

Ensayos de deformabilidad para la caracterización del terreno *in situ*

Benjamín CELADA; José Miguel GALERA; y Angel RODRÍGUEZ. GEOCONTROL, S.A.

La determinación del módulo de elasticidad del terreno es de vital importancia a la hora de dimensionar el sostenimiento de una excavación subterránea mediante cálculos tensodeformacionales. En este artículo se describen diferentes métodos de medición utilizados con éxito por Geocontrol, S.A. en numerosos proyectos.

La caracterización de un macizo rocoso desde el punto de vista de su deformabilidad es uno de los principales problemas que cualquier estudio geológico-geotécnico debe afrontar si se desean realizar cálculos tenso-deformacionales con posterioridad.

Un macizo rocoso es un medio inhomogéneo y sobre todo discontinuo, cuyas propiedades resistentes y deformacionales no pueden ser medidas directamente en laboratorio ya que existe una diferencia muy apreciable entre los valores que se obtienen en los ensayos de laboratorio y los que se obtienen en los ensayos realizados *in situ*, diferencia que es consecuencia del volumen de terreno afectado en cada caso y que es conocida como **Efecto Escala**.

Para caracterizar el comportamiento deformacional del terreno bastan dos parámetros que, habitualmente, son el *coeficiente de Poisson* y el *módulo de Young*. En la actualidad se admite la hipótesis simplificada de que el coeficiente de Poisson del macizo rocoso es el mismo que el de la roca intacta y éste, sí puede ser determinado en ensayos de laboratorio.

Admitiendo esta hipótesis, sólo hace falta conocer el otro factor que define el comportamiento deformacional de un macizo rocoso, que es el módulo de elasticidad (E_m).

Este último es un importante problema que tiene planteada la Mecánica de Rocas y que ha llevado a la *ISRM* a la creación de un grupo específico de trabajo (*Pinto da Cunha*, 1990 y 1993), encargado de valorar el denominado *efecto escala* en un macizo rocoso, que ejerce una acción preponderante sobre el módulo de Young real del macizo rocoso.

Aproximaciones empíricas

Para determinar E_m suele recurrirse a las correlaciones de *Bieniawski* (1978)

$$E \text{ (GPa)} = 2RMR - 100 \quad (1)$$

o con posterioridad a la debida a *Serafim y Pereira* (1983)

$$E \text{ (GPa)} = 10^{\frac{RMR - 10}{40}} \quad (2)$$

Palabras clave: CARACTERIZACIÓN, DEFORMABILIDAD, DILATÓMETRO, EFECTO ESCALA, MACIZO ROCOSO, MÓDULO DE ELASTICIDAD, PRESIÓMETRO.

En la *Fig. 1* se representan gráficamente ambas expresiones, que son función del conocido índice *RMR* debido a *Bieniawski*.

Más recientemente, *Hoek* (1995) ha propuesto afectar a la expresión de *Serafim y Pereira*, por la resistencia a compresión simple de la roca intacta (σ_{ci}) que sin duda es un parámetro muy relacionado con el módulo de elasticidad de la roca intacta (E_i) y a su vez al del macizo rocoso (E_m). Así *Hoek* (1995) propone la relación:

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{RMR - 10}{40}} \quad (3)$$

sustituyendo el *RMR* por el *GSI* (*Geological Strength Index*), recogido en su último libro *Hoek et al.* (1995). En la *Fig. 2* se representa esta aproximación.

La experiencia indica que las expresiones anteriores, en general, suelen sobrevalorar el valor de E_m , que en realidad suele ser mucho más bajo, tal como se aprecia en la *Fig. 3*.

