de la caracterización geotécnica del terreno se concreta en definir los parámetros que caracterizan su comportamiento tenso-deformacional para poder utilizarlos en los análisis numéricos que permitan diseñar la solución constructiva.

A los efectos del proyecto de una excavación en el terreno hay que considerar que está constituido por la roca intacta que integra la matriz rocosa y por las discontinuidades generadas sobre esta matriz.

Hace ya muchos años que se conoce el hecho de que si determinamos la propiedad de un litotipo, e.g. su resistencia a compresión simple, mediante un ensayo de laboratorio el valor obtenido es sensiblemente mayor que el que realmente corresponde al macizo rocoso a escala real.

Esta minoración de propiedades entre la roca intacta, a escala de laboratorio, y el terreno, a escala real, se debe al efecto de las discontinuidades que se pueden tener tanto más en cuenta en los ensayos realizados cuanto mayor es el tamaño de la muestra.

El efecto escala ha sido muy estudiado y, concretamente, *Pinto Da Cunha*, del L.N.E.C. de Lisboa, ha conseguido editar excelentes compendios sobre el tema. En la ***Fig. 10*** se presenta la curva correspondiente al efecto escala obtenido en ensayos en laboratorio y presiométricos para determinar el módulo de elasticidad de un hormigón pobre. De ella se pueden deducir claramente dos conclusiones:

a) El valor medio de los resultados de laboratorio es unas 2,5 veces mayor que el de los ensayos in situ.
b) La dispersión de los resultados de los ensayos de laboratorio es mucho mayor que la de los ensayos in situ.

ENSAYO	REALIZACIÓN	PARÁMETRO OBTENIDO	COSTE
Carga puntual	Testigo	Indice de carga puntual	——
Tilt-test	Testigo (bloque)	Angulo básico de fricción	—
Vane-test	Testigo	Resistencia al corte	——
Penetrómetro	Testigo	Resistencia al corte	——
Esclerometría	Testigo	IR (σ_c); JCS	——
Permeabilidad	Sondeo	Permeabilidad	Bajo
Presiometría	Sondeo	Módulo de corte, G (E)	Medio
Dilatometría	Sondeo	Módulo de corte, G (E)	Medio
Hidrofracturación	Sondeo	Estado tensional natural	Alto

CUADRO II.- Ensayos geotécnicos "in situ"

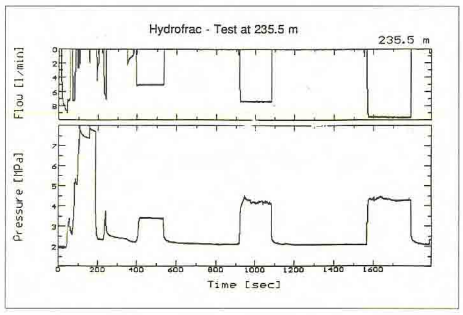


Fig. 9.- Ensayo de hidrofracturación.

Tradicionalmente el efecto escala ha sido tenido en cuenta minorando los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio con expresiones empíricas que solían tener un campo de aplicación limitado.

La metodología de caracterización del terreno que en estos momentos parece mejor, supone la realización de las siguientes fases:

1) Clasificación del terreno, que incluye roca intacta y discontinuidades, en tramos homogéneos utilizando la clasificación de *Bieniawski*.
2) Caracterización de las propiedades geotécnicas de los litotipos presentes en el macizo.
3) Caracterización de las propiedades geotécnicas de las discontinuidades del macizo rocoso.
4) Evaluación de las propiedades geotécnicas de los distintos tramos homogéneos en que se ha dividido el macizo rocoso.

