

# Consideraciones sobre mecanismos de falla en superficies de foliación de rocas metamórficas meteorizadas

## Considerations about failure mechanics along foliation surfaces of weathered metamorphic rocks.

Daniel A. Salcedo

*Profesor Asociado, Universidad Central de Venezuela. Caracas*

*Ingeniero Consultor*

### RESUMEN

*Con base en experiencias obtenidas de observaciones en deslizamientos y el análisis de ensayos de corte a lo largo de superficies de foliación, se describen algunas consideraciones relativas a mecanismos de falla en rocas metamórficas meteorizadas. Se discute el uso de diferentes terminologías, llamando la atención de cómo algunas definiciones tienden a originar confusión y equivocaciones. Se hace énfasis en la necesidad de una correcta caracterización de campo y se describen problemas que pueden surgir cuando la masa rocosa está representada por rocas meta-sedimentarias que han sido sujetas a varias generaciones de plegamientos superpuestos. Finalmente, fundamentándose en la interpretación de ensayos de corte directo, se propone un mecanismo para explicar el cizallamiento en superficies de foliación de filitas meteorizadas. Con el fin de explicar las diferencias entre la resistencia pico y última, las cuales no deberían esperarse en superficies de foliación lisas, untuosas y casi planas, el mecanismo propuesto describe el desarrollo de un perfil escalonado durante el corte originado por rotura tensional de la roca débil muy meteorizada, aparentemente facilitado por el incipiente clivaje crenulado.*

### ABSTRACT

*Based on some experiences gained from observations of landslides and analysis of shear tests along foliation surfaces, this paper deals with some considerations about failure mechanics of weathered metamorphic rocks. Use of different terminology is discussed, calling attention how some definitions may lead to confusion and misunderstanding. The need for a correct field characterization is emphasized, and problems that could arise when dealing with meta-sedimentary rocks subjected to various generations of superimposed foldings, are described. Finally, based on interpretation of direct shear tests, a failure mechanism is proposed to explain shearing along weathered foliation surfaces of phyllites. In order to explain differences between peak and ultimate strength, not expected on smooth planar foliation surfaces, the proposed mechanism describes the development of a stepped profile created during shearing by tensile rupturing of the weathered weak rock, apparently facilitated by an incipient crenulation cleavage.*

### INTRODUCCION

En la Cordillera de La Costa Venezolana afloran rocas metamórficas de origen sedimentario las cuales muestran superficies de foliación muy bien desarrolladas y cuya orientación es responsable de la ocurrencia de muchos deslizamientos. Prácticamente

todos los años, estos deslizamientos causan daños a propiedades y pérdidas de vidas en desarrollos urbanísticos ubicados en colinas. La descripción de esta problemática ha sido publicada previamente por Salcedo (1982, 1983, 1984). Deslizamientos catastróficos que han afectado las Colinas al Sur de Caracas, han sido también publicados por Schuster, Salcedo & Valenzuela (2002).

Muchos de los afloramientos de rocas metamórficas muestran principalmente esquistos cuarzo micáceos, esquistos cuarzo calcáreos micáceos y filitas sericíticas y cuarzosas, con algunos lentes de mármoles. Los resultados de ensayos de meteorización en estas rocas han sido publicados previamente por Gómez Da Silva, Aires Barros & Salcedo (1993).

Las filitas sericíticas tienen típicamente un color gris claro, superficies lisas y una estructura untuosa similar al talco. Dado la baja resistencia al corte en planos de foliación, las superficies de falla son principalmente controladas por esta litología, y por lo tanto existe la necesidad de entender el mecanismo de falla a lo largo de superficies de foliación meteorizadas en las mencionadas filitas. Este artículo discute la terminología, caracterización de campo y aspectos de resistencia al corte, relacionados con rocas metamórficas meteorizadas.

## TERMINOLOGIA

El uso de la misma terminología en la literatura de mecánica de rocas se considera un aspecto esencial para el intercambio de conocimientos acerca del comportamiento al corte de discontinuidades. Esta tarea es difícil debido a que el problema de terminología surge del hecho de que algunos investigadores utilizan definiciones genéticas y otros usan nomenclatura descriptiva.

