



ROCAS Y SUELOS COMO INDICADORES INGENIERO GEOLÓGICOS Y AMBIENTALES DE ESTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD DE TALUDES Y LADERAS.

Dr. Rafael Guardado Lacaba. MSc. Yuri Almaguer Carmenates.

Departamento de Geología
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas S/N, Moa, Holguín. rguardado@ismm.edu.cu

Resumen.

Las rocas y suelos, su composición, estructura y textura, propiedades físico mecánicas, y otras tienen un componente clave en la estabilidad de los taludes y laderas al movimiento de masa en ellos. Los autores brindan un análisis de los diferentes tipos de rocas: Rocas duras y semiduras, friables cohesivas y no cohesivas y rocas con composición y estado especiales y particulares. Se brinda una comparación de los distintos movimientos de masas en los taludes según el tipo de roca y sus condicionales ingeniero geológicas.

Summary.

The rocks and SOILS, its composition, structures and texture, properties physique mechanics, and others have a key component in the stability of the slopes and hillsides to the movement of mass in them. The authors offer an analysis of the different types of rocks: Hard rocks and semihard, friable cohesive and not cohesive and rocks with composition and special state and matters. You offers a comparison of the different movements of masses in the banks according to the rock type and their geologic conditional engineer.

Palabras claves: geomecánica, evaluación de taludes, rocas duras y semiduras, suelos, macizo rocoso, deslizamientos, movimientos de masas.



1. Introducción.

En la inestabilidad de los terrenos las rocas y suelos que los componen tienen un componente fundamental en los movimientos de masas que se producen en las laderas y taludes. Los procesos y fenómenos gravitacionales están relacionados con los desprendimientos de rocas, deslizamientos de rocas y suelos, los flujos, torrentes, etc. Para que se produzcan estos movimientos debe haber una roca o suelo que falle ante la acción combinada de las fuerzas gravitacionales, hidrostáticas, hidrodinámicas, sísmicas, por los cambios de estado, de presión, etc.

Podríamos evaluar diferentes indicadores geotécnicos que reporten la estabilidad en las laderas y taludes, pero son las rocas, sus propiedades, su estructura, textura, composición y estado los que hacen que las rocas desafíen la gravedad y se alcen a gran altura y con una pendiente prácticamente vertical. Contrariamente laderas y taludes no aceptan diferentes condiciones y se ponen en movimiento. En este sentido la Ingeniería Petrológica (Rock Engineering) juega un papel determinante en la evaluación de la inestabilidad de los taludes. Conocer las rocas que componen las laderas y/o taludes, su composición, estructura, textura, alteración, diaclasamiento, las propiedades físicas, acuíferas y mecánicas, todos estos indicadores ingenieros petrológicos condicionan ampliamente las condiciones de estabilidad. Ejemplos hay muchos, precisamente trataremos en este trabajo de fundamentar de cómo condiciones ingenieras petrológicas inciden en las inestabilidades de los terrenos. Hemos dividido las rocas en cinco grandes grupos: I- Rocas estables, II- Rocas poco estables, III- Rocas friables y cohesivas, IV- Rocas friables no cohesivas, V- Rocas con propiedades y estados particulares. Los taludes y laderas pueden ser homogéneos y heterogéneos, así los indicadores ingenieros geológicos fundamentales de estabilidad lo brindan los tipos de rocas presentes en ellos, de ahí la importancia de su dominio y conocimiento.

2. La estabilidad de los taludes formados por rocas resistentes y semiresistentes:

La estabilidad de taludes formados por rocas resistentes y semiresistentes, está relacionada con la estabilidad de los macizos rocosos, las rocas las podríamos dividir en dos grandes grupos en materia de estabilidad de laderas: rocas estables o resistentes y rocas inestables o semiduras. Las rocas para ser estables en taludes deben ser resistentes, cohesivas, densas, impermeables, estables en el amplio sentido de la palabra.

Las rocas semiresistentes son aquellas que presentan un grado de alteración de intemperismo, presentan numerosas debilidades estructurales (planos de diaclasamiento, fallas, esquistosidad, estratificación, etc.) todo ello reduce la resistencia de las rocas en los taludes y laderas. Precisamente el agrietamiento controla en las rocas de los taludes su estabilidad.

