

## CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO ROCOSO, DOS MONTAÑAS, SIQUIRRES, COSTA RICA

Rolando Mora<sup>1)</sup> & Francisco Cervantes<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Escuela Centroamericana de Geología, Apdo. 35, 2060 Universidad  
de Costa Rica, San José, Costa Rica

<sup>2)</sup> Departamento de Geología, Instituto Costarricense de Electricidad,  
Apdo. 10032, 1000 San José, Costa Rica

**ABSTRACT:** Searching for future possibilities in the production of hydroelectric energy in Costa Rica, the site known as Dos Montañas represents one of the most attractive places to develop a hydropower project.

This study determines the rock mass quality of the site, the calculus of support pressure, not only for the roof, but also for walls from underground excavations. It also includes support recommendations for water tunnels taken into account rock mass quality, diameter of the tunnel and its purpose. Finally, empirical criteria for rupture are used to estimate the failure envelope of the rock mass.

**RESUMEN:** Desde el punto de vista de las posibilidades futuras de generación de energía hidroeléctrica en Costa Rica, el sitio denominado Dos Montañas surge como uno de los más atractivos para la construcción de una represa. En el presente trabajo se determina la calidad del macizo rocoso de Dos Montañas, se calculan las presiones de soporte, tanto para la bóveda como para los hastiales de cavidades subterráneas, así mismo se brindan recomendaciones de soporte para túneles de conducción, tomando en cuenta la calidad del macizo rocoso, el diámetro del túnel y su propósito. Finalmente, se utilizan criterios de ruptura empíricos con el objetivo de estimar las envolventes de falla del macizo rocoso.

### INTRODUCCION

La Clasificación Geomecánica de Macizos Rocosos de acuerdo al método de Barton (1974), permite obtener los valores de algunos parámetros con los que se puede estimar la Calidad del Macizo Rocosó (Q), la cual es una combinación de seis parámetros, cada uno de los cuales puede ser estimado al analizar los afloramientos de roca o durante la excavación de galerías exploratorias subterráneas.

Q se expresa con la siguiente fórmula:

$$Q = (RQD/J_n) * (J_r/J_a) * (J_w/SRF)$$

donde :

RQD es el índice de calidad de la roca,

J<sub>n</sub> el número de sistemas de fisuras,

J<sub>r</sub> la rugosidad de las fisuras,

J<sub>a</sub> el grado de alteración de las fisuras,  
J<sub>w</sub> la influencia del agua subterránea y  
SRF el factor de reducción por esfuerzos.

Tomando en consideración el valor de Q, pueden realizarse estimaciones sobre el tipo de soporte permanente para una excavación subterránea dada, (túnel, casa de máquinas, minas subterráneas, etc.), si conocemos la presión de soporte que deberá ejercer el revestimiento, así como las dimensiones y propósitos de la excavación (Hoeck & Brown, 1886).

Pérez (1989) realizó anteriormente un estudio de este tipo para el sitio de Presa del Proyecto Hidroeléctrico Siquirres, en el sector de Dos Montañas. El autor antes mencionado se basó en datos obtenidos de afloramientos y algunas perforaciones ejecutadas para la investigación del proyecto. Actualmente se cuenta con mayor información, entre esto, un

gran metraje de galerías exploratorias, que modifica algunas de las apreciaciones anteriormente realizadas.

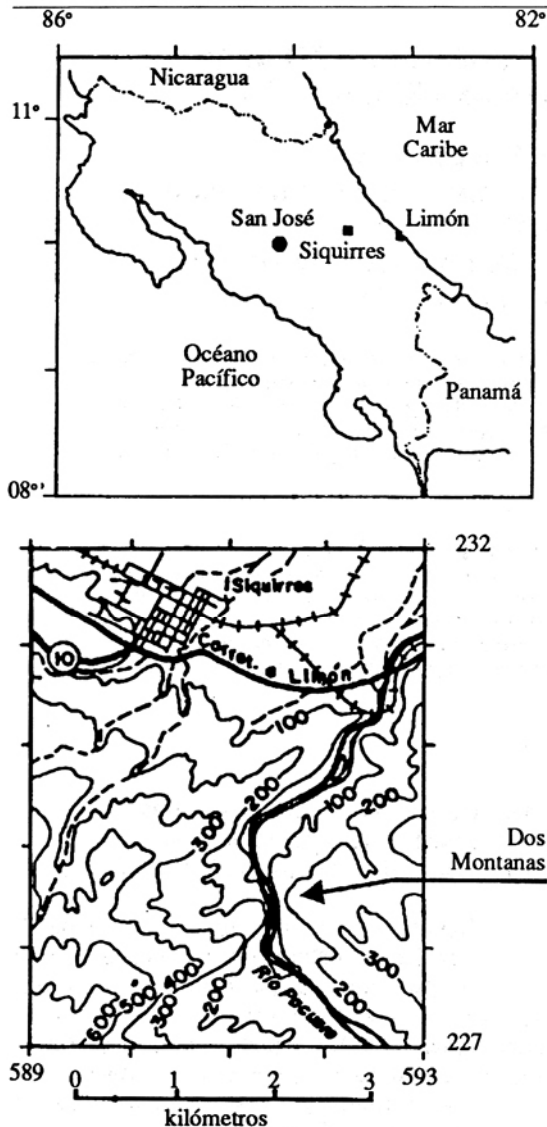


Fig. 1: Ubicación del área de estudio.

