

Cuando la meteorización es incipiente los bloques son grandes y controlan en parte el comportamiento del talud, pero a medida que se hace más intensa el factor más importante es la resistencia del suelo meteorizado que actúa como matriz de los bloques independientes.

Minerales resultantes

Caolinita

Los suelos con caolinita como mineral de arcilla presentan un comportamiento normal en los ensayos, en términos de baja a media plasticidad y permeabilidad. El efecto del aumento de humedad sobre las propiedades del suelo generalmente, no es importante.

Montmorillonita

Los materiales con contenidos apreciables de Montmorillonita poseen muy alta plasticidad y baja permeabilidad. El efecto del aumento de humedad puede resultar en una disminución importante de la resistencia al cortante. La Montmorillonita tiene un alto nivel de reacción con el cemento y la cal.

Aloisita

Al aumentar la humedad de una aloisita puede disminuir la resistencia al cortante en forma apreciable.

Sesquióxidos

Los sesquióxidos generalmente, cementan las partículas y su presencia equivale a una reducción en la plasticidad. Los óxidos de hierro y aluminio se acumulan como consecuencia de una cadena de procesos químicos y de lavado interno.

La identificación del mineral de arcilla presente es muy importante para la valoración del comportamiento del suelo.

Existen varios métodos para la identificación del mineral de arcilla:

a. Análisis termogravimétrico

Identifica los minerales con base en los cambios que ocurren al ocurrir deshidratación en un rango de temperaturas. Es generalmente, un método impreciso con excepción de algunos minerales que poseen un comportamiento termogravimétrico muy claro.

b. Escaneado con Electromicroscopio

Amplificación de un electro-microscopio, más de 3.000 veces. Revela detalles de la microestructura y puede deducirse la relativa abundancia de algunos minerales. Este método no permite conclusiones a menos que se utilice conjuntamente con otro sistema de identificación.

c. Microscopio óptico

Se deben incluir medidas de polarización. Es un técnica útil para identificar la abundancia relativa de ciertos minerales y definir la fábrica y textura.

d. Espectro de difracción de Rayos X

El método más utilizado es la difracción de rayos X, pero es apropiado solamente para minerales que poseen una cristalografía muy característica, y se requiere que la muestra analizada tenga un porcentaje alto del mineral para que se pueda identificar en el espectro su presencia. Se requieren técnicas especiales en suelos con cantidades significativas de hierro.

En todos los casos es conveniente utilizar por lo menos dos formas de identificación que permitan comprobar los resultados.

Efecto del clima

El clima ejerce una profunda influencia en la meteorización, especialmente la humedad relativa y la temperatura.

Las reacciones químicas prácticamente se duplican cada aumento de 10°C de temperatura. La influencia de la temperatura y la humedad en la descomposición de la roca en Sudafrica ha sido relacionada por Weinert's (1974) por medio de un índice climático:

$$N = \frac{12EJ}{Pa}$$

Donde:

EJ: evaporación en el mes de Enero, el mes más cálido.

Pa = Lluvia anual.

El valor de $N = 5$ indica la transición de las condiciones cálida subhúmedas, en las cuales la meteorización química predomina y la condición caliente semiárida en las cuales predominan los fenómenos físicos.

Donde N es menor de 5 se deben esperar grandes espesores de suelo residual.

En las zonas tropicales y subtropicales donde la superficie de la tierra está cubierta por una vegetación densa que facilita la infiltración del agua, por aumento de los tiempos de retención del agua y a su vez son sujetas a lluvias fuertes, pueden aparecer profundidades de meteorización de varios cientos de metros.

En climas secos o áridos la meteorización química es subsuperficial, lenta y predominan los fenómenos de meteorización de tipo mecánico, igualmente esto ocurre en zonas tropicales montañosas, con poca vegetación, donde las pendientes altas del terreno no facilitan la infiltración del agua lluvia.

Otros factores que afectan el proceso de meteorización

La frecuencia o espaciamiento de las discontinuidades afecta el proceso de meteorización y en los sitios en los cuales el espaciamiento de las discontinuidades es mayor, pueden aparecer masas de materiales no descompuestos como es el caso de los "Tors" o masas de granito sólido (Brand- 1982) (Figura 6.4).

Las plantas y organismos vivos, tales como bacterias ayudan en el proceso de meteorización química. Otros elementos ambientales pueden incidir en la meteorización, pero sobre todo las condiciones de humedad y temperatura.

La topografía es un factor muy importante. En zonas de alta montaña predominan los procesos de meteorización mecánica, especialmente por acción del alivio a descargue de geopresiones, los cambios de temperatura, los procesos de humedecimiento y secado y la cristalización de materiales.

La meteorización depende de la topografía del terreno, siendo mayor en los sitios de menor pendiente y la profundidad de la meteorización aumenta hacia abajo del talud.

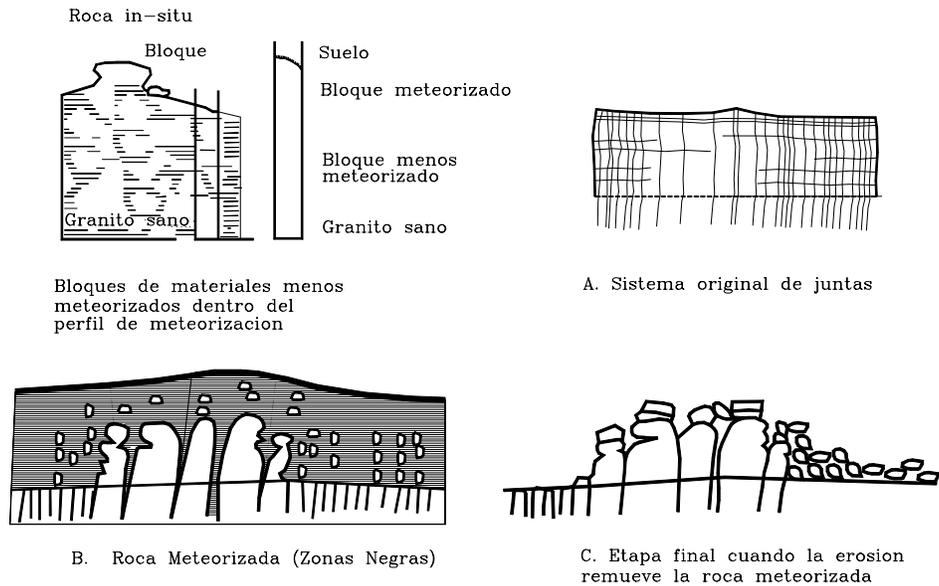


Figura 6.4 Etapas en la formación de torres (Tors) de granito bajo condiciones húmedas de meteorización en un medio tropical.

