

Comparación entre los ensayos presiométricos y dilatométricos con la predicción del RMR

Evaluación del módulo de deformación en macizos rocosos

El presente artículo –traducción de la Conferencia Mayor pronunciada con motivo del Simposio Internacional *ISP5-Pressio 2005 50 years of pressuremeters*, organizada por el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) y la École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), (*Gambin, Magnan and Mestat* (ed). Vol II. Presses de l'ENPC / LCPC, Paris 2005)–, expone el resultado de la comparación entre el módulo de deformación obtenido a partir de ensayos dilatométricos y la calidad geomecánica del macizo rocoso, utilizando la clasificación *RMR* y las propiedades básicas de la roca intacta como la resistencia a compresión simple y el módulo de *Young*. Con los resultados de varios estudios realizados en los últimos diez años y utilizando datos de bibliografía, en este estudio se incluyen más de 700 datos.

El primer objetivo fue comparar el módulo dilatométrico con el *RQD* y *RMR*, incluyendo las clasificaciones litológicas de macizo rocoso de la *ISRM* y de *Goodman*. Posteriormente se decidió utilizar el *RMR* sin considerar la litología, ya que las diferencias encontradas fueron insignificantes.

El segundo paso fue filtrar los datos, excluyendo aquellos con las siguientes limitaciones:

- Grado de meteorización \geq IV.
- Módulo dilatométrico \leq 0,5 GPa.

También en aquellos casos en los que $E_m \leq 10$ GPa, se añadieron 15 puntos al valor del *RMR* debido a que siempre ha considerado el módulo sin drenar.

El tercer objetivo fue llevar a cabo un análisis exhaustivo de los datos, utilizando los siguientes criterios:

- Comparación entre E_i y σ_c^i
- Comparación entre E^i y E_m
- Comparación entre E_m/E^i y *RMR*.

Excluyendo cualquier dato con valores anómalos, la base de datos final quedó establecida por 436 casos, en los cuales, los valores conocidos de E_m , *RMR*, σ_c^i y E^i son totalmente fiables.

Con esta base de datos se realizaron varias correlaciones para estimar la deformabilidad del macizo rocoso mejorando los existentes criterios de *Bieniawski* (1978), *Serafim-Pereira* (1983), *Nicholson-Bieniawski* (1990) y *Hoek* (1995).

Introducción

El principal propósito de este artículo es presentar el estado del arte en la evaluación de la deformabilidad del macizo rocoso y presentar los resultados de comparaciones entre el módulo de deformación obtenido a partir de los ensayos presio y dilatométricos y la calidad geomecánica del macizo rocoso utilizando la clasificación *RMR*.

La importancia del conocimiento del módulo de deformación del terreno es bien sabida, y puede obtenerse por estimaciones a partir de análisis esfuerzo-deformación, habiendo sido estudiada en las tres últimas décadas (desde *Bieniawski*, 1978).

En la [Figura 1] se muestra un ejemplo de un cálculo tensodeformacional realizado con el programa *FLAC*.

Esta figura, representa la estimación de la convergencia de un túnel, construido en varias fases, y los asentamientos inducidos en una estructura existente sobre el túnel.

En este caso, la suposición de la rigidez del terreno es de vital importancia para la evaluación de estas deformaciones.

Como estos datos no pueden determinarse mediante ensayos de laboratorio, se han probado varias aproximaciones para estimar las propiedades del macizo rocoso *in situ*.

Aproximación al problema: El concepto del equivalente elástico continuo

La deformabilidad de un macizo rocoso es el resultado de la rigidez de la matriz rocosa y

Palabra clave: CARACTERIZACION, DEFORMACION, DILATOMETRICO, ENSAYO, GEOMECANICA, JUNTA, MACIZO, PRESIOMETRICO, RMR, RQD, ROCA, TENSION.

José M. GALERA ⁽¹⁾, M. ALVAREZ ⁽²⁾, y Z.T. BIENIAWSKI ⁽³⁾,
 (1) Geocontrol, S.A. - UPM
 (2) Geocontrol, S.A.
 (3) Bieniawski Design Enterprises, Arizona, USA

de la rigidez de las juntas; el equivalente elástico continuo tiene las mismas características en cuanto a deformación que el macizo rocoso fracturado. La [Figura 2] muestra este concepto.

Por lo tanto:

$$U_{\text{macizo rocoso}} = U_{\text{equivalente elástico continuo}}$$

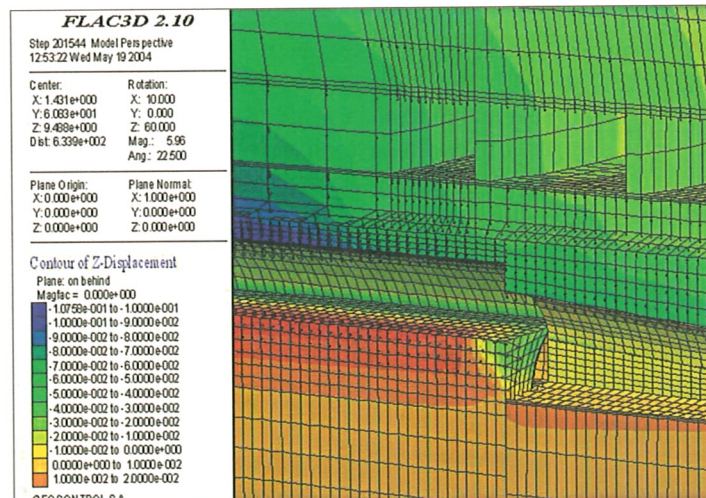
$$\frac{1}{Er} + \frac{1}{k_n s} = \frac{1}{En} \quad (1)$$

donde:

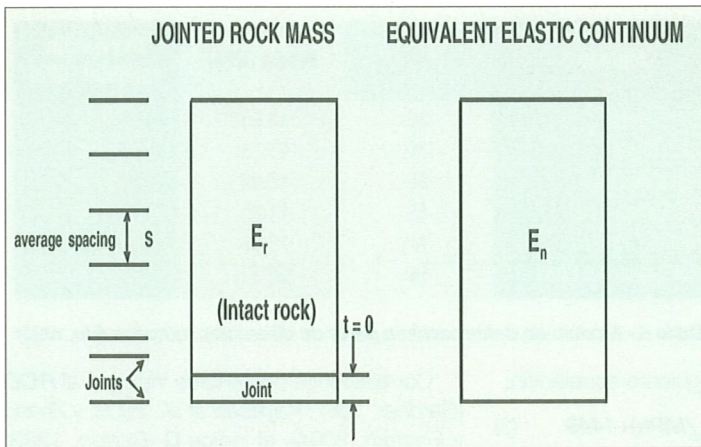
- Er es el módulo de deformación de la roca.
- k_n es la rigidez normal de la junta.
- s es el espaciado medio.
- En es el módulo de deformación equivalente.

