

**CARACTERIZACION INGENIERO GEOLÓGICA DEL PERFIL DE
METEORIZACION DE ROCAS ULTRABASICAS SERPENTINIZADAS
EN EL TERRITORIO DE MOA, CUBA**

*Engineering geological characterization of the weathering profile of the
residual lateritic soils as element of risk for landslide in the territory of Moa,
Cuba*

Yuri ALMAGUER CARMENATES¹, Rafael GUARDADO LACABA

(1) Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Email: yalmaguer@ismm.edu.cu

RESUMEN- Las cortezas de meteorización desarrolladas sobre rocas ultrabásicas serpentinizadas en la región de Moa han sido ampliamente caracterizadas desde el punto de vista mineralógico y geoquímico, no siendo así respecto de su comportamiento ingeniero geológico, el cual constituye un elemento fundamental para emprender cualquier evaluación de riesgos asociados a movimientos de masas. La presente investigación abarcó las cortezas de tipo residual sobre las cuales se aplicaron los métodos geomecánicos tradicionalmente utilizados para caracterizar el comportamiento ingeniero geológico de un macizo. Se realizó la descripción visual de los diferentes horizontes lateríticos, y se aplicaron índices relacionados con las propiedades físico- mecánicas, estructurales y texturales tales como el índice de microfractura y micropetrográfico, índice de calidad del macizo rocoso (RQD) e índice de alteración unificado. Como resultado se presenta una propuesta de clasificación ingeniero geológica del perfil en función del grado de meteorización, el cual se definió en una escala de I a V a partir de los valores típicos de las propiedades físico mecánicas, RQD, relación porcentual roca/suelo y otros dos elementos relacionados con el modo de rotura de taludes y laderas y la tipología de deslizamiento.

Palabras clave: corteza de meteorización, movimientos de masas, riesgo por deslizamiento.

ABSTRACT-The weathering crust developed on serpentine ultrabasic rocks in the region of Moa have been broadly characterized from the geochemical and mineralogical point of view, not being this way regarding their behavior geologic engineer, which constitutes a fundamental element to undertake any evaluation of risks associated to landslide. The present investigation embraced the residual crust on which the geomechanic methods were applied traditionally used to characterize the behavior geologic engineer of a rocks. It was carried out the visual description of the different lateritic horizons, and indexes related with the physcal, mechanical, structural and textural properties such as the microfracture and micropetrographic, rock quality designation of rock (RQD) and unified alteration index

were applied. As a result a proposal is made of engineering geological classification of the weathering profile in function of the weathering grade, the which it was defined in a scale from I to V starting from the typical values of the properties physical and mechanical, RQD, relationship percentage rock/soil and other two elements related to the way of breakage of slope and the typology of most common sliding for each weathering grade.

Key words: weathering profile, landslide, risk.

INTRODUCCIÓN

Las cortezas de meteorización desarrolladas sobre rocas ultrabásicas serpentinizadas en la región de Moa han sido ampliamente caracterizadas desde el punto de vista mineralógico y geoquímico, no siendo así respecto de su comportamiento ingeniero geológico, el cual constituye un elemento fundamental para emprender cualquier evaluación de riesgos asociados a movimientos de masas.

El análisis de riesgo por movimientos de masas en los taludes y laderas en el territorio de Moa esta relacionado con el tipo de suelo, así como los mecanismos que gobiernan los tipos de movimientos (Guardado y Almaguer, 2001). Una incorrecta identificación del mecanismo de rotura puede hacer inútil y a veces contra producentes las soluciones estabilizadoras y los análisis de riesgos.

Existen varias clasificaciones propuestas a nivel internacional por varios autores (González de Vallejo et al., 2002) y para diferentes tipos litológicos dentro de los cuales destacan Love (1951) y Little (1961) clasificaron las rocas ígneas en seis grados: I roca sana, II algo alterada, III moderadamente alterada, IV altamente alterada, V completamente alterada y VI suelo. Vargas (1951) propone para rocas ígneas, basálticas y areniscas, cuatro grados: roca sana, capas de rocas desintegradas, suelo residual joven y suelo residual. Sowers (1954, 1963) plantea otra clasificación para rocas ígneas y metamórficas dividiéndolas en zonas de alteración: roca inalterada, zona parcialmente alterada, zona intermedia y zona superior. Asimismo Chandler (1969) presenta para la corteza de meteorización desarrollada sobre margas y limolitas una clasificación en tres grupos principales: roca inalterada, parcialmente alterada y completamente alterada. El Grupo de Ingenieros de la Sociedad Geológica (Geological Society Engineering Group) (1970) expuso para rocas ígneas una clasificación con seis grados de meteorización: IA roca sana, IB muy poco alterada, II débilmente alterada, III moderadamente alterada, IV altamente alterada, V completamente alterada y VI suelo residual.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la corteza de meteorización desarrollada sobre rocas ultrabásicas serpentinizadas teniendo en cuenta indicadores ingeniero