Suponiendo que la metodología de aplicación de las clasificaciones geomecánicas es suficientemente conocida, en

TIPO DE ENSAYO	HABITUALES	ESPECÍFICOS
IDENTIFICACIÓN	- Petrología - Mineralogía - Densidad - Humedad	- Hinchamiento - Velocidad sísmica
MECÁNICOS	- Compresión uniaxial - Tracción indirecta - Compresión triaxial - Corte sobre discontinuidades	- Tracción directa - Tenacidad al corte
HIDRÁULICOS	——	- Permeabilidad - Porosidad
OTROS ENSAYOS	- Schimazeck - Indice Cerchar	- Slake durability

CUADRO III.-Principales ensayos de laboratorio

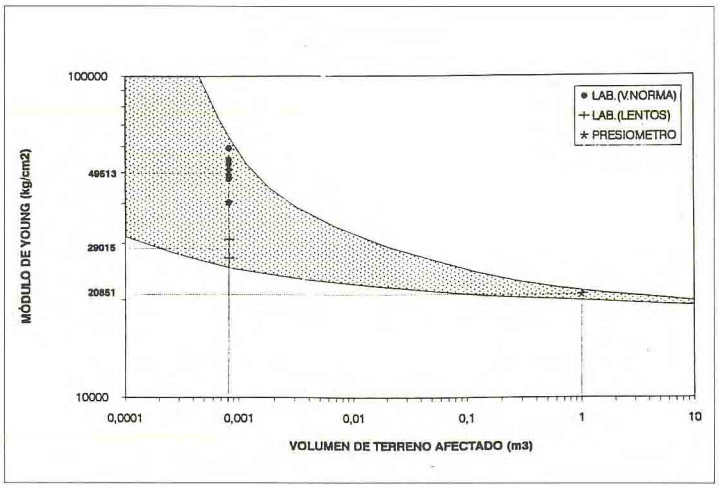


Fig. 10.- Relación entre el módulo de elasticidad y el volumen de terreno afectado.

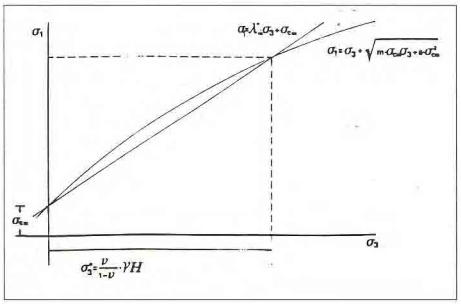


Fig. 11.- Ajuste de la recta de Mohr-Coulomb a la curva de Hoek- Brown.

los apartados siguientes se expone con detalle la metodología que puede seguirse en las tres fases restantes que completan el ciclo de la caracterización geotécnica del terreno.

Propiedades resistentes de la matriz rocosa

Actualmente se emplean, básicamente, dos criterios de rotura para establecer el límite de resistencia de la matriz rocosa. Uno es el clásico de *Mohr-Coulomb* que está dado por la expresión

$$\tau = c + \sigma \bullet \mathrm{tg}\phi \qquad (1)$$

o, por su equivalente, en términos de tensiones normales:

$$\sigma_1 = \lambda \,.\, \sigma_3 + \sigma_c \qquad (2)$$

donde

$$\lambda = \frac{1 + \mathrm{sen}\,\phi}{1 + \mathrm{sen}\,\phi} \qquad (3)$$

El otro criterio utilizado es el de *Hoek-Brown*, que está definido por la expresión

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \bullet \sigma_c \bullet \sigma_3 + s \bullet \sigma_c^2} \qquad (4)$$

donde m y s son parámetros característicos del macizo rocoso.

Para un intervalo dado de la presión de confinamiento, σ_3 , tal como se ilustra en la ***Fig. 11***, el criterio de Hoek-Brown se puede aproximar por una recta de **Mohr-Coulomb** y se cumple que:

$$\lambda_m = 1 - \frac{\sigma_c \,.\, \sqrt{s}}{\sigma_3} + \sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma_3} m + \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3}\right)^2 . s} \qquad (5)$$

$$\phi_m = 2 \; arc\,\mathrm{tg}\left(\sqrt{\lambda_m} - 90\right) \qquad (6)$$

$$C_m = \frac{\sqrt{s} \,.\, \sigma_c \,(1 - \mathrm{sen}\,\phi_m)}{2 \cos \phi_m} \qquad (7)$$

donde el subíndice m indica el macizo rocoso.