El término foliación ha sido utilizado con diferentes significados por geólogos e ingenieros, generando ambigüedades. Muchos investigadores han utilizado el término foliación como un sinónimo de “clivaje de flujo”, “clivaje pizarroso” y “esquistosidad”, para describir la textura o arreglo paralelo en rocas metamórficas. Por otro lado, algunos autores como Hobbs, Means & Williams (1976) usan el término foliación en un sentido más amplio para describir intervalos composicionales (compositional layering), variación en tamaño de grano, discontinuidades finamente espaciadas aproximadamente paralelas tales como microfallas o fracturas, orientación preferencial de fronteras entre tamaño de granos, orientación preferencial de minerales planos o agregados minerales lenticulares, y combinación de varias microestructuras. De acuerdo a esta definición, la foliación es aplicada tanto a rocas sedimentarias como a metamórficas y aún en rocas ígneas. Esta última definición es confusa y desde el punto de vista de comportamiento ante esfuerzos de corte, las diferentes texturas y estructuras incluidas

por Hobbs et al en su definición, deben ser tratadas en forma separada.

En función de la intensidad del metamorfismo, las rocas metamórficas se forman en el siguiente orden: pizarras, filitas, esquistos micáceos y gneiss. En este sentido, el término “clivaje pizarroso” (slaty cleavage) es mayormente usado para rocas con menor grado de metamorfismo tal como la pizarra, mientras que el término “esquistosidad” se emplea si la roca es recrystalizada en minerales que son fácilmente identificables por el ojo humano, sin lentes amplificadores (Billings, 1972).

Desde el punto de vista teórico, una roca que posee clivaje pizarroso puede ser separada en un número indefinido de hojas delgadas paralelas al clivaje. La esquistosidad ha sido también definida como una variedad de la foliación que ocurre en rocas metamórficas de grano grueso (AGI, 1974).

El autor del presente artículo prefiere utilizar el término foliación en un sentido más estricto, para describir superficies con arreglo paralelo de minerales planos y tabulares, o arreglos paralelos de granos elipsoidales tales como cuarzo o feldespatos, debido al proceso de metamorfismo. Esta definición restringe el uso del término a rocas de origen metamórfico. La Figura 1 muestra un típico afloramiento de filitas con foliación bien desarrollada y la Figura 2 muestra una sección fina de una filita con foliación muy bien desarrollada debido a la orientación preferencial de las micas entre bandas de cuarzo.

Rocas de grado medio de metamorfismo como las filitas, pueden tener además lo que se conoce como “clivaje crenulado”, el cual puede ser definido como microfallas o fracturas finamente espaciadas que dividen la roca en una serie de cuerpos tabulares, aproximadamente planares. Otros términos como “clivaje de corte” (shear cleavage) o “clivaje de deslizamiento” (slip cleavage), han sido también utilizados en la literatura de geología estructural. Algunos autores prefieren el uso en forma general, del término “clivaje de fractura”. Tal como lo indica Billings (1972), la terminología aplicada a varios tipos de clivajes en roca ha evolucionado en el tiempo y como consecuencia son inevitables las confusiones y falta de completa uniformidad.

Respecto a la terminología, es también importante mencionar que muchas publicaciones geotécnicas utilizan el término “joint” cuando se refieren a toda clase de discontinuidades tales como a verdaderas diaclasas (joints), estratificación y foliación. Hay que destacar que la foliación tiene un origen geológico diferente al de una verdadera diaclasa (joint). Desde el

punto de vista geológico, las diaclasas (joints) son fracturas sin desplazamiento lateral, originadas por esfuerzos tectónicos.



Figura 1. Afloramiento de filitas meteorizadas, mostrando foliación bien desarrollada y diaclasas subpersistentes.

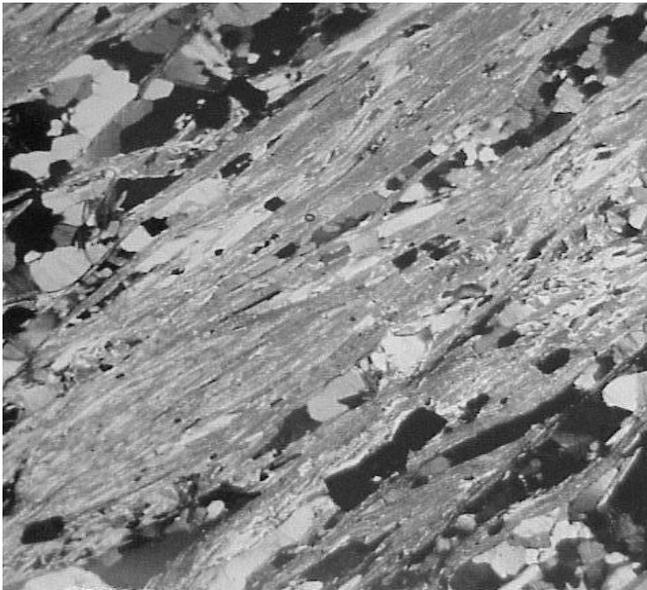


Figura 2. Sección fina de una filita, mostrando foliación muy bien desarrollada debido a orientación preferencial de micas entre intervalos de cuarzo. (1.5 cm en la foto = 1 mm).