Existe una segunda aproximación que relaciona el valor de E_m directamente con

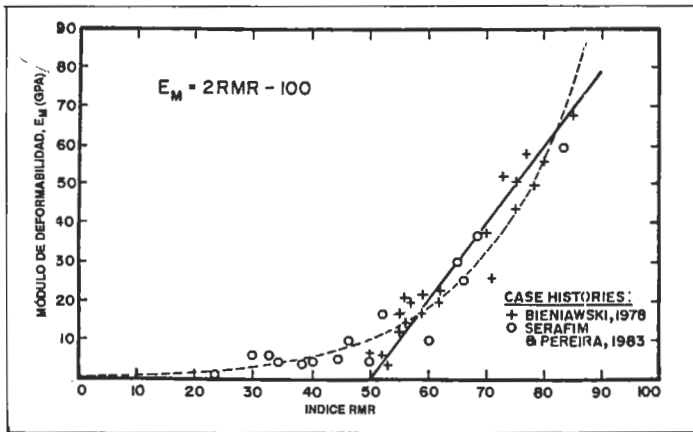


Fig. 1.- Correlación entre el módulo de deformación in situ y el RMR.

el de la roca intacta (E_i) a través del número de fracturas existentes en el macizo rocoso. Así *Kulhawy* (1978) realiza esta correlación a través del espaciado tal como se aprecia en la *Fig. 4*, o más recientemente *Kulhawy y Goodman* (1980) expresan:

$$E_m = j E_i \quad (4)$$

siendo j el espaciado medio de las discontinuidades expresado en metros, asumiendo un comportamiento razonablemente rígido de las juntas.

Métodos de medición in situ

Todas las expresiones anteriormente citadas no dejan de ser sino una estimación de la relación E_m/E_i , y que muchas veces

proporcionan estimaciones que no se ajustan a la realidad del terreno.

De todos los métodos que se han venido empleando para la medición in situ de la deformabilidad del macizo rocoso, solamente los de más interés son los presiodilatómetros y los gatos planos (*flat-jacks*) ya que los clásicos ensayos con placa de carga sólo tienen utilidad para cimentaciones superficiales.

En la *Fig. 5* se aprecia la influencia que pone el volumen involucrado en la realización de un ensayo en el resultado del módulo de deformación que se obtiene de ella, resulta indudable que el empleo de *flat-jacks* proporciona una mejor aproximación a la deformabilidad global del macizo. No obstante existe una desproporción importante entre el coste de uno u otro ensayo, ya que un ensayo dilatométrico

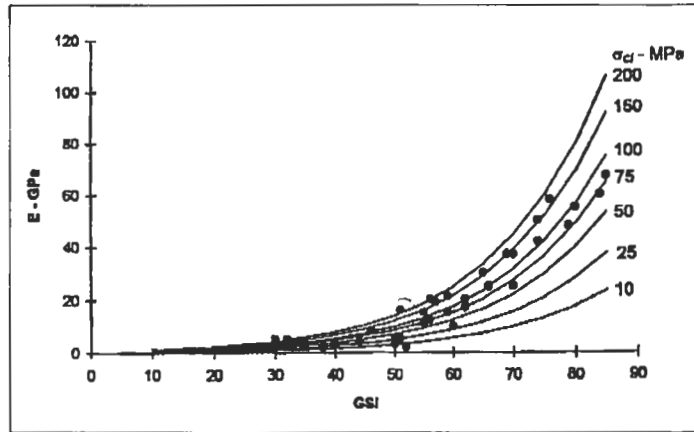


Fig. 2.- Relación propuesta entre el GSI, σ_{ci} y el E .

tiene un coste de realización de, al menos, un orden de magnitud, menor que el del gato plano.

Ensayos presiométricos

Los ensayos presiométricos fueron introducidos por *Menard* en los años 60 y fueron aplicados a suelos de relativamente alta deformabilidad ($E < 2000$ kp/cm²) y que no requerían gran precisión en las medidas de deformación, que se realizaba volumétrica-mente, ni en las de presión; estando esta última limitada a unos 25 kp/cm².