En esta línea de razonamiento del equivalente elástico continuo, varios autores presentaron sus conclusiones, tales como *Kulhawy* (1978), mostradas en la [Figura 3], y *Kulhawy* y *Goodman* (1980).

Básicamente se propuso una reducción del tipo:



[Figura 1] Ejemplo de análisis numérico tensodeformacional realizado con programa *FLAC*.



[Figura 2].- El concepto de macizo rocoso fracturado versus equivalente elástico continuo.

$$E_m = j \cdot E_i \quad (2)$$

donde:

E_m es el módulo de deformación del macizo rocoso.

j es el espaciado medio de las juntas.

E_i es el módulo de deformación de la roca intacta.

También *Bandis et al.* (1983) discutieron la evaluación de la rigidez normal y de cizalla de las juntas.

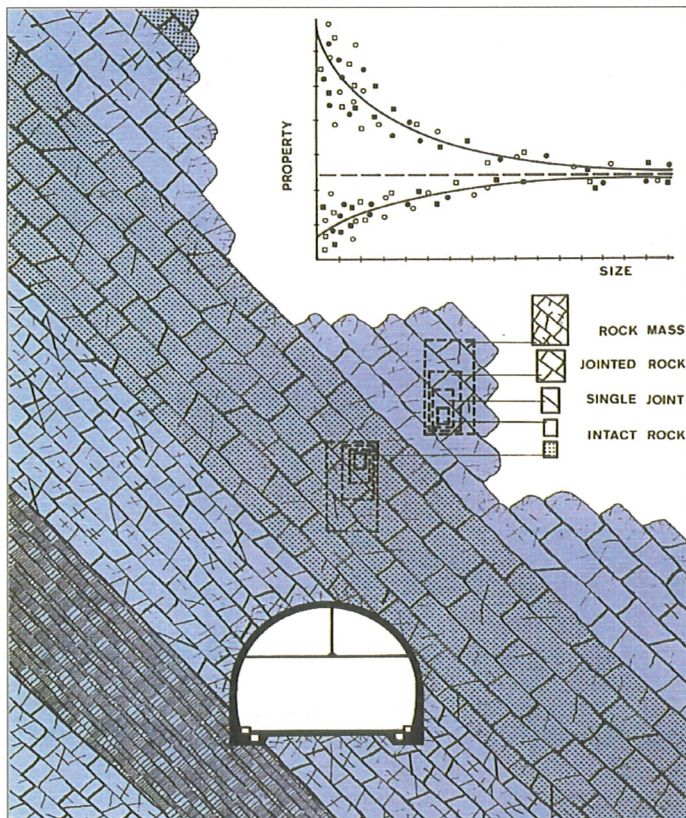
Una segunda aproximación fue iniciada por *Bieniawski* (1978), en la cual la estimación del módulo de deformación de la roca se estimaba de forma empírica. Esta aproximación se discutirá posteriormente.

Algunas consideraciones sobre el efecto escala en macizos rocosos

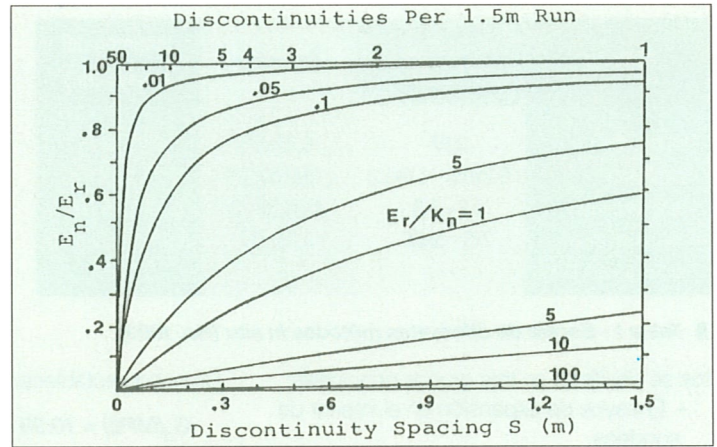
Una de las primeras consideraciones sobre el efecto escala en macizos rocosos fue realizada por *Hoek y Brown* (1980), donde la resistencia del macizo rocoso fue estimada a partir del valor del *RMR*.

También la *ISRM* organizó un grupo de trabajo para el estudio del efecto escala en macizos rocosos, en cuanto a su resistencia, deformabilidad, propiedades de las juntas, permeabilidad e incluso tensiones *in situ*. La [Figura 4] muestra el concepto de este efecto.

Los resultados de estos estudios fueron presentados en dos *Jornadas*, en *Löen* (1990)



[Figura 4].- Concepto de macizo rocoso y su efecto escala (*Pinto da Cunha*, 1993).



[Figura 3].- Módulo de Reducción frente al Espaciado de las Discontinuidades (*Kulhawy*, 1978).

de laboratorio, *BHD* a Ensayos Dilatómétricos y *LFJ* a Ensayos con gato plano. Dos ideas diferentes se derivan de esta figura. Una es que cuanto mayor es el volumen de roca involucrada en el ensayo, menor es el módulo. La segunda es que cuanto mayor es el volumen de roca, menor es la variabilidad en los resultados.

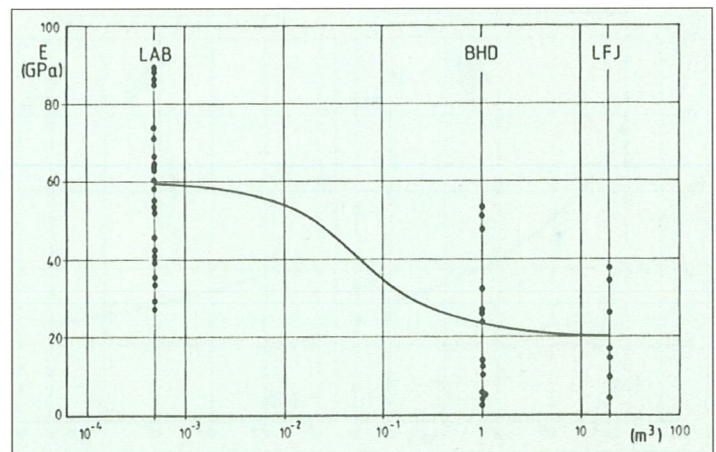
Posteriormente, *He* (1993) estudió la influencia del volumen del ensayo en el módulo de deformación. En las [Tablas I y II] el efecto escala puede observarse utilizando varios métodos *in situ* para su determinación. Estos resultados son consistentes con los estudios previos de *Bieniawski* (1979) sobre la influencia de varios métodos de medida de la deformación *in situ*.