Por otra parte la foliación, tal como se describió previamente, se refiere a superficies donde los minerales planos y tabulares se han orientado en un arreglo paralelo por un proceso de metamorfismo sea de contacto, estático o dinámico, el cual implica una condición particular de temperatura y presión.

En resumen, de acuerdo al autor de este artículo, el uso del término “joint” no es adecuado para toda clase

de discontinuidades en una masa rocosa y tiende a causar errores de interpretación. De esta forma, cuando se requiere hacer referencia a todos los términos en conjunto, es preferible utilizar el término “discontinuidad”. Con base en estas ideas es razonable pensar que el comportamiento al corte de superficies de foliación y de verdaderas diaclasas (joints), debe ser investigado en forma individual, aún cuando algunos mecanismos de falla son similares. Salcedo (1984) concluyó que las teorías conocidas de discontinuidades abiertas (Patton 1966, Barton et al 1977, Ladanyi & Archambault 1970) no explicaron completamente el mecanismo de deslizamiento a lo largo de planos de foliación en filitas meteorizadas.

## CARACTERIZACION DE CAMPO DE MASAS ROCOSAS METAMORFICAS

Una etapa importante para la comprensión del mecanismo de falla de deslizamientos en masas rocosas metamórficas, es llevar a cabo una caracterización correcta de campo. En la mayoría de rocas ígneas y sedimentarias, la caracterización de campo puede ser generalmente considerada como una tarea relativamente fácil y cualquier ingeniero geotécnico podría realizar ese trabajo con un conocimiento adecuado de conceptos geológicos básicos.

Cuando se trata de masas rocosas metamórficas provenientes de rocas sedimentarias (rocas meta-sedimentarias) la caracterización podría parecer simple pero la interpretación final de los datos tomados en campo sin una adecuada experticia geológica, puede conducir a interpretar perfiles del subsuelo que difieren significativamente de los reales, y como consecuencia, conducen a graves errores en las decisiones ingenieriles (Salcedo, 1990). Por ejemplo, cuando se trata de rocas metamórficas provenientes de rocas sedimentarias, y el grado de metamorfismo es bajo, la textura original de la estratificación podría estar todavía presente. Bajo estas condiciones un ingeniero geotécnico inexperto puede confundir estratificación con foliación en diferentes afloramientos, y por lo tanto la caracterización puede resultar equivocada. Goodman (1993) destaca las razones por las cuales, el clivaje pizarroso no debería ser confundido con estratificación en rocas que poseen ambas estructuras.

Las rocas metamórficas de la cadena de montañas de la Costa Central Venezolana, por ejemplo, han sido sujetas al menos a tres generaciones de plegamientos superpuestos. Estos procesos producen replegamientos

de rocas previamente plegadas, resultando como consecuencia formas geométricas extremadamente complicadas que deben ser preferiblemente interpretadas por un experto geólogo de campo.

En la Figura 3 se pueden observar superficies de foliación y estratificación original en dos tipos diferentes de muestras de rocas metamórficas. En estos casos las superficies de foliación han sido desarrolladas y orientadas en forma paralela a los planos axiales de los pliegues de la estratificación original.



Figura 3. Muestras de esquistos que permiten observar planos de foliación paralelos a los planos axiales de los planos de estratificación original.

Esta es una observación muy importante debido que si se requiere analizar una falla por corte a lo largo de las superficies de foliación, debe tenerse en cuenta que el corte ocurrirá a lo largo de diferentes litologías; por lo tanto, los parámetros de resistencia al corte tienen valores diferentes a lo largo del plano de falla. En otras palabras, si la roca sedimentaria original se formó por ejemplo, por capas alternadas de areniscas

y lutitas, debido al proceso de metamorfismo estas rocas se transformarían en cuarcitas y pizarras (o filitas o esquistos, dependiendo de la intensidad del metamorfismo), respectivamente. Esto significa que el ángulo de fricción y la cohesión variarían a lo largo del plano de falla y alguna hipótesis deberá ser aceptada para propósitos de definir los parámetros de resistencia al corte requeridos en los análisis de estabilidad de taludes. Cualquier hipótesis requiere, por supuesto, una comprensión clara de la historia geológica de la masa rocosa en consideración. Tomando en cuenta que la foliación es generalmente una discontinuidad no-persistente, los razonamientos anteriores complican aún más el problema de analizar la estabilidad de taludes en masas rocosas que tienen este tipo de discontinuidad. Como es ampliamente conocido, este problema está relacionado con las dificultades de medir la persistencia y del hecho que la resistencia pico de áreas intactas y de la discontinuidad, no se movilizan simultáneamente.