geológicos sobre la base de los trabajos de campo y la aplicación de algunos índices de composición, estado, y propiedades físico- mecánicas, el comportamiento en el perfil según la porosidad, humedad y el índice de plasticidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de la investigación se ubica en el extremo oriental de la provincia de Holguín. El territorio se encuentra enclavado en el grupo orográfico Sagua-Baracoa, lo cual hace que el relieve sea predominantemente montañoso, principalmente hacia el sur, donde es más accidentado en la Sierra de Moa con dirección submeridional. Hacia el norte el relieve se hace más suave con cotas que oscilan entre 40 y 50 m como máximo, disminuyendo gradualmente hacia la costa. El clima es tropical con abundantes precipitaciones.

Geológicamente predominan las rocas del complejo ultramáfico, caracterizado petrológicamente por harzburgitas y, en menor medida, dunitas, dunitas plagioclásicas, wherlitas, lherzolitas, y piroxenitas. Aparecen además cumulos de gabros incluidos en el complejo ultramáfico (Adamovich et al., 1962; Andó et al., 1989; Blanco et al., 1994).

Metodología de evaluación de las rocas meteorizadas

El estudio del proceso de meteorización desde el punto de vista geotécnico se basó en las metodologías propuestas por GSE (1977); Barton (1978); Zhao (1994a, 1994b); Kilic (1995), las cuales incluyen trabajos de reconocimiento, descripción y estimación de índices en el campo, tales como el color de la roca, humedad, dureza relativa, grado de alteración, características estructurales, relación roca/suelo, índice de espaciamiento de las fracturas e índice RQD, además incluyen trabajos de laboratorio donde se determinan las propiedades resistentes de las rocas y suelos, velocidades de las ondas longitudinales a través de las muestras de rocas y la descripción microscópica de los elementos de fábricas presentes en las mismas.

La descripción del macizo y del material rocoso fue esencialmente por reconocimiento visual usando la terminología siguiente:

- Grado de decoloración.
- Grado de descomposición química.
- Grado de desintegración física.

- Presencia de la fábrica original.
- Relación roca suelo.

Además del reconocimiento visual de algunas características del macizo rocoso, se emplearon los índices físico-mecánicos (Bieniawski, 1967, 1974, 1988; Baynes et al., 1978; Bebáis, 1985; Zhao, 1994 a y b; Kilic 1995) siguientes:

- Índice de resistencia de la roca (axial).
- Elasticidad del material rocoso.
- Velocidad sónica.
- Porosidad de la roca intacta.
- Índice de espaciamiento de las fracturas e índice de calidad de la roca (RQD).
- Permeabilidad relativa del macizo rocoso.
- Índice de microfractura y micropetrográfico.

La descripción ingenieril del fenómeno de meteorización se hizo a partir de los índices anteriormente descritos. Los mismos se emplearon en dependencia de su efectividad para determinar los rasgos característicos de cada grado de meteorización (tabla 1), de esta manera tenemos índices tales como resistencia axial y permeabilidad, que brindan criterios para analizar todos los grados de meteorización, y se tienen otros como el RQD, que solo se puede usar hasta el grado altamente meteorizado, porque en el grado superior la roca en estado de suelo es imposible aplicarlo.

A partir de los índices descritos, se aplicó el índice de alteración unificado (K_c), propuesto por Kilic R. (1995), el cual depende de la velocidad de las ondas longitudinales a través de la roca, de la resistencia uniaxial y de la absorción de agua en por ciento (%) en peso. La siguiente expresión es un ejemplo de cómo se obtiene el valor de la alteración con respecto de las propiedades analizadas:

$$K = 1 - a/i$$

donde:

K : alteración con respecto de la velocidad de las ondas, a la resistencia uniaxial y a la absorción de agua.

i : velocidad de las ondas, resistencia uniaxial y absorción de agua de la roca fresca.

a : velocidad de las ondas, resistencia uniaxial y absorción de agua de la roca alterada.