De acuerdo con esto el problema para caracterizar geotécnicamente un macizo rocoso estriba en determinar la resistencia a compresión simple de la roca intacta, σ_c, y los parámetros m y s correspondientes al macizo rocoso.

Este problema se resuelve realizando ensayos de laboratorio con probetas sanas obtenidas en sondeos, con lo cual se puede suponer que estamos en condiciones de roca intacta y, por definición, $s_i = 1$. De estos ensayos se podrá determinar σ_c y sólo quedará por definir m_i.

En este caso, como $s_i = 1$, el criterio de *Hoek-Brown* puede expresarse como

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \bullet \sigma_c \bullet \sigma_3 + s \bullet \sigma_c^2} \qquad (8)$$

haciendo el cambio de variables

$$\left.\begin{aligned} x &= \sigma_3 \\ y &= (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \end{aligned}\right\} \quad \text{resulta}$$

$$y = m_i \,.\, \sigma_c \,.\, x + \sigma_c^2 \qquad (9)$$

que es una expresión lineal que puede ajustarse por mínimos cuadrados y da directamente m_i, pues:

$$m_i = \frac{y - \sigma_c^2}{x \bullet \sigma_c} \qquad (10)$$

Una vez conocido mi, los valores de m y s, del macizo rocoso, se calculan por las expresiones de *Priest y Brown* (1983) para excavaciones subterráneas:

$$\left.\begin{aligned} m &= m_i \,.\, e^{\frac{RMR - 100}{28}} \\ s &= e^{\frac{RMR - 100}{9}} \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

En la ***Fig. 12*** se muestran los resultados de un ajuste aplicando esta metodología a los resultados obtenidos en un ensayo a compresión simple o uniaxial y siete compresiones triaxiales.

Propiedades deformacionales de la matriz rocosa

Habitualmente se admite que el módulo de Poisson del macizo rocoso es el mismo que el de la roca intacta, que se determina en ensayos de laboratorio. Por ello, para definir los dos parámetros elásticos que rigen el comportamiento del macizo rocoso, sólo hace falta determinar el módulo de elasticidad del macizo rocoso (E_m).

Para determinar E_m puede utilizarse la correlación de *Bieniawski* (1978).

$$E\,(\mathrm{GPa}) = 2 \bullet \mathrm{RMR} - 100 \qquad (12)$$

o la de *Serafín-Pererira* (1983)

$$E\,(\mathrm{GPa}) = 10^{\frac{10 - R}{40}} \qquad (13)$$

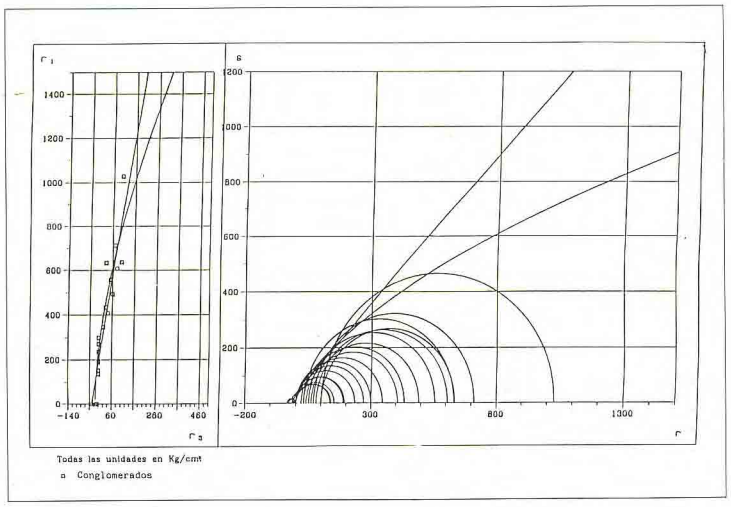


Fig 12.- Ajuste del m_i en un litotipo.