La resistencia al corte de discontinuidades no-persistentes, y su efecto en estabilidad de taludes, ha sido previamente reportado por diferentes investigadores tales como Lajtai (1969), Jennings (1970), Stimpson (1958), Von Thun (1975), Einstein et al (1983), y recientemente por Gehle & Kutter (2003).

#### ENSAYOS DE CORTE EN SUPERFICIES DE FOLIACION DE FILITAS METEORIZADAS.

En vista de que un número significativo de los deslizamientos que ocurren en la zona montañosa de la Costa Central Venezolana están controlados por la orientación de la foliación en filitas meteorizadas, se realizaron 29 ensayos de corte a lo largo de dicha discontinuidad en muestras tomadas en áreas de deslizamientos. Veinte de las muestras tenían las superficies de foliación cerradas, y nueve muestras tenían la foliación abierta (100% persistencia). Es de notar que el término “foliación cerrada” utilizada en este artículo, no significa que la superficie total es “no penetrativa” o “no persistente”. Las superficies de foliación cerrada pueden tener áreas en contacto sin resistencia tensional en la dirección perpendicular a ellas.

Los ensayos de corte fueron ejecutados con un equipo de campo manufacturado por Robertson Research Laboratory, descrito por Hoek & Bray (1974). Las muestras tenían forma esencialmente rectangular con longitudes entre 7 cm y 12 cm, y ancho entre 5 cm y 9 cm. Luego de obtener la curva

esfuerzo de corte -vs- desplazamiento hasta un desplazamiento máximo de 5 mm, se realizó un ensayo múltiple en reverso bajo diferentes esfuerzos normales, en la misma superficie de falla. Las filitas ensayadas tienen un peso unitario promedio de  $21.5 \text{ KN/m}^3$ , y una resistencia a la compresión estimada que varía entre 1.1 MPa y 7.0 MPa. Ensayos de absorción rápida según el procedimiento de Hamrol (1961), dieron resultados variables entre 9% y 10%. Durante el trabajo de campo, se observó que solamente algunas de las muestras monolíticas tenían superficies de foliación abiertas, pero la mayoría mostraron superficies de foliación cerradas. (Véase Figura 4).

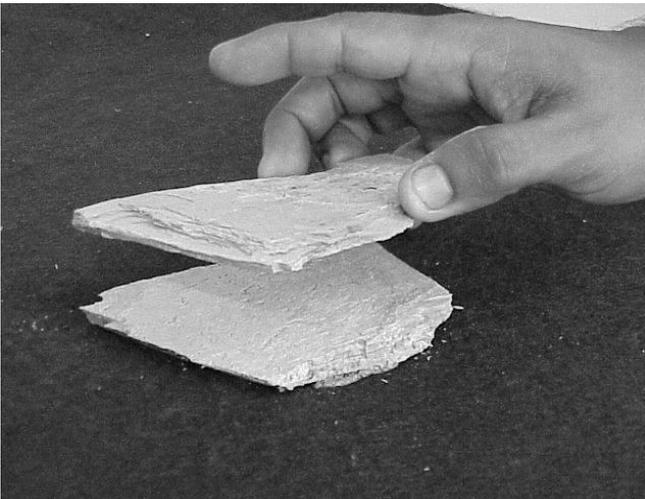


Figura 4. Muestras de filitas con superficies de foliación cerrada y abierta.