Medición del grado de Meteorización

El grado de meteorización puede medirse de varias formas:

Arenosidad

La forma más sencilla es utilizando un cuchillo o una puntilla y medir la facilidad con que se puede cortar o el índice de arenosidad (Tabla 6.3.).

Tabla 6.3 Medición del grado de descomposición de feldespatos mediante el ensayo de arenosidad.

Grado de Descomposición	Términos de arenosidad	Modo de reconocimiento
Fresco	Duro	No puede ser cortado por un cuchillo, ni gravado por una puntilla.
Moderado	Arenoso	Puede ser cortado por un cuchillo o gravado por una puntilla.
Alto	Deleznable	Puede ser desmoronado a fragmentos de limo con las manos.
Completo	Blando	Puede ser moldeado fácilmente con las manos.

Martillo de Schmidt

Una forma de evaluar en campo el grado de meteorización es utilizando el martillo de Schmidth. Este instrumento mide el rebote de un pistón metálico cargado con un resorte que se golpea contra la superficie de la roca. El rebote es un índice de la

resistencia a la compresión y corte y puede utilizarse para determinar el grado de meteorización, previa elaboración de una carta de calibración similar a las presentadas por Irfan y Powel (1985) y por Cascini y otros (1991) las cuales se muestran en la figura 6.5.

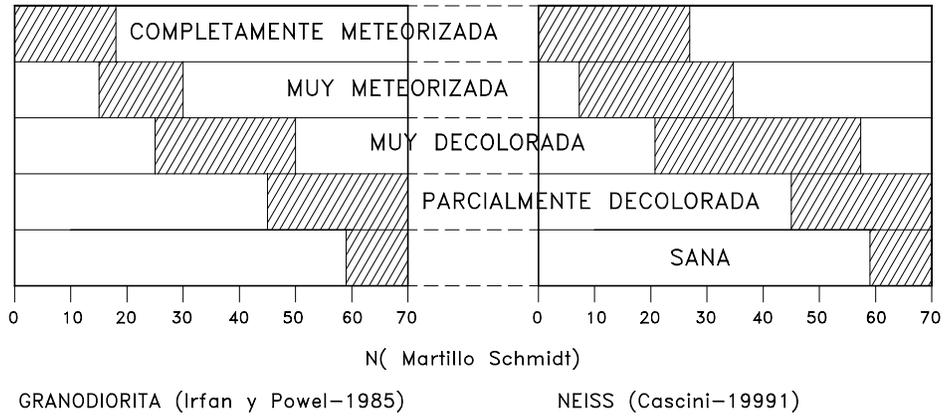


Figura 6.5 Relaciones entre el grado de meteorización y el índice de rebote del martillo de Schmidt.

Ensayo de penetración

Los ensayos de penetración estándar o penetración de cono pueden relacionarse con la meteorización en materiales blandos y se puede diferenciar el suelo propiamente dicho de la roca meteorizada. Sin embargo se requiere una calibración del sistema para cada formación, basada en un número grande de datos.

Índice Micropetrográfico

Otra forma de medir el grado de descomposición es utilizando el índice micropetrográfico en el cual, se determinan los porcentajes de materiales inalterados y alterados utilizando una magnificación de 100 veces, con un mínimo de tres secciones delgadas analizadas, y un mínimo de 90 puntos contados en cada caso (Irfan y Dearman - 1978).

$$\begin{aligned}
 \text{IMP} &= \frac{\% \text{ de materiales inalterados}}{\% \text{ de materiales alterados}} \\
 &= \frac{\% (\text{quarzo} + \text{feldespatos inalterados.} + \text{biotita inalterada.})}{\% (\text{minerales alterados} + \text{vacíos} + \text{microgrietas})}
 \end{aligned}$$

En la tabla 6.4 se muestra un trabajo realizado por Irfan (1988) en el cual se realizó un análisis micropetrográfico de un granito.

Textura

La textura puede revelar la orientación entre las partículas cementación y contacto entre ellas. La influencia de la textura en las propiedades ingenieriles de los suelos tropicales fue enunciada por Terzaghi describiendo la arcilla en una presa, sobre la base de que ella ocurría en grupos densos de partículas de arcilla cementados por óxido de hierro. Esta afirmación ha sido ratificada por muchos autores a través de los años.

Arreglo elemental de partículas

Corresponde a la localización en el espacio de las partículas entre sí (Figura 6.6). Las partículas arcillosas pueden encontrarse en arreglos desordenados, paralelos o en racimos y las partículas granulares (Arenas y limos) en agrupaciones de partículas con los contactos limpios o cubiertos de otro material, generalmente de arcilla.

La mayoría de los suelos tropicales son susceptibles a descomposición física por la manipulación de los “terrones o racimos ” que se forman. El rompimiento de estos racimos dificulta la determinación exacta de sus propiedades físicas y complica el proceso de compactación en el campo.

Ensamble

El ensamble de las partículas corresponde a la forma como interactúan las partículas unas con respecto a las otras. El ensamble presupone la existencia de una matriz, la cual puede ser arcillosa o granular y se forma por la agregación o la unión de las partículas. La disolución y lavado de la matriz o las uniones y la cementación conducen al desarrollo de una estructura porosa. Este efecto es producto de la frecuente ocurrencia de lluvias y por esto es necesario analizar el efecto de las lluvias sobre los poros y uniones entre las partículas. El ensamble puede ser modificado por el flujo de corrientes de agua.