Con posterioridad se han desarrollado equipos presiométricos que permiten alcanzar presiones de 200 kp/cm², con medida directa de la deformación del terreno durante el ensayo. Estos equipos han permitido extender el rango de aplicación de estos

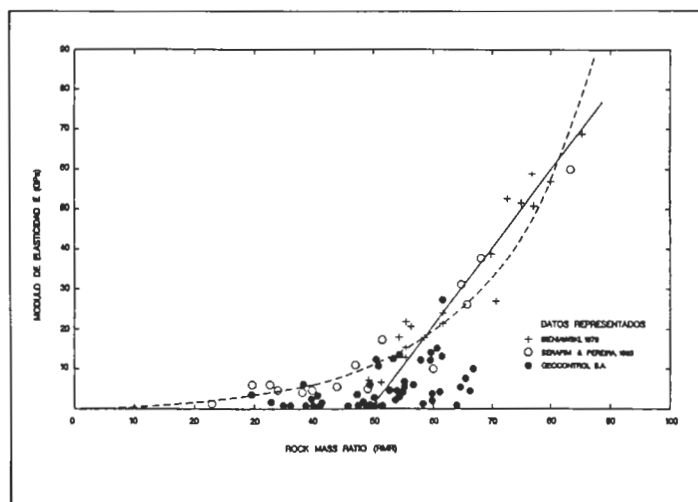


Fig. 3.- Correlación entre E y RMR

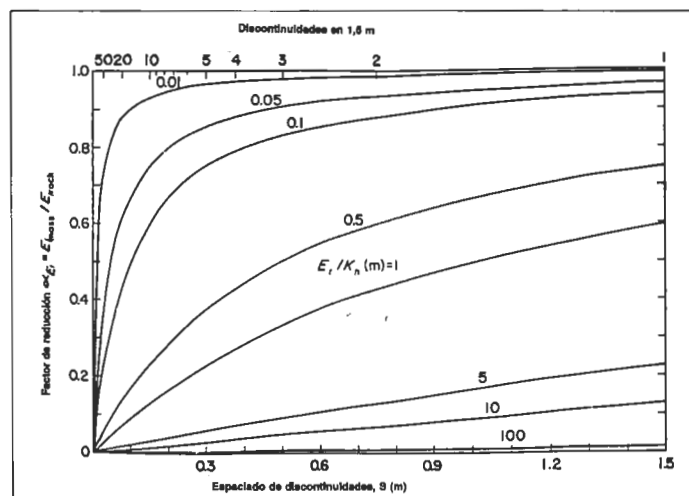


Fig. 4.- Correlación entre el factor de reducción del módulo y el espaciado de discontinuidades (*Kulhawy*, 1978).

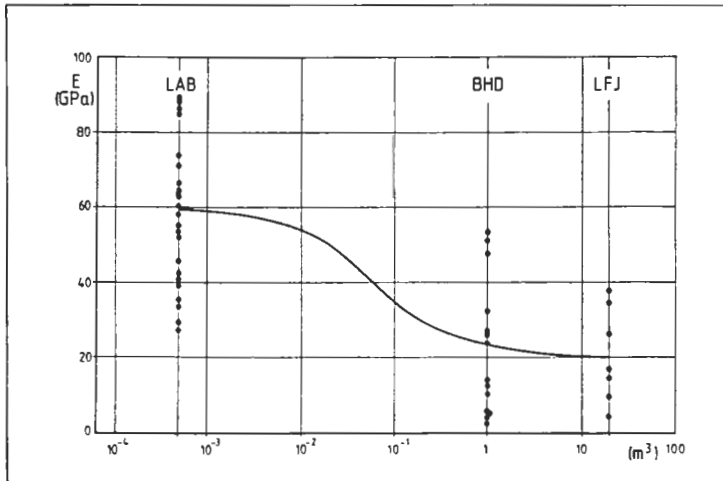


Fig. 5.- Correlación entre deformabilidad y volumen ensayado.

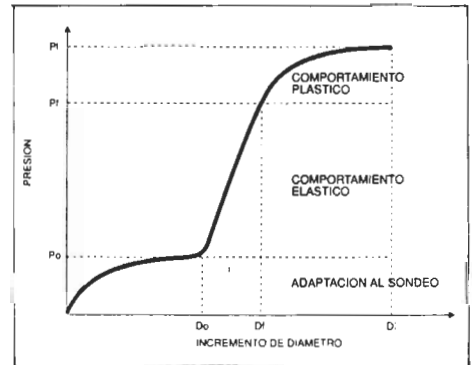


Fig. 6.- Curva típica de un ensayo presiométrico.