También se observó durante los trabajos de campo que algunas de las muestras con foliación cerrada se partían y se separaban fácilmente, exhibiendo muy poca resistencia tensional en dirección normal a las superficies de foliación. Otras muestras podían ser

separadas según sus planos de foliación con suficiente presión de las manos. Finalmente, se observaron muestras con superficies de foliación que no podían ser separadas según dichos planos, aun con fuerte presión manual. Este comportamiento revela que las superficies de foliación cerrada están constituidas por áreas “no-fracturadas” o “intactas” y áreas “fracturadas” en contacto. Tomando en consideración que la foliación no es realmente una “fractura”, pareciera más correcto expresar que existen áreas donde la foliación es “penetrativa” (100% persistente), y áreas donde la foliación es “no-penetrativa” (no-persistente). La relación de áreas “penetrativas” a “no-penetrativas” depende de la historia geológica y principalmente de las características de esfuerzo-deformación de una localidad en particular dentro de la roca metamórfica plegada. Es obvio que la relación de dichas áreas determina la resistencia de una muestra en particular, la cual varía dependiendo de su localización. Las filitas sericíticas ensayadas también tienen un incipiente clivaje crenulado, el cual consiste en superficies paralelas de origen secundario, tal como puede verse en la Figura 5.



Figura 5. Clivaje crenulado incipiente, desarrollado en una muestra de filita sericítica.

### Resistencia pico

La Figura 6 muestra los resultados de los valores de resistencia pico, obtenidos en ensayos de corte directo en muestras con foliación cerrada, y de la resistencia pico obtenida en muestras con foliación abierta. Puede observarse que en términos de la teoría de Mohr-Coulomb, se puede trazar una línea recta para caracterizar el comportamiento de las superficies de foliación abierta; sin embargo, es imposible establecer

una relación única para el caso de superficies de foliación cerradas. Estos resultados eran de esperarse, y el amplio rango de valores pico obtenidos en las superficies de foliación cerrada, confirman la variabilidad observada durante la caracterización de campo, concerniente a las diferentes fuerzas manuales requeridas para separar muestras individuales según sus planos de foliación.

En la Figura 6 se ha ajustado una línea recta como envolvente de los resultados de superficies de foliación abiertas, obteniéndose un ángulo de  $29^\circ$  y cohesión nula. Adicionalmente, una serie de líneas paralelas a la envolvente de superficies de foliación abierta, han sido ajustadas a los resultados de resistencia pico de superficies de foliación cerrada presentados en la Figura 6, las cuales han sido trazadas en la Figura 7. Esta es simplemente una interpretación aproximada realizada en términos de Mohr-Coulomb, y basada en la hipótesis de que las envolventes de la familia de superficies de foliación cerrada, tienen ángulos de fricción aproximadamente igual al obtenido en las superficies de foliación abiertas, lo cual no es necesariamente cierto.

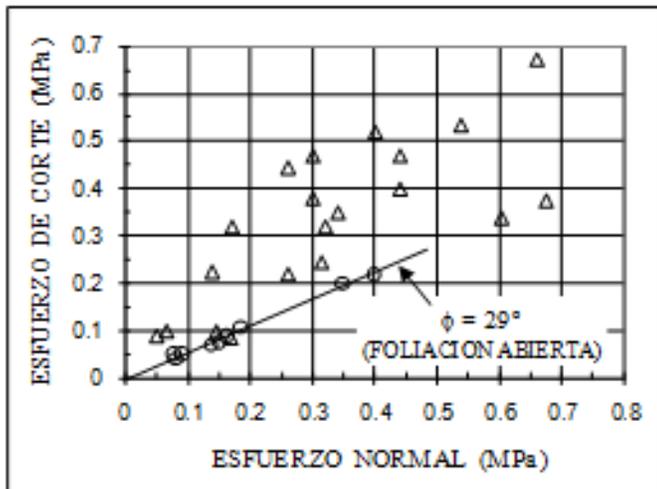


Figura 6. Resistencia pico en superficies de foliación abiertas (círculos), y en superficies de foliación cerrada (triángulos).

En la Figura 8 se muestran los valores de esfuerzo de corte -vs- esfuerzo normal para el caso de resistencia pico de muestras de foliación abierta, y el comportamiento post-pico de todas las muestras tanto abiertas como cerradas. Puede observarse que el límite inferior de una envolvente lineal, está representada por cohesión nula y un ángulo de fricción de  $12^\circ$ , el cual fue considerado como el ángulo de fricción último ( $\phi_u$ ). Los valores de ángulo de fricción último de todas las muestras ensayadas, variaron entre  $12^\circ$  y  $23^\circ$ .