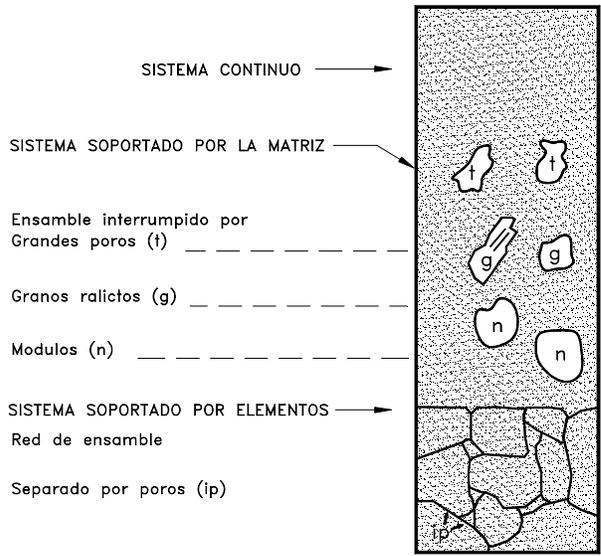


Figura 6.7 Sistemas de fábrica en un suelo residual.

Fábrica

La fábrica muestra la organización general de los grupos de partículas (Figura 6.7). El sistema de fábrica puede ser de tres formas:

1. Sistema continuo

En el cual la matriz y las partículas o elementos forman un todo homogéneo aunque existen uniones entre partículas estas no interrumpen la continuidad de la fábrica.

2. Sistema embebido por una matriz

El ensamble forma un elemento homogéneo pero es interrumpido por poros, granos grandes, relictos o nódulos de materiales diversos.

3. Sistema soportado por una red de bloques o terrones

En este caso aparecen varios elementos que se integran entre sí, separados por poros, pero es la microestructura del ensamble de estos elementos los que le dan soporte al material.

6.5 ESTRUCTURA DE LOS SUELOS RESIDUALES

Según Blight (1977) citando a Lumb, las juntas en la mayoría de las rocas ígneas y la estratificación en rocas sedimentarias permanecen en los suelos residuales. Igual cosa ocurre con la esquistocidad y la foliación de algunas rocas metamórficas.

1. Juntas o diaclasas

Las juntas juegan un papel importante en las fallas de materiales residuales. Si se encuentran abiertas actúan como conductores de agua y activadores de presiones de poro. Por lo general, se encuentran más abiertas en la superficie que a profundidad.

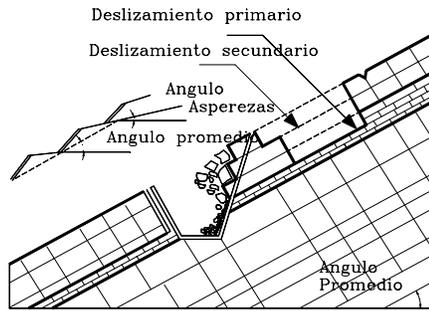
El agua al pasar a través de la junta produce meteorización de sus paredes, formando arena o arcilla que forma superficies de debilidad. Adicionalmente, el agua que viaja a lo largo de las juntas puede llevar arcilla en suspensión que es depositada en ellas y las discontinuidades se hacen muy peligrosas si se encuentran rellenas de arcilla.

Blight afirma que la resistencia a lo largo de una estructura heredada puede ser la mitad de la resistencia en el suelo residual intacto y cita casos en que la resistencia es de solamente 1/3 de la resistencia a través del suelo. Las superficies de falla pueden coincidir con una junta o puede comprender varias familias de juntas diferentes formando bloques deslizantes.

2. Foliaciones

Las foliaciones son superficies generalmente paralelas de baja cohesión y por las cuales las rocas se pueden partir. Estas son debidas principalmente, a efectos de metamorfismo y son conocidas como pizarrosidad, esquistosidad, foliación, etc. Este fenómeno produce direcciones de debilidad muy similares a diaclasas, pero son menos separadas y pueden inducir el desmoronamiento de los suelos al momento de moverse, produciéndose flujos secos del material desintegrado.

A. Buzamiento en la dirección del talud



B. Buzamiento en la dirección contraria al talud

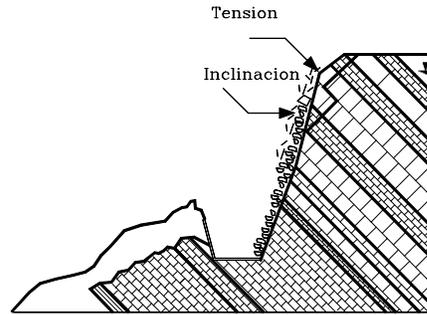


Figura 6.8 Efecto de las discontinuidades en la falla de los taludes.

3. Estratificación

La estratificación genera superficies de debilidad por cambio de material. Cuando los materiales a lado y lado de la estratificación son de propiedades mecánicas similares, trabajan en forma similar a una diaclasa pero cuando la diferencia de propiedades es grande, como en el caso de estratificación de areniscas y Lutitas, la situación se hace más compleja, produciéndose concentración de agua en la interfase y flujo dentro del material más permeable. Este fenómeno genera una zona de meteorización a partir del plano de estratificación que debilita esta superficie.

4. Fallas

Su influencia en los problemas de taludes en materiales residuales pueden definirse así: Producen una zona de debilidad varios metros a lado y lado y en el caso de fallas de gran magnitud, de varios centenares de metros en dirección normal a éstas. En algunos casos las fallas son verdaderas familias de fallas que parecen especies de diaclasamiento. El material fracturado a lado y lado de la falla puede producir zonas inestables dentro de la formación estable.

Los planos de falla a su vez pueden estar rellenos de arcilla o completamente meteorizados, formando superficies débiles muy peligrosas. Es común que un deslizamiento esté directamente relacionado con la presencia de una falla geológica.