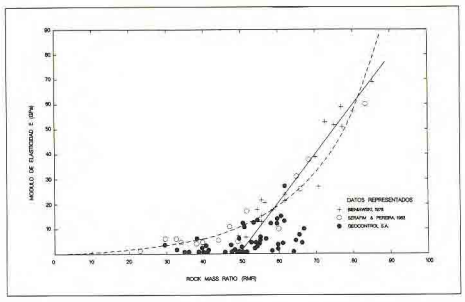


Fig. 13.- Correlación entre E y RMR.

En la realidad, la estimación que se consigue con las expresiones anteriores sobrevalora notablemente el valor de E_m, tal como se ilustra en la ***Fig. 13*** y por ello se recomienda determinar el valor de E_m mediante ensayos presiométricos.

Propiedades resistentes de las juntas

La resistencia máxima de una junta está dada por la expresión de *Barton* (1976)

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}\left[JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_b \right] \qquad (14)$$

donde:

τ = tensión de corte en la junta
σ_n = tensión normal sobre la junta
JRC = perfil de rugosidad de la junta
JCS = resistencia a compresión simple de los labios de la junta
ϕ_b = ángulo básico de fricción, determinado mediante tilt test.

A partir de los trabajos de *Bandis* (1983), tal como se ilustra en la ***Fig. 14,*** se conoce en que forma afecta el efecto escala a la resistencia al corte de una discontinuidad. Puede apreciarse, en esta figura, que a medida que aumenta la longitud de la junta ensayada el efecto de la resistencia de pico es menos acusado; de tal forma que, a escala real, éste desaparece y gradualmente se llega a condiciones residuales.

En los apartados siguientes se presenta el método que puede seguirse para estimar las propiedades geotécnicas de las juntas teniendo en cuenta el efecto escala de la muestra.

Estimación del efecto escala sobre la resistencia de las juntas

Para tener en cuenta el efecto escala sobre la resistencia de las juntas, *Bandis* (1981) propone corregir los valores de *JRC* y *JCS* de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$JRC_n = JRC_o \left[\frac{Ln}{lo}\right]^{-0,02\,JRC_o} \qquad (15)$$

$$JCS_n = JCS_o \left[\frac{Ln}{lo}\right]^{-0,03\,JRC_o} \qquad (16)$$

En la ***Fig. 15*** se presenta la influencia de la longitud de la muestra a ensayar sobre *JRC* y *JCS*; en ella puede apreciarse que esta influencia es tanto más marcada cuanto más rugosa es la junta; lo cual sucede para los mayores valores de *JRC*. En el caso límite el valor de *JRC* puede reducirse en un 50% y el *JCS* en un 60%.

Una vez determinados JCS_n y JRC_n se pueden determinar la cohesión y fricción de la junta mediante la expresión básica de *Barton* (14) ajustándola con tres ensayos de laboratorio, lo que permitirá obtener la cohesión de la junta J_c y su fricción J_ϕ.

Estimación del efecto escala sobre la deformabilidad de las juntas

La deformabilidad de una junta se define mediante su rigidez tangencial y normal.

La *rigidez tangencial* se define como el cociente entre la resistencia al corte de pico (2) y el desplazamiento tangencial correspondiente (<). De acuerdo con la expresión de la resistencia al corte de *Barton*, expresión (14), se tiene

$$K_s = \frac{100}{L}\left[\sigma_n \cdot \operatorname{tg}\left(JRC \cdot \log\frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r\right)\right] \qquad (17)$$

La expresión de la rigidez normal, definida como el cociente entre la resistencia al corte de pico y el desplazamiento normal, vale según *Kawai*

$$K_n = \frac{1 - \upsilon}{1 - 2\upsilon} \bullet K_s \qquad (18)$$

Para tener en cuenta el efecto de escala y llegar a estimar las rigideces tangenciales y normales de una junta, basta con introducir en las expresiones (15) y (16) en la (17) y (18).