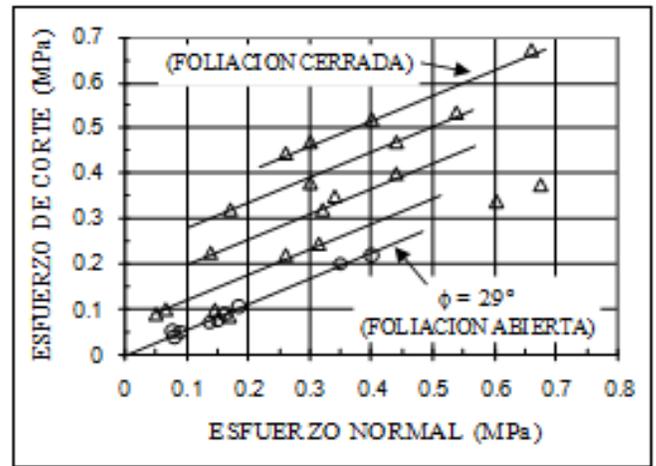


Figura 7. Líneas rectas ajustadas a resultados de resistencia pico en muestras con foliación cerrada, paralelas a la línea ajustada para el caso de foliaciones abiertas.

### Resistencia última

La envolvente límite superior que puede ser ajustada en la Figura 8, revela un ángulo de fricción de  $29^\circ$  hasta un esfuerzo normal de 0.4 MPa. Para valores mayores de este esfuerzo normal (con la excepción de dos puntos que sugieren que la envolvente de  $29^\circ$  continúa con la misma pendiente), existe una tendencia a una disminución del ángulo de fricción hasta  $19^\circ$ . Este comportamiento estaría de acuerdo con la envolvente bilineal propuesta por Patton (1966) para discontinuidades abiertas.

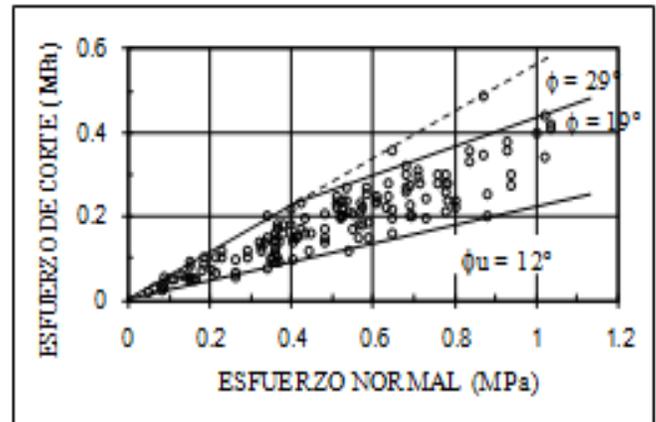


Figura 8. Resultados de resistencia pico en muestras con foliación abierta, y resultados post-pico en muestras con foliación tanto abierta como cerrada.

La envolvente superior en la Figura 8 ha sido trazada en forma bilineal como una aproximación, pero tal como ha sido reportado por Patton (1966), el verdadero modo de falla tendería a una curva reflejando no un simple cambio, sino cambios en las intensidades de diferentes modos de falla ocurriendo simultáneamente.

## Perfiles de rugosidad y diferencias entre resistencia pico y última

De acuerdo a los perfiles de rugosidad determinados con un copiador de formas en superficies de foliación de muestras de filitas, se puede concluir que a la escala de muestras las superficies de foliación son muy lisas y prácticamente planas con un ángulo de dilatación pico estimado que varía entre  $0^\circ$  y un máximo de  $5^\circ$ .

Con base en Barton & Choubey (1977), las características de las filitas ensayadas pueden ser descritas con un coeficiente de rugosidad igual o menor de 5 ( $JRC \leq 5$ ). La Figura 9 muestra un perfil típico de rugosidad medido con el copiador de formas en una filita.

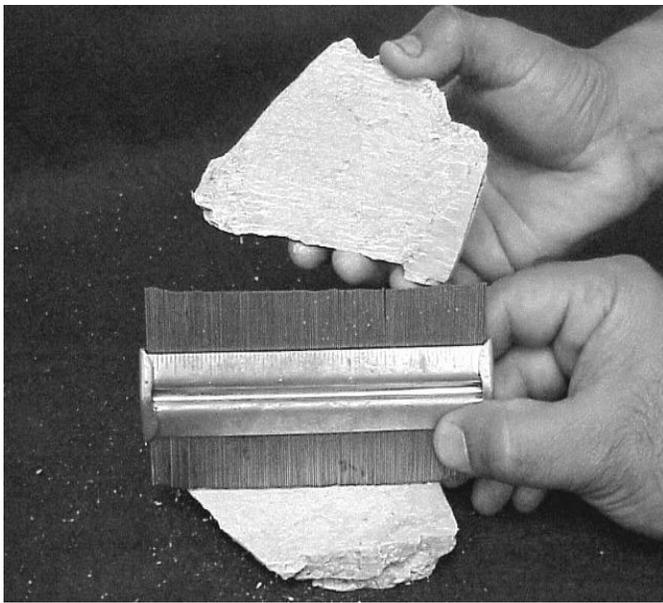


Figura 9. Perfil de rugosidad planar y liso, típico de las filitas ensayadas.