Las rocas y las discontinuidades presentes en ellas rigen la resistencia y su comportamiento deformacional de estas en laderas y taludes. La resistencia de las discontinuidades depende del tipo de rocas y del origen del propio agrietamiento del cual distinguiremos:

- **Juntas.** Corresponden a las grietas de las rocas. Pueden distinguirse las juntas de origen tectónico, formadas por un movimiento orogénico determinado. Son persistentes, se presentan en familias perfectamente definidas. Las juntas de compresión debidas a la expansión de las rocas en la superficie y debido a la descarga de la presión y descompresión a que están sumidas. Juntas de contracción, provocadas por el enfriamiento rápido de un magma en la superficie, siendo característico de las rocas volcánicas.



- **Fallas.** Son superficies de roturas en las rocas donde ha existido un desplazamiento. Son estos movimiento y sus consecuencias componentes problemáticos en la estabilidad de los taludes. Estos desplazamientos dejan marcados huellas muy peculiares pero también su movimiento a lo largo del plano de falla eliminan los elementos resistentes de cohesión entre las juntas borrando las irregularidades de su superficie. Los espejos son caras muy pulidas, en ellos aparecen muy bien marcados las superficies de resbalamiento, en ella es notable que la fricción es baja. En las fallas aparecen por lo general zonas de trituración que representan un conjunto de fallas, de rocas trituradas, diaclasadas, etc. Las fallas pueden ser buenos conductos de circulación de las aguas. La presencia de agua en las rocas y en las laderas complica y eleva las amenazas por inestabilidad.
- **Planos de estratificación.** Están asociados al tipo de litología, estas discontinuidades representan un contacto dentro de la misma roca o entre litologías distintas. Las estructuras sedimentarias son las mas comunes.
- **Esquistosidad.** Son discontinuidades muy persistentes y presentes con gran densidad, originadas por la anisotropía que produce en la orientación preferentemente de los minerales aplanados, estos planos a veces presentan cohesión pero pueden abrirse cerca de la superficie del terreno por descompresión.

Valores aproximados del ángulo de fricción para rocas y rellenos de fallas.
(Hoek y Bray, 1974).

Roca	ϕ roca intacta	ϕ discontinuidades	ϕ condiciones límites
Andesita	45	31 - 35	28 - 30
Basalto	48 - 50	47	-
Granito	45 - 50	-	-
Grauvaca	45 - 50	-	-
Caliza	30 - 60	-	33 - 37
Pórfido	64	40	30 - 34
Cuarcitas	45 - 60	44	26 - 34
Areniscas	-	-	25 - 34
Esquistos	45 - 60	-	25 - 34
Pizarra arcillosa	45 - 64	-	25 - 34
Limonita	50	37	27 - 32
Material de relleno	ϕ aproximado		
Relleno arcilloso remoldeado	10 - 20		
Calcita en zonas de cizalla	20 - 27		
Pizarra en zona de falla	14 - 22		
Brecha en roca dura	22 - 30		
Relleno de rocas dura	38		

La porosidad de las rocas otro componente que incide en las inestabilidad de las rocas en las laderas y taludes. La experiencia práctica plantea que cuanto más porosidad más inestabilidad. La porosidad se caracteriza por:

$$n = 1 - m = 1 - \frac{\gamma_{esq}}{\gamma_m} = \frac{\gamma_m - \gamma_{esq}}{\gamma_m}$$



otro componente importante es el índice de poros

$$e = \frac{n}{m} = \frac{n}{1-n} = \frac{\gamma_m - \gamma_{esq}}{\gamma_{esq}}$$

precisamente las rocas resistentes, duras y estables presentan poca porosidad e índice de poros. Sin embargo las rocas poco resistentes e inestables son rocas con alta porosidad y su peligrosidad aumenta cuando esta se hace más activa y permeable. La densidad de las rocas resistentes en los taludes estables son de 2.65 – 3.10 g/cm³ y la porosidad alcanza valores de las decenas de por ciento y menor. La resistencia y las propiedades elásticas son altas. La resistencia a la compresión 50 – 40 Mpa y al corte 2 – 15 Mpa. El módulo de deformación general es mayor de 10 000 Mpa, la velocidad de propagación varía entre 4.0 – 4.5 hasta 6.5 – 7.0 Km/s y en algunos casos hasta 8.0 Km/s, la dureza sísmica es de 10 – 12 y la dureza $F_d > 8$. en estas propiedades podríamos agrupar las rocas graníticas, granodioritas, garbos, sienitas, los pórfidos, las andesitas y basaltos, los mármoles, las cuarcitas, gneis, esquistos cristalinos, las areniscas y conglomerados cementados, las calizas, dolomitas y otras.