Presentación de los resultados

Como resultado de los trabajos realizados, en campo y en laboratorio, se redactará el informe geotécnico que debe contener todos los datos obtenidos, debidamente documentados con protocolos de ensayos y fotografías, la interpretación de los resultados obtenidos y las recomendaciones sobre las propiedades geotécnicas del terreno que deben utilizarse en la etapa de cálculos.

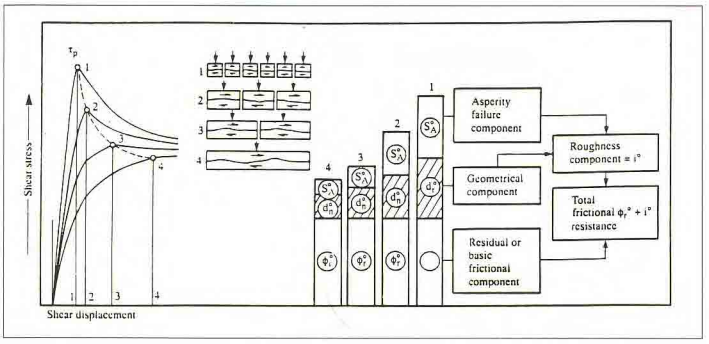


Fig. 14.- Efecto escala en las juntas.

OBRA		AUTOPISTA MATARÓ-GRANOLLERS	EIX TRANSVERSAL S. JULIÁ-STA. COLOMA-LLEIDA	NOVA LÍNA BARCELONA-FRONTERA FRANCESA
Nº TÚNELES (Uds.)		1	11	5
LONGITUD DE TÚNEL (km)		2	5,5	4,8
GRADO DE DIFICULTAD		MEDIO	ALTO	MEDIO-ALTO
PESO EN EL INFORME GEOTÉCNICO (%)	CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA	16,4	13,1	7,4
	GEOFÍSICA	3,0	4,6	3,5
	SONDEOS	39,5	38,4	56,9
	ENSAYOS "IN SITU"	10,4	10,8	10,6
	ENSAYOS LABORATORIO	12,8	12,5	7,9
	INTERPRETACIÓN	17,9	20,6	13,7
	TOTAL	100,0	100,0	100,0

CUADRO IV.- Distribución del presupuesto de tres investigaciones geológico - geotécnicas.

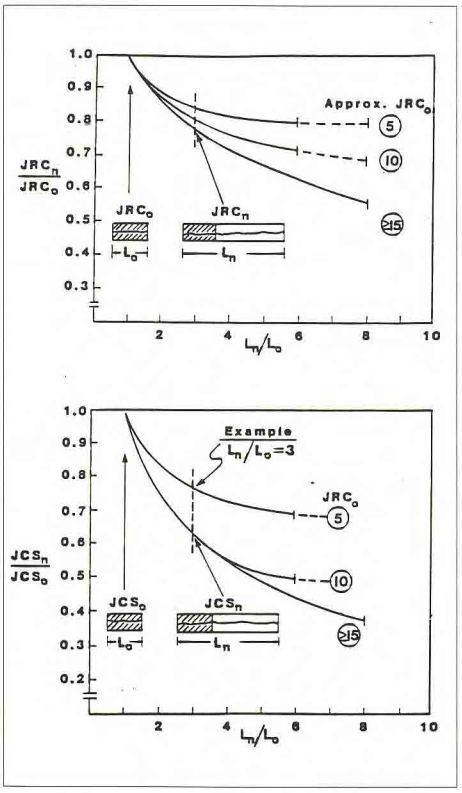


Fig. 15.- Corrección del efecto escala en las juntas.