## GEOLOGIA DE DOS MONTAÑAS Y ALREDEDORES

El sector conocido como Dos Montañas se localiza a unos 3,5 km al sureste de la ciudad de Siquirres, Provincia de Limón, entre las

coordenadas (228-229) N y (591-592) E, según la cuadrícula Lambert Costa Rica Norte (Fig. 1). En este sitio el río Pacuare forma una estrecha garganta, sumamente atractiva para la construcción de una presa que utilizaría las aguas del río para la generación de energía eléctrica.

Cervantes (1990) estudió las condiciones geológicas y estratigráficas del área, reconociendo varias unidades sedimentarias típicas de una cuenca en estado de colmatación. En el sitio de estudio el mismo autor describe las siguientes unidades (Fig. 2):

**Unidad de Margas (Tom-m):** Secuencia potente de margas gris verdoso, con estratificación centimétrica a decimétrica. En la base compuesta por flujos de escombros y de granos (eventos carbonatados), que transicionan hacia sedimentos lodosos (lutitas). La parte basal de esta unidad es correlacionable con la Formación Senosri y la media-superior con la Formación Uscari, con lo que su edad se extiende desde el Oligoceno Superior hasta el Mioceno Medio. El contacto superior es discordante con la Unidad de Areniscas y Conglomerados (Formación Río Banano). El espesor total de esta unidad es de 570 m.

**Subunidad de Areniscas y Conglomerados (Tpp-la):** Sedimentos detríticos de grano grueso, constituidos en la base por areniscas medias y gruesas, color gris verdoso y con estratificación decimétrica. En la parte media alternan areniscas gruesas, medias y finas con lutitas carbonosas, la estratificación es centimétrica y la laminación paralela. En la sección superior predominan areniscas gruesas y conglomerados finos. Esta subunidad es correlacionada con la Formación Río Banano y se estima su edad de Mioceno Superior a cuspidal del Plio-Pleistoceno.

**Unidad de Lavas Alcalinas (Tp-lv):** Interrumpe el ciclo regresivo de sedimentación, está constituida por flujos de lava basáltica-alcalina, el número de coladas es superior a 25 y alcanza un espesor total cercano a los 300 m. Su edad se estima de Plioceno y su emplazamiento se dio en un ambiente geológico lagunar costero, permitiendo un proceso de enfriamiento rápido y modificando el patrón columnar esperado para este tipo de rocas básicas. Los flujos lávicos se disponen en paquetes de 5 a 20 m de espesor,

590

593

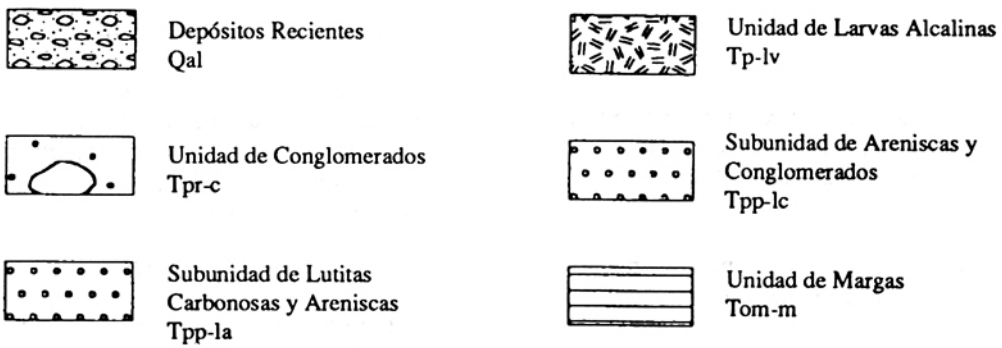
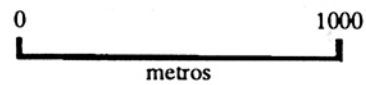
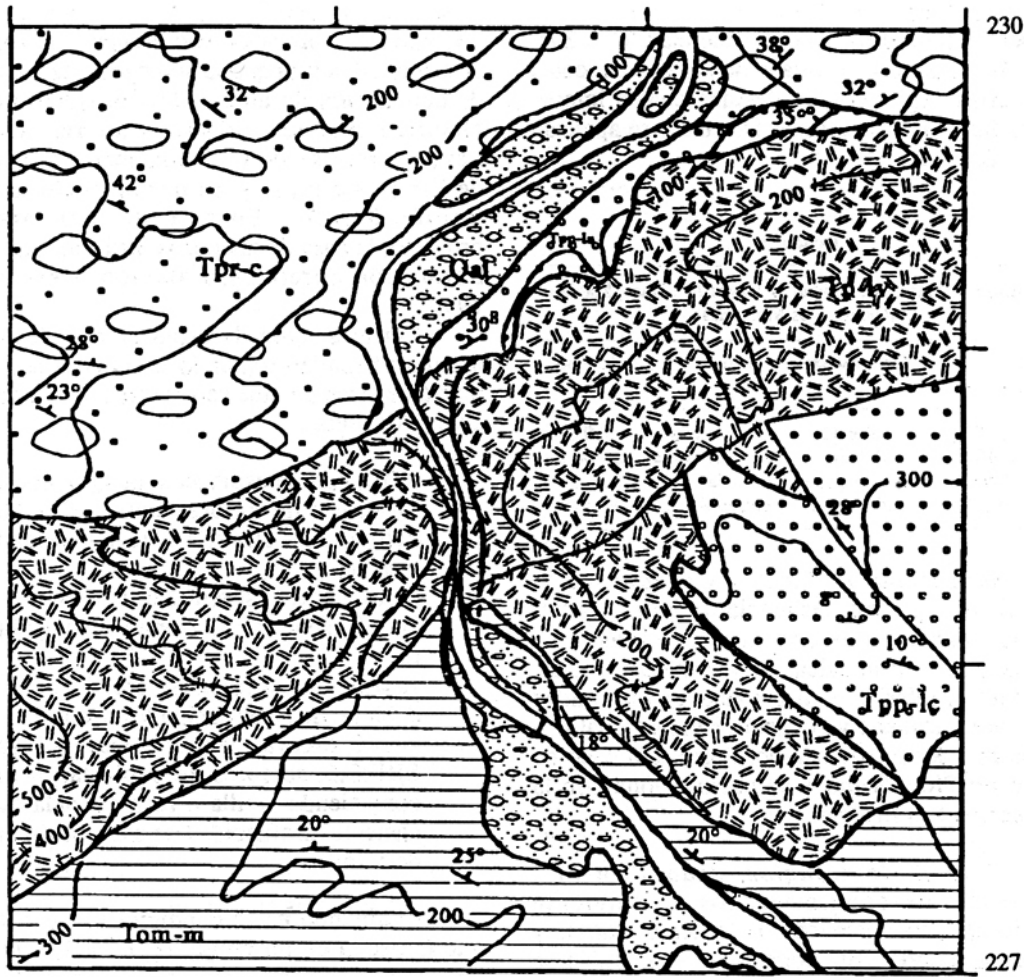