Las rocas semiresistentes, son rocas que como las anteriores pero que están sometidas a cambios de su estado, composición propiedades geomecánicas y otras provocadas por la meteorización, congelación, diaclasamiento y fallamiento, la carsificación, los procesos neotectónicos entre otros. Por lo general encontramos entre este grupo a rocas volcánicas muy agrietadas y alteradas, las tobas y rocas tobáceas, las areniscas y eleurolitas con un cemento arcilloso, las margas, las arcillas. Este grupo de rocas tiene la característica a diferencia de las anteriores de ser menos densa, sin densidad promedio 12.20 – 26.59 g/cm³, son más porosas 10 – 15 % y mayor y poseen las características en algunos casos de ser cavernosas.

Un elemento importante que incide en la inestabilidad de los taludes y laderas es la presencia de agua en estas rocas. Este grupo se caracteriza precisamente por ser permeables y por tener una capacidad acuífera que estará en dependencia del agrietamiento y la meteorización, así el coeficiente de filtración variará de 0.5 – 30 m/s (hasta 15 l/min) en rocas con poca a media permeabilidad y más de 30 m/s para rocas muy permeables.

Las propiedades mecánicas pueden ser variables debido precisamente al grado de diaclasamiento y meteorización, así la resistencia a la compresión puede variar para rocas medianamente resistentes con valores de 2.5 – 1.50 Mpa y rocas poco resistentes menor de 2.0 Mpa. El módulo de deformación general puede variar desde 10 000 – 2000 y menor de 2000 Mpa y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas V_p varían desde 4.5 – 1.1 Km/s y su coeficiente de dureza oscila entre 8 – 2.

Las rocas duras y semiduras del grupo I y II originan desprendimientos principalmente en tobas, materiales volcánicos, granitos y granodioritas muy agrietadas y alteradas, peridotitas, serpentinitas, gneis, grabros muy agrietados, calizas y dolomitas agrietadas y lateradas, areniscas, entre otras.

Los desplomes. Se producen en rocas semiduras poco resistentes, agrietadas y meteorizadas, fundamentalmente en rocas tobáceas, volcánicas, terrazas aluviales (Cortes de la autopista Santiago de Cuba, Guantánamo, cortes de la carretera Santiago de Cuba Chivirico, Ocujal. Carretera Moa - Nicaro).



Los vuelcos. Aparecen relacionados con los esquistos, serpentinitas, rocas estratificadas, tobas, etc. (Cortes de la carretera Guantánamo Baracoa,)

Deslizamientos. Se pueden encontrar dos tipos de movimientos traslacionales donde el deslizamiento es producido por un plano de fallo que está relacionado con grietas planas o juntas en forma de bloques, es forma de cuñas. Precisamente las rocas serpentinizadas, las tobas estratificadas, las calizas margosas son rocas que presentan las huellas de estos desplazamientos. (Baracoa, Maisi, Sierra Maestra, Moa, Sagua de Tanamo)

Otras formas de fallos pueden ser los deslizamientos rotacionales; estos son muy bien enmarcados en las lutitas micénicas, las margas eocénicas de Cuba, en particular en las provincias de Santiago de Cuba, Guantánamo en el oriente de Cuba .

3. La estabilidad de laderas formadas por rocas friables no cohesivas.

Las rocas friables no cohesivas están constituidas fundamentalmente por arenas, gravas, conglomerados y otras mezclas de material detrítico. Sin embargo en ellas encontramos en algunos casos sedimentos con contenidos de fracción fina (matriz arcillosa o limosa) superiores al 10 – 20 % lo que le confiere una cierta cohesión al conjunto pero que justifica la disgregación del depósito cuando falla y se desplaza por la ladera.

La estabilidad de las rocas de este grupo en laderas y taludes dependen en gran medida del grado de clasificación de las partículas y de su empaquetamiento. Los factores que afectan la resistencia al esfuerzo cortante de las rocas friables no cohesivas o friccionantes pueden agruparse en dos clases. La primera agrupa a los que afectan la resistencia al corte de un suelo dado de los cuales los más importantes son la compactación:

$$C_r = 100 \frac{e_{\max} - e_{\text{nat}}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

donde:

C_r se expresa en %

e_{\min} : relación de vacío correspondiente al estado más compacto del suelo, obtenido al someter la muestra a un proceso de compactación dentro de un volumen determinado.

e_{nat} : relación de vacío en estado natural.

e_{\max} : relación de vacío máxima correspondiente al estado suelto obtenida vertiendo el material en un volumen sin ninguna compactación.

Valores superiores a 50% suelen considerarse como un suelo compacto y este valor puede considerarse como límite de seguridad razonable en problemas prácticos de estabilidad de taludes. Además de la compactación, se deberá analizar la influencia en el comportamiento mecánico de los suelos gruesos la angulosidad de los granos (a misma compactación, la mayor angulosidad da más trabazón y por lo tanto mayor resistencia al esfuerzo cortante) y la orientación de sus partículas que inciden en su permeabilidad.

