

## APLICACIÓN DE LAS CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS AL ESTUDIO DE EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS

L. M. MUÑOZ FERNANDEZ \* y L. I. GONZALEZ DE VALLEJO \*\*

### RESUMEN

Se realiza una revisión de la metodología seguida en la elaboración de las Clasificaciones Geomecánicas, así como de los factores geológicos que son empleados por éstas. Se han seleccionado, por sus características específicas, cuatro clasificaciones (R.S.R., Q., R.M.R. y S.R.C.), siendo estudiados en profundidad.

### PALABRAS CLAVE

Clasificación geomecánica.

### ABSTRACT

*A review of the methodology followed to produce a Geomechanical Classification and of the geological parameters selected by them, is carried out. Four of these Rock Mass Classifications have been chosen (R.S.R., Q., R.M.R., S.R.C.), because of their specific features, and studied thoroughly.*

### KEY WORDS

Geomechanical classification.

\* I.B.M. Paseo de la Castellana, 4. Madrid.

\*\* Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. Madrid.

### INTRODUCCIÓN

El número de factores geológicos que influyen sobre el comportamiento mecánico de un macizo rocoso es muy elevado. La evaluación de todos los factores para aproximar este comportamiento sería prácticamente imposible por hacer demasiado extensos los trabajos de campo y sería poco práctica al complicar la selección de la información relevante.

Si se tiene en cuenta que:

- El volumen de datos disponible en cualquier estudio es escaso, en relación con el macizo rocoso al que pretenden representar, y
- Su validez es relativa al ser obtenidos, fundamentalmente, en afloramientos superficiales puntuales y sondeos. Es necesaria la aplicación de modelos que seleccionen la información geológica relevante y necesaria para predecir el comportamiento mecánico de los macizos rocosos en excavaciones subterráneas.

### PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

Los factores que influyen sobre el comportamiento mecánico de los macizos rocosos y que afectan a la estabilidad de las excavaciones subterráneas pueden ser divididos en tres grupos, dependiendo de los aspectos estudiados:

a) **Parámetros de matriz rocosa:** estudian las propiedades intrínsecas del material rocoso derivadas de su petrografía, fábrica, textura, etc. (tabla I).

b) **Parámetros de macizo rocoso:** Evalúan la interacción entre los bloques de matriz rocosa y las discontinuidades que los atraviesan, así como la influencia de factores geológicos y naturales externos al macizo rocoso.

c) **Parámetros geotécnicos-constructivos:** valoran las perturbaciones introducidas por la presencia y construcción de excavaciones en el macizo rocoso. La consecuencia inmediata de la presencia de una excavación es la modificación del Estado tensional en torno a la misma.

TABLA I. FACTORES QUE CONDICIONAN EL COMPORTAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO

- 1. PARAMETROS DE MATRIZ ROCOSA**
  - LITOLOGIA
  - METEORIZACION
  - TAMAÑO DE GRANO
  - DUREZA
  - DEFORMABILIDAD
  - RESISTENCIA ANTE LOS ESFUERZOS
  - POROSIDAD
  - PERMEABILIDAD
  - DENSIDAD
  - GRADO DE SATURACION
  - COLOR
  
- 2. PARAMETROS DE MACIZO ROCOSO**
  - **DISCONTINUIDADES:**
    - NUMERO DE FAMILIA
    - ORIENTACION
    - TIPO
    - ESPACIADO
    - CONTINUIDAD ESPACIAL
    - ANCHURA
    - RUGOSIDAD Y ONDULACION DE LOS PLANOS
    - ALTERACION DE LAS PAREDES
    - RELLENOS
  - R.G.D.
  - TAMAÑO Y FORMA DE LOS BLOQUES DE MATRIZ ROCOSA
  - RESISTENCIA AL CORTE ENTRE BLOQUES DE MATRIZ ROCOSA
  - CONDICIONES HIDROGEOLOGICAS
  - ESTADO DE ESFUERZOS
  
- 3. PARAMETROS GEOTECNICOS-CONSTRUCTIVOS**
  - SISTEMA DE EXCAVACION
  - TIEMPO DE INSTALACION DE LOS SOSTENIMIENTOS
  - PRESENCIA DE EXCAVACIONES ADYACENTES
  - GEOMETRIA Y DIMENSION DE LA EXCAVACION

**MODELO DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA**

Desde que TERZAGHI (1946) propuso el primer modelo empírico para clasificar los macizos rocosos diferenciando siete tipos de terreno se han propuesto una gran cantidad de ellos (tabla II).

