

CARACTERIZACION GEOMECANICA DE LAS MARGAS DE OLAZAGUTIA (NAVARRA)

L. GONZALEZ DE VALLEJO

L.C. Geológicas, MSc. (Ing. Geológica), DIC

J.L. BERZAL FERNANDEZ

Ing. de Minas, MSc. (Mec. de Rocas), DIC

Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras S.A.

RESUMEN

Se presentan las características geológico-geotécnicas de un macizo rocoso formado por margas blandas, débiles, de baja durabilidad y de naturaleza expansiva, afectadas por varios sistemas de discontinuidades. Se evalúa y discute la clasificación del macizo según la aplicación de los criterios dados por los índices de calidad. Se estudia la influencia de la rugosidad y el tipo de relleno sobre la resistencia al corte a través de las discontinuidades.

INTRODUCCION

Con motivo del estudio geotécnico - realizado para la excavación y cimentación de una planta de trituración de margas, situada junto a la cantera de Cementos Portland de Olazagutia (Navarra), se estudiaron las características geológicas del macizo rocoso, y aquellas geotécnicas más relevantes para el proyecto. Esto, requería la excavación, en margas, de una cavidad de planta rectangular, aproximadamente de 25 x 18 m de lado y 20 m de profundidad, llevada a cabo bajo garantías de seguridad, a largo plazo, y con el mínimo volumen de excavación. En la Fig. 1 se aprecia el área de excavación, comprendida entre las cotas -570 y 550. Previamente a la misma se efectuará un desmonte o explanación general a la cota 570.

La campaña de investigaciones y trabajos de campo consistió en un reconocimiento geológico de la zona, cartografía y cortes geológicos de detalle del área, y estudio estructural de afloramientos. Se efectuaron tres sondeos verticales (Fig. 1) con una profundidad media de 45 m. y con recuperación de testigo continuo con un diámetro mínimo de 75 mm. El material, de matriz débil, muy fracturado y expansivo, respondía a la definición de "roca blanda" dada por Gordon (1975).

Por una parte, la naturaleza del proyecto y, por otra, los condicionantes económicos que todo estudio de esta naturaleza tiene, en general, en la práctica, obligó a una planificación detallada de los trabajos a realizar, ajustándose a las necesidades del mismo. Así, de entre las diferentes fases que constituyeron el proyecto, se prestó especial atención, por un lado, al Estudio Geológico, fundamentalmente en lo que se refiere a la naturaleza y características de las discontinuidades y, por otro, a los ensayos de corte directo realizados en la fase de laboratorio, ya que por tratarse de una excavación el problema se centraba principalmente en un análisis de estabilidad. No obstante, y con el fin de tener una mejor apreciación de la caracterización geomecánica del material, se llevaron a cabo ensayos de compresión simple, especialmente de Point Load Test, de deformabilidad y de durabilidad, éstos por medio de ensayos de Slake Durability Test y ensayos de hinchamiento.

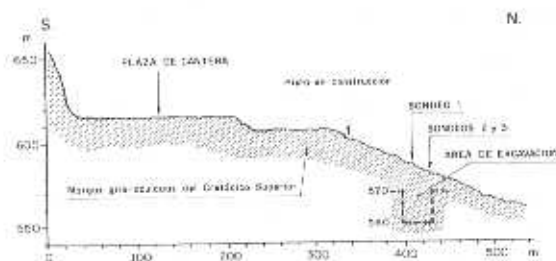


Fig. 1. Corte geológico por el área de excavación.

CARACTERIZACION DEL MACIZO ROCOSO

El macizo estudiado forma parte de una serie margosa de unos 700 m de potencia, perteneciente al Cretácico Superior, y dispuesta sobre el flanco Norte del sinclinal de la Sierra de Urbasa (Navarra). Sus materiales consisten en margas estratificadas en bancos de 0,1 a 2 m de espesor, con buzamientos variables entre 30 y 40 grados hacia el Sur, siendo la dirección, prácticamente, Este-Oeste (Fig. 1).