Foto 1.- Elastimeter-2 de Oyo.

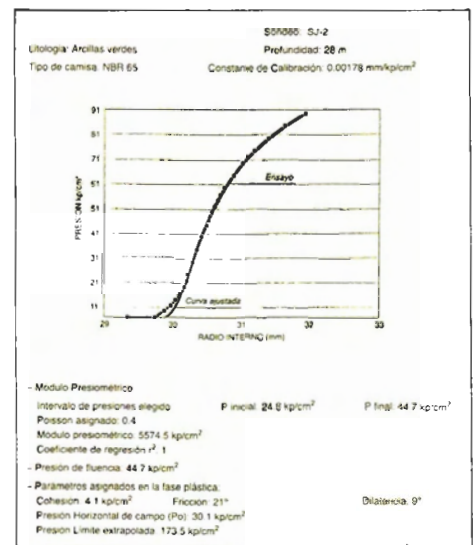


Fig. 7.- Ajuste con el programa Presiometría, de una curva presiométrica con el método Haberfield-Johnston.

ensayos, con los aparatos llamados *soft dilatometers* o presiómetros unicelulares, hasta terrenos con módulos de deformación del orden de 60.000 kp/cm².

Como resultado de un ensayo presiométrico se puede obtener, en el caso más general, una gráfica como la que se muestra en la Fig. 6. En ella se pueden distinguir las etapas siguientes de deformación:

- Adaptación de la camisa al sondeo
- Deformación elástica
- Deformación plástica
- Rotura del terreno

En la Fig. 7 se muestra una curva real de un ensayo efectuado con el equipo *Elastimeter-2* de OYO, que se puede observar en la Foto 1.

En términos de presiones se distinguen los siguientes valores:

P₀ : Presión a la que la camisa se adapta totalmente a la pared del sondeo.

P_F : Presión a la que el terreno deja de comportarse elásticamente. Se llama presión de fluencia.

P_L : Presión a la que el terreno se cizalla y no admite ningún incremento de presión. Se llama presión límite. (Se toma, por norma, cuando se alcanza el doble del volumen inicial).

En términos de desplazamientos se tienen los siguientes parámetros homólogos:

D₀ : Incremento de diámetro para el cual la camisa de caucho está totalmente en contacto con el terreno.

D_F : Incremento de diámetro correspondiente al inicio de la plastificación del terreno.

D_L : Incremento de diámetro correspondiente al cizallamiento del terreno.

Para que se pueda obtener una curva presiométrica completa es preciso que se cumplan dos condiciones:

- Que el sistema de presión sea capaz de cizallar el terreno.
- Que la camisa de caucho soporte el incremento de diámetro sin llegar a romperse.

La mayor parte de los equipos comerciales trabajan con presiones menores de 10 MPa y sólo algunos alcanzan hasta 20 MPa lo cual limita notablemente la posibilidad de llegar a la presión límite que, normalmente, debe ser extrapolada después del ensayo.

En la práctica resulta mucho más restrictiva, que la limitación por presión, la capacidad de la camisa de caucho para admitir incrementos de su diámetro. Para minimizar esta restricción es muy impor-

tante que D_0 sea lo menor posible, lo cual exige que el sondeo se realice con gran cuidado y precisión.

Las condiciones del terreno en el ensayo presiométrico pueden asimilarse a las de una cavidad cilíndrica de radio r sometida a una presión radial p . En condiciones de elasticidad las variaciones del radio de la cavidad al incrementarse la presión están dadas por la conocida expresión:

$$\Delta r = \frac{1 + \nu}{E_p} \cdot \Delta p \cdot r \quad (5)$$

siendo ν el coeficiente de Poisson y E_p el módulo de deformación presiométrico del terreno.

A partir de la expresión (5) puede definirse el módulo presiométrico como:

$$E_p = (1 + \nu) \frac{\Delta p}{\Delta r / r} \quad (6)$$

Denominando rigidez del terreno al cociente:

$$M = \Delta p / \Delta r \quad (7)$$

y recordando la relación básica de elasticidad:

$$E = (1 + \nu) 2 \cdot G \quad (8)$$

resulta:

$$G_p = 2 \cdot M \cdot r \quad (9)$$

La ecuación (9) pone de manifiesto que el ensayo presiométrico es un ensayo de corte que permite determinar directamente el módulo de corte del terreno (G).