Fig. 2: Mapa geológico simplificado de Dos Montañas y alrededores (modificado de Cervantes, 1989).

constituidos por un núcleo de estructura maciza y periferias brechosas. Estos eventos forman una secuencia estratificada que se inclina 25° al 37°, además, un análisis detallado de los afloramientos y galerías exploratorias, destaca cuatro importantes familias de diaclasas, las cuales se aprecian en el cuadro 1.

Cuadro 1

Familias de diaclasas, Unidad de Lavas Alcalinas, Macizo Rocosos Dos Montañas				
Familia	Orientación	Perfil	Relleno	Espaciamiento
1	337/23°	escalonado	limo/calcita	5-10 cm
2	108/75°	ondulado	abierto/arcilla	30-40 cm
3	160/65°	ond.-rugoso	cerrada	60 cm
4	204/80°	ond.-rugoso	cerrada/ceolita	50 cm

*Subunidad de Lutitas Carbonosas y Areniscas (Tpp-1c):* Secuencia de lutitas carbonosas, intercaladas con niveles escasos de lumaquelas (detrito calcáreo) y areniscas medias. El contacto inferior es discordante con la Unidad de Lavas Alcalinas y el superior transicional con la Unidad de Conglomerado. Posee una edad de Plioceno-Pleistoceno y se correlaciona con la Formación Río Banano.

*Unidad de Conglomerado (Tpr-c) :* Secuencia de conglomerados de ambiente continental, intercalados con lentes de lutitas y areniscas pobremente consolidados, también se alternan eventos volcánicos como flujos laháricos. Su edad se estima del Pleistoceno al Reciente y se correlaciona con la Formación Suretka.

#### PARAMETROS PARA LA CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOSO DOS MONTAÑAS

Utilizando los datos obtenidos por Pérez (1989) y las investigaciones posteriores realizadas por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), se han estimado los parámetros empleados por la Clasificación Ingenieril de Macizos Rocosos propuesta por Barton et al. (1974).

La mayor parte del sitio de estudio se caracteriza por la presencia de dos series de rocas diferentes: la Formación Río Banano y la Unidad de Lavas Alcalinas que la sobreyace. Los túneles de conducción de un eventual proyecto hidroeléctrico cuentan con varias alternativas de trazado, atravesando primordialmente la Unidad de Lavas Alcalinas y en menor grado la Formación Suretka. En caso de realizarse el proyecto, la casa de máquinas será fundada en la Formación Suretka y/o aluvión (Cervantes, 1990).

Por lo anterior, la estimación de los parámetros se realiza tomando en cuenta la información existente y que caracteriza a la Unidad de Lavas Alcalinas :

RQD: para la estimación de Q se considera un rango de valores entre 10 y 100%, debido a la elevada heterogeneidad del macizo;

Jn:15,0, cuatro sistemas de fisuras;

Jr:1,5, fisuras escalonadas, onduladas, rugosas;

Ja:4,0, revestimientos arcillosos ablandables o de baja fricción (esmectita);

Jw:1,0, excavación seca o poca infiltración;

SRF:2,5, sectores de debilidad aislados conteniendo arcilla o roca alterada químicamente (profundidad de excavación mayor de 50 m).