Los procedimientos utilizados para su elaboración tienen puntos comunes: se seleccionan, de la información geológica disponible, aquellas magnitudes que parece afectan de un modo más importante al comportamiento geotécnico del macizo rocoso en la excavación. Estos parámetros son evaluados y combinados para diferenciar las clase de roca en función del comportamiento esperado.

Este proceso básico es más complejo para aquellos modelos que aportan un índice numérico que evalúa la calidad de roca y proponen sostenimientos (fig. 1). Como consecuencia de la evaluación de la incidencia de los diferentes parámetros seleccionados y del establecimiento de baremos de puntuación, se propone un índice de calidad de roca.

Las combinaciones de los valores posibles de los parámetros determinan el rango de variación de los índices de calidad de roca. Dicho rango es subdividido en intervalos denominados clases de roca, en base al comportamiento esperado.

En las clasificaciones geomecánicas más evolucionadas se procede a una matización de este índice de calidad de roca por condicionamiento geotécnicos.

En base a la experiencia obtenida del análisis de la casuística se proponen sostenimientos para cada una de las clases de roca y se calculan parámetros para ser utilizados durante el diseño.

**CLASIFICACIONES DE MACIZOS ROCOSOS: GRUPOS Y CRITERIOS PARA SU ESTABLECIMIENTO (TABLA II)**

- I. TIPOS DE CLASIFICACIONES**
  - 1. **CLASIFICACION CUALITATIVA** (No se asigna puntuacion)
    - a. Basada en parametros cuantificados
    - b. Basada en parametros no cuantificados
    - c. Mixtas
  - 2. **CLASIFICACION CUANTITATIVA** (Se asigna puntuacion)
    - a. Cuantificacion de parametros no objetivos (Subjetiva)
    - b. Cuantificacion de parametros objetivos (Objetiva)
  
- II. SOSTENIMIENTOS**
  - 1. NO PROPUESTOS
  - 2. PROPUESTOS
  
- III. TIPOS DE PARAMETROS EVALUADOS**
  - 1. DE MATRIZ ROCOSA
  - 2. DE MACIZO ROCOSO
  - 3. AMBOS GRUPOS

		I		II	
		1		2	
I	a	DEERE (1963) III.1	CORDING, HENDRON Y DEERE (1972) III.1	DEERE Y MILLER (1966, 1974)	LAUFFER (1968) III.2 COON (1968) MERRIT (1972) CECIL (1975)
		BRIOLI ( ) III.2		BRIOLI Y MULLER ( )	
		COATES Y PARSONS (1964) III.3 COATES (1964, 1965) BURTON (1965) JOHN (1962) MABAR ( )			
	b	MOYE (1965) III.1	TERZAGHI (1946) III.2	HANDIN (1957)	FRANKLIN (1970) III.3
		KNILL Y JONES (1965)			
		DORING ( ) III.2			
	c	DUNCAN (1966) III.1	DEARMAN (1974) III.3		
		WAHLSTROM (1973) III.3			
	2	b	COTTISS, DOWELL Y FRANKLIN (1971) III.2	R.S.R. (1972) III.3 R.M.R. (1973, 1976, 1979) Q (1974) LAUBSCHER (1974) S.R.C. (1962)	EGE (1968) III.3

R.S.R. ("Rock Structure Rating")- WICKHAM, TIEDEMANN y SKINNER (1972)  
 R.M.R. ("Rock Mass Rating")- BIENIAWSKI (1973, 1976, 1979)  
 Q ("Rock Mass Tunneling Quality")- BARTON, LIEN y LUNDE (1974)  
 S.R.C. ("Surface Rock Mass Classification System")- GONZALEZ DE VALLEJO (1982)

La contrastación de las previsiones efectuadas con la realidad permite:

- Optimizar los procesos de elaboración de la clasificación anteriormente citados al comprobar el grado de ajuste con la realidad.
- Incorporar las nuevas experiencias a la casuística existente.