La roca considerada es una marga gris-azulada de grano muy fino, de fractura concoidea, blanda -se puede surcar fácilmente con la navaja e incluso rayarla con la uña- y con una densidad media de 2,46 Tm/m³. Químicamente está compuesta por un 70% de CO₃Ca, en forma de calcita, 25% de arcilla, y de 3 a 4% de cuarzo. Por medio de difracción por rayos X se determinó que la fracción arcillosa estaba formada por un 10% de montmorillonita, 8 a 9% de illita, y del 1 a 2% de clorita. En lámina delgada presentó abundantes restos orgánicos y algunas microfisuras limpias o rellenas de calcita.

Las características estructurales de las discontinuidades fueron estudiadas mediante medidas y observaciones llevadas a cabo, de forma exhaustiva, en los testigos de los sondeos y, de forma selectiva, en los taludes de la cantera y pista de acceso (Fig. 1). La distribución de los sistemas observados fue analizada en proyección estereográfica, según Fig. 2.

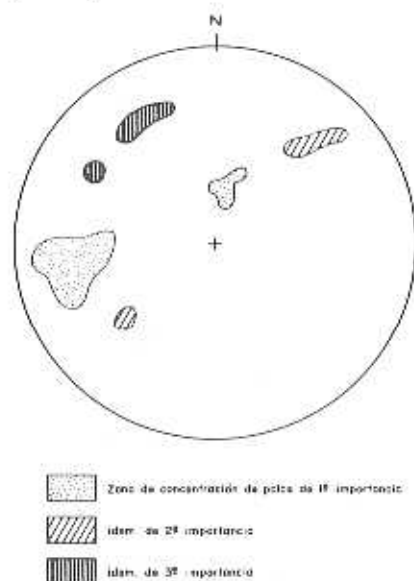


Fig. 2. Representación estereográfica (Schmidt) de discontinuidades y su importancia en relación a la estabilidad de los taludes considerados.

La naturaleza y propiedades de las discontinuidades se describen sinópticamente en el Cuadro I, distinguiéndose planos de estratificación, diaclasas, y fallas secundarias. El estudio genético de las diaclasas permitió identificar diaclasas de corte, tensión y decompresión, cuya representación se realiza en la Fig. 3. Algunas de estas discontinuidades presentaron rellenos de calcita fuertemente estriados, y rellenos de arcillas con zonas de corte, las cuales evidenciaron desplazamientos que, a pesar de ser pequeños, determinan clasificar a estas discontinuidades como fallas secundarias, de acuerdo con los criterios formulados por Price (1966).

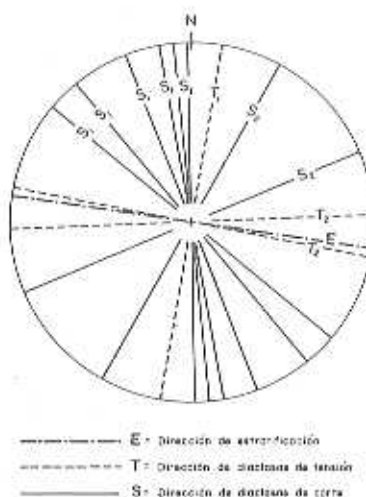


Fig. 3. Clasificación genética de las diaclasas.

La índole de la información estudiada, así como la reducida área de observación condicionan extrapolaciones de carácter tectónico. No obstante, la continuidad de las estructuras contempladas y fines del estudio en cuestión, podrían justificar la validez de la siguiente explicación al estado tensional del macizo: La dirección, prácticamente Este-Oeste del eje del pliegue sinclinal, determinarían unos empujes principales de dirección Norte-Sur que serían, en gran parte, los responsables de las alineaciones estructurales y de las fracturas. El plegamiento daría origen al desarrollo de diaclasas de corte, compresión y tracción. De entre éstas, las de corte serían las que con mayor frecuencia e intensidad afectarían al macizo, prevaleciendo los sistemas S₁ sobre los S₂. Por el contrario, las de tracción y compresión incidirían escasamente, como corresponde a la parte del pliegue considera-