Entre otros factores se destacan el tamaño, la forma, la textura y la distribución granulométrica de las partículas, y de su grado de alteración, definiendo esta última el fenómeno de ruptura de los granos, que afecta la resistencia de manera fundamental.



4. Componen las rocas friables no cohesivas.

Los suelos eluviales que en las laderas aparecen muy abundantes en las regiones tropicales y subtropicales. Su composición responde a las rocas madre que lo originan, poseen una granulometría variable y una matriz limosa en algunos casos.

Los depósitos deluviales y coluviales son derrubios con cierto grado de movimiento en las áreas montañosas, su composición es heterogénea y están representados por diversa granulometría, incluyendo su matriz, a veces limosa-arcillosa. La disposición del depósito a modo de película que recubre heterogéneamente la ladera con grosores que oscilan entre los 0.5 – 2.5 m y más, condicionan la geometría del fallo en las pendientes.

En plano de fallo se desarrolla en el contacto entre el depósito y la roca subyacente por tal motivo las superficies de fallos pueden ser roturas por deslizamiento planos o rotacional superficial elíptica.

La masa movida se deslizará como un paquete único o se desmoronará en su recorrido generando una corriente o flujo.

Por lo general la superficie de fallo o de contacto es permeable y por ella circula agua provocando el lavado de los materiales más finos y aumentando la humedad del depósito. Así en épocas de grandes precipitaciones se generan las condiciones hidráulicas que favorecen las roturas en un talud. Ejemplo de ello los deslizamientos de Vargas en Venezuela en 1999.

Cuando la capa de deluvio o de coluvio no es potente y se encuentran en zonas de pendientes moderadas o laderas con vegetación arbórea, las deformaciones pueden ser lentas o limitadas, se detectan signos de reptación.

Las rocas formadas por arenas y gravas aluviales.

Los depósitos más representativos son las terrazas fluviales y depósitos torrenciales que se desparraman formando grandes abanicos. En las terrazas cuaternarias antiguas y en los rellenos detríticos continentales estos materiales presentan cierto grado de compactación y cementación que les permite disponer de una cierta cohesión. En este caso es posible encontrar taludes naturales prácticamente verticales que tienden a inestabilizarse por la apertura de grietas de tracción paralelas al frente del talud y que acaban desarrollando fenómenos de vuelco.

Las propiedades físico mecánicas. Las rocas arenosas poseen una densidad que varía entre 1.40 – 1.90 g/cm³ y porosidad de 25 – 40% (cambia en grandes límites y valores). Son permeables con coeficiente de filtración de 30 m/s, para un valor medio y bajo hasta más de 30 m/s para la permeabilidad fuerte. La resistencia dependerá del depósito. No son rocas de alto índice de dureza, $F_d < 2$ y el módulo de deformación varía entre 5 – 10 hasta 100 Mpa. La velocidad de propagación de las ondas V_p están entre 1.5 – 1.8 Km/s y su dureza sísmica 0.5 – 2.9 hasta 4.8. El coeficiente de fricción interna f , varía de 0.25 – 0.60.



5. Rocas blandas y cohesivas.

Comprenden las arcillas, limos, argilitas y limonitas compactas, pizarras arcillosas, margas y otras. Son rocas homogéneas que cuando se presentan en espesores potentes pueden dar lugar a deslizamientos rotacionales; si los espesores son pequeños, los movimientos son de característica planar y en otros campos aparecen desplazamientos lentos provocando arrugas en las pendientes. Estratos arcillosos intercalados con rocas más resistentes provocan el fallo de deslizamiento traslacionales. Las coladas de barro-torrentes están caracterizados por arcillas, lutitas o sedimentos margosos-arcillosos. Las rocas arcillosas presentan la propiedad de ser plásticas y en ella la humedad adquiere un nivel fundamental en su fallo y traslado en las laderas y taludes.

Los resultados de las investigaciones sobre suelos arcillosos indican que la resistencia de estos suelos en una prueba drenada puede representarse por la expresión:

$$\tau = \sigma' \tan \phi_A + c$$

$$\tau = (\sigma - u) \tan \phi + c$$

para suelos arcillosos (sin drenaje y sin consolidación) la resistencia será simplemente:

$$\tau = c$$

y el ángulo de fricción aparente resulta ser cero.