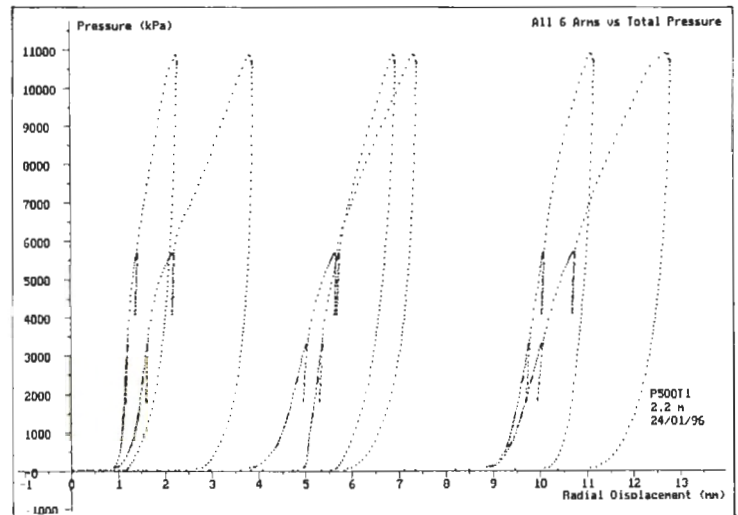
Basándose en la ecuación (8) si se conoce el coeficiente de Poisson sin drenar del terreno (ν) se obtendrá el módulo de elasticidad sin drenar (E) y si lo que se conoce, como es más frecuente, es el coeficiente de Poisson obtenido en condiciones de drenaje (ν') se obtendrá con la ecuación (8) el módulo de elasticidad drenado (E').

Las precisiones de medida de la deformación logradas con estos equipos son de $2 \cdot 10^{-6}$ m que son ampliamente suficientes.

Ensayos dilatométricos

Los ensayos presiométricos realizados con los equipos comerciales, actualmente existentes, poseen un límite de aplicabilidad para terrenos muy rígidos.

Fig. 8.- Resultado en un dilatómetro en granito (6 radios).



Los equipos dilatométricos surgieron en los años 70 como adaptación al presiómetro Menard, para su aplicación en rocas. Estos equipos, siendo uno de los originales el ideado por Rocha en el LNEC, permitían alcanzar presiones superiores a 100 kp/cm², y realizaban varios ciclos de carga, midiendo la deformación del terreno tanto en carga como en descarga, dado que el sistema de medida de la deformación no era volumétrico sino directo.

A diferencia de la gran parte de los suelos un macizo rocoso es mucho más inhomogéneo y discontinuo, y además dista mucho de poderse considerar isótropo, resultando en algunos casos (esquistos, pizarras, rocas estratificadas, etc.) indispensable considerar la fuerte anisotropía existente, ya que afecta fuertemente a su deformabilidad.

En un ensayo dilatométrico se suele medir la deformación directa en seis direc-

ciones lo que supone tres diámetros, tal y como se aprecia en la Fig. 8 que muestra un ensayo realizado con el dilatómetro HPD-95 de Cambridge In Situ. Este dilatómetro, que se muestra en la Foto 2, puede operar a presiones mayores de 200 kp/cm² en caso necesario.

La precisión de las medidas de deformación del equipo son de 10^{-6} , lo que permite medir módulos de corte de hasta 5 GPa, que equivalen, aproximadamente, a módulos de elasticidad del orden de 150.000 kp/cm².

Como puede apreciarse en la Fig. 8 la lectura se efectúa en 6 canales, pudiéndose posteriormente representar indistintamente los tres radios medidos, o la curva media de deformación (Figs. 9 y 10).