Cuadro I. Características de las discontinuidades

TIPO	ORIENTACION	FRECUENCIA	SEPARACION	RELLENO	RUGOSIDAD	OBSERVACIONES
Plano de estratificación	100 - 30 a 40°	0.1 a 2 m	Cerradas; hasta 2 cm	Calcita arcilla	Rectilínea y lisa	Algunos rellenos de calcita presentan estriaciones de dirección E-W
Diaclasas de corte S ₁	180 - 78 E 182 - 57 E 170 - 72 E 160 - 74 E	2 a 10 m	Orden de mm	Calcita o limpia	Onduladas y lisas	Gran continuación atravesando a toda la formación. Estriaciones en calcita. Estos sistemas - han ocasionado - deslizamientos.
	140 - 80 S 130 - 62 S 140 - 70 N	5 a 10 m	Orden de mm	Calcita, limpia y raras veces arcilla	Suavemente Onduladas y lisas	Irregular continuidad. Estriaciones en calcita. Estos sistemas - han ocasionado - deslizamientos.
Diaclasas de corte S ₂	30 - 70 W 70 - 75 N	10 a 20 m	Orden de mm	Limpia o con rellenos de calcita	Suavemente Onduladas y lisas	Aparecen en algunas ocasiones.
Diaclasas de tensión T ₁ y T ₂	190 - 75 E 100 - 75 N 85 - 85 N	10 a 20 m y 2 a 3 m	Cerradas; hasta varios cm	Limpia o con calcita	Onduladas y rugosas	Bastante continuas. Favorecen planos de deslizamiento.
Diaclasas de decompresión	Subparalelas a la topografía	Decreciente con la profundidad	Cerradas; hasta 5 cm	Limpia	Onduladas y rugosas	Planos imbricados que sólo afectan a los 10 primeros metros
Fallas secundarias	Paralelas a la estratificación	Únicamente observadas en sondeos	Zona triturada abarca de 0.5m a 2 m	Arcilla y venas de calcita	Rectilíneas y lisas	Arcillas margosas muy cizalladas. Estriaciones y slickensides con direcciones E-W.

do, la cual, está alejada de las zonas de intensas deformaciones. Posteriormente, parte de las discontinuidades fueron rellenadas de calcita que, como consecuencia de reajustes -principalmente gravitacionales- sufrieron estriaciones, dejando marcados nuevos empujes de dirección Este-Oeste. Finalmente, la pérdida de la presión de confinamiento producida por la erosión, liberaría tensiones que originaron las diaclasas de decompresión.

Respecto a la calidad del macizo rocoso, cuatro fueron los índices inicialmente analizados para su clasificación y evaluación: meteorización, permeabilidad, RQD y resistencia a la compresión simple. En la Fig. 4 se muestran las variaciones de estos índices con la profundidad. En general, la

correlación entre ellos fue buena, marcando se a partir del sexto metro de profundidad el paso de una mala a regular calidad, a buena. A esta clasificación, habría que añadir las siguientes observaciones: por lo que a la meteorización se refiere, se observó que los testigos extraídos, a cualquier profundidad, se hinchaban, cambiaban de color y, finalmente, se desmoronaban al cabo de 15 días de exposición a la intemperie. Este comportamiento sería objeto de un estudio en el laboratorio, el cual confirmaría posteriormente el carácter expansivo del material. Por su parte, el R.Q.D. fue cero en las zonas arcillosas y cizalladas. La resistencia a la compresión simple - σ_c - se determinó, in situ, por medio del Point Load Test (PLT) - $\sigma_c = 24 I_s$ - efectuado sobre testigos. En la Fig. 4 se observan las variaciones de