**TIPOS DE CLASIFICACIONES DE MACIZOS ROCOSOS**

Se han seguido tres criterios para agrupar las clasificaciones de macizo rocoso (tabla II).

1. Se distingue entre clasificaciones cuya evaluación de la calidad del macizo rocoso es plasmada en un índice cuantitativo de aquellas en las que se hace una valoración cualitativa.

El primer grupo es dividido dependiendo de si los parámetros empleados son objetivamente cuantificables (ej.: R.Q.D., Resistencia a compresión simple) o no (ej.: Mineralogía).

En el segundo grupo la subdivisión se realiza dependiendo de que los parámetros sean cualitativos (ej.: color, litología) o cuantitativos (ej.: espaciado de fracturas, número de familias de diaclasas).

2. Ausencia o presencia de sostenimientos calculados usando los resultados obtenidos de la evaluación del índice de calidad de roca.

3. El tipo de parámetros geológicos, de los enumerados en la tabla I, considerados en la evaluación de la calidad del macizo rocoso.

El resultado de la aplicación de los tres criterios son los distintos grupos de clasificaciones de macizo rocoso (tabla II). De todos ellos el que nos parece más interesante es el constituido por las clasificaciones de macizo rocoso en las que se asigna una puntuación obtenida de la evaluación de parámetros cuantificables (1.2.b), que proponen sostenimientos (II.2) y que incluyen ambos tipos de parámetros geológicos (III.3) porque:

- los resultados pueden ser utilizados en el proyecto y diseño de la excavación,
- permiten una menor subjetividad en la determinación de la calidad del macizo rocoso,
- incorporan mayor cantidad de aspectos diferentes de la realidad en la elaboración de estos índices, y
- la amplia casuística en la que están fundamentados y el frecuente empleo con resultados satisfactorios conducen a otorgarles una mayor fiabilidad.

De los seleccionados no analizaremos el de LAUBSCHER (1974), al estar orientada su aplicación a las excavaciones subterráneas en el campo de la minería, y ser su problemática diferente de la planteada para los demás modelos.

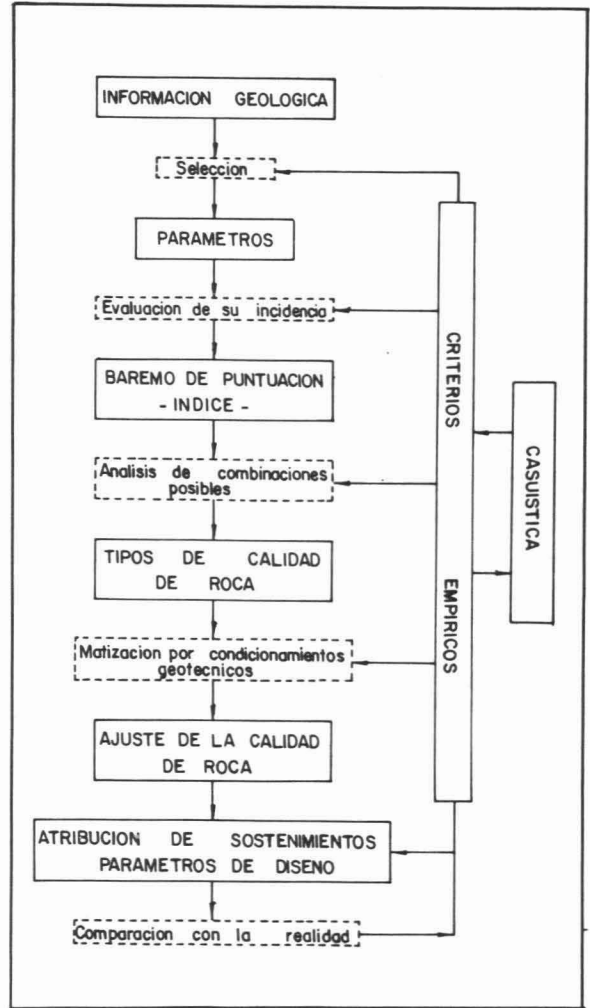


Fig. 1 Elaboración de una clasificación de macizo rocoso. Rock masif elaboration.