Como resultado de un ensayo se puede conocer la anisotropía del terreno, y además si es necesario medir módulos de

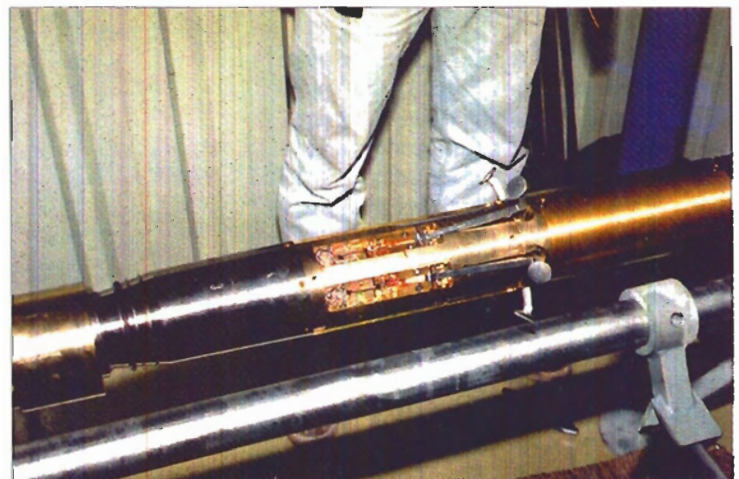


Foto 2.- Dilatómetro HP-95 de Cambridge In Situ.

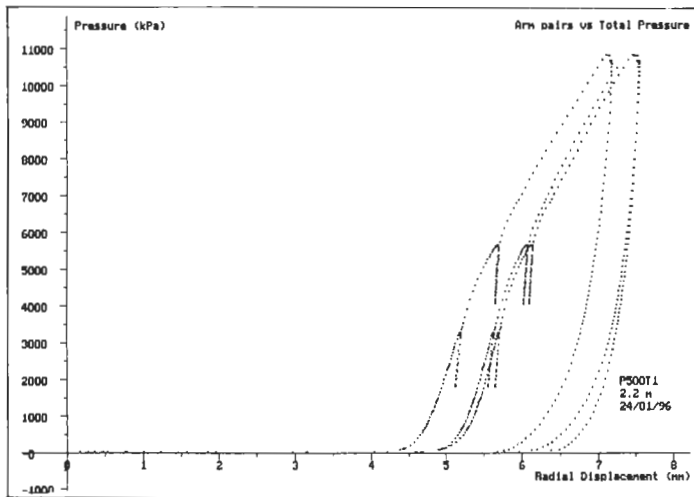


Fig. 9.- Resultado del ensayo para los tres diámetros.

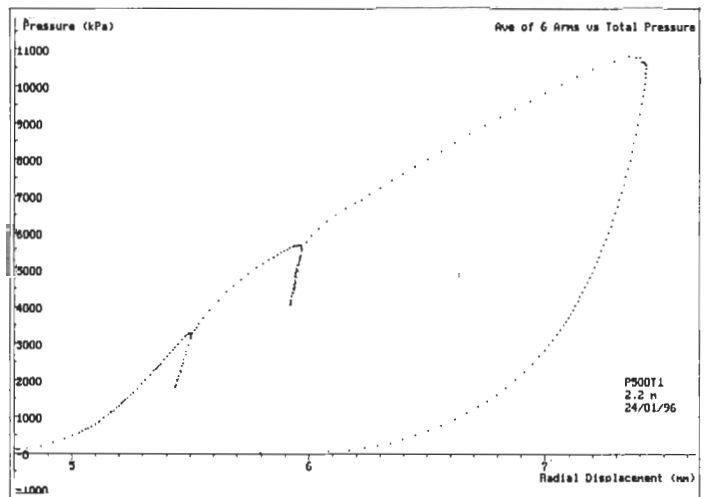


Fig. 10.- Resultado del ensayo.

deformación en descarga. En la **Fig. 11** se muestran los resultados del mismo ensayo anterior, realizado recientemente para el reconocimiento del terreno a travérsar por el túnel hispano-francés de *El Perthus*, que formará parte de la línea de alta velocidad entre Francia y España.