Evaluando estas condiciones, se obtiene que Q oscila en un rango de 0,1 a 1,0, lo que implica que el macizo rocoso puede considerarse de calidad muy mala.

#### PRESIONES DE SOPORTE

Barton et al. (1974) proponen una ecuación empírica para el cálculo de la presión de soporte de excavaciones subterráneas, en función de la Calidad del Macizo Rocosos (Q) y algunos de los parámetros utilizados para su estimación :

$$P(\text{bóveda}) = 2 \cdot (J_n^{1/2}) \cdot (Q^{-1/3}) / 3 \cdot J_r$$

Debido a que los hastiales de las excavaciones subterráneas mantienen una posición más favorable desde el punto de vista del estado de esfuerzos, Barton et al. (1974) proponen una

"calidad de hastial" incrementada, la cual también es función de Q. En la figura 3 y el cuadro 2 se aprecian las presiones de soporte tanto para la bóveda como para los hastiales, en función del RQD y comparadas con casos documentados de Escandinavia (Cecil, 1970 en Barton et al., 1974).

Cuadro 2

Rango de presiones de soporte probables para el Macizo Rocoso Dos Montañas		
	Pmax. (kPa)	Pmin. (kPa)
Bóveda	364	169
Hastial	364	24

### RECOMENDACIONES DE SOPORTE

Las recomendaciones de soporte se dan en función de Q y de la Dimensión Equivalente, la cual se define como (Barton et al., 1974):

$$De = \text{trecho, diámetro o altura [m]} / \text{ESR}$$

donde ESR es la relación de soporte de la excavación y es una función de la práctica constructiva y el propósito de la obra, su valor oscila entre 0,8 y 5,0. Para túneles de conducción en plantas hidroeléctricas el ESR es igual a 1,6 y para casas de máquinas subterráneas 1,0.

Barton et al. (1974) han propuesto 38 categorías de soporte, en cada una de ellas existen pequeñas variaciones que dependen de la combinación de todas las variables utilizadas y se expresan como factores condicionantes.

En el caso de Dos Montañas, se ha adoptado un diámetro de excavación mínimo y máximo de 6,0 y 9,0 m respectivamente en los túneles de conducción.

Las recomendaciones de soporte se dan para toda la sección transversal sin discriminar entre bóveda y hastiales, ya que se consideran las condiciones más desfavorables y además un cambio del tipo de revestimiento, en una misma sección, podría no justificarse desde el punto de vista económico.

En la figura 4 se aprecian las categorías correspondientes para el sector de Dos Montañas en función de un rango de RQD de 10 a 100% y comparadas con los casos escandinavos anteriormente mencionados. En el cuadro 3 se resumen los factores condicionantes y las recomendaciones de soporte según los cuadros publicados por Barton et al. (1974).

A: Empernado sistemático tensionado, 1 m de espaciamiento, más concreto lanzado reforzado con malla y espesor de 5 a 7,5 cm.

B: Empernado sistemático tensionado, 1 m de espaciamiento, más concreto lanzado reforzado con malla y espesor de 5 cm.

C: Arco de concreto chorreado, reforzado con acero, de 30 a 50 cm de espesor, más empernado sistemático tensionado, 1 m de espaciamiento.

Es importante notar la no existencia de diferencias significativas entre los tipos de revestimiento A y B. Sin embargo, el tipo de revestimiento C difiere sustancialmente de los otros dos, esto por cuanto se refiere a una calidad del macizo tendiente a ser extremadamente mala y a la vez se considera el diámetro de túnel máximo.

Cuadro 3

Recomendaciones de soporte para túneles de conducción, Macizo Rocoso Dos Montañas						
Diámetro de excavación	Categoría de soporte	Q	RQD/Jn	Jr/Ja	diam./ESR (m)	Tipo de soporte
6 m	30	0,1-0,4	< 5	0,375	3,75	A
	25	0,4-1,0	< 10	0,375	5,625	B
9 m	31	0,1-0,4	≤4, ≥1,5	0,375	3,75	C
	26	0,4-1,0	< 10	0,375	5,625	A

Fig. 3: Presión de soporte, Macizo Rocoso Dos Montañas.