De esta manera el índice unificado de alteración se obtiene de acuerdo con la expresión:

$$K_C = K_V * K_{\sigma u} * K_A$$

donde:

K_V : alteración de la roca con respecto al paso de la velocidad de las ondas sísmicas P.

$K_{\sigma u}$: alteración de la roca con respecto de la carga unitaria.

K_A : alteración de la roca con respecto de la absorción de agua dado por la humedad de la roca.

En la tabla 2 se representan los valores obtenidos de los índices de alteración **K_C** , **K_V** , **$K_{\sigma u}$** y **K_A** para clasificar el grado de meteorización de las rocas serpentinizadas.

RESULTADOS

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 (tabla 3). 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 y transformación de los minerales iniciales de la roca en minerales más estables en las condiciones exógenas. En la figura 1 se muestra la relación entre estos dos índices y el grado de meteorización.

Comportamiento de las propiedades físico mecánicas en la corteza laterítica

Para el análisis del perfil de meteorización fue necesario establecer el estado físico de los diferentes horizontes ingeniero geológicos, así como su comportamiento mecánico, para ello nos auxiliamos de las siguientes propiedades:

1. Propiedades físicas:
 - humedad (%).
 - Peso (KN/m^3).
 - Índice de poros.
 - Índice de plasticidad.

2. propiedades mecánicas:
 - ángulo de fricción ($^{\circ}$).

- Cohesión (KPa).

Como se observa en la figura 2, existen comportamientos típicos de las propiedades para cada grado de meteorización. Tenemos que la humedad y el peso tienen valores medios el grado de meteorización V, a medida que descendemos en el perfil, grados IV, III y II, estas propiedades aumentan con el aumento del porcentaje de minerales arcillosos, los cuales tienen la capacidad de contener mayores cantidades de agua transmitiéndola muy lentamente, de manera que durante todo el año estos horizontes se mantienen con altos contenidos de humedad.

En cuanto al índice de poros se tiene que en el grado de meteorización V se comporta con valores promedios de 26. A medida que descendemos en el corte comienza el aumento hasta valores de 32, esto viene dado por el aumento del contenido de minerales arcillosos, sin embargo existe un grado de meteorización intermedio (III) en el cual disminuye ligeramente. El índice de plasticidad desde los grados I al IV se mantiene prácticamente constante con valores aproximadamente entre 27 y 30, solo existe un notable cambio en el grado V, suelo residual, donde hay una disminución hasta 12 debido a la disminución del contenido de material arcilloso. La cohesión se mantiene prácticamente igual en los grados II, III y V, con valores que varían entre 95 y 100 KPa, sin embargo en el grado IV disminuye hasta valores de 68 KPa debido al parecer por el aumento del contenido de humedad retenido por las arcillas. El ángulo de fricción se presenta con los mayores valores en los grados III y V en rangos de 28° a 32°, mientras que en los grados II y IV disminuyen hasta 13°.

Relacionado con la granulometría y el índice de plasticidad de los diferentes grados de meteorización tenemos que en el grado V el material es predominantemente areno-gravoso con bajo porcentaje de partículas arcillosas y baja plasticidad. Entre los grados IV y II hay predominio de material arcilloso (87%) sobre el areno gravoso. En algunas ocasiones presenta un comportamiento casi homogéneo entre todos los componentes granulométricos en los grados III y IV. En relación con los límites de Atterberg son materiales de alta plasticidad.

Otra característica determinada a partir de los límites de Atterberg es la consistencia relativa, la cual permite evaluar las condiciones de soporte de los materiales que componen cada grado de meteorización. De los resultados tenemos que en el grado V los materiales presentan baja consistencia en estado saturado ($C_r = -0.5$) donde el porcentaje de humedad ($W = 48\%$) sobrepasa el límite líquido ($LL = 42$); en estado no saturado la consistencia adquiere valores mayores ($C_r = 0.85$). En los grados III y IV la consistencia presenta valores positivos pero

siempre menores que 1, teniendo para estado saturado valores de 0.21 y no saturado de 0.7. En el grado II vuelve a disminuir la consistencia tanto en estado saturado ($CR = -0.85$) como no saturado ($Cr = -0.59$), manteniéndose los porcentos de humedad por encima del límite líquido de los materiales, siendo esto un elemento a considerar durante la construcción de taludes para laboreos mineros o para cualquier construcción civil.

En la figura 3 se muestra un gráfico de tensión deformación para los diferentes grados de meteorización. En los grados menos meteorizados la roca presenta mayor resistencia, sin embargo manifiestan menos deformación plástica. A medida que aumenta la meteorización y aumenta el contenido de minerales arcillosos, los horizontes se van haciendo más plásticos y menos resistentes.