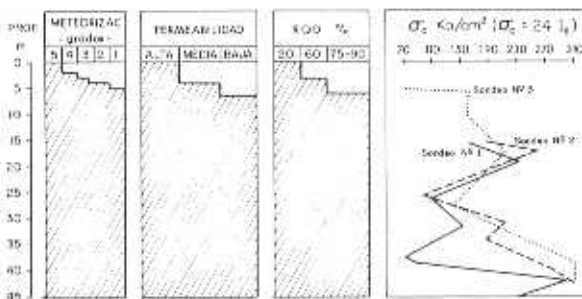


Fig. 4.- Variación de los índices de calidad con la profundidad.

con la profundidad y, en la Fig. 5, la curva de frecuencias acumuladas. Según este índice la roca es de baja a muy baja resistencia (Deere y Miller, 1966).

Por otro lado, si se aplica una clasificación más integral en la que se incluya un mayor número de parámetros, v.g. la propuesta por Bieniawski (1973) en la que además de los índices anteriores introduce el espaciado, separación, continuidad y orientación de discontinuidades, se obtendrá una clasificación correspondiente a una calidad aceptable.

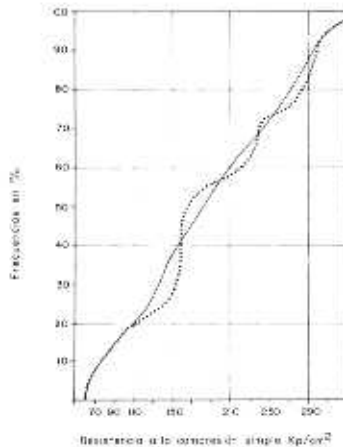


Fig. 5.- Curva de frecuencias acumuladas de los valores de resistencia a la compresión simple, obtenidos en el P.L.T.

PROPIEDADES MECANICAS

Se estudiaron principalmente: a) Durabilidad b) Deformabilidad c) Resistencia a la compresión simple d) Resistencia al corte.

La durabilidad, según la acepción de Pookes et al. (1971), se analizó mediante ensayos de Slake Durability Test (SDT) y ensayos de hinchamiento. Los SDT se efectuaron de acuerdo con las recomendaciones de la ISRM, sometiendo las muestras a dos ciclos de humedad-sequedad durante 10 horas. Los valores obtenidos estaban comprendidos entre 90 y 95%, clasificando a la roca como de media a alta durabilidad. Al no responder estos resultados con las observaciones de campo, se procedió a efectuar nuevos ensayos, pero esta vez manteniéndose las muestras 18 horas en agua y 6 horas en la estufa a 110 grados, durante 5 ciclos. Los índices derivados de este caso fueron de 4, 20, 39 y 40%, que corresponden a un material de muy baja a baja durabilidad, con la salvedad de que en dos casos la muestra se desmoronó al final del segundo ciclo. Por su parte, en los ensayos de hinchamiento (Nascimento et al. 1968), el hinchamiento unitario fue de $1,23 \cdot 10^{-3}$, valor que corresponde a una roca muy meteorizada.

En cuanto a la resistencia a la compresión simple, dicho parámetro se evaluó por medio de ensayos de compresión simple y ensayos "in situ" de Point Load Test (PLT). Dadas las características del estudio, el objetivo de los ensayos de compresión simple respondió únicamente a obtener una idea aproximada de sus valores, para así poder disponer de información adicional que permitiese una mejor caracterización del material. Por tanto, el número de muestras ensayadas fue muy limitado -tres, únicamente-, las cuales se cargaron hasta rotura. La resistencia media deducida de dichos ensayos fue de 350 kp/cm^2 . Por otra parte, los ensayos de PLT -31, en total- (Fig. 5), proporcionan valores para la resistencia, en general, inferiores a 250 kp/cm^2 . Valores tan bajos limitan el empleo del PLT en la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial (Bieniawski, 1973), siendo, por tanto, preferible emplear los resultados de los ensayos de compresión simple.