Pinto da Cunha y Muralla (1990) también realizaron una comparación entre el módulo de deformación obtenido en laboratorio y el obtenido *in situ* con el ensayo de gato plano, frente a la densidad de las juntas. El resultado de este estudio se muestra en la [Figura 6].

Métodos principales para la determinación *in situ* de la deformabilidad

Existen varios métodos para la determinación *in situ* de la deformabilidad del suelo. Es-

La [Figura 5] muestra este fenómeno, donde *LAB* equivale a ensayos



[Figura 5].- Módulo de deformación frente a volumen ensayado (*Pinto da Cunha & Muralla*, 1990).

Método	Rango de la dimensión del ensayo (m)	Ecuación	Volúmen del ensayo (m ³)
Dilatómetro	0,07	$8,75\pi D^2 l$	0.13 (0.1)
Gato Plano	0.2x0.3 - 1.0x1.0	$2[\pi(2D)^3]/3$	0.71-3.1 (1.0)
Placa de carga	0.2 - 1.0	$4[\pi(2D)^3]/3$	0.27-33.5 (10)
Presión en túnel	2x5 - 5x30	$8.75\pi D^2 l$	550-20600(1000)
Relajación del túnel	--	--	(>1000)

■ **Tabla I.- Escala de diferentes métodos in situ (He, 1993).**

tos se clasifican en tres grupos principales:

- Ensayos de expansión en el interior de sondeos.
- Métodos geofísicos.
- Ensayos de placa de carga.

Los **ensayos de expansión en sondeos** son ampliamente utilizados con varios equipos, fundamentalmente:

- *Presiómetro Ménard*.
- *Dilatómetro flexible*.
- *Presiómetro auto-perforante*.

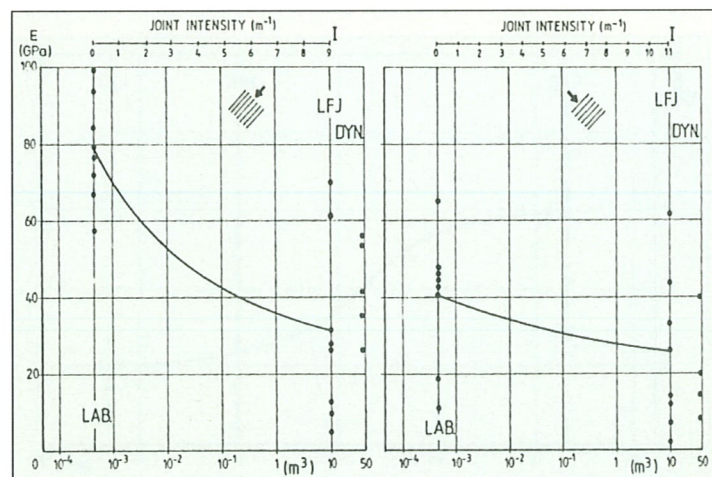
Todos los métodos citados están bajo estandarización por *CEN (CEN, 2005)*.

De acuerdo con estas normas, para macizos rocosos convencionales, el dilatómetro flexible es la mejor herramienta, mientras que los demás equipos deben utilizarse únicamente para rocas muy blandas o suelos.

Los métodos geofísicos para la medida *in situ* de la deformabilidad del macizo se basan en la medida de la velocidad de ondas compresiva y de cizalla, **V_p** y **V_s**, y por tanto llevan a cabo una evaluación de las propiedades dinámicas de la roca.

Estos módulos se deben correlacionar con los módulos elásticos. En bibliografía pueden encontrarse varios estudios sobre esta correlación (*Starzec, 1999* o *Galera et al., 2001*).

La [Figura 7] muestra la correlación entre el módulo obtenido por ensayos con presiómetro flexible y el módulo dinámico obtenido a partir de un perfil sónico de onda completa.



■ [Figura 6].- **Módulo de deformación frente a intensidad de las juntas y volúmenes ensayados (Pinto da Cunha & Muralla, 1990).**

Método	Nº	Media (GPa)	Desviación estándar (GPa)
Dilatómetro	30	13.80	10.01
Gato Plano	31	25.13	17.42
Placa de carga	96	15.65	15.70
Presión en túnel	45	11.30	8.90
Método sísmico	11	19.68	6.80
Relajación del túnel	16	22.71	12.40

■ **Tabla II.- Módulo de deformación a partir de diferentes métodos (He, 1993).**

Se puede establecer la siguiente correlación:

$$G_d(\text{MPa}) = 10.95 \cdot G_{\text{stat}}(\text{MPa}) + 1449 \quad (3)$$

El *Ensayo de Placa de Carga* también proporciona una evaluación de la reducción del módulo debido al efecto escala en macizos rocosos. Su uso es limitado debido principalmente a su elevado coste. Sin embargo, se usa en algunos estudios de cimentaciones en roca y en investigación de emplazamientos de presas.

La [Figura 8] muestra un ejemplo del ensayo de placa de carga realizado en la galería experimental de Le Boulou (Francia) para el Túnel del Perthus (*Celada et al., 1997*).

Se puede concluir que los ensayos presiométricos y dilatométricos son los más adecuados para determinar la deformabilidad de un macizo rocoso.

Evaluación empírica a partir de clasificaciones geomecánicas

Es evidente que los métodos in situ constituyen la mejor aproximación para predecir la deformabilidad del macizo rocoso. Sin embargo, los ensayos in situ son relativamente caros y no siempre proporcionan resultados fiables, debido a distintas razones.

La estimación del módulo de deformación del macizo rocoso a partir de clasificaciones geomecánicas aparece como una herramienta tradicional en la mecánica de rocas desde *Bieniawski (1978)* y el desarrollo de su índice **RMR**.

Correlaciones posteriores incluyen al **RQD** (*Gardner, 1987; Kayabasi et al., 2003; y Zhang y Einstein, 2004*), al índice **Q** (*Barton, 1983; Grimstad y Barton, 1993*) y al **RMR** (*Serafim y Pereira, 1983; Nicholson y Bieniawski, 1990; y más recientemente Hoek et al., 1995*).

Actualmente, se utilizan tres correlaciones a partir de los índices **Q**, **RQD** y **RMR**:

a) Q y el módulo de deformación del macizo rocoso.