Sistema de clasificación propuesto para el perfil de meteorización de las rocas ultrabásicas serpentinizadas

De la aplicación conjunta de los diferentes métodos resultó un sistema de clasificación de las rocas serpentínicas meteorizadas (tabla 4), el cual introduce una descripción ingenieril de la meteorización. La descripción y clasificación del material rocoso meteorizado 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, apoyados con observaciones microscópicas. El sistema propuesto está basado en la identificación de varios grados de meteorización y en la proporción volumétrica de estos materiales con respecto de las discontinuidades.

Un rasgo importante de la clasificación es que se muestra para cada clase el modo de rotura de taludes y laderas asociado a estas. De esta manera se tienen modos de fallo no estructural en el horizonte más meteorizado (grado V), y en los demás grados se observa la influencia del control estructural fundamentalmente del agrietamiento, clivaje de agrietamiento y esquistosidad en zonas de intenso cizallamiento; en los grados II y IV la roca con agrietamiento espaciado rompe 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 donde se manifiestan movimientos circulares.

CONCLUSIONES

Los perfiles de rocas ultrabásicas en zonas tropicales no siempre presentan una uniformidad en su comportamiento geotécnico, tal es el caso de las rocas presentes en el territorio de Moa. Precisamente a partir del complejo de métodos de investigación ingeniero geológica para el estudio del proceso de meteorización se llega a la conclusión de que en el perfil laterítico desde el punto de vista ingeniero geológico existen cinco horizontes relacionados con cinco grados de meteorización en los cuales hay un comportamiento típico de las propiedades físicas y mecánicas, microagrietamiento y desarrollo tipológico de deslizamientos.

De esta manera tenemos que en los grados I al IV el mecanismo de rotura de taludes y laderas tiene un control estructural, en los cuales la corteza mantiene la estructura inicial de la roca dura, desarrollándose deslizamientos planares, en cuña, vuelcos y combinaciones de estos, en ocasiones en grado de meteorización I, cuando la roca esta muy tectonizada, en zonas de cizallamiento intenso, con pequeños espaciamientos entre grietas, se pueden manifestar deslizamientos rotacionales.

En el grado V el mecanismo de fallo no es estructural y la tipología de los movimientos son controladas por la propiedades físicas y mecánicas del suelo, de esta forma se manifiestan movimientos rotacionales, sin embargo hay ocasiones en los que se desarrollan grietas de tracción paralelas a los bordes de taludes de altas pendientes a través de las cuales se infiltran las aguas superficiales aumentando las presiones dentro de las mismas, provocando movimientos en forma de vuelcos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamovich A. y V. Chejovich, 1962: "Principales características de la geología y minerales útiles de la región norte de la provincia de oriente". Revista Tecnológica, Cuba.
- Almaguer Y. 1998: Evaluación ingeniero geológica e hidrogeológica del yacimiento Punta Gorda. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. (Trabajo de Diploma). 100.
- Andó J., K. Miklos y Y. Ríos, 1989: "Caracterización general de la asociación ofiolítica de la zona Holguín - Moa y el papel de las ofiolitas en el desarrollo estructural de Cuba". Revista Minería y Geología, Cuba, Vol. 7, No.1.
- Bieniawski, Z. T. 1988: "The rock mass rating system (Geomechanics classification) in engineering practice. ASTM/STP 984. Filadelfia. 17-31.
- Blanco J. y J. Proenza, 1994: "Terrenos geológicos de Cuba Oriental". Revista Minería y Geología, Cuba, vol XVIII (2): 25-31.

- Guardado R. y Y. Almaguer, 2001: "Evaluación de riegos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín". *Minería y Geología, Cuba*, vol 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. Empresa Comandante Che Guevara. Informe de Investigación., Moa, 300.
- Kilic R., 1995: "Geomechanical properties of the ofiolites (Cankiri/Turkey) and alteration degree of diabase". *Bulletin of the international association of engineering geology, Francia*. vol (51): 63-69.
- Report by the geological society engineering, 1977: "The description of rock masses for engineering purposes". *The quarterly journal of engineering geology, Great Britain*, vol 10 (4): 355-388.
- Zhao J., B. B. Broms, Y. Zhou and V. Choa, 1994a: "A study of the weathering of the Bukit Timah granite. Part A: Review, field observations and geophysical survey". *Bulletin of the international association of engineering geology, Francia*, vol (49): 98-106.
- , 1994b: A study of the weathering of the Bukit Timah granite. Part B: Field and laboratory investigations. *Bulletin of the international association of engineering geology, Francia*, vol (50): 106-111.