Habitualmente la información referente a los datos del terreno se suele presentar en un perfil geotécnico, elaborado a partir de un perfil longitudinal de la obra en el que se incorporan los terrenos existentes y se sitúan los trabajos realizados.

El perfil geotécnico debe incluir, al menos, datos sobre los siguientes aspectos:

- perfil estratigráfico (o distribución geométrica de los litotipos),
- datos geométricos de la excavación,
- propiedades mecánicas del macizo rocoso, a nivel de la rasante de la excavación,
- posición del nivel freático,
- método de excavación, y
- secciones constructivas tipo.

En la ***Fig. 16*** se presenta, a título de ejemplo, el perfil geotécnico del Túnel del Boc, que forma parte del tramo Osormort-Viladrau del Eje Transversal entre Lleida y Girona.

Consideraciones económicas

Con objeto de tener una idea de la incidencia en el coste de un informe geotécnico de los trabajos necesarios para llevarlos a cabo, en el ***Cuadro IV*** se presentan los datos más relevantes de tres informes geotécnicos, realizados recientemente aplicando esta metodología, en relación a tres obras lineales de importancia relevante que incluyen tramos en túnel.

Conclusiones

Los túneles constituyen un punto singular en el proyecto de construcción de una obra lineal ya que, aunque actualmente es posible realizar proyectos muy ajustados basándose en cálculos tenso-deformacionales muy afinados, es preciso conocer con una precisión razonable las características geotécnicas de los materiales a excavar.

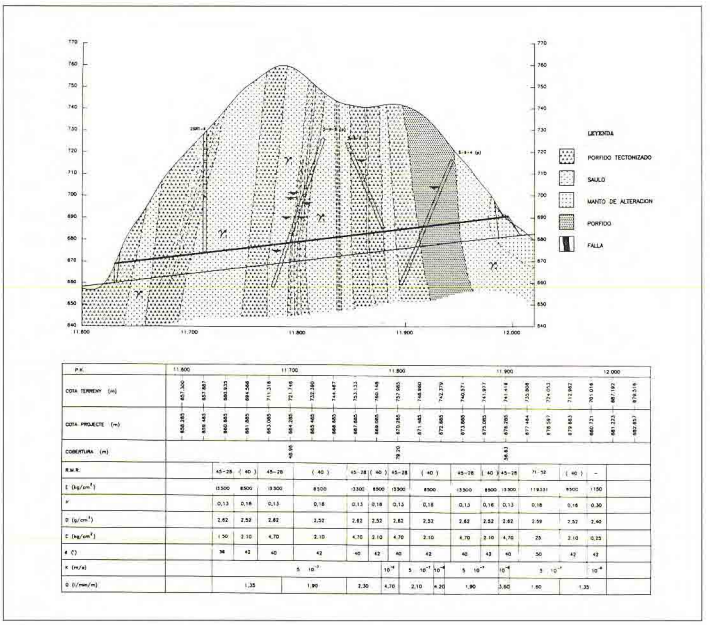


Fig. 16.- Perfil geológico del Túnel de Boc.

La obtención de datos geotécnicos representativos puede realizarse mediante trabajos, de campo y de laboratorio, cuyos resultados deben ser adecuadamente analizados a fin de definir las propiedades del terreno, en tramos homogéneos, que se presentan en el perfil geotécnico de la obra a proyectar.

En el caso de túneles en roca, las discontinuidades presentes en el terreno hacen que exista un apreciable efecto escala entre las propiedades determinadas en el laboratorio y las reales del macizo rocoso que son siempre peores.

Este efecto escala puede ser tenido en cuenta, para asignar las propiedades del terreno que deben ser empleadas en los cálculos, siguiendo la metodología que se presenta en este trabajo.