La literatura sobre la correlación **Q-Em** no es tan abundante como la existente para el **RMR**. Sin embargo, *Barton (1983)* y *Grimstad y Barton (1993)* proporcionan un estudio basado en varias medidas de parámetros geofísicos (básicamente **V_p**) en el interior de sondeos, obteniéndose las siguientes relaciones:

$$Q = 10(V_p - 3.5) \quad \text{con } V_p \text{ en km/s,}$$

y concluyendo:

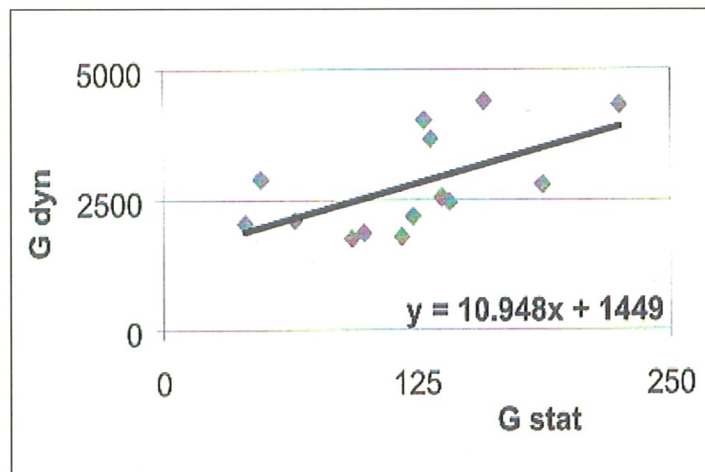
$$E(\text{GPa}) = 25 \text{Log} Q \quad (4)$$

aunque en otros proyectos **E = 10LogQ** resultó ser más adecuado.

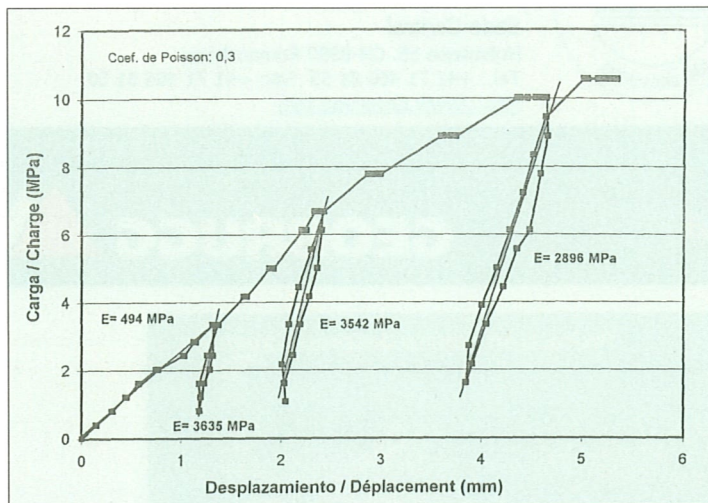
b) RQD y módulo de deformación del macizo rocoso.

Hay que tener en cuenta que el **RQD** tiene la limitación de que es un índice de calidad de la matriz rocosa y no del macizo rocoso como el **RMR** o **Q**. *Gardner (1987)* propuso la siguiente expresión:

$$E_m = \alpha_E \cdot E_i \quad (5)$$



■ [Figura 7].- **Correlación entre módulos de cizalla estático y dinámico (Galera et al. 2001).**



[Figura 8].- Ensayo de placa de carga en los esquistos de Montesquieu (Celada et.al. 1997).

donde $\alpha_E = 0.0231 \cdot RQD - 1.32 (\geq 0.15)$. Este método fue adaptado por la AASHTO para valorar la deformabilidad del terreno.

Más recientemente, Zhang y Einstein (2004) recomendaron las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
 - E_m / E_i &= 0.2 \cdot 10^{0.0186RQD - 1.91} && \text{(Límite inferior)} \\
 - E_m / E_i &= 1.8 \cdot 10^{0.0186RQD - 1.91} && \text{(Límite superior)} \\
 - E_m / E_i &= 10^{0.0186RQD - 1.91} && \text{(Media)}
 \end{aligned}$$

Estas expresiones se muestran en la [Figura 9]. Obsérvese la gran dispersión existente.

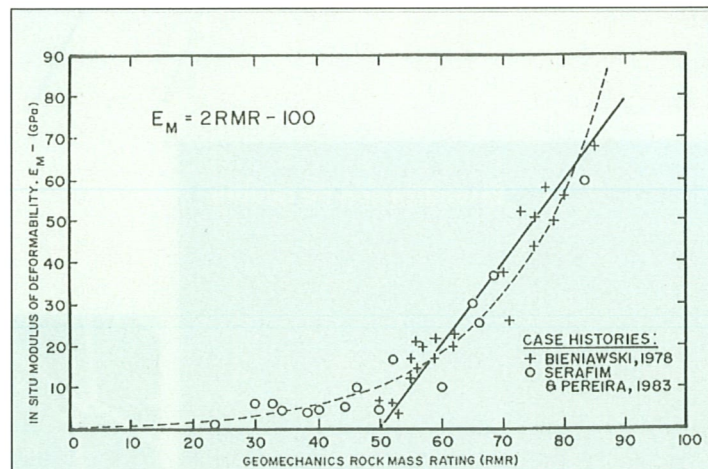
c) RMR y módulo de deformación del macizo rocoso.

La primera correlación entre RMR y el módulo de deformación fue propuesta por Bieniawski (1978), como:

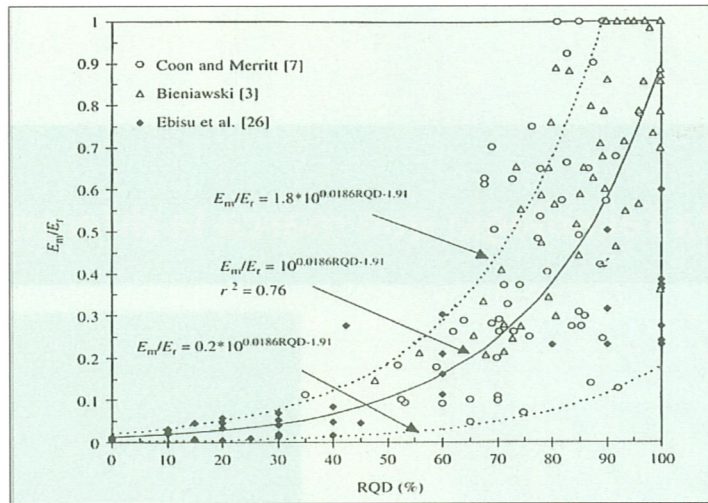
$$E_m (\text{GPa}) = 2 \cdot RMR - 100 \quad (6)$$

Posteriormente, Serafim-Pereira (1983) propusieron la expresión más conocida:

$$E_m (\text{GPa}) = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}} \quad (7)$$



[Figura 10].- Correlación entre el módulo de deformación in situ y el RMR (Bieniawski, 1989).



[Figura 9] Relación entre RQD y Em/Er (Zhang y Einstein 2004).

La [Figura 10] muestra gráficamente ambas expresiones y su comparación.