**ÍNDICE R.S.R. («Rock Structure Rating»)**  
**[WICKHAM, G. E., et al. (1972)]**

Toma como base el modelo de TERZAGHI (1946), enfocándose fundamentalmente al empleo de sostenimiento pesados. Para su elaboración fueron analizadas 53 excavaciones.

Son tres los parámetros utilizados (fig. 2):

- A) Evalúa la influencia de la geología general del área teniendo en cuenta: tipo de terreno y estructura de la zona.
- B) Analiza el papel de las discontinuidades del macizo rocoso midiendo su espaciado y orientación respecto de la de la excavación.
- C) Estudia la importancia de las condiciones hidrogeológicas, para cuya estimación se mide la afluencia de agua a la excavación relacionándola con el valor de los parámetros anteriores.

Estos parámetros son evaluados y sumados, como se indica en la figura 2, para calcular el índice R.S.R. que es ajustado según el sistema constructivo empleado. A partir de él se obtienen parámetros de diseño y sostenimiento.

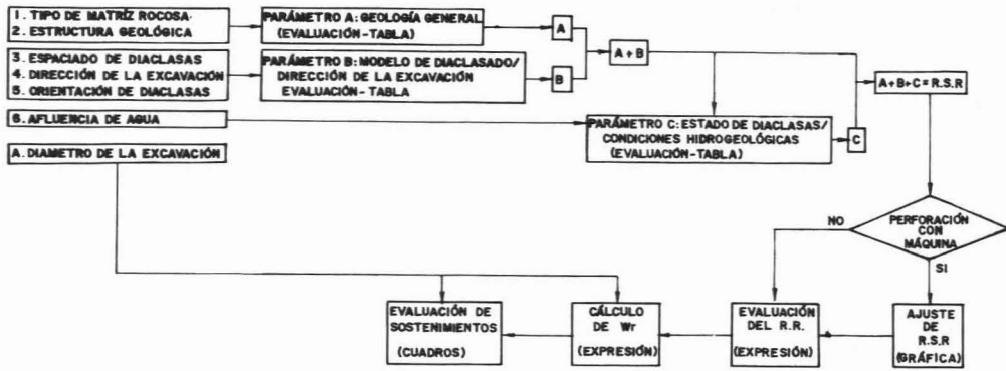


Fig. 2 Índice R.S.R.: Proceso de elaboración-sostenimiento.  
R.S.R. index: Elaboration-maintenances process.

### ÍNDICE Q («Rock Mass Quality») [BARTON, N., et al. (1974)]

Este índice fue deducido después de analizar 200 excavaciones subterráneas en macizos rocosos de diferentes características litológicas y estructurales.

Como en el caso precedente, tres son los parámetros escogidos para estimar la calidad geomecánica de los macizos rocosos:

1. **Tamaño de los bloques de matriz rocosa:** resultado de dividir R.Q.D. entre  $J_n$ . El R.Q.D. se define como el porcentaje que representan los fragmentos mayores de 10 cm. de testigo recuperado en un sondeo en un tramo de 1 m.  $J_n$  es el número de familias de discontinuidades.

Cuanto menos familias de discontinuidades existan y mayor sea el R.Q.D., mayores serán los bloques de matriz rocosa.

2. **Resistencia al corte entre bloques de matriz rocosa:** deducida del cociente  $J_r/J_a$ .  $J_r$  representa la ondulación y rugosidad de los planos, que son los factores que se oponen al deslizamiento de los bloques.  $J_a$  refleja la alteración de las paredes de las discontinuidades: si éstas están muy alteradas, el deslizamiento se ve favorecido.

3. **Estado de esfuerzos activos existente en el macizo rocoso:** Se define como el cociente entre S.R.F. y  $J_w$ . S.R.F. («Stress Relief Factor») mide la influencia de los esfuerzos tectónicos en el macizo rocoso a través de sus manifestaciones: pliegues, fracturas, zonas de debilidad, etc...  $J_w$  describe las condiciones hidrogeológicas en el macizo rocoso de modo cualitativo o cuantitativo (midiendo la presión o el caudal de agua).

En el cálculo de los sostenimientos intervienen, además del índice Q, el diámetro y la finalidad de la excavación (E.S.R. o «Excavation Support Ratio»).