Campo de aplicación

Desde 1989, *Geocontrol, S.A.* ha realizado más de 1000 ensayos presiométricos en terrenos muy variados que van desde limos costeros, con módulos inferiores a 50 kP/cm², hasta granitos con módulos del orden de 110.000 kP/cm².

Esta empresa ha desarrollado una metodología propia de calibración, *Celada et al.* (1995) y ha conseguido realizar ensayos presiométricos en argilita a profundidades de 350 m con total satisfacción. *Celada et al.* (1995).

A partir de la experiencia habida hasta ahora, se puede afirmar que el presiómetro *OYO* que utiliza *Geocontrol, S.A.* es un equipo muy fiable y robusto que puede emplearse, con gran precisión, para determinar el módulo de elasticidad de terrenos que lo tengan comprendido entre 50 y 60.000 kP/cm².

Por encima del límite de 60.000 kP/cm² resulta más recomendable utilizar un dilatómetro, como el *Cambridge in situ*, que se está utilizando en el reconocimiento de los terrenos, básicamente graníticos, en los que se excavará el *Túnel del Perthus*.

Los ensayos dilatométricos son unas tres veces más caros que los presiométricos;

pero hay que tener en cuenta las siguientes ventajas:

- Cada ensayo dilatométrico permite medir el módulo de elasticidad en tres direcciones; lo cual, de hecho, equivale a tres ensayos presiométricos.
- Al obtener tres medidas en un mismo plano se puede estimar la anisotropía del terreno.
- El dilatómetro *HPD-95* de *Cambridge In Situ* permite orientar perfectamente en el espacio las tres medidas obtenidas en cada ensayo.
- En el ensayo dilatométrico se puede medir el módulo de descarga en cada uno de los ciclos de carga que se realicen.
- La precisión de las medidas de deformación son el doble de precisas lo cual

permite medir con rigor módulos de hasta 150.000 kP/cm².

Por todo lo anterior, se puede afirmar que los ensayos presiométricos y los dilatométricos son totalmente complementarios. Así, cuando se debe medir el módulo de elasticidad en macizos rocosos muy resistentes o con gran anisotropía y cuando se desee conocer el módulo en descarga será necesario realizar ensayos dilatométricos. Sin embargo, si el terreno tiene un módulo de Young inferior a unos 60.000 kP/cm², no presenta anisotropía y no interesa conocer el módulo en descarga, con precisión, deben realizarse ensayos presiométricos, que son unas tres veces más baratos que los dilatométricos.

Por otro lado hay que recordar que, tanto los ensayos presiométricos como los dila-

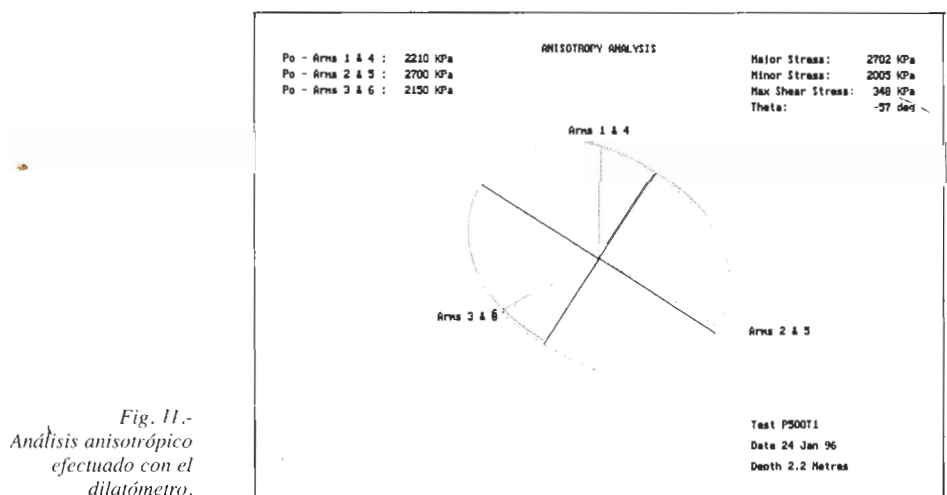


Fig. 11.- Análisis anisotrópico efectuado con el dilatómetro.

tométricos, permiten obtener información complementaria sobre los parámetros plásticos del terreno (Haberfield y Johnston 1990) y, en algunos casos, estimar el coeficiente de reparto de tensiones.