En la práctica cuando se necesitan conocer las características esfuerzo-deformación y resistencia de un suelo dado se recurre a la búsqueda de pruebas que reflejen las circunstancias a la que están expuestas las rocas según la circunstancia que se trate. Existen dos criterios para la determinación práctica de la resistencia al esfuerzo cortante:

1. el criterio de los esfuerzos efectivos.
2. el criterio de los esfuerzos totales.

Los diferentes suelos arcillosos están relacionados con los suelos eluviales, los suelos lateríticos conservan un agrietamiento relíctico que unidos a los cambios de composición, estado, textura y estructura ponen en peligro a aquellos taludes con condiciones propias para el surgimiento de deslizamientos.

Numerosas formaciones arcillosas compuestas por arcillas y limonitas sobreconsolidadas tanto marinas como continentales tienen un estado tensional definido. Estos materiales están sometidos a una carga de peso propio que pueden ser descargados por varios efectos. Esta descarga tanto natural como provocada, causa en estas arcillas sobreconsolidadas una relajación que puede conllevar su inestabilización a largo plazo. La descarga en las arcillas hacen que estas se deformen expandiéndose. En algunos casos estas tensiones pueden superar la resistencia al cortante y desarrollar grietas de tracción y el movimiento en el talud. Claro está, otras condicionantes, como la lluvia, el ablandamiento del material arcilloso y el aumento de las presiones intersticiales contribuyen a una rotura progresiva en las laderas y taludes.

En los suelos cohesivos se presentan con abundante frecuencia los fenómenos de solifluxión o coladas de barro. Venezuela, en particular el estado de Lara y Caracas (diciembre, 1999).



Johnson y Sitar (1990), plantean la necesidad de considerar la presión de poros, a la cual atribuyen la reducción de la resistencia al corte en suelos saturados y con flujos según las pendientes. En arcillas sobre consolidadas que fallan en condiciones drenadas, los valores de la resistencia pico y residual pueden ser muy diferentes. La menor resistencia que se alcanza durante la deformación permite explicar porque las arcillas que rompen por deslizamiento rotacional progresan posteriormente ladera abajo a grandes distancias e incluso por pendientes menores que la inicial del movimiento.

Estudios realizados en deslizamientos en suelos arcillosos del yacimiento Punta Gorda de Moa, indican que tanto las arcillas preconsolidadas como las blandas, las resistencia al cortante cambia en dependencia de la orientación de las partículas, según los planos de microcizamiento. Como se conoce, estos materiales son capaces de absorber y retener el agua pero no transmitirla, esto trae consigo el aumento de cargas hidrostáticas e hidrodinámicas en flujo según su pendiente, generando un mecanismo de carga no drenada.

Las rocas arcillosas poseen propiedades físico mecánicas muy variables, dependiendo de la composición (caolinítica, monmorillonítica o hidromicácea). Por lo general su densidad varía entre 1.10 – 1.20 y 1.90 – 2.10 g/cm³; su porosidad es amplia, desde 30 hasta 75 – 80% y su humedad varía en amplios límites entre 20 y 80%.

Su resistencia varía en amplios límites también, en dependencia de la humedad y densidad. Son rocas poco duras y el índice de resistencia $f_d < 2$. En cuanto a la compresibilidad, pueden catalogarse como muy compresibles con un módulo de deformación de 5 – 10 Mpa. La velocidad de propagación de las ondas longitudinales es de 0.3 – 0.85 hasta 1.2 – 2.2 km/s; la resistencia sísmica es de 0.8 – 2.3 hasta 2.8 – 5.9. poseen un coeficiente de fricción interna entre T_g 0.15 – 0.35; por tal motivo la estabilidad de laderas o taludes dependerá de la humedad e pendiente de estos. En ello juega un papel las propiedades reológicas del suelo arcilloso.

Estas rocas generan deslizamientos rotacionales y traslacionales, además de flujos de distintos tipos.

La fluidificación de los suelos lateríticos.

La experiencia en investigaciones geotécnicas en suelos lateríticos indican cambios bruscos en el contenido de humedad del suelo, provocando variaciones negativas en la resistencia al cortante de estos; estas variaciones transforman el material de un estado plástico a un estado viscoso-plástico a semilíquido con una alta capacidad para fluir. Así, en los suelos arcillosos-arenosos el comportamiento de esfuerzos-deformaciones dependerá de la cantidad de agua que se encuentra en el volumen de vacío de los suelos.