### ÍNDICE R.M.R. («Rock Mass Rating») [BIENIAWSKI, Z. T. (1973, 1976 y 1979)]

Para su desarrollo han sido estudiadas 49 excavaciones subterráneas. Desde 1973 ha sufrido diversas modificaciones añadiendo o eliminando parámetros y factores de ajuste (fig. 4).

Son cinco las magnitudes geológicas que, sumadas, componen el índice R.M.R.

Como parámetro de matriz rocosa es evaluada:

1. **Resistencia de la roca intacta:** determinada mediante el ensayo de Resistencia a compresión simple o el ensayo de carga puntual (P.L.T. o «Point Load Test»).

Dos son los aspectos del macizo rocoso incorporados al índice:

— El papel de las discontinuidades es reflejado por tres parámetros:

2. R.Q.D.
3. Espaciado de las discontinuidades.
4. Condición de las discontinuidades.

5. **Las condiciones hidrogeológicas** evaluadas de modo cualitativo (observación directa) o cuantitativo (midiendo caudal de agua o presión).

La finalidad de la excavación y la orientación de las discontinuidades respecto de la excavación son los factores de ajuste del índice R.M.R.

En el cálculo de los sostenimientos intervienen la densidad de la roca y el diámetro de la excavación, que permiten deducir la presión sobre el sostenimiento ejercida por la columna de roca afectada por la excavación.

### ÍNDICE S.R.C. («Rock Mass Surface Classification System») [GONZALEZ DE VALLEJO, L. (1982)]

Muy parecido al de BIENIAWSKI (1973) en cuanto al número, tipo de parámetros básicos evaluados y proceso de elaboración (fig. 5), parte de una suposición diferente: pretende estimar la calidad del macizo rocoso partiendo de datos obtenidos en superficie. Es, por tanto, un modelo predictivo.

Los parámetros básicos difieren de los del índice R.M.R. en que:

— Agrupa R.Q.D. y espaciado de diaclasas en un único parámetro al suponer que evalúan lo

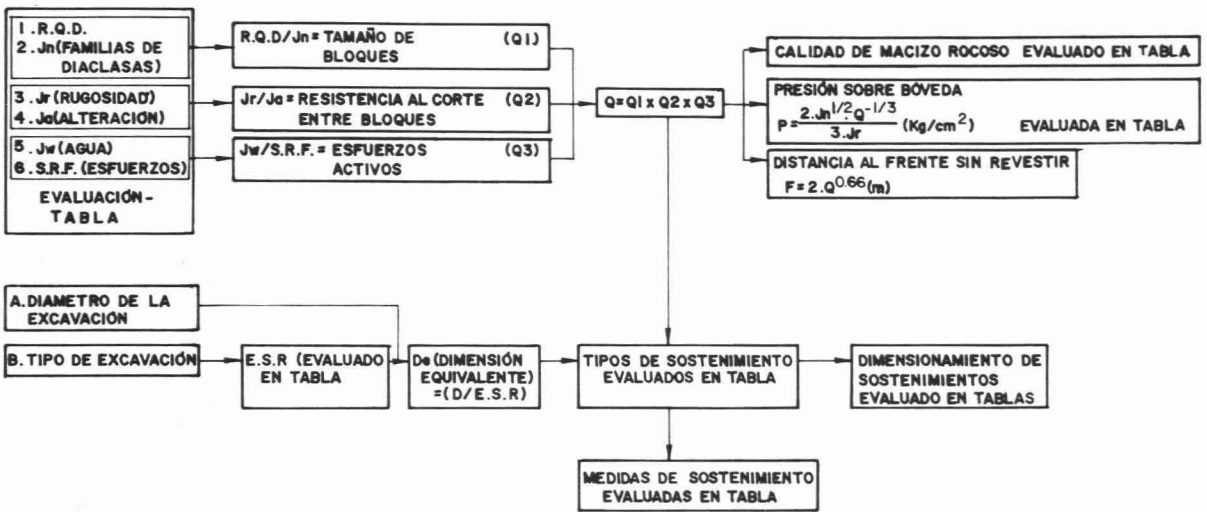


Fig. 3 Índice Q: Proceso de elaboración-sostenimiento.  
*Q index: Elaboration-maintenances process.*