Los resultados de ensayos de corte revelan que la diferencia entre la resistencia pico ( $\phi_p$ ) y la resistencia última ( $\phi_u$ ) para muestras con foliación abierta varió entre  $6^\circ$  y  $17^\circ$ . De acuerdo a las teorías de discontinuidades abiertas, la diferencia entre el ángulo de fricción pico y el ángulo de fricción último corresponde a los ángulos de rugosidad ( $i$ ) a bajos esfuerzos normales. Sin embargo, los valores de “ $i$ ” calculados no correlacionan con los perfiles de rugosidad casi planos y lisos, determinados en las muestras ensayadas.

En este sentido, para explicar las diferencias apreciables entre  $\phi_p$  y  $\phi_u$ , es necesario proponer un nuevo mecanismo diferente al cabalgamiento en las asperezas originales.

## Mecanismo de falla propuesto

En vista de las mencionadas incongruencias previamente mencionadas, algunos ensayos de corte fueron detenidos antes de alcanzar el valor de resistencia pico, con el fin de observar cuidadosamente la superficie de foliación sujeta a corte. Fue posible observar que la superficie lisa original había desarrollado un perfil escalonado durante el proceso de corte. El autor de este artículo cree que debido al hecho de que la roca meteorizada es débil y las superficies de foliación están finamente espaciadas, la roca se quiebra en tensión en algunas áreas durante el corte. Estas fracturas, las cuales son aproximadamente perpendiculares al plano de falla promedio, aparentemente se desarrollan a lo largo del clivaje crenulado incipiente observado en las muestras ensayadas. Durante este proceso se desarrolla una especie de perfil aleatorio que pasa de un plano de foliación a otro. El efecto de este perfil escalonado es aumentar el ángulo de fricción pico debido principalmente a dilatación a bajos esfuerzos normales.

Es también posible que debido a la debilidad de las filitas ensayadas, algunas irregularidades son cizalladas a bajos esfuerzos normales. También puede explicarse que en el rango de esfuerzos normales altos ( $>0.4$  MPa, Figura 8) ocurre el mismo mecanismo que origina la superficie de corte escalonada. Sin embargo, el mecanismo de falla comprende principalmente corte de los escalones y las pequeñas asperezas originales. Bajo estas condiciones el criterio de falla de Mohr-Coulomb podría expresarse en términos de cohesión y ángulo de fricción de la roca intacta.

Finalmente, es necesario explicar que el perfil escalonado tiende a desaparecer después del pico debido a que a grandes desplazamientos los trozos de roca producto de las fracturas iniciales, tienden a llenar los espacios entre las superficies de foliación, desarrollando un relleno con una superficie casi lisa donde se obtiene el ángulo de fricción último.

## CONCLUSIONES

- 1 El uso de la misma terminología técnica, es indispensable para poder compartir conocimientos relativos al comportamiento al corte de diferentes discontinuidades.
- 2 La caracterización de masas rocosas metamórficas, principalmente en aquellas zonas donde han sido afectadas por varias generaciones

de plegamientos superpuestos, debe ser ejecutada por un geólogo estructural con experiencia en ingeniería de rocas. Errores involuntarios en campo pueden conducir a modelos geotécnicos incorrectos y como consecuencia a resultados de análisis de estabilidad apartados de la realidad.