El índice de liquidez (IL) de un suelo nos permitirá conocer el comportamiento según su estado (sólido, plástico, viscoso, líquido, etc.) el índice de liquidez:

$$IP = (W_n - W_p) / I_p$$

cuando IL es menor de cero ($IL < 0$) el suelo se comporta como un sólido frágil, si está entre $0 < IL < 1$, el suelo tendrá un comportamiento plástico y si el $IL > 1$ se comportará como líquido viscoso (Holtz y Kovaca, 1981; Lontadze, 1982; Guardado, 1986).



En terrenos tropicales y subtropicales, durante las grandes precipitaciones en corto tiempo o en épocas prolongadas, la humedad de los suelos lateríticos aumenta debido a que como son materiales que permiten absorber el agua, al almacenarla y no transmitirla, hacen que el índice de liquidez alcance valores superiores a la unidad, disminuyendo considerablemente la resistencia al corte y provocando alteraciones en su comportamiento plástico que hacen que los suelos se pongan en movimiento.

La combinación del elemento pendiente puede incrementar la velocidad de traslación del material. De esta manera en taludes y laderas formados por suelos arcillosos o arcillosos-arenosos ocurrirán movimientos de diferentes tipos que van desde flujos a deslizamientos traslacionales, rotacionales o por bloques, conjugándose este caso el tipo de material con el agrietamiento relíctico de la roca que lo originó (Guardado y Almaguer, 2001).

ANÁLISIS DE LA METEORIZACIÓN

La descripción ingenieril del fenómeno de meteorización en el área de estudio se hizo mediante a partir de índices, los cuales nos permitieron determinar los diferentes grados de meteorización en el perfil rocoso. Los mismos fueron usados en dependencia de su efectividad para determinar los rasgos característicos de cada grado, de esta manera tenemos índices tales como resistencia axial y permeabilidad, que nos brindan criterios para analizar todos los grados de meteorización, y tenemos otros como el RQD, que solo se puede usar hasta el grado altamente meteorizado, porque en grados superiores la roca en estado de suelo no se le puede aplicar el mismo. En la tabla 3.7 mostramos los índices utilizados para cada grado de meteorización.

Uno de los resultados obtenidos acerca de la meteorización de las rocas serpentinizadas fue en base a la aplicación del índice de alteración unificado (Kc). En la tabla 3.8 se muestran los resultados.

Clase y grado de meteorización		Roca fresca (I)	Débilmente meteorizada (II)	Moderadamente meteorizada (III)	Altamente meteorizada (IV)	Extremadamente meteorizada (V)	Suelo residual (VI)	
Inspección visual	Material de roca	Presencia de textura original						
		Grado de decoloración y desintegración física						
		Grado de descomposición química de piroxenos y olivino						
							Presencia de humus y raíces	
	Macizo rocoso	Decoloración en las juntas						
		Relación roca/suelo						
		Apertura y meteorización a través de las juntas						
		Angulosidad de los núcleos de rocas						
Propiedades físicas y mecánicas	Material de roca	Resistencia a la tracción						
		Módulo de elasticidad y resistencia a la compresión uniaxial						
		Permeabilidad del material de roca						
		Porosidad, contenido de humedad y densidad						
		Velocidad sónica						
		Índice micropetrográfico y de microfractura						
	Macizo rocoso	Espaciamiento fracturas y RQD						
		Permeabilidad relativa del macizo rocoso						



Tabla 3.7 Métodos utilizados para definir los grados de meteorización de las rocas serpentinizadas.

Clase	Descripción	K_c	K_v	$K_{\sigma c}$	K_a
I	Fresco	0	0	0	0
II	Bajo	0,07	0,018	0,15	0,01
III	Moderado	0,62	0,33	0,25	0,54
IV	Alto	7	0,42	0,67	23
V	Muy alto	12	0,72	0,95	42

Tabla 3.8 Clasificación de las rocas de acuerdo a los índices de alteración obtenidos.

De la aplicación de los índices micropetrográfico y de microfractura se pudo determinar el grado de alteración sobre la base del conteo del microagrietamiento y del porcentaje de minerales secundarios formados por la descomposición de la roca. En la tabla 3.9 se muestran los resultados de los mismos. En la tabla se puede observar una correspondencia entre el aumento del grado de alteración y descomposición de las rocas y el aumento del microagrietamiento y del porcentaje de minerales secundarios dado por el avance de la meteorización a través de las microfracturas.

Clase de meteorización	Grado	Micropetrográfico	Microfractura
Roca fresca	I	> 15	> 5
Levemente meteorizado	II	7 - 15	5 - 8
Moderadamente meteorizado	III	5 - 7	8 - 14
Altamente meteorizado	IV	3 - 5	14 - 25
Completamente meteorizado	V	< 3	< 25

Tabla 3.9 Resultados de la aplicación de los microíndices en las rocas serpentinizadas.