Nicholson y Bieniawski (1990) obtuvieron la siguiente relación considerando no sólo el RMR sino también el módulo de Young de la roca intacta E_i :

$$\frac{E_m}{E_i} = \frac{1}{100} \cdot \left(0.0028 \cdot RMR^2 + 0.9^{22.82} \right) \quad (8)$$

Finalmente, Hoek et al. (1995) surgieron una corrección a la expresión de Serafim-Pereira utilizando el factor:

$$\frac{\sigma_c^i (\text{MPa})}{100}$$

y sustituyendo el GSI (Geological Strength Index) por el RMR, como sigue:

$$E_m (\text{GPa}) = \sqrt{\frac{\sigma_c^i (\text{MPa})}{100}} \cdot 10^{\frac{(GSI-10)}{40}} \quad (9)$$

La [Figura 11] muestra gráficamente esta relación de Hoek et al. (1995).

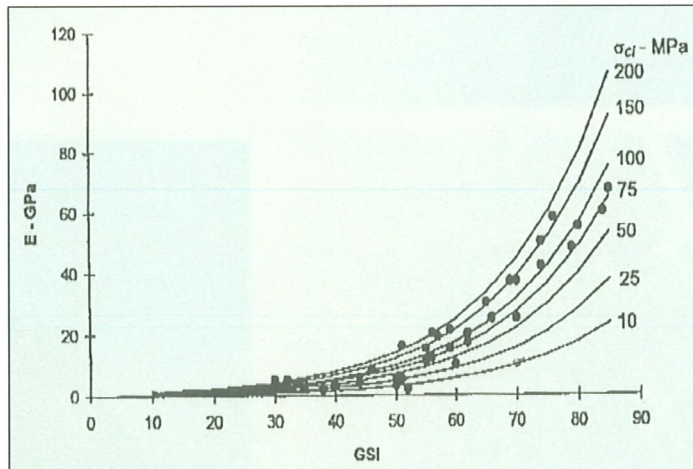
Sin embargo, los autores recomiendan firmemente el uso del RMR en lugar del GSI debido a que el GSI introduce mayor empi-

rismo en una clasificación de por sí empírica, como se determinó en una reciente revisión llevada a cabo por Palmström (2003) que advierte del siguiente modo: La determinación visual del parámetro GSI representa el retorno a las descripciones cualitativas, en lugar de avanzar introduciendo datos cuantitativos como el RMR, Q o los sistema RMI. El GSI es útil principalmente para rocas poco resistentes, con valores de RMR < 20. Como el GSI se utiliza para la estimación de parámetros de entrada (resistencia), constituye solamente una relación empírica, no siendo válido para clasificaciones ingenieriles de las rocas.

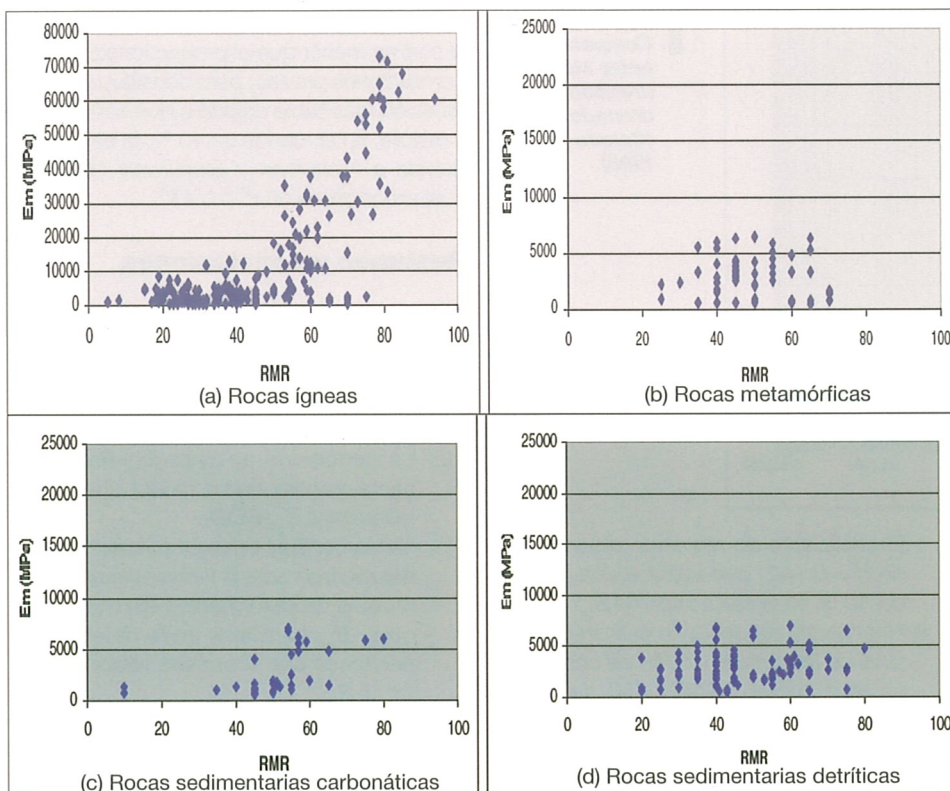
Nuevas correlaciones entre el RMR y el módulo de deformación del macizo rocoso

Base de datos

La información aquí presentada se deriva parcialmente de bibliografía (Bieniawski, 1978; Serafim-Pereira, 1983; y Labrie et al. (2004)), y principalmente de medidas con presiómetro y



[Figura 11].- Relaciones entre GSI o RMR con la resistencia de la roca intacta (σ_{ci}).



■ [Figura 12].- Base de datos según su litología.

dilatómetro realizadas por *Geocontrol* durante la última década.

La cantidad de datos disponibles clasificados según su litología es la siguiente:

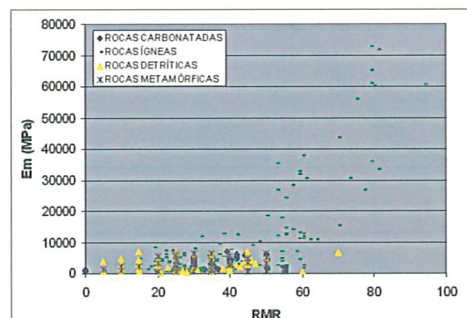
- Rocas ígneas: 270.
- Rocas metamórficas: 108.
- Rocas sedimentarias detríticas: 175.
- Rocas sedimentarias carbonáticas: 101.
- Bibliografía: 48.

Esto representa 702 datos en los que se conoce el valor de E_m a partir de ensayos *in situ*, y los valores de RMR y RQD .

En 123 de estos datos también se conoce la resistencia a compresión simple (σ_c) y el módulo de Young de la roca intacta (E_i).