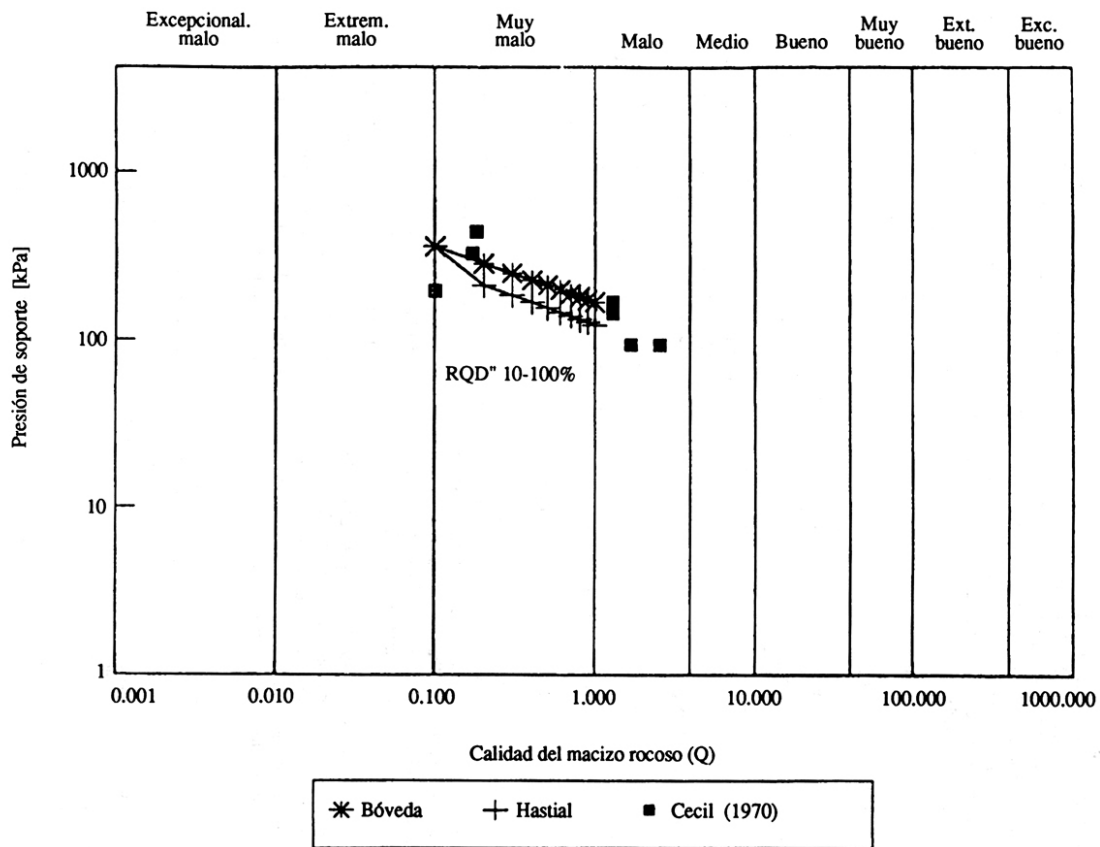
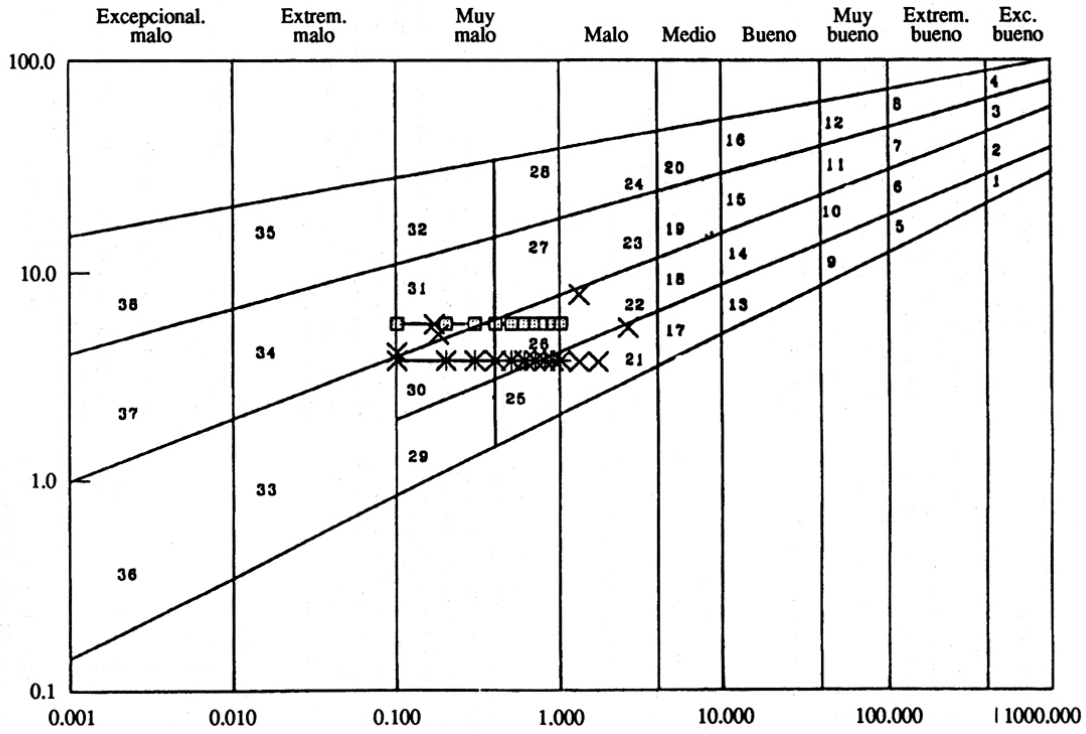


Fig. 4: Categorías de soporte, Macizo Rocoso Dos Montañas.