FIGURAS Y TABLAS

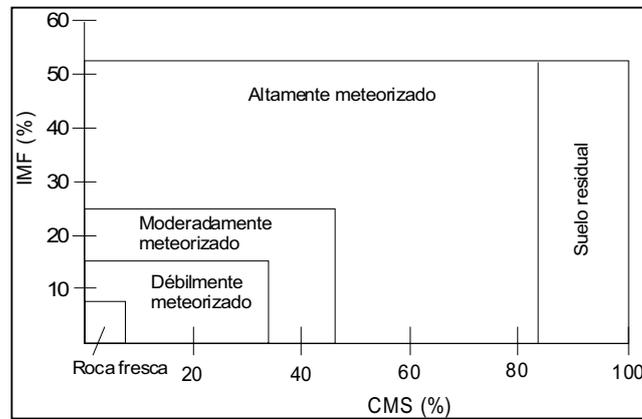


Figura 1. Relación entre el contenido de minerales secundarios y el índice de microfractura para cada grado de meteorización.

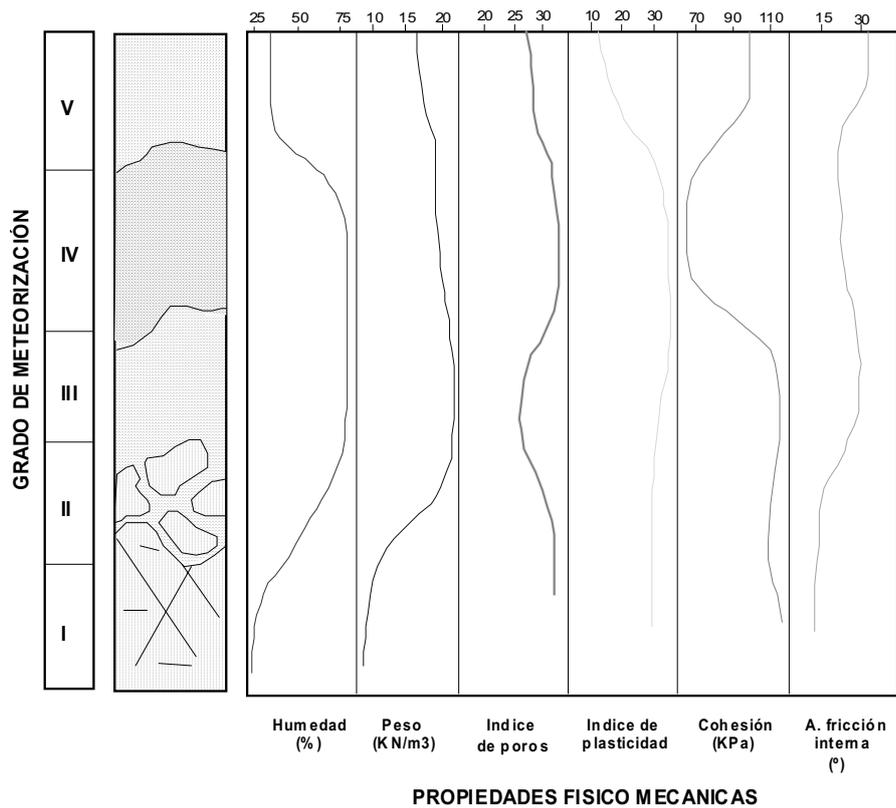


Figura 2. Comportamiento de las propiedades físico-mecánicas en los diferentes grados de meteorización de rocas ultrabásicas serpentinizadas.