Las [Figura 12 a,b, c y d] muestran los datos disponibles clasificados por litología. Esta clasificación se basa en las clasificaciones litológicas de macizo rocoso de la *ISRM* y de *Goodman*.

La [Figura 13] muestra todos los datos reunidos en el mismo gráfico pudiendo observar-



■ [Figura 13].- Relación entre E_m (MPa) y RMR considerando la litología.

se como las diferencias debidas a la litología son insignificantes.

El primer objetivo fue comparar los resultados obtenidos con ensayos presiométricos y dilatométricos, los cuales representan el módulo de deformación E_m , con el RQD y RMR . En la [Figura 14 a y b] se muestran ambas comparaciones.

Es evidente que el RMR proporciona una tendencia mejor de los datos ya que el RQD es solamente uno de los cinco componentes principales de la clasificación RQD .

En esta figura se observa claramente como el RMR muestra una mayor confianza para la estimación del módulo de deformación que el RQD , obteniéndose una menor dispersión de los datos.

Análisis de los datos

El segundo paso consistió en filtrar la base de datos, excluyendo aquellos con las limitaciones siguientes:

- Grado de meteorización mayor o igual que IV.
- Módulo presiométrico o dilatométrico menor o igual que 0,5 GPa.

La razón para este filtro es eliminar datos con un *comportamiento de suelo* en los que la aplicación del RMR no es apropiada, debido a que no constituyen un macizo rocoso convencional.

También, en aquellos casos en los que $E_m \leq 10$ GPa, se añadieron 15 puntos al valor del RMR debido a que se consideró un módulo drenado.

Celada et al. (1995) analizaron la relación entre módulo drenado y no drenado, de la siguiente forma:

$$\frac{E_u}{E} = \frac{3(1-\nu)Kw + E \cdot n}{2(1+\nu)(1-2\nu)Kw + E \cdot n} \quad (10)$$

donde Kw es el módulo volumétrico del agua y n es la porosidad.

La [Figura 15] muestra esta relación, de la que se puede concluir lo siguiente:

- Si E es mayor que 10 GPa, $E_u / E \approx 1$, no existiendo diferencias importantes entre ambos módulos.
- Si E es inferior a 10 GPa y con un *coeficiente de Poisson* drenado de 0,3, $E_u / E \approx 1,15$, por lo que el módulo no drenado es aproximadamente un 15 % más elevado que el módulo drenado.

Finalmente, el tercer paso consistió en realizar un análisis exhaustivo de los datos, con los siguientes criterios:

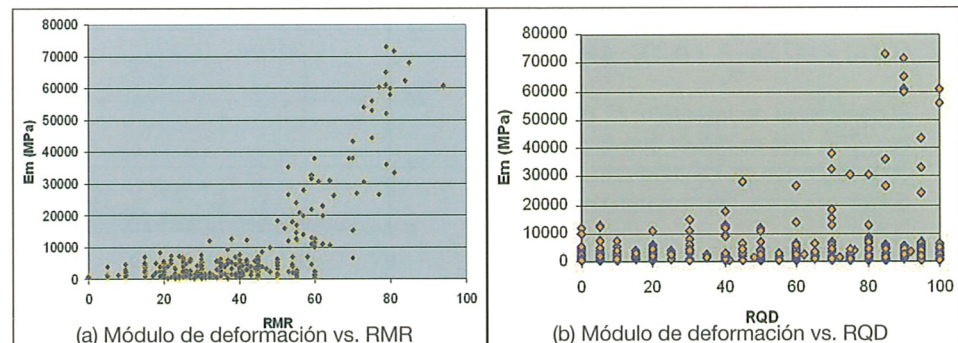
- Comparación entre E_i y σ_c^i
- Comparación entre E_i y E_m
- Comparación entre E_m / E_i y RMR .

Excluyendo cualquier dato con valores anómalos, la base de datos final consistió en:

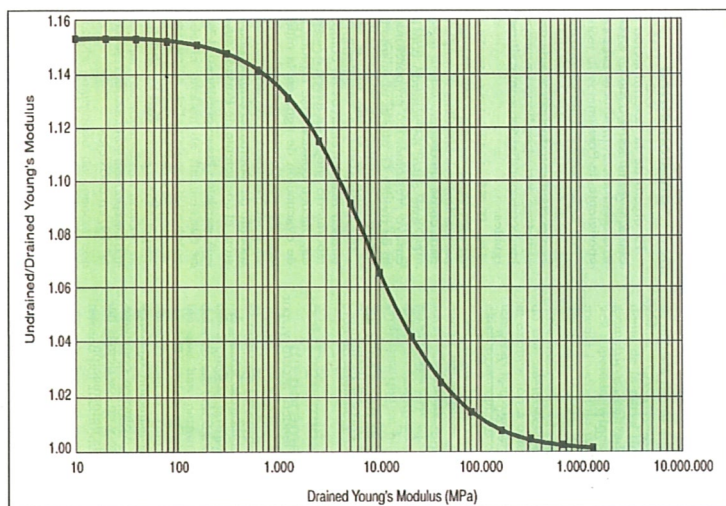
- 427 casos en los que E_m y RMR se consideran fiables.
- 98 casos en los que E_m , E_i , σ_c^i y RMR se consideran fiables.

Discusión

Con estos datos, se investigaron varias correlaciones para estimar la deformabilidad del



■ [Figura 14].- Comparación entre E_m y RMR y entre E_m y RQD .



[Figura 15].- Comparación entre Módulo drenado y no drenado. (Celada et al., 1995).

macizo rocoso mejorando las relaciones existentes, citadas anteriormente

La experiencia muestra que con las correlaciones actuales, el módulo de deformación, E_m , estimado, es normalmente superior al medido por medio de ensayos de expansión en sondeos, tales como los presiómetros y dilatómetros. Se proponen dos nuevos tipos diferentes de relaciones:

- Sin considerar valores de E_i .
- Incluyendo valores de E_i .

En el primer caso, también se incluyen los valores de σ_c^i usando la expresión:

$$\sigma_m = \sigma_c^i \cdot e^{\left(\frac{RMR-100}{24}\right)} \quad (11)$$

(Kalamaras y Bieniawski, 1995)

En todos los casos, el coeficiente de regresión r^2 se calcula como sigue:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

donde y_i es el valor de E_m , \bar{y} es la media y y_i' son los valores ajustados.

a) Nuevas correlaciones entre RMR y módulo de deformación del macizo rocoso.

La [Figura 16] muestra todas las nuevas correlaciones consideradas y también la expresión de Serafim y Pereira.

- 1) Considerando $\sigma_m = \sigma_c^i \cdot e^{(RMR-100)/24}$, se deriva:

$$E_m \text{ (GPa)} = 147.28 \frac{\sigma_m}{\sigma_c} - 0.202 \cdot RMR \quad (13)$$

El coeficiente de regresión, r^2 , obtenido es 0,765, que es mayor que el obtenido en la regresión de los datos siguiendo a Serafim-Pereira, concretamente un $r^2 = 0,76$.