5. Intrusiones

A veces los deslizamientos son generados por la presencia de intrusiones de materiales más permeables que traen su efecto en el régimen de aguas. Las diferencias en el grado de cristalización y el tamaño de los cristales también afectan la estabilidad de los taludes en rocas ígneas y metamórficas.

6.6 PROPIEDADES MECANICAS DE LOS SUELOS RESIDUALES.

Resistencia al cortante

La estabilidad de los suelos residuales muy meteorizados (grado VI en la clasificación de Hong Kong), se puede analizar utilizando las teorías tradicionales de la mecánica de suelos, con cierto grado de confiabilidad; sin embargo a medida que se profundiza en el perfil las propiedades de los materiales cambian sustancialmente. Las muestras de roca son difíciles de muestrear y las muestras de tamaño para ensayos de laboratorio generalmente, dan estimativos muy pobres de la resistencia al cortante y de la permeabilidad.

El caso más delicado de análisis es el de los saprolitos. Los saprolitos son generalmente, no saturados, muy débilmente cementados y muy heterogéneos, con varios sistemas de juntas heredadas (Mitchell y Sitar, 1982).

Vaughan (1988) explicó la relación entre la resistencia al cortante y la relación de vacíos en la siguiente forma:

- a. La resistencia derivada de la evolución del suelo y encontrada en equilibrio con el estado de esfuerzos, influencia el comportamiento del suelo y su dureza.
- b. La historia de esfuerzo durante la formación del suelo tiene muy poco efecto sobre las propiedades de los materiales.
- c. Los suelos tienen una variedad muy amplia de mineralogía y resistencia de los granos.
- d. Los suelos en el sitio tienen un rango muy amplio variable de relación de vacíos.

Las deformaciones pequeñas inducidas durante el muestreo pueden debilitar las uniones y disminuir la resistencia al cortante. Brand (1985) sugirió que los saprolitos a bajas presiones efectivas tienen resistencias más altas que las obtenidas en ensayos triaxiales con envolvente de falla de línea recta.

Variación de la resistencia al cortante

La cohesión y la fricción entre las partículas o bloques varían considerablemente de acuerdo al tipo de suelo, contenido de minerales, tamaño y forma de las partículas, humedad, presión de poros y la historia de la formación del material. Adicionalmente, cuando ha ocurrido anteriormente un movimiento, la cohesión y la fricción han disminuido especialmente, cerca de las superficies de falla o fractura.

La resistencia al cortante es generalmente, menor en el suelo que en el saprolito o en la roca, pero las formaciones residuales tienen generalmente, superficies de discontinuidad equivalentes a superficies de debilidad de baja resistencia que facilitan la posibilidad de movimientos. Es común que la resistencia al cortante sea menor a lo largo de las discontinuidades heredadas, que en la matriz del material residual y se reportan casos en los cuales la resistencia a lo largo de la discontinuidad puede ser muy pequeña, comparada con la resistencia a través del suelo en sí, especialmente cuando las discontinuidades se encuentran rellenas.

Según Massey y Pang (1988) el comportamiento y la resistencia al corte de los materiales son una función de:

- La naturaleza de la roca original.
- La mineralogía y microfábrica derivada de los procesos de meteorización física y química.
- El grado de saturación y los cambios inducidos por modificaciones del contenido de humedad.
- La presencia, orientación, espaciamiento, persistencia e imperfecciones de las discontinuidades heredadas, junto con la naturaleza de los rellenos o coberturas.
- La presencia, forma y distribución de material de roca menos meteorizada en forma de bloques o bandas dentro de la matriz más fuertemente meteorizada.

Tiene gran importancia en el comportamiento de un talud el efecto de la presión de poros a lo largo de contactos de materiales diferentes, zonas de mayor permeabilidad y discontinuidades heredadas.

La resistencia al corte disminuye por acción de dos efectos:

- La disminución de los esfuerzos efectivos de acuerdo al principio de Coulomb.
- La separación de las superficies a lado y lado de la discontinuidad, debidas a movimientos de compresión elastoplástica de los materiales, por acción de la fuerza diferencial generada por la presión de poros "preferencial" a lo largo de la discontinuidad. Al aumentar la presión de poros la discontinuidad tiende a separarse y la resistencia al corte disminuye (Figura 6.9).

De estudios realizados por el Autor, discontinuidades con ángulo de fricción para presiones efectivas de aproximadamente 30° se comportan en la práctica como si el ángulo de fricción fuera de menos de 15° al producirse presiones de poros "preferenciales" a lo largo de las discontinuidades de valores superiores a más de 3 metros de columna de agua.

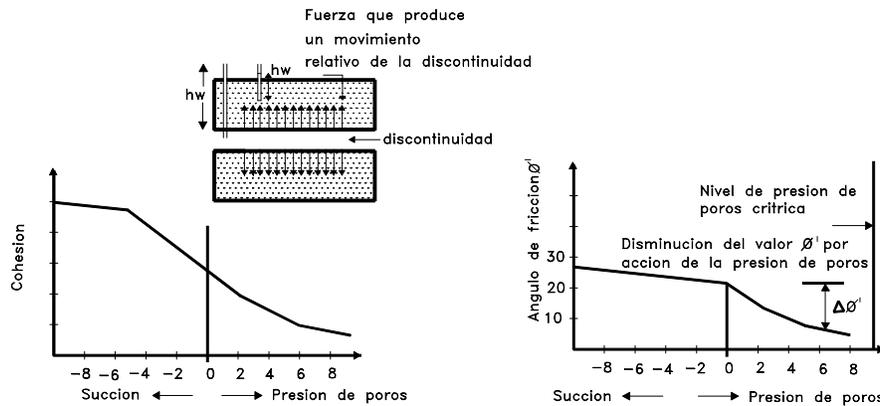


Figura 6.9 Variación de cohesión y el ángulo de fricción dentro de una discontinuidad por el aumento de la humedad y de la presión de poros.