Bibliografía

AFTES (1979). **Recomendations pour une description des massifs rocheux utile a l'etude de la stabilité des ouvrages souterrains.**

BANDIS; LUMSDEN, A.C. and BARTON, N. (1981). **Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints.** *Int. Jour. Rock. Mech, Min. Sci. N°18.*

BANDIS; LUMSDEN, A.C. and BARTON, N. (1983). **Fundamentals of rock joint deformation.** *Int. Jour. Rock. Mech, Min. Sci. N°20.*BARTON, N. (1976). **The shear strength of rock and rock joints.** *Int. Jour. Rock. Mech, Min. Sci. N°13.*

BELL, F.G. (1992). **Engineering in Rock Masses.** *Ed. B.H.*

BIENIAWSKI, Z.T. (1978). **Determining Rock Mass deformability. Experience from histories.** *Int. Jour. Rock. Mech, Min. Sci. N°15.*

ERVIN, M.C. (1983). **In situ testing for geotechnical investigations.** *A. A. Balkema.*

GOODMAN, R.E. (1993). **Engineering geology. Rock engineering construction.** *Ed. Wiley (1993).*

ISRM (1978). **Rock characterization testing and monitoring.** *Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.*

PINTO DA CUNHA, A. (1990). **Scale Effects in Rock Masses.** *1st Int. Workshop on Scale effects in Rock Masses, Balkema.*

PINTO DA CUNHA, A. (1993). **Scale Effects in Rock Masses 93. 2nd** *Int. Workshop on Scale effects in Rock Masses, Balkema.*

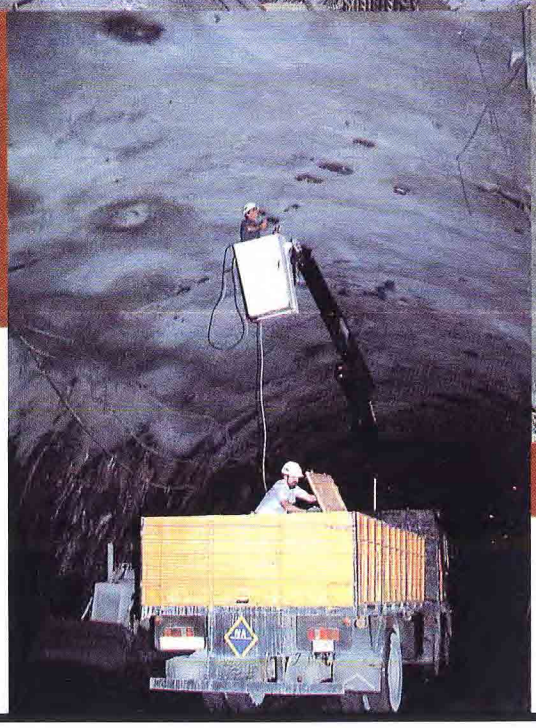
PRIEST, S.D.; BROWN, E.T. (1983). **Probabilistic stability analysis of variable rock slopes.** *Trans. of IMM.*

SERAFIN, J.L.; PEREIRA, J.P. (1983). **Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski.** *Prco. Symp. on Eng. Geol. and Underground Constr. L.N.E.C, Lisboa.*

Geocontrol, S.A.
Alenza, 9 - 2º Izda.
28003 MADRID
Tel.: (91) 553 17 63 - 553 15 89 - 553 16 91
Fax: (91) 554 93 96

● Túnel a cielo abierto en Puentes de García Rodríguez.
◄ AUXINI, S.A. - ENDESA.

● Inspección con radar del sostenimiento del túnel ► de Vera de Bidasoa. GOBIERNO DE NAVARRA. (Servicio de caminos).



● Emboquille norte del túnel de la Floresta.
TUNELES Y ACCESOS DE BARCELONA, S. A.

CAMPO DE ACTIVIDADES:
- Caracterización del terreno
- Diseño estructural de excavaciones a cielo abierto y subterráneas
- Control de la estabilidad
- Ingenieria ambiental