Respecto al módulo de elasticidad y al módulo de Poisson, éstos se determinaron a partir de las curvas de tensión-deformación derivadas de los ensayos de compresión simple; provistas las muestras, previamente a la ejecución del ensayo, de bandas extensométricas. El valor medio deducido para el módulo de Young, al 50% de rotura en la rama de carga, fue de 103.500 kp/cm^2 , en tanto que el módulo de Poisson arrojó un valor de 0,32.

Asimismo, se determinaron las velocidades sónicas longitudinales y transversales cuyos valores medios fueron de 2.725 m/s y 172 m/s respectivamente, deduciéndose posteriormente los módulos dinámicos, considerando un comportamiento elástico del material, a partir de las expresiones:

$$E = \rho \frac{V_p^2}{1-\nu} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} = 113.541 \text{ kp/cm}^2$$

$$\nu = \frac{1/2 (V_p / V_s)^2 - 1}{(V_p / V_s)^2 - 1} = 0,49$$

en donde

- E= módulo de Young
- ν = módulo de Poisson
- V_p = velocidad de ondas P
- V_s = velocidad de ondas S
- ρ = masa específica

Finalmente, en cuanto a la resistencia al corte, se produjeron en la zona de estudio varios deslizamientos planares que ofrecieron características adecuadas para realizar un "back-analysis" de los mismos, al objeto de estimar las posibles combinaciones de cohesión y rozamiento interno para condiciones de equilibrio límite, y así poder disponer de un criterio comparativo con los resultados de laboratorio. Dicho "back-analysis" se efectuó de acuerdo con los criterios desarrollados por Hoek y Bray (1974), para el caso de ausencia de presiones intersticiales. En este caso, la expresión que relaciona la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, en función de los diferentes parámetros geométricos del talud, es la siguiente:

$$c = \frac{\gamma H \zeta (1 - \cot \psi_p \tan \psi)}{2 P}$$

en la que

$$P = (1 - \frac{Z}{H}) \operatorname{cosec} \psi_p$$

$$Q = \left[1 - \left(\frac{Z}{H} \right)^2 \cot \psi_p - \cot \psi_r \right] \operatorname{sen} \psi_p$$

- Z= altura de la grieta de tracción = 4 m
- H= altura del talud = 40 m
- ψ_p = buzamiento de la discontinuidad = 40°
- ψ_r = ángulo del talud = 80°
- γ = densidad media del material = 2,4 Tm/m³

Los valores derivados de c y ϕ , para los casos estudiados, se muestran en la Fig. 6.

Por otra parte, de acuerdo con las características estructurales del macizo, se efectuaron ensayos de corte directo en laboratorio a través de: a) diaclasas -

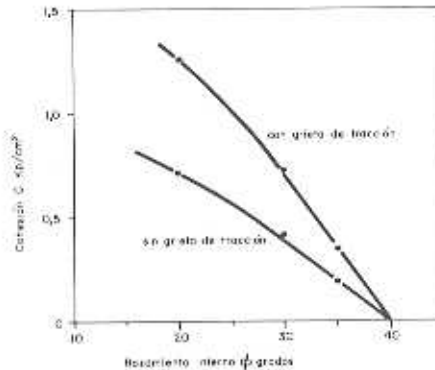


Fig. 6.- Relación entre el ángulo de rozamiento interno y la cohesión para las condiciones establecidas en el "back-analysis".

onduladas, algo rugosas y con relleno de calcita, tipo T; b) diaclasas lisas y limpias, tipo S; c) discontinuidades lisas y con rellenos de arcilla, tipo S; d) material de marga intacta. Las muestras procedieron de testigos de sondeos y de un bloque de roca-discontinuidad extraído y parafinado "in situ". En todos los casos se determinó la resistencia de pico y la residual, representándose los resultados obtenidos en la Fig. 7. En dicha figura puede observarse la influencia de la rugosidad y el tipo de relleno sobre la resistencia al corte. Así, la rugosidad de las diaclasas ensayadas ha sido baja en el caso B, y lisa y plana en los casos C y D respectivamente. Por otra parte, en los casos B y C se acusa mejor la influencia de la rugosidad en la resistencia al