La cohesión

La cohesión es una propiedad determinante en el comportamiento de un suelo residual. En suelos no saturados hay una cohesión aparente, la cual es el producto de las presiones negativas en el agua de poros, la cual desaparece por saturación, sin embargo

en muchos casos, la cohesión es debida a la cementación de productos precipitados (Sowers - 1985). La cohesión generalmente, no es continua a lo largo de una superficie y desaparece con frecuencia por la abertura de las discontinuidades debida a fuerzas de tensión o a presión de poros.

Angulo de fricción

El valor del ángulo de fricción interna de los materiales disminuye con el avance del proceso de meteorización. En ensayos realizados en materiales de granitos y Neisses en Colombia, se encuentran variaciones de 26 a 38° similares a los indicados por Deere y Patton(1971), para materiales de Lutitas entre 10 y 35° y para materiales de areniscas entre 25 y 45°, en concordancia a los valores propuestos por Sowers - 1981. En materiales derivados de areniscas, el Autor ha encontrado ángulos de fricción a lo largo de discontinuidades rellenas de arcilla con valores de 10 a 15°, cuando los ángulos de fricción de discontinuidades sin relleno dan valores de 35 a 38° en el mismo talud. Esta realidad dificulta la evaluación del comportamiento de los suelos residuales utilizando los modelos de la mecánica de suelos tradicional.

La envolvente de falla

En los suelos residuales la envolvente de falla puede tener una forma no lineal, especialmente en el rango de presiones bajas. Brand (1985) presenta el caso de los suelos residuales derivados de granitos en Hong Kong, donde la envolvente de falla presenta una curva en los niveles de esfuerzos normales bajos sin que se presente un caso de cohesión (Figura 6.10).

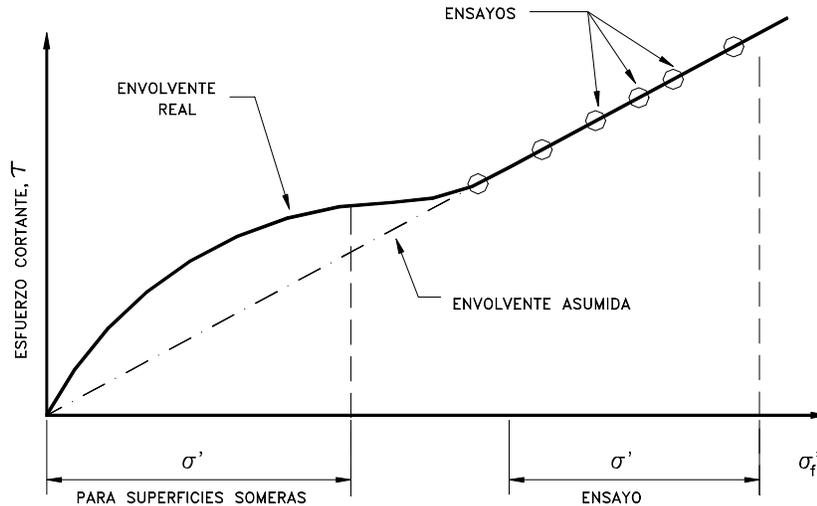


Figura 6.10 Envolvente real de falla para suelos residuales de granitos en superficies someras (Brand, 1985).

Factores que afectan el comportamiento esfuerzo-deformación

Historia de esfuerzos

Los suelos residuales se forman por una historia de descomposición o meteorización y esta a su vez es afectada por procesos tectónicos de compresión, relajación, corte, etc.. Estos esfuerzos tectónicos han producido una serie de cambios en el estado de los materiales, los cuales equivalen generalmente a disminuciones en los valores de la resistencia al cortante.

La mayoría de los suelos residuales se comportan como si fueran sobreconsolidados.

Resistencia de los granos o partículas

Las partículas que conforman un suelo residual muestran generalmente una gran variabilidad en la resistencia al aplastamiento o trituración y esta resistencia influye en forma importante sobre los valores de la resistencia al cortante. Por ejemplo, los suelos residuales con partículas de cuarzo resistentes al aplastamiento muestran ángulos de fricción relativamente altos.

Unión y cementación entre partículas

Una de las características básicas de los suelos residuales es la existencia de uniones entre las partículas. Estas uniones pueden ser de cementación por la depositación de carbonatos, hidróxidos, materia orgánica, etc., o por la reprecipitación de agentes cementantes como los silicatos o el crecimiento de uniones durante la alteración química de los minerales. Las uniones entre partículas disminuyen a medida que avanza el proceso de descomposición. La roca poco meteorizada posee una resistencia al cortante mucho mayor que la roca descompuesta.

Estado de alteración o remodelado

La resistencia al cortante es muy sensitiva a la alteración del material. Esta alteración puede deberse a causas naturales o antrópicas. Por ejemplo, el uso de explosivos para la ejecución de un corte puede disminuir la resistencia al cortante de toda la ladera. La estructura también puede destruirse durante la saturación o la toma de muestras. La resistencia al corte del suelo varía en forma grande de una muestra natural a otra compactada, debido al efecto de cementación y es difícil poder obtener valores confiables de diseño.

Las estructuras heredadas y discontinuidades

La resistencia de los Saprolitos puede ser determinada casi en su totalidad por los detalles estructurales. La resistencia de las discontinuidades es determinada también por el grado de meteorización y la cementación secundaria o laterización. En ocasiones, puede determinarse la resistencia de la masa de suelo mapeando cuidadosamente las discontinuidades del Saprolito y midiendo la resistencia a lo largo de esas discontinuidades.

La anisotropía

La resistencia al cortante depende de la dirección del esfuerzo con relación a la fábrica del suelo. Por ejemplo, en rocas metamórficas donde se encuentra mica presente, las superficies de las partículas de mica actúan como zonas de debilidad.