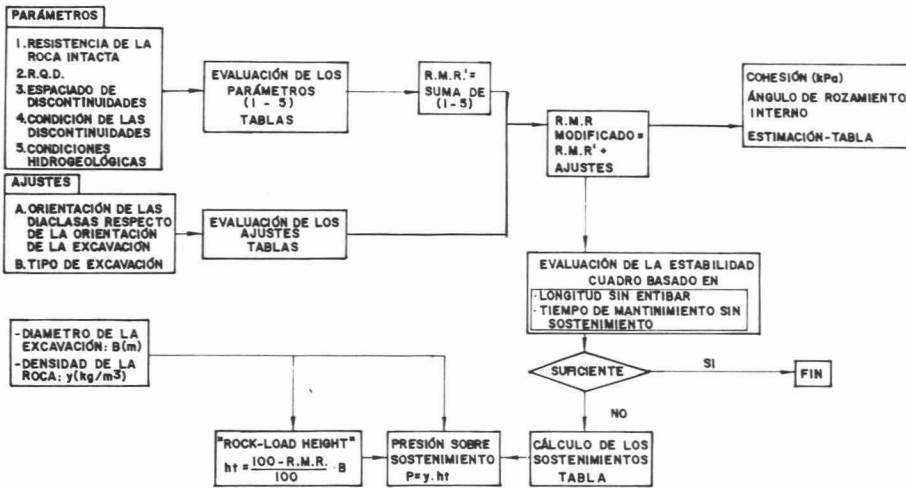


Fig. 4 Índice R.M.R.: Proceso de elaboración-sostenimiento.  
*R.M.R. index: Elaboration-maintenances process.*

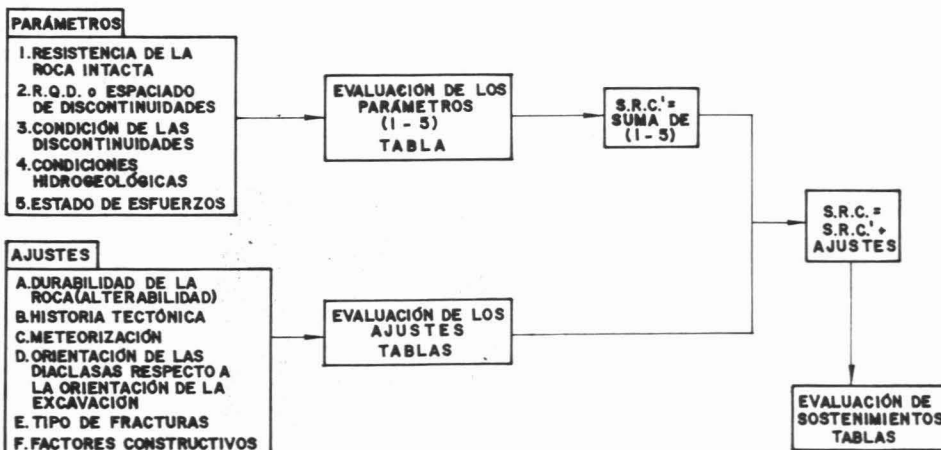


Fig. 5 Índice S.R.C.: Proceso de elaboración-sostenimiento.  
*S.R.C. index: Elaboration-maintenances process.*

mismo: si hay muchas diaclasas, el R.Q.D. será bajo y viceversa.

— Incorpora la influencia del estado de esfuerzos a través de una serie de magnitudes:

- \* **Accidentes tectónicos:** deducidos del análisis tectónico regional.
- \* **Actividad neotectónica:** obtenida de modo indirecto mediante el estudio de la actividad sísmica.
- \* **Factor de competencia:** cociente de la resistencia a compresión simple y la tensión inducida por la carga litostática.
- \* **Factor de relajación tensional:** calculado como el cociente entre la edad de la última deformación principal experimentada por el macizo rocoso y la diferencia entre la carga litostática máxima a la que se vio sometida durante la deformación o litogénesis y la carga litostática actual (peso del recubrimiento).

El índice S.R.C. es ajustado posteriormente por diversos factores para obtener los sostenimientos.