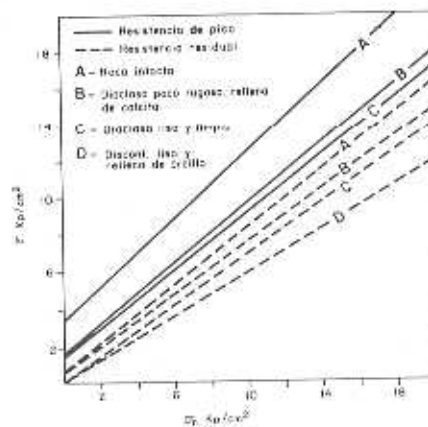


Fig. 7.- Valores de resistencia al corte de marga intacta y diaclasado

corte, en tanto que el D presenta valores menores para la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, como resultado de la presencia de relleno arcilloso. Esta presencia, y su incidencia en la resistencia al corte, se analizó por medio de ensayos de corte directo realizados sobre la muestra de roca-discontinuidad y su relleno, de 2 cm de espesor, así como sobre el propio relleno arcilloso ensayado aisladamente.

En la Fig. 8 se presentan los resultados derivados de ambos ensayos y en condiciones residuales, mostrando la resistencia al corte del relleno aislado es superior a la de la discontinuidad roca-relleno. En el proceso de extracción y preparación de la muestra en bloque se produjeron algunas alteraciones debidas a las inevitables manipulaciones que el tamaño de la

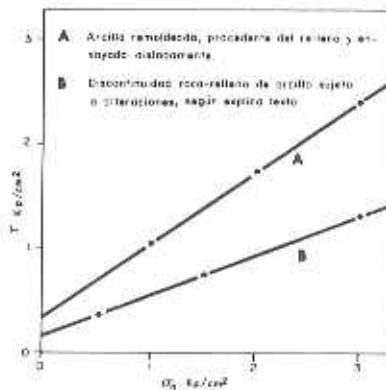


Fig. 8.- Resistencia al corte de los rellenos arcillosos.

muestra originó (45 x 30 cm). Estas alteraciones podrían repercutir en la pérdida de la humedad natural y en algún ligero desplazamiento en las superficies de contacto roca-relleno. Por otro lado, pudo observarse que dicha superficie presentaba un aspecto muy liso y pulido. Por tanto, debido a las alteraciones mencionadas, puede suponerse que la resistencia al corte obtenida en el laboratorio a través de la diacnasa -curva B de la Fig. 8- sea superior a la allí de terminada. Sin embargo, por el momento, es discutible admitir que su valor debiera alcanzar e incluso superar al obtenido en la curva A, correspondiente a la arcilla remoldeada. En este sentido, debe señalarse que en investigaciones de laboratorio se ha encontrado que una interfase de roca lisa y suelo puede tener una resistencia inferior a la del propio suelo rellenante, ensayado éste aisladamente (Kanji, 1970; Patton y Deere, 1970). Asimismo, en nuestro caso, debemos indicar que, en general, los valores obtenidos para la cohesión y el ángulo de rozamiento interno de los ensayos de corte directo, se encuentran en consonancia con los deducidos en el "back-analysis" (Fig. 9)

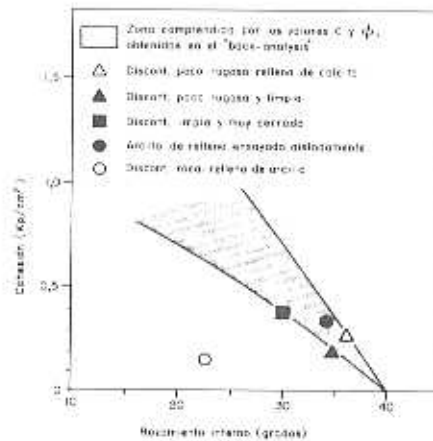


Fig. 9.- Relación entre los valores residuales de C y ϕ , obtenidos en los ensayos de corte directo y los deducidos en el "back-analysis".