La humedad

Se ha detectado que en los suelos tropicales la humedad afecta sensiblemente su resistencia al corte. Se observa en ocasiones disminución de hasta 50% de la cohesión y 30% del ángulo de fricción por el proceso de saturación (Foss, 1973). Aparentemente la cementación es afectada en forma importante por la humedad. Es común el colapso de la estructura del suelo al saturarse, produciendo asentamientos diferenciales por

saturación accidental por fugas de agua de conductos enterrados o por mal control del agua de escorrentía. Al secarse la Aloysita el agua de la capa hidratada se seca y se forma Metalloysita, lo cual cambia las propiedades del material y su comportamiento. Lumb (1975) ensayando muestras saturadas y no saturadas encontró que las envolventes de falla, en ensayos drenados dependían en forma importante de la saturación y de la relación de vacíos, en granitos y en suelos volcánicos. La cohesión obtenida representa lo que se llama Cohesión aparente, como un resultado de la succión capilar.

Permeabilidad y flujo de agua

En un perfil de meteorización, la permeabilidad aumenta al incrementarse el tamaño de las partículas en el perfil de meteorización, para luego disminuir en la roca intacta, creando una zona de máxima concentración de agua que puede determinar la posición de la zona crítica de falla. Esto es muy corriente en perfiles de Granitos, Neisses y Esquistos y algunas veces en Lutitas y Areniscas.

La mayoría de los problemas de estabilidad de laderas en suelos residuales se relaciona con infiltraciones debidas a la permeabilidad de los materiales. La infiltración de agua elimina las presiones negativas, aumenta las presiones positivas, genera corrientes de agua y sube los niveles freáticos.

A pesar de la influencia grande de la Permeabilidad en la estabilidad de las laderas, existe muy poca información sobre la permeabilidad, de los suelos residuales. La variación en la macrofábrica del perfil de meteorización puede resultar en grandes variaciones de permeabilidad tanto lateralmente como a profundidad. La variación en tamaño de granos, tamaño de vacíos, mineralogía, grado de fisuración y las características de las fisuras afectan los valores de la permeabilidad.

Tabla 6.5 Permeabilidad de perfiles de meteorización en rocas ígneas y metamórficas (modificado de Deere y Patton, 1971).

Zona del perfil	Permeabilidad relativa
Suelos orgánicos	Media a alta
Suelos residuales maduros o coluviones arcillosos	Baja
Suelos saprolíticos o suelos residuales jóvenes	Media
Saprolitos	Alta
Roca meteorizada	Media a alta
Roca sana	Baja a media

La permeabilidad de los suelos saprolíticos está controlada generalmente, por la estructura de los materiales. La mayoría del flujo tiene lugar a lo largo de las juntas heredadas, de las venas de cuarzo o biocanales. Como la permeabilidad es gobernada por detalles de escala macro, los ensayos de laboratorio generalmente, no son representativos debido a que su escala es muy pequeña. La única forma de determinar un valor confiable de permeabilidad es realizar ensayos a escala grande, como son los ensayos de infiltración en apiques o sondeos.

El método más común de ensayo de permeabilidad en el campo es la permeabilidad realizada en un sondeo o perforación. La mayoría de los suelos residuales permite la construcción de perforaciones sin revestimiento.

Brand (1985) indicó que en suelos residuales existen zonas de alta transmisibilidad a través de las discontinuidades que hacen que la permeabilidad de la roca sea muy alta, por lo tanto las presiones de poro pueden reaccionar muy rápidamente a las lluvias fuertes. Por ejemplo, en la figura 6.11 se muestra como en Hong Kong, en 24 horas de

lluvia se produjo aumentos de cabezas piezométricas de cinco metros, en solo 18 horas y la presión de poros disminuyó bruscamente, inmediatamente después de la lluvia. Estos cambios tan rápidos hacen muy difícil la determinación de las presiones de poro para el análisis de deslizamientos.

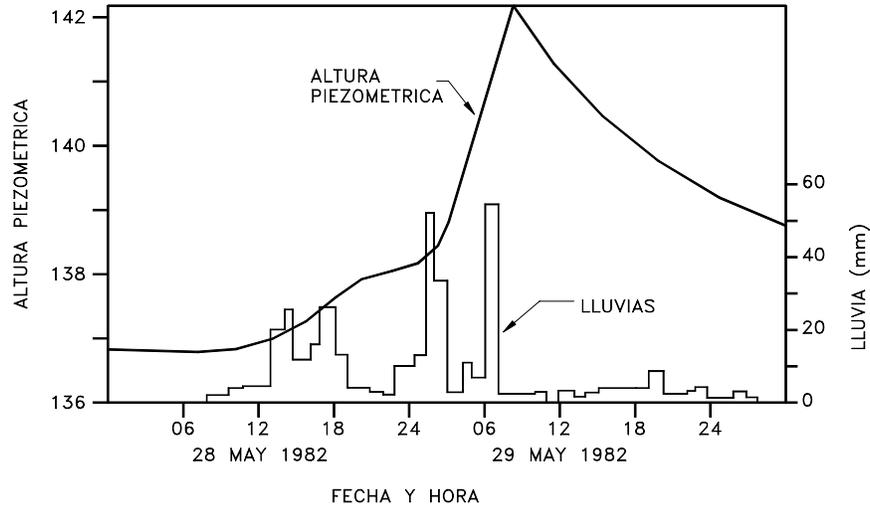


Figura 6.11 Ascenso rápido del nivel de agua en una sola lluvia en los granitos descompuestos de Hong Kong (Brand 1985).

El avance del frente húmedo es un factor muy importante en el análisis de estabilidad como se indica en el capítulo 7 del presente texto. El grado de saturación después de un evento lluvioso varía con la profundidad en el perfil (Figura 6.12). La eliminación de la succión en suelos no saturados debido a la saturación puede producir fallas repentinas de taludes.

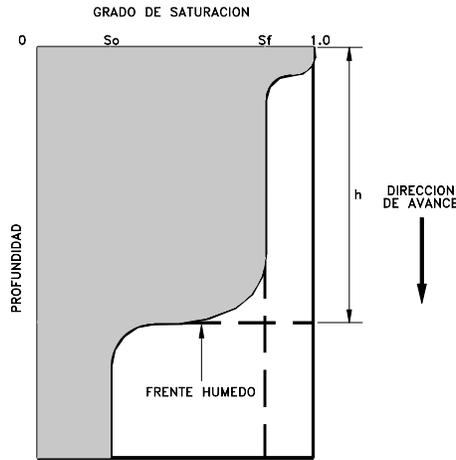


Figura 6.12 Avance del frente de humedad en suelos residuales.