## CONCLUSIONES

Son necesarios los modelos que, seleccionando una serie de factores geológicos, puedan predecir

fiabilidad el comportamiento mecánico de un macizo rocoso ante una excavación. Estos modelos, denominados Clasificaciones Geomecánicas, han de ser:

- Rápidos en su aplicación, obteniendo los datos a partir de técnicas de campo sencillas y que permitan realizar una gran cantidad de determinaciones.
- Cuantitativos, produciendo un índice numérico que pueda ser utilizado para el cálculo de parámetros de diseño y la evaluación de sostenimientos.
- Generales, incluyendo parámetros de matriz y macizo rocoso, cuya selección y puntuación sea el resultado de un proceso en el que se analice una amplia casuística.

Dichos modelos pueden ser incorporados en las fases de anteproyecto y diseño de la excavación para la selección entre diversas opciones de trazado, estimación de costes previos y elaboración de una planificación, en el primer caso, o como herramientas de trabajo, en el segundo caso.

**Nota.**—Los datos de este trabajo forman parte de la Tesis de Licenciatura de D. Luis Muñoz Fernández.

## BIBLIOGRAFÍA

- BARTON, N.; LIEN, R., y LUNDE, J. (1974): "Engineering Classification of Rock Masses for the design of tunnel support", *Rock Mechanics*, 6, 189-236.
- BIENIAWSKI, Z. (1973): "Engineering Classification of jointed Rock Masses", *Trans. S. Afr. Inst. Civil Engineers*, 15 (12), 335-344.
- BIENIAWSKI, Z. (1976): "Rock Mass Classification in Rock Engineering", in *Proceedings of the Symposium on Rock Exploration*, 97-117.
- BIENIAWSKI, Z. (1979): "Tunnel design by Rock Mass Classification". State University. U.S. Technical Report, GL-7919, 131 pp.
- BIENIAWSKI, Z. (1984): "Rock Mechanics design in mining and tunnelling", 271 pp. Ed. Balkema. Rotterdam.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L. (1981): "Métodos de clasificación de Masas Rocosas aplicados al proyecto del Salto del Duque". *Simpósio sobre "Uso industrial del subsuelo"*. Comunicaciones, 1-9 pp.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L. (1982): "Clasificaciones Geomecánicas aplicadas al estudio de excavaciones subterráneas a partir de datos de superficie", *Tecniterrae*, 47, 1-14, Madrid.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L. (1983): "A new Rock Mass Classification System for Underground Assessment using surface data", in *Int. Symp. on Eng. Geol. & Underground Construction*, II, 85-94. Lisboa.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L. (1985): "Tunnelling evaluation using the Surface Rock Mass Classification System (S.R.C.)", *I.S.R.M. Int. Symp. MEXROC 85*, 8 pp. Zacatecas, México.
- HOEK, E., y BROWN, E. (1980): "Underground excavations in rock", *Institution of Mining and Metallurgy*, 527 pp.
- HOUGHTON, D. (1975): "The assesment of Rock Masses and the role of Rock Quality indices in Engineering Geology with reference to tunnelling in hard rock", *M. Sc. Thesis Imp. College*, 128 pp. London.
- IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. ROYAL SCHOOL OF MINES (1981): "Rock characterization testing and monitoring", *Comission on testing methods I.S.R.M.*, Brown Ed., 211 pp. Pergamon Press. Oxford.
- LAUBSCHER, D., y TAYLOR, H. (1976): "The importance of Geomechanic Classification of Jointed Rock Masses in mining operations", in *Proc. of the Symp. on Rock Exploration*, 119-128 pp.
- MUNOZ FERNANDEZ, L. (1987): "Incidencia de las condiciones geomecánicas en la estabilidad de excavaciones subterráneas: Desarrollo de las Clasificaciones Geomecánicas a partir de datos de superficie", *Tesis de Licenciatura*. Universidad Complutense, 162 pp. Madrid.
- PAYNE, J. (1976): "An assesment of the use of Rock Classification Systems in practice", *M. Sc. Thesis Imperial College*, 112 pp. London.
- WICKHAM, G.; TIEDEMANN, H., y SKINNER, E. (1972): "Support determinations based on geological prediction", *North American rapid excavation and tunnelling conference*, vol. 1, Proceedings, 43-64. Chicago.