Conclusiones

El módulo de elasticidad del terreno debe ser conocido con precisión si se pretende que los cálculos tenso-deformacionales que se realicen para dimensionar el sostenimiento de una excavación subterránea, para definir las condiciones de cimentación o para cuantificar los movimientos de una excavación protegida con pantallas, tengan una verosimilitud razonable.

El módulo de deformación del terreno presenta un importante *Efecto Escala*, debido a las heterogeneidades y discontinuidades existentes, que hace que sea muy

distinto al determinado mediante ensayos de laboratorio.

Hasta ahora, las correcciones empíricas propuestas para conseguir el módulo de elasticidad determinado en laboratorio y pasar al módulo real del terreno no dan más que una aproximación que, en muchos casos, es poco precisa.

En los últimos años se han desarrollado intensamente los ensayos presiométricos y dilatométricos que permiten conocer con excelente precisión el módulo de Young del terreno que constituye el primer paso para que los análisis tenso-deformacionales sean realmente verosímiles.

Bibliografía

• Serafim y Pereira. Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski. *Proc. Int. Symp. Eng. Geological and ungerground construction, Lisbon I (II)*, 33-34. (1983).

• Bieniawski Z. T. Determining rock mass deformability—experiences from cases histories. *Int. J. R. Mech. Min. Sci. and Geom. Abstr.* 15, 237-247. (1978).

• B. Celada, J.M. Galera and P. Varona. Development of a new calibration and interpretation procedure of pressuremeter tests to obtain elastic parameters. *The Pressuremeter and its New Avenue, Balkema*, 265-272 (1995)

• B. Celada, J.M. Galera and A. Rodríguez. Pressuremeter tests at 310 m depth on argillaceous formations. *The Pressuremeter and its New Avenue, Balkema*, 273-279 (1995)

• Haberfield, C.M. and I. W. Johnston. 1990 (a). A numerical model for pressuremeter testing in soft rock. *Geotechnique*, 40, pp. 569-580.

• Hoek, E. Estimating the strength and deformability of very poor quality rock masses. *Draft*, 1995, 20 p.

• Hoek, E.; Kaiser, P. K. y Bawden, W. Support of underground excavations in hard rock. *Balkema*, (1995).

• Kulhawy. Geomechanical model foundation settlement. *J. Geot. Eng. Div., ASCE* 104, 211-227 (1978).

• Kulhawy & Goddman. Design of foundations on discontinuous rock. *Proc. Int. Conf. Struct. Found. Rock, Balkema*, 209-220 (1980).



Geocontrol, S.A.

Alenza, 9 - 2º Izda.

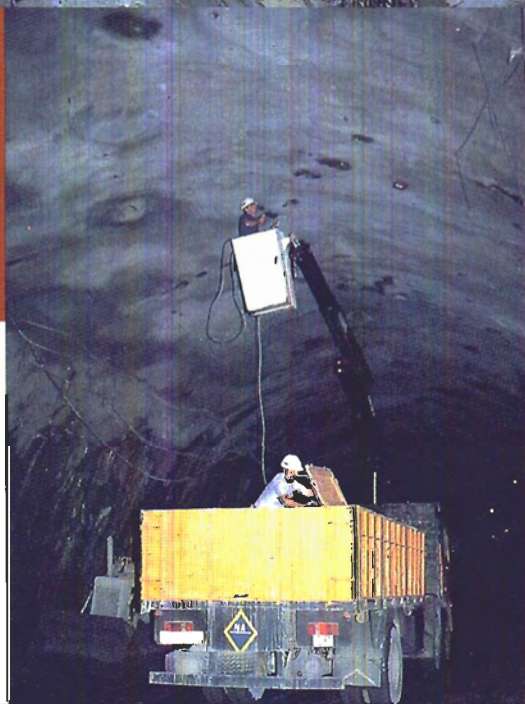
28003 MADRID

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
- Ingeniería ambiental