En una lluvia fuerte al ocurrir una infiltración durante un tiempo t , el frente húmedo avanza una distancia h , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h = \frac{kt}{n(S_f - S_o)}$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad

n = Porosidad

S_f = Saturación final

S_o = Saturación inicial

Esta ecuación sugiere que el frente húmedo avanza más rápidamente si la lluvia antecedente ha incrementado S_o . Lumb (1975) reportó que si un suelo volcánico tiene una permeabilidad de $1.5 \cdot 10^{-4}$ cm/seg., y una lluvia excede los 400 mm., en tres días, el frente húmedo avanzará cuatro metros dentro del suelo y para la misma permeabilidad en un granito descompuesto se requiere una acumulación de 400 mm., en un periodo de 14 horas para avanzar los mismos cuatro metros.

Vaughan (1985) demostró que para un perfil que tiene una permeabilidad decreciente, al profundizarse se genera inestabilidad, mientras si la permeabilidad aumenta, se genera drenaje natural.

Compresibilidad

Las propiedades de consolidación y permeabilidad dependen de la estructura del suelo, teniendo que distinguir entre suelos naturales y suelos compactados. La permeabilidad varía típicamente entre $1 \cdot 10^{-2}$ a $1 \cdot 10^8$ cm/seg. y el coeficiente de consolidación de $1 \cdot 10^{-1}$ a $1 \cdot 10^{-3}$ cm²/seg. En general para un mismo Límite Líquido la compresibilidad del suelo tropical es menor que la indicada por Terzaghi Peck.

Según Vargas, para suelos tropicales:

$$Cc = 0.005 (LL + 22) \mp 0.1$$

Generalmente las curvas de consolidación exhiben una preconsolidación aparente debida a la presencia de cementación. Esta preconsolidación aparente disminuye y la compresibilidad aumenta cuando los suelos son saturados.

Compactación

Las características de compactación de los suelos residuales tropicales son influenciadas por su gradación, resistencia a la desintegración de los grupos de partículas, composición mineral y esfuerzo de compactación. En consecuencia las características de compactación varían en un rango muy amplio.

La mayoría de suelos ensayados por el Autor poseen valores de peso unitario que varían entre 1.7 y 2.2 Ton/m. y las humedades óptimas poseen un rango desde 6 a 22%. A medida que aumenta el contenido de arcilla o finos presentes, aumenta la humedad óptima y disminuye el peso unitario máximo. Townsend (1985) reportó que para algunos suelos naturales con permeabilidades de campo de 10^{-4} a 10^{-5} cm/seg., la compactación producía una disminución de las permeabilidades de 10^{-5} a 10^{-7} cm/seg.

Ensayos en suelos residuales

La validez de los ensayos de “Laboratorio” en suelos residuales es cuestionable aunque no puede discutirse que son útiles para la toma de decisiones de diseño. Muestras totalmente inalteradas aunque son difíciles de obtener, son deseables y es recomendable que las muestras sean lo más grande posibles. En algunos casos como en “Coluviones” los ensayos de laboratorio son totalmente inapropiados y sólo los ensayos de campo dan resultados de alguna confiabilidad.

El ensayo de penetración estándar (SPT), tanto para suelos granulares como arcillosos, permanece como el más comúnmente empleado para conocer la resistencia de todo tipo de suelos residuales.

Dependencia del factor agua

El perfil de meteorización y las propiedades de suelos tropicales dependen principalmente del régimen de lluvias y en general del ambiente climático de su formación. En zonas de alta precipitación la relación de vacíos es alta y existe una dependencia directa de la relación de vacíos con la precipitación (Figura 6.13).

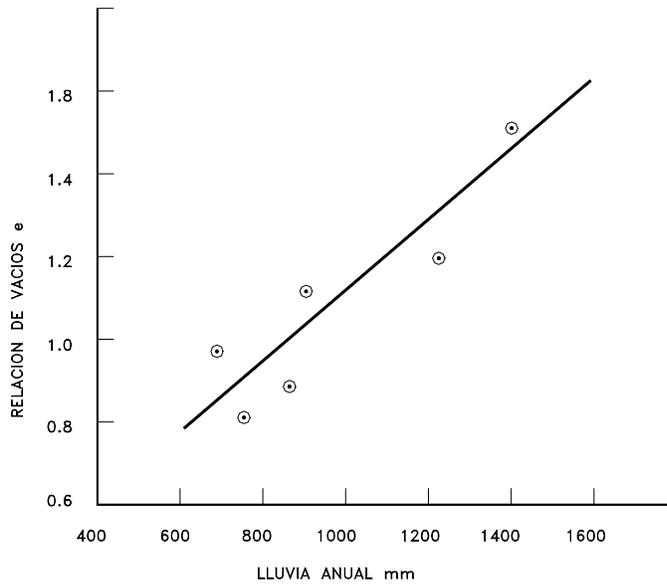


Figura 6.13 Relación entre la relación de vacíos y la precipitación en un granito altamente meteorizado y lavado, en Suráfrica. (Bligh 1997).

El proceso de disolución, lavado y recementación afecta otras propiedades del suelo como son la densidad y cohesión.

El fenómeno de lavado de finos y ciertos compuestos químicos es gradual y va produciendo un deterioro permanente en la calidad de los materiales que hace que los taludes se vuelvan inestables con el paso del tiempo.

6.7 SUELOS RESIDUALES ESPECIALES

Las Lateritas

Los suelos arcillosos ricos en aluminio y hierro son muy frecuentes y se caracterizan por la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio; el hierro en pequeñas cantidades que es movilizadado por el agua subterránea es luego oxidado.

El movimiento cíclico de los niveles de agua conduce a la acumulación de óxidos de hierro, formando una capa de suelos cementados, generalmente semipermeables (Figura 6.14). Estos materiales se van endureciendo en presencia del aire formando suelos lateríticos, los cuales poseen una gradación que puede ir desde las gravas a las arcillas y una plasticidad de baja a intermedia.