Calidad del macizo rocoso (Q)

\* d = 6.0 m.      □ d = 9.0 m.      × Cecil (1970)

### RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO DOS MONTAÑAS

Uno de los criterios de ruptura más utilizado mundialmente en el diseño de excavaciones subterráneas, es el que incorpora los esfuerzos principales mayor y menor en el momento de la falla. La ecuación empírica que define la relación entre dichos esfuerzos es la siguiente (Hoeck, 1983):

$$\sigma_1' = \sigma_3' * (m * \sigma_c * \sigma_3' + s * \sigma_c^2)^{1/2}$$

donde :

- $\sigma_1'$  es el esfuerzo efectivo principal mayor,  
 $\sigma_3'$  el esfuerzo efectivo principal menor o la presión de confinamiento en el ensayo triaxial,  
 $\sigma_c$  la resistencia a la compresión uniaxial del material intacto,  
 m y s constantes empíricas.

Las constantes empíricas pueden ser estimadas utilizando la Clasificación Geomecánica de Macizos Rocosos (Hoeck, 1983), por lo que para el Macizo Rocosos Dos Montañas se ha considerado la variación de Q entre 0,1 y 1,0, así como el hecho de que esté constituido primordialmente por rocas ígneas poliminerálicas de grano fino. Los valores estimados de las constantes m y s para el Macizo Rocosos Dos Montañas se aprecian en el cuadro 4.

Cuadro 4

Constantes m y s, Macizo Rocosos Dos Montañas

Q	m	s
0,1	0,09	0,00001
1,0	0,34	0,0001

Utilizando la información existente sobre los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial para el material brechoso del macizo y que arrojan valores promedio de 11 MPa, lo que a su vez se considera como una roca de calidad muy mala (Pérez, 1989), además de realizar las sustituciones apropiadas en la ecuación empírica

anteriormente mencionada, se han obtenido la resistencia a la compresión inconfiada y la resistencia a la tensión uniaxial del Macizo Rocosos Dos Montañas y cuyos valores se expresan en función de Q en el cuadro 5.

Bajo estas condiciones, podemos incorporar todas las estimaciones realizadas en el criterio de ruptura de Hoeck y así obtener la envolvente de falla para el macizo rocoso (Fig. 5), útil en el diseño de excavaciones subterráneas donde la respuesta de elementos de roca individuales a los esfuerzos ("in situ" e inducidos) es importante (Hoeck, 1983).

Cuadro 5

Resistencia a la compresión inconfiada y a la tensión uniaxial, Macizo Rocosos Dos Montañas

Q	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]
0,1	0,03	-0,00122
1,0	0,11	-0,00323

En el diseño de taludes en roca, donde se requiere la resistencia al corte de una superficie de falla bajo condiciones específicas de esfuerzo efectivo normal, el anterior criterio es limitado, de manera que se utiliza la envolvente de falla de Mohr correspondiente al mismo criterio y que ha sido desarrollada por el Dr. J. Bray del Imperial College (Hoeck, 1983):

$$\tau = [ (\cot \phi_i' - \cos \phi_i') * m * \sigma_c ] / 8$$

donde :  $\tau$  es la resistencia al corte en el momento de la falla,

$\phi_i'$  el ángulo de fricción instantáneo:

$$\phi_i' = \arctan [ 4 * h * \cos^2 ( 30 + 1/3 * \arcsen h^{3/2} ) - 1 ]^{1/2}$$

$$h = 1 + \sqrt{16 ( m * \sigma' + s * \sigma_c ) / ( 3 * m^2 * \sigma_c )}$$

y  $\sigma'$  el esfuerzo efectivo normal.

De la misma manera, puede calcularse la resistencia cohesiva instantánea como (Hoeck, 1983):

$$c_i' = \tau - \sigma' * \tan \phi_i'$$



Para el Macizo Rocosos Dos Montañas se han realizado los cálculos pertinentes, obteniéndose las relaciones entre el esfuerzo efectivo normal y el ángulo de fricción instantáneo y la cohesión instantánea (Fig. 6), así como la envolvente de Mohr predicha por las ecuaciones antes expuestas (Fig. 7).

Es importante recalcar que en todos los cálculos realizados, se ha incorporado el valor de la resistencia a la compresión uniaxial correspondiente al material brechoso del macizo (11 MPa), esto por cuanto representa la calidad de roca más deficiente y un tipo de roca sumamente común en ocurrencia en el sitio.