- 3 Es de esperar que resultados de resistencia pico obtenidos de ensayos de corte directo en superficies de foliación cerradas, revelen una dispersión considerable. Por lo tanto, estos resultados no pueden ser interpretados en términos de la teoría de Mohr-Coulomb debido al hecho de que las muestras ensayadas pueden tener diferentes proporciones de áreas penetrativas y no penetrativas en el plano de foliación.
- 4 Los resultados de ensayos de corte en superficies de foliación en filitas meteorizadas, muestran una diferencia significativa entre el ángulo de fricción pico y el ángulo de fricción último, lo cual es incongruente con la superficie casi planar y lisa de las rocas ensayadas. En este sentido se ha propuesto un posible mecanismo de falla para explicar este atípico comportamiento.
- 5 Se requieren investigaciones adicionales para estudiar la influencia del clivaje crenulado en el mecanismo de falla de superficies de foliación. Para investigar este comportamiento particular, se requiere realizar una serie de ensayos de corte directo a lo largo de la foliación, variando la dirección de la fuerza de corte con respecto a la orientación del clivaje crenulado.
- 6 La influencia en la resistencia al corte de otros tipos de clivaje y otras estructuras que caracterizan algunas rocas metamórficas, también debe ser investigada.
- 7 Para una mejor comprensión del comportamiento al corte, es absolutamente necesaria una observación cuidadosa y la descripción de las estructuras presentes en las muestras de roca, antes de realizar los ensayos de corte. Esta línea de investigación en mecánica de rocas, requiere la participación adicional de expertos en geología estructural.

## RECONOCIMIENTOS

El autor desea expresar su reconocimiento a las siguientes personas: Dr. Evert Hoek, Dr. Rodolfo Sancio, Ing. Josefina Ortas e Ing. Nelson Rodríguez, por leer la primera versión de este artículo y por sus valiosas sugerencias.

## REFERENCIAS

- American Geological Institute (AGI). 1974. *Dictionary of Geological Terms*. Anchor Press/Doubleday. 545 p.
- Barton, N. & Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*. 10. pp. 1-54.
- Billings, M. 1972. *Structural Geology*. Prentice Hall, Inc. Third Edition. 605 p.
- Einstein, H. Veneziano, D. Baecher, G. & O'Reilly, K. 1983. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. *International Journal Rock Mechanic, Mining Science & Geomechanics Abstract*. Vol. 20. No. 5. pp. 227-236.
- Gehle, C. & Kutter, H. 2003. Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints. *International Journal Rock Mechanic, Mining Science & Geomechanics Abstract*. Vol. 40. pp. 687-700.
- Gómez Da Silva C., Aires-Barros, I. & Salcedo, D. 1993. Ensayos de envejecimiento acelerado en rocas metamórficas de la Cordillera de la Costa. Caracas, Venezuela. *Boletín Sociedad Venezolana de Geotecnia*. N° 65. pp. 4-12.
- Goodman, R. 1993. *Engineering Geology*. Rock in Engineering Construction. John Wiley & Sons. 412 p.
- Hamrol, A. 1961. A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. *Proc. 5<sup>th</sup>. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Paris. Vol. 2. pp. 771-774.
- Hobbs, B., Means, W. & Williams, P. 1976. *An Outline of Structural Geology*. John Wiley & Sons. 571 p.
- Hoek, E. & Bray, J. 1974. *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy. London. 309 p.
- Jennings, J. 1970. A mathematical theory for the calculation of the stability of slopes in open cast mines. *Symposium on Open Pit Mines*. Johannesburg. Balkema, Amsterdam pp. 87-102.
- Lajtai, E.Z. 1969. Strength of discontinuous rocks in direct shear. *Geotechnique* 19. No. 2. pp. 218-233.
- Salcedo, D. 1982. Problemática geotécnica de desarrollos urbanos en las colinas del área metropolitana de Caracas. *Boletín SVMSIF* N° 49. Caracas, Venezuela. pp. 47-56.
- Salcedo, D. 1983. Consideraciones técnicas sobre estabilidad de taludes en las colinas del área metropolitana de Caracas. *II Jornadas Geológicas Venezolanas*. SVG-SVMSIF. Caracas, Venezuela.
- Salcedo, D. 1984. Deslizamientos según superficies de foliación y teorías de discontinuidades abiertas. *VIII Seminario de Geotecnia*. Sociedad Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones. Caracas, Venezuela.
- Salcedo, D. 1990. Aspectos relacionados con la caracterización geotécnica de rocas metamórficas. *Memorias III Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas*. ISRM. pp. 19-62.
- Schuster, R., Salcedo, D. & Valenzuela, L. 2002. Overview of catastrophic landslides of South America in the twentieth century. *Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology*, Volume XV. pp. 1-33.
- Stimpson, D. 1978. Failure of slopes containing discontinuous planar joints. *Proc. 19<sup>th</sup> Symposium on Rock Mechanics*. pp. 246-300.
- Von Thun, L. J. 1975. The practical realistic solution of rock slope stability problems. *Proc 16<sup>th</sup> Symposium on Rock Mechanics*. Minnesota. pp. 139-150.