- 2) La segunda relación es una mejora de Serafim-Pereira, de la siguiente forma:

$$E_m = e^{\frac{(RMR-10)}{18}} \quad (14)$$

El coeficiente de regresión obtenido es de $r^2 = 0,742$, que supone una mejora del 10 % en la estimación de E_m .

- 3) Finalmente, siguiendo la estimación original de Bieniawski (1978), se consideró un valor umbral de $RMR = 50$, del modo siguiente:

$$E_m \text{ (GPa)} = 0.0876 \cdot RMR \quad \text{para } RMR \geq 50 \quad (15)$$

$$E_m \text{ (GPa)} = 0.0876 \cdot RMR + 1.056(RMR - 50) + 0.015(RMR - 50)^2 \quad \text{para } RMR > 50 \quad (16)$$

Esta correlación muestra un coeficiente de regresión $r^2 = 0,8$, que mejora en más de un 15 % la estimación de Serafim y Pereira.

b) Nueva correlación entre RMR y módulo de deformación del macizo rocoso incluyendo E_i

La [Figura 17] muestra la relación:

$$E_m = E_i \cdot e^{\frac{(RMR-100)}{36}}$$

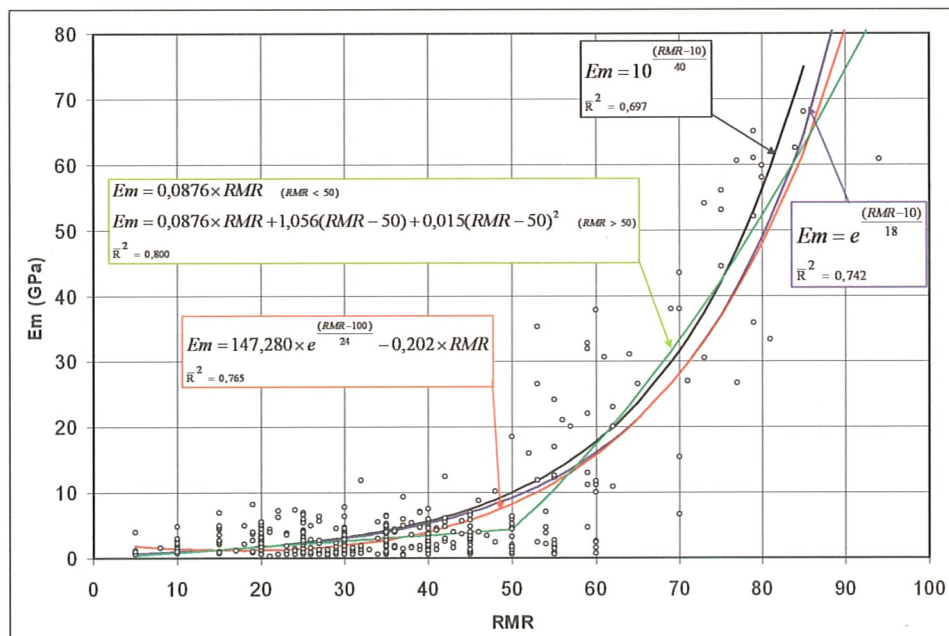
El coeficiente de regresión, r^2 , es de 0,656 el cual es menor que el proporcionado por las correlaciones previas, pero constituye una estimación más fiable debido a que considera E_i y mejora, en al menos un 40 %, la estimación debida a Nicholson y Bieniawski (1990), la cual proporciona un $r^2 = 0,472$.

Resumen y conclusiones

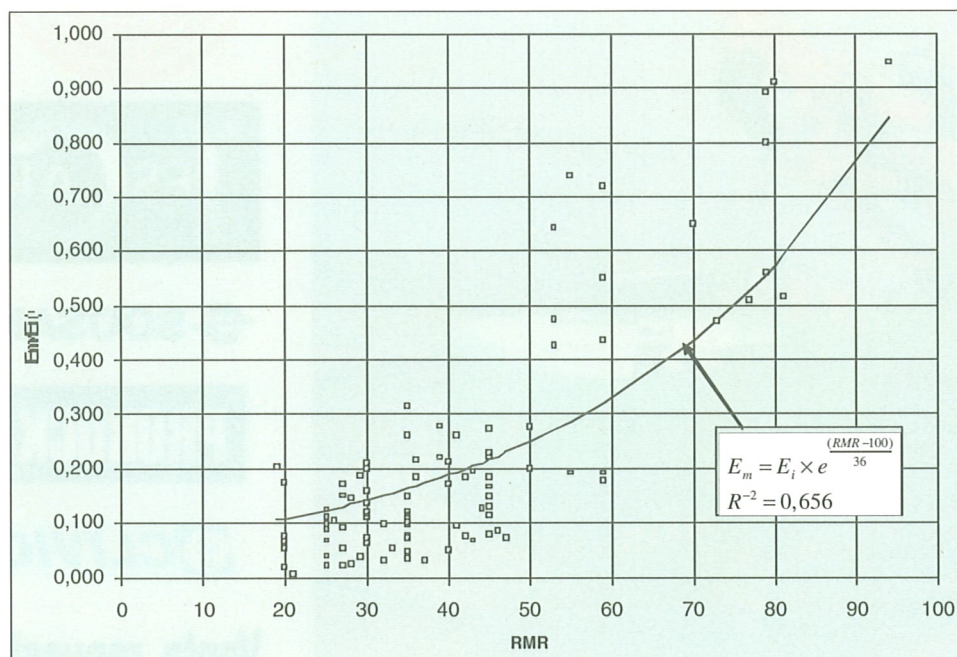
- (1) Los ensayos de expansión en sondeos, principalmente el dilatómetro flexible, es el ensayo *in situ* más adecuado para la determinación del módulo de deformación del macizo rocoso.
- (2) La correlación empírica E_m -RMR presenta una dispersión menor que las correlaciones E_m -RQD.
- (3) Varias correlaciones empíricas han sido estudiadas hasta la fecha para estimar el módulo de deformación del macizo rocoso, E_m . La mayor parte de ellas proporcionan una sobre-estimación del valor de E_m .
- (4) Considerando 427 datos recogidos de literatura publicada y de nuestros datos, el mejor coeficiente de regresión se obtiene considerando un valor umbral de $RMR = 50$. Para valores menores o iguales que 50 se propone una relación lineal, mientras que para valores mayores que 50, se recomienda una expresión polinómica.
- (5) Se propone una nueva relación entre RMR y E_m / E_i . a partir de 98 datos. Esta expresión es:

$$E_m = E_i \cdot e^{\frac{(RMR-100)}{36}} \quad (17)$$

representando una potente herramienta para la estimación del módulo de deformación del macizo rocoso.