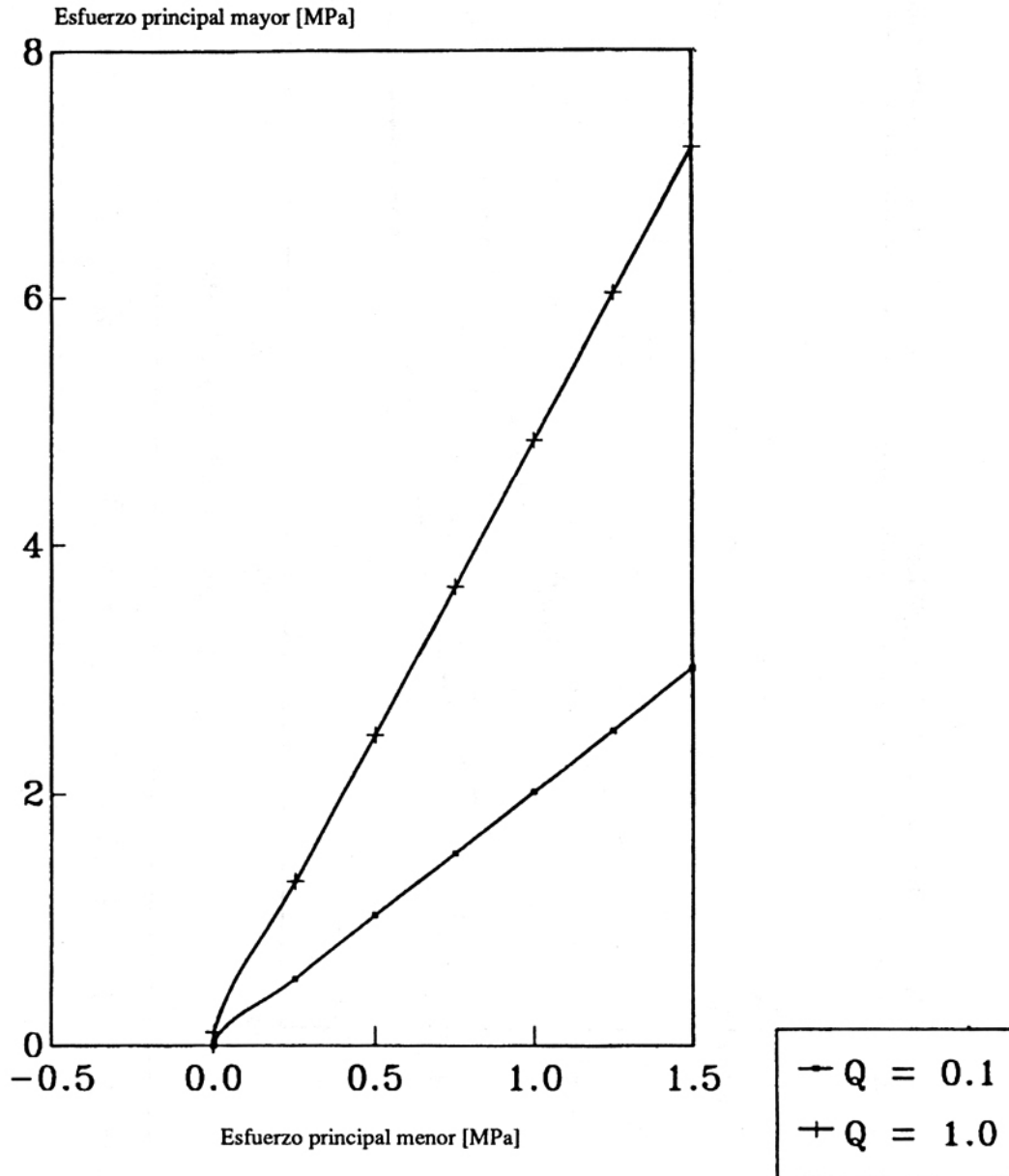
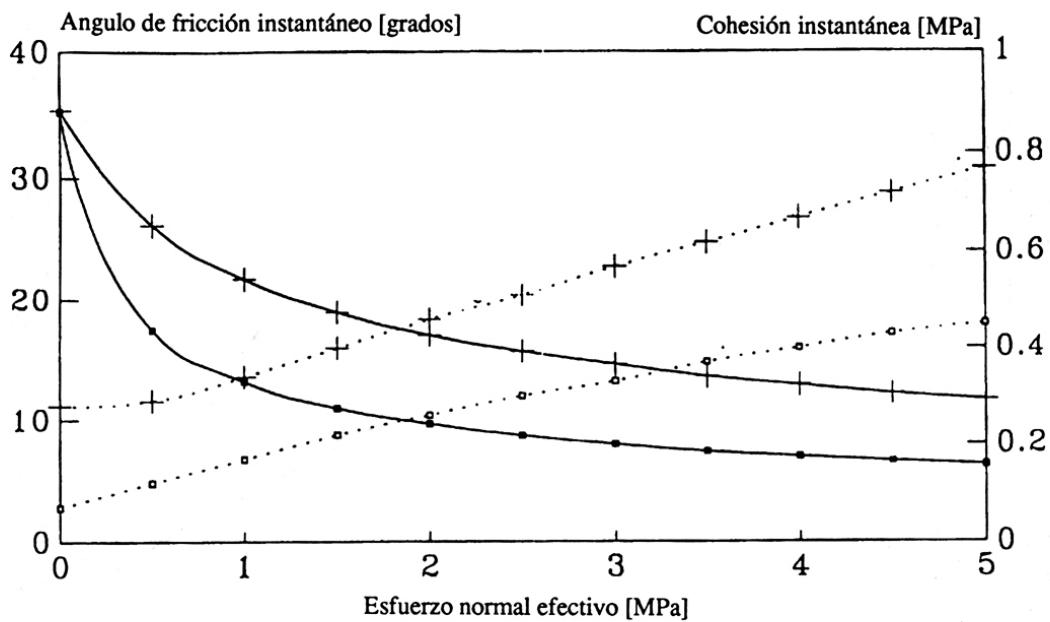


Fig. 5: Criterio de falla no lineal, Macizo Rocosos Dos Montañas.

Fig. 6: Parámetros instantáneos, Macizo Rocoso Dos Montañas.