Sistema de clasificación propuesto para las rocas meteorizadas.

De la aplicación conjunta de los diferentes métodos resultó un sistema de clasificación de las rocas serpentínicas meteorizadas el cual introduce una descripción ingenieril de la meteorización. En el sistema propuesto se combinan el uso una identificación y descripción geológica, el reconocimiento de propiedades ingenieriles y ensayos de laboratorio. La descripción y clasificación del material rocoso meteorizado propuesto está basado en la información geológica obtenida por la inspección visual y reconocimiento de rasgos típicos de la desintegración física y descomposición química de las rocas en los afloramientos, y en muestras de núcleos de perforación, además, de la información mecánica, física e hidráulica derivada de ensayos de campo y laboratorio, suplementados con observaciones microscópicas. El sistema propuesto esta basado en la identificación de varios grados de meteorización y en la proporción volumétrica de estos materiales con respecto a las discontinuidades.

Un rasgo importante de esta clasificación propuesta es que mostramos para cada clase el modo de fallo de taludes asociado a estas. De esta manera tenemos modo de fallo no estructural en el horizonte más meteorizado (grado VI), y en los demás grados se observa la influencia del control estructural fundamentalmente del agrietamiento y la esquistosidad; en los grados II, IV y V la roca con agrietamiento espaciado falla a través de las discontinuidades (planar, cuña, vuelco), pero a medida que la intensidad del agrietamiento se intensifica, la roca tiene un comportamiento tipo suelo, o sea que los movimientos son circulares.



A modo de discusión.

En la inestabilidad de los terrenos las rocas y suelos que los componen tienen un componente fundamental en los movimientos de masas que se producen en las laderas y taludes. En 1974, en los Andes del Perú ocurrió uno de los deslizamientos de tierra más grandes en la historia de nuestro continente. Casi 500 personas en el pueblo de Mayunmarca y en sus alrededores perdieron la vida cuando el deslizamiento represó el río Mantaro. Este deslizamiento es un ejemplo del potencial destructivo y del por qué son considerados como peligros y riesgos naturales y ambientales. En 1987 Medellín: Un deslizamiento de la ladera arrasó con sus vidas y sus casas, 199 cadáveres de habitantes del barrio Villa Tina fue un desastre. No solamente los grandes deslizamientos pueden catalogarse como catastróficos, muchos pequeños por pueden provocar daños de igual magnitud o exceder el impacto de un solo gran deslizamiento. Los deslizamientos, sin importar su tamaño, pueden ser capaces de causar daños significativos y pérdidas de vida. En ello el factor fundamental es la roca o el suelo que compone la estructura del talud o la ladera.

Dentro de los pasos más importantes para identificar las áreas relativamente susceptibles a deslizamientos y evaluar los deslizamientos es: conocer los tipos de rocas y suelos del terreno y qué tipos de actividades de desarrollo socio económicas están planificadas o desarrolladas en estos terrenos. Los cambios en el medio geológico (naturales o antropicos) pueden afectar la susceptibilidad de los terrenos y provocar deslizamientos. Tres factores físico geológicos - la historia, la calidad de las pendientes y las rocas firmes - componen los elementos ingeniero geológicos para evaluar el peligro de deslizamientos. Además, es necesario añadir otro factor el hidrológico que permita conocer el trabajo que las aguas subterráneas en las rocas y que juegan un papel clave en la ocurrencia de deslizamientos.

Los movimientos de ladera constituyen un riesgo geológico que debe tenerse en cuenta en el ordenamiento territorial y la planificación física del territorio. En la actualidad no es posible la predicción de dónde y cuándo han de ocurrir los deslizamientos, aún con la mejor información disponible. Sin embargo, es posible identificar áreas susceptibles a deslizamiento y evaluar estos riesgos. Este artículo nos ha permitido analizar un componente básico de la susceptibilidad a los deslizamientos: las rocas como fundamento de los taludes y laderas y los diferentes tipos de deslizamientos. Todo esto permitirá tener un conocimiento práctico de los términos, conceptos y de las importantes consideraciones relacionadas con deslizamientos y la evaluación de los peligros y riesgos de los movimientos de masas en laderas y taludes. La mejor herramienta para reducir los riesgos por deslizamientos es el conocimiento del comportamiento geomecánico y geotécnico de las rocas, que precisa la existencia del fenómeno geológico peligroso, de la evaluación de la peligrosidad y la adopción de medidas para mitigar los efectos.