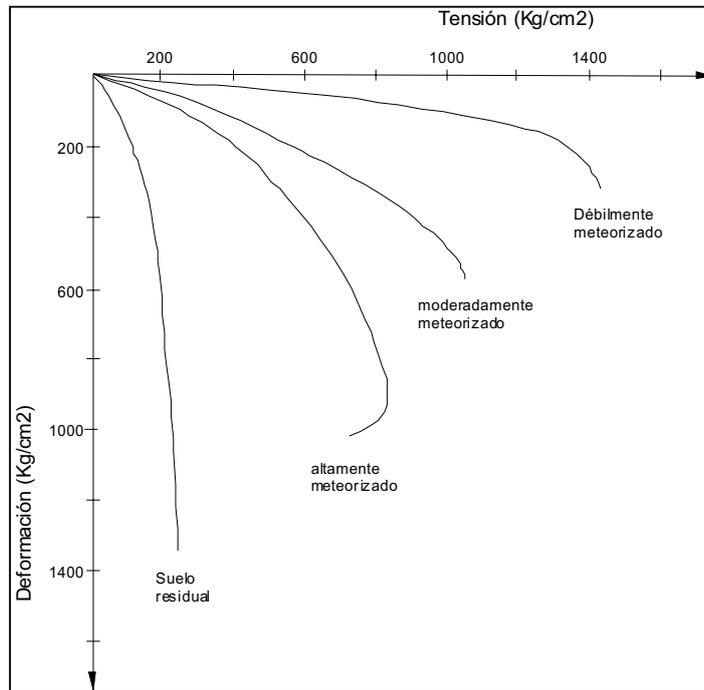


Figura 3. Gráfico de tensión-deformación para los diferentes grados de meteorización de las rocas ultrabásicas serpentinizadas.

Tabla 1. Métodos utilizados para definir los grados de meteorización de las rocas serpentinizadas.

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

Clase	Descripción	Kc	Kv	$K\sigma c$	Ka
I	Fresco	0	0	0	0
II	Bajo	0,000027	0,018	0,15	0,01
III	Moderado	0,04455	0,33	0,25	0,54
IV	Alto	6,4722	0,42	0,67	23
V	Muy alto	28,728	0,72	0,95	42

Tabla 2. Clasificación de las rocas de acuerdo con los índices de alteración obtenidos.

Tabla 3. . Resultados de la aplicación de los microíndices en el perfil de meteorización de rocas ultrabásicas seperntinizadas.

Término	Roca fresca	Débilmente meteorizada	Moderadamente meteorizada	Altamente meteorizada	Suelo residual
Grado	I	II	III	IV	V
Descripción	No hay signos visibles de material meteorizado. La roca puede tener algunas grietas manchadas de óxidos de Fe.	Se presentan manchas en las superficies de las discontinuidades. La meteorización se manifiesta de manera desigual a través de la fábrica de la roca. La resistencia es alrededor del 50 % de la roca fresca. Mas del 90% es roca.	La roca está manchada de limonita. Posee alguna resistencia, no pueden ser rotos grandes fragmentos con la mano. La roca fresca o decolorada se presenta como una estructura discontinua o en núcleos rocosos. Entre 50% –85% es roca	La roca está tan debilitada por la meteorización que pueden ser separados o desintegrados grandes fragmentos con la mano. Se puede excavar con la mano si está húmedo. Se pueden obtener núcleos perforando cuidadosamente, en algunos casos no se pueden recuperar. Resistencia muy baja comparada con la roca fresca. Menos del 10% es roca.	La textura de la roca no es reconocible. Puede ser fácilmente excavado con la mano. Resistencia muy baja comparada con la roca fresca. Las capas superficiales contienen raíces de plantas y humus.
Peso específico (KN/m³)	5.2	S: 8.4 H: 15.5	S: 12.28 H: 18.47	S: 8.53 H: 16.5	S: 15 H: 20
Humedad (%)	23	85.3	70	69	48
Cohesión (KPa)	-	102	106	71.01	95
Angulo de fricción (°)	25.5	16	26	17	25
Índice de plasticidad	-	26	28	28	12
RQD (%)	90–100	70-90	30-70	0 - 30	0
Roca/suelo (% roca)	95-100	85-95	55-85	0-55	0
Resistencia	Muy alta	Muy alta a 45-55 %	25 % de la resistencia de la roca fresca	12 % de la	Extremadamente baja

		de la resistencia de la roca fresca		resistencia de la roca fresca	
Modo de fallo	Estructural. Controlado por discontinuidades (grietas en las rocas serpentinizadas, clivaje de agrietamiento y esquistosidad en zonas de cizallamiento)			Estructural Material controlado por discontinuidades (clivaje de agrietamiento y esquistosidad en zonas de cizallamiento) Estructural Material controlado por grietas relícticas	No estructural No hay control estructural
Tipo de fallo	Agrietamiento espaciado: Planar, cuña, vuelco, combinados.	Agrietamiento cerrado: Circular, combinados (circular/cuña, planar/cuña, planar /vuelco)		Fallos planares y en cuña a través de discontinuidades. Circular con agrietamiento estrechamente espaciado. Circular Cuña a través de grietas relícticas. Combinados	Erosión No circular Circular