+ fii (Q = 1.0) - - fii (Q = 0.1) + ci (Q = 1.0) ··· ci (Q = 0.1)

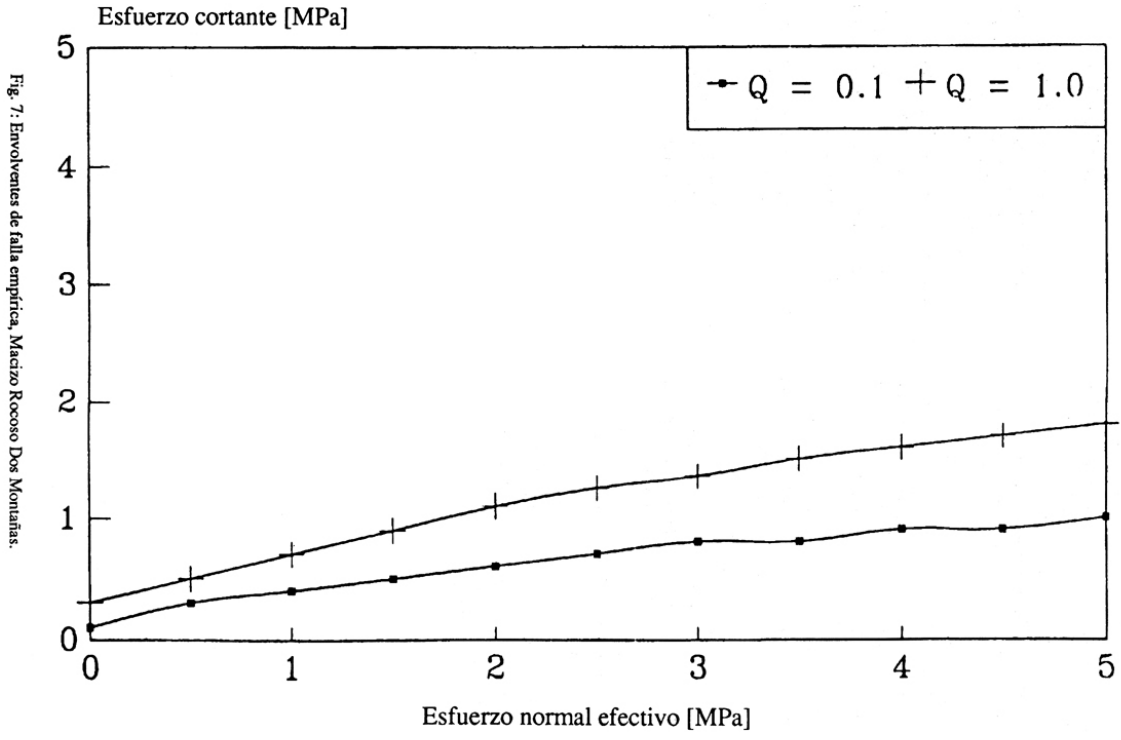


Fig. 7: Envolventes de falla empírica, Macizo Rocoso Dos Montañas.

### CONCLUSIONES

El macizo rocoso de Dos Montañas, Siquirres, puede clasificarse como de calidad muy mala, en donde las presiones de soporte del revestimiento de estructuras subterráneas pueden alcanzar valores de 169 a 364 kPa y de 124 a 364 kPa para la bóveda y los hastiales respectivamente.

Las recomendaciones de soporte de los túneles de conducción son tres, dependiendo de la Calidad del Macizo Rcoso (Q) y el diámetro de la excavación. Existiendo diferencias ínfimas entre el tipo A y B, y sustanciales entre los anteriores y el tipo C. Esto puede significar la necesidad de utilizar revestimientos más competentes en los tramos donde la roca presenta una calidad inferior y se trabaja con diámetros cercanos a los 9 m.

Para el macizo estudiado los valores de la constante empírica  $m$  son de 0,09 y 0,43, por su parte los de  $s$  son 0,00001 y 0,0001. Lo anterior siempre tomando en cuenta la peor y mejor calidad de macizo con que se puede tratar teóricamente. De igual manera, los valores de la resistencia a la compresión inconfiada del macizo son 0,03 y 0,11 MPa, los de la resistencia a la tensión uniaxial -0,0122 y -0,00323 MPa.

Utilizando toda la información previa, se han obtenido las envolventes de falla para el macizo rocoso y los parámetros de resistencia al

corte instantáneos, utilizables en el diseño de excavaciones subterráneas y taludes de roca.

### BIBLIOGRAFIA

- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J., 1974: Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. - *Rock Mechanics*, 6: 189-236.
- Cervantes, F., 1989: Base geológica para los análisis geotécnicos del Proyecto Hidroeléctrico Siquirres. - Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica (tesis inédita).
- Hoeck, E., 1983: Strength of jointed rock masses.- *Geotechnique* 33(3): 7-223.
- Hoeck, E. & Brown, E.T., 1986: Excavaciones subterráneas en roca. - Traducción (primera edición) de *Underground Excavations in Rock*. Mc Graw-Hill de México.
- Pérez, C., 1989: Caracterización geológico-geotécnica preliminar del macizo rocoso del Sitio de Presa del Proyecto Hidroeléctrico Siquirres, Provincia de Limón, Costa Rica. - Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica (tesis inédita).