DISCUSION Y CONCLUSIONES

La evaluación realizada sobre la calidad del macizo sugiere se adopten clasificaciones que incluyan índices que, a la vez de sencillos de aplicar, sean suficientemente representativos del conjunto de parámetros característicos del macizo. Además, dichas clasificaciones deberían tener en cuenta aquellos aspectos aún insuficientemente reflejados por los criterios de clasificación empleados actualmente, y que, en el presente caso, fueron la expansividad y el desmoronamiento resultante del material frente al Grado I de meteorización del macizo, y las intercalaciones arcillosas con RQD cero, frente a un RQD superior al 80%. La presencia de un 10% de montmorillonita en la composición de la marga, determinó el carácter altamente expansivo del material y condicionó los resultados de los ensayos de durabilidad realizados. Dichos ensayos clasificaron a la roca como de baja a muy baja durabilidad, hinchable y altamente degradable ante los cambios de humedad. Sin embargo, para obtener valores representativos de la durabilidad de este tipo de material, se tuvieron que prolongar, tanto el número de ciclos, como los tiempos de inmersión y secado de los ensayos de SDT. En el caso estudiado los ensayos de SDT realizados según las recomendaciones de la ISRM no han sido válidos para calificar la durabilidad del material. Por otra parte, los valores medios de los ensayos de compresión simple mostraron una resistencia del orden de 350 kp/cm^2 , en tanto que, al emplear el Point Load Test, los valores obtenidos fueron mucho menores ($<250 \text{ kp/cm}^2$).

La caracterización geométrica y gené

tica de las discontinuidades ha constituido el punto básico de partida del estudio de la resistencia al corte directo realizado en laboratorio a través de los distintos tipos de discontinuidades consideradas. Se compararon los valores de cohesión y rozamiento interno para cada sistema de discontinuidad en función de la rugosidad y el tipo de material rellenante. Las de corte, de tipo S, fueron las que influyeron principalmente sobre el comportamiento mecánico del macizo, obteniéndose valores muy bajos de cohesión y de 30 a 35 grados de rozamiento interno, lo que permitió efectuar un estudio de la estabilidad de las posibles cuñas deslizantes y, asimismo, establecer los máximos ángulos de talud admisibles por la excavación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a D. Angel Uriel Ortiz y a D. Carlos Oteo Mazo por sus valiosas observaciones y comentarios aportados durante la preparación del artículo. Igualmente agradecen a D. Alvaro Linares-Rivas y a D. Enrique Dapena sus interesantes sugerencias.

REFERENCIAS

- Bieniawski, Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. The Civil Engineer in South Africa, December.
- " 1975. The Point Load Test in geotechnical practice. Eng. Geol. 9, 1-11.
- Deere, D.U. and Miller, R.P. 1966. Engineering Classification and Index properties for intact rock. Air Force Weapons Lab. Tech. Rep. - AFWLTR, 65-116.
- Pookes, P.G. Dearman, W.R. and Franklin, J.A. 1971. Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. Q. J.L. Eng. Geol. 4, 139-185.
- Gordon, F.R. 1975. General Report on the Second Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, Res. Bull. IAEG. 12.
- Hoek, E. and Bray, 1974. Rock Slope Engineering, IMME. London.
- Kanji, M.A. 1970. Shear strength of soil-rock interfaces. MSc Thesis - Univ. Illinois, Urbana.
- Merritt, A.H. 1968. Engineering classification of in situ rock. PhD Thesis, Univ. Illinois, Urbana.
- Nascimento, Oliveira y Graça, 1968. Rock Swelling Test. Int. Conf. on Rock Mech. Lisboa.
- Patton, F.D. and Deere D.U. 1970. Significant geologic factors in rock slope stability. Proc. Symp. Planning Open Pit Mines Johan. 143-151.
- Price, N.J. 1968. Fault and Joint Development in Brittle and Semibrittle rock Pergamon Press, London.