Los factores ingeniero geológico que influyen en la estabilidad de las laderas se pueden separar en: factores internos y externos. Los factores internos están relacionados con los diferentes tipos de rocas y suelos que dan lugar a los diferentes tipos de deslizamiento. Los indicadores claves son los relativos a la composición, estado y propiedades físicas, acuíferas y mecánicas del material. Las primeras incluyen parámetros como la litología, textura (granulometría, cementación), consolidación y espesor de los materiales y parámetros estructurales relativos a planos de estratificación y de debilidad (diaclasas, fallas y fracturas). En el segundo grupo encontramos los parámetros que caracterizan el estado físico, acuífera y mecánico del material rocoso o suelo. En los factores externos podemos encontrar las condicionales morfológicas como la pendiente de la ladera y su disposición respecto a discontinuidades geológicas y la orientación, y los factores de tipo ambiental como cambios estacionales de temperatura y tipo y cambios en la vegetación. La pendiente del terreno así como la morfología propia de la ladera es un factor y condicionante previo a partir del cual el



resto de factores se combinarán influyendo en la estabilidad. Los factores externos actúan sobre el material y dan lugar a modificaciones en las condiciones iniciales de las laderas, provocando o desencadenando las roturas debido a las variaciones que ejercen en el estado de equilibrio de aquéllas. Tres tipos de acciones se incluyen aquí: la infiltración de agua en el terreno, las vibraciones y las modificaciones antrópicas. La *infiltración de agua* provoca el aumento de la presión intersticial disminuyendo la resistencia de los materiales.

La relación entre ocurrencia de deslizamientos y períodos lluviosos o de deshielo es bien conocida. Las variaciones del nivel de agua subterránea pueden ser debidas a intensas precipitaciones, intervenciones humanas, etc. Las *vibraciones*, por otra parte, provocan aceleraciones en el terreno favoreciendo la rotura y la licuefacción. Éstas pueden ser debidas a movimientos sísmicos naturales o inducidos por el hombre como explosiones mineras o por obras públicas. La sacudida debida a terremotos naturales es una de los principales agentes que generan deslizamientos siendo capaces, en el caso de los terremotos más grandes, de desencadenar miles de deslizamientos a lo largo de enormes áreas. Finalmente, las *actividades humanas* alteran el equilibrio de las laderas debido a cargas estáticas provocadas por construcciones de edificios, construcciones de taludes para vías de comunicación, explotaciones mineras y construcciones de presas.



Bibliografía.

- Almaguer Y. 1998. Evaluación ingeniero geológica e hidrogeológica del yacimiento Punta Gorda. Trabajo de Diploma. P. 100. Dpto. geología, ISMM.,
- Barton N. 1976. The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rocks Mechanics and Mining Sciences*, **13(9)**:255–279.
- Bieniawski Z. T. 1967. Stability concept of brittle fracture propagation in rock. *Engineering Geology an International Journal*, **2(3)**:149–162.
- Corominas J. (1996): Litologías inestables. Monografía. SEG: 3. p: 81-96-
- Guardado R. y Almaguer Y. (2001): Análisis de peligrosidad por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa. Revista Minería y Geología.
- Guardado R. y Y. Almaguer 2001.: Evaluación de riegos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín. *Minería y Geología*. XVIII (1): 1-12,
- Guardado R; C. De Miguel; Y. Almaguer; J. Blanco; A. Rodríguez; B. Riverón; J. Batista 1998.: Evaluación ingeniero geológica e hidrogeológica del yacimiento Punta Gorda. Informe de Investigación. Archivo de la Empresa Comandante Che Guevara, Moa.
- Guardado R. 1986. Ingeniería Geológica, Ingeniería Petrológica. Editorial Pueblo y Educación La Habana Cuba. 2da edición 356 pg.
- Hock E., Marinos P., Benissi M. 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environments*, **57(2)**:151–160.
- Hoexter D. F., Holzhausen G., Soto A. E. 1978. A method of evaluating the relative stability of ground for hillside development. *Engineering Geology an International Journal*, **12(4)**:319–336.
- Hutchinson, J.N., and Kogan, E. "The Mayunmarca Landslide of 25 abril 1974" in UNESCO Serial No. 3124/RMO.RD/SCE (Paris: UNESCO, February, 1975).
- Instituto Tecnológico Geo Minero de España. *Manual de ingeniería de taludes*. 2 ed. Madrid. Editora Gráfica Monterreina, SA. 1991. p. 466.
- Johnson K. A. and Sitar N. (1990): Hidrologic condition leading to debris flow initiation. Part I and II. *Canadian Geotechnical Journal*. V: 77, p: 789-801.