[Figura 16].- Gráfica representativa de nuevas correlaciones entre RMR y módulo de deformación del macizo rocoso



■ [Figura 17].- Correlación entre RMR y coeficiente del módulo de deformación, incluyendo E_i .

Considerando que la resistencia del macizo rocoso es $\sigma_m = \sigma_c' \cdot e^{(RMR-100)/24}$, y la ecuación (17), se obtiene como resultado la siguiente expresión:

$$\frac{E_m}{E_i} = \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_i} \right)^2 \quad (18)$$

que resulta ser otra herramienta útil para la caracterización del macizo rocoso.

- (6) Sin embargo, las correlaciones presentadas se deberán utilizar teniendo en cuenta que algunos factores son ignorados, como el efecto de la dirección de las juntas.

Bibliografía

- BANDIS ET AL. (1983) *Fundamentals of Rock Joint Deformation*. Int. J. Rock Mech. and Min. Sc., vol. 20(6), 249-268.

- BARTON N (1983) *Application of Q-system, index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses*. Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, vol. I (II), Lisbon, Portugal, 1983, 51-70.

- BIENIAWSKI Z.T. (1978) *Determining rock mass deformability: experience from cases histories*. Int. J. ROCK MECH AND MIN. Sc., vol. 15, 237-247.

- BIENIAWSKI Z.T. (1979) *A comparison of rock mass deformability measurements by different methods*. Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conf., New York, 1979, 901-916.

- BIENIAWSKI Z.T. (1989) *Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 251 pages.

- BOCABARTEILLE A., GONZÁLEZ A., CELADA B., GALERA J.M. (2000) *Geotechnical site charac-*

terisation of the Perthus Tunnel. Geoengineering 2000, Melbourne.

- CELADA B., GALERA J.M., VARONA P. (1995) *Development of a new calibration and interpretation procedure of pressuremeter test to obtain elastic parameter. The pressuremeter and its new avenues*. Ed Balkema, 265-272.

- CELADA B. GALERA J.M., VARONA P, RODRÍGUEZ A. (1995) *Determinación del módulo de elasticidad de formaciones arcillosas profundas*. Enresa. Publicación Técnica núm. 01/95.

- CELADA B., GALERA J.M., RODRÍGUEZ A. (1996) *Ensayos de deformabilidad para la caracterización del terreno in situ*. Ingeopres, nº 36, 22-27.

- CELADA B, GONZÁLEZ A., GALERA J.M., ROLLAND A. (1997) *Rock mass characterisation of the weak zones at the Perthus Tunnel*. In. Tunn. Under Difficult Cond. and Rock Mass Classification. ITC., 75-86.

- CEN/TC 341 / WG 5 *Borehole expansion tests (2005)*. Pr EN ISO 22476-4 Ménard pressuremeter test. Pr EN ISO 22476-5 Flexible dilatometer. Pr EN ISO 22476-6 Self-boring pressuremeter. Pr EN ISO 22476-7 Borehole jack test. Pr EN ISO 22476-8 Full displacement pressuremeter test.

- GALERA J.M., PERAL F., RODRÍGUEZ A. (2001) EGS108: *In situ characterisation of rock mass deformability. Comparison between elastic moduli obtained with full wave form sonic and pressuremeter tools*. EEGS2001 Proceedings Meeting Birmingham. Engineering and Site Investigation Session (EGSI).

- GARDNER W.S. (1987) *Design of drilled piers in the Atlantic Piedmont*. SMITH RE, editor. *Foundations and excavations in decomposed rock of the piedmont province*, GSP ASCE, no. 9, 1987, 62-86.

- GRIMSTAD E., BARTON N. (1993) *Updating the Q-system for NMT*. Proc. Int. Symp. Sprayed Concrete, Fagernes, 21 pages.

- HE J. (1993) *A case review of the deforma-*

tion modulus of rock mass. Scale effect. Int. workshop on scale effects in rock masses, Lisbon. Ed. Balkema, 87-91.

- KALAMARAS G.S. AND BIENIAWSKI Z.T. (1995) *A rock mass strength concept*. ISRM International Congress of Rock Mechanics. Tokyo, Japan.

- KAYABASI A, GOKCEOGLU C, ERCANOGLU M (2003) *Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, 40:55-63.

- HOEK E, BROWN E.T. (1980) *Underground Excavations in Rock*. Ed. Institute of Mining and Metallurgy, 527 pages.

- HOEK E, KAISER P.K., BAWDEN W.F. (1995) *Support of underground Excavations in Hard Rock*. Ed. Balkema, 215 pages.

- KULHAWY F.H. (1978) *Geomechanical model foundation settlement*. J. Geot. Eng. Div., ASCE 104, 211-227.

- KULHAWY F.H., GODDMAN R. (1980) *Design of foundations on discontinuous rock*. Proc. Int. Conf. Struct. Found. Rock. Ed. Balkema, 209-220.

- LABRIE D. ET AL. (2004) *Measurement of in situ deformability in hard rock*. Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Porto, Portugal. Ed. Milpress, 963-970.

- NICHOLSON G. AND BIENIAWSKI Z.T. (1990) *A non-linear deformation modulus based on rock mass classification*. Int. J. Mining & Geol. Eng., vol. 8, 181-202.

- PALMSTRÖM A., SINGH R. (2001) *The deformation modulus of rock masses - Comparison of in situ tests and indirect estimates*. Tunnelling and Underground Space Tech. Vol. 16, 115-131.

- PALMSTRÖM A., STILLE H. (2003) *Classification as a tool in Rock Engineering*. Tunnelling and Underground Space Tech., vol. 18, no. 4, 331-345.

- PINTO DE CUNHA A., MURALHA J. (1990) *About LNEC experience on scale effects in the deformability of rock masses*. Int workshop on scale effects in rock masses, Loen. Ed. Balkema, 219-229.

- PINTO DA CUNHA A. (1993) *Scale effects in rock engineering - An overview of the Loen Workshop and other recent papers concerning scale effects*. Int. workshop on scale effects in rock masses, Lisbon. Ed Balkema, 3-14.

- SERAFIM J.L., PEREIRA J.P. (1983) *Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski*. Proc. Int. Symp on Eng. Geol. and Underground Construction, vol. I (II), Lisbon, Portugal, 1983, 33-44.

- STARZEC P. (1999) *Dynamic elastic properties of crystalline rocks from South - West Sweden*. Int. Jo. Rock Mech. and Min. Sc. Vol. 36, 265-272.

- ZHANG L., EINSTEIN H.H. (2004) *Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses*. Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 41, 337-341.