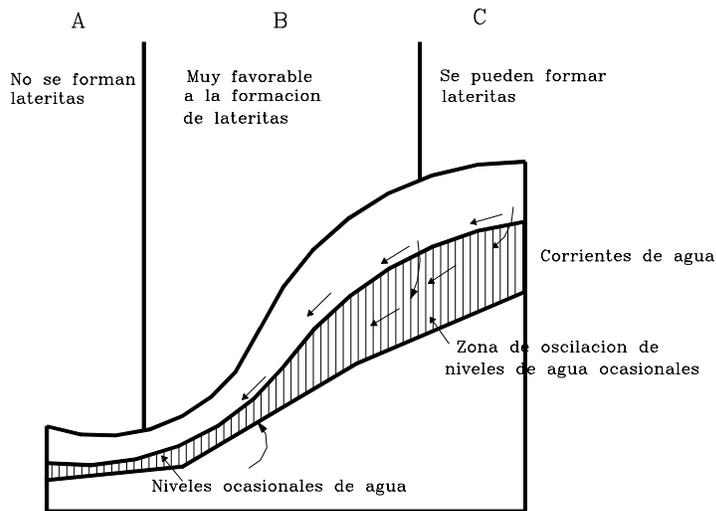


Figura 6.14 Formación de lateritas por corrientes de agua ocasionales.

Las lateritas se forman por descomposición de la roca y lavado por corrientes de agua ocasionales.

Tabla 6.6 Propiedades típicas de los suelos tropicales lateríticos

Propiedad	Valor
Contenido de agua	10 a 49 %
Límite líquido	33 a 90 %
Límite plástico	13 a 31 %
Porcentaje de arcilla	15 a 45 %
Peso unitario seco	1.6 a 2.0 gr./cm ³ .
Angulo de fricción interna	28° a 39°

Es el proceso físico químico que convierte el suelo o roca en Laterita. Las Lateritas no son propiamente derivadas directamente de las rocas, sino que son el resultado de la

remoción gradual de sílice y sales solubles. Este proceso ocurre cuando el agua percola a través del suelo o la roca.

En algunas rocas existen factores que facilitan el proceso de laterización, ellas son:

1. Rocas ígneas ácidas y algunas metamórficas

Incluyen el Neiss y el Granito. Estas rocas contienen suficiente hierro y aluminio para la formación de Lateritas. Aunque la permeabilidad intergranular es baja, usualmente poseen un muy buen desarrollado sistema de juntas que facilita el lavado.

2. Basalto

Contiene suficiente aluminio y abundante hierro y posee fracturas abundantes similares a los de otras rocas cristalinas. Estas rocas permiten una desintegración rápida.

3. Arenisca

Los contenidos bajos de aluminio y hierro pueden no contribuir a la formación de lateritas de espesor grande, pero su alta permeabilidad puede contribuir al lavado de los Feldespatos.

Algunas rocas no son favorables para el desarrollo de Lateritas y estas son: Las Calizas, que aunque son muy solubles no poseen una permeabilidad que permita la ocurrencia de Lateritas. Lo mismo ocurre con las Lutitas y pizarras.

Los Esquistos son muy difíciles de categorizar por la gran cantidad de tipos que existen y aunque son comparables químicamente a las Lutitas, su habilidad para producir Lateritas depende principalmente de su textura y estructura.

Las Lateritas tienen su importancia, especialmente en construcción de carreteras, por el uso de gravas lateríticas como material de bases y sub-bases viales. El Cuarzo como mineral no soluble es abundante y hace que sus resistencias al corte sean apreciables.

Ante la presencia de una gran cantidad de suelos residuales tropicales de coloración rojiza, la identificación de Lateritas debe hacerse por la presencia de partículas del tamaño de grava y por su ocurrencia en sitios de poca vegetación donde la humedad no es permanente pero que están expuestos a la acción de la lluvia.

La Grava laterítica es un suelo de consistencia gruesa, granular, que tiene partículas gruesas que se forman de la cementación de partículas más pequeñas. Al clasificarse podría ser grava o arena pero posee matriz de arcillas o limos.

Arcillas negras tropicales

Otro tipo de suelo muy común en ambientes tropicales son las arcillas negras, las cuales se desarrollan en áreas de drenaje pobre, con periodos secos y húmedos muy bien definidos. La arcilla presente más común es la Montmorillonita, lo cual conduce a que estos suelos sean generalmente expansivos, especialmente en los metros más subsuperficiales del perfil.

Suelos dispersivos residuales

Es frecuente en áreas tropicales la presencia de suelos arcillosos o arcillo-arenosos dispersivos, los cuales son muy susceptibles a ser erosionados por las corrientes de agua. Estos suelos son generalmente de coloración amarilla a roja. No existe realmente una velocidad crítica de erosión para los suelos dispersivos, los cuales son disueltos en aguas prácticamente quietas.

Tabla 6.7 Propiedades típicas de las arcillas tropicales negras

Propiedad	%
Porcentaje de arcilla	Más del 50
Porcentaje de limos	20 a 40
Porcentaje de arenas	10 a 30
Materia orgánica	Menos del 2
Límite líquido	50 a 100
Índice plástico	25 a 70
Índice de contracción	10 a 12

Para completar la amplia y diversa gama de suelos tropicales están los suelos Calcáreos limosos, los cuales poseen coloración gris y los depósitos de carbonatos de Calcio conocidos como "Caliche". En general el comportamiento de los suelos residuales tropicales es muy complejo y se requiere conocer en forma detallada las características físico-estructurales y químicas para su correcta clasificación.

6.8 SUPERFICIES PREFERENCIALES DE FALLA A DESLIZAMIENTO

En las formaciones de suelos residuales generalmente, existen superficies preferenciales por las cuales el talud tiende a fallar. Se pueden indicar las siguientes:

1. Las discontinuidades heredadas

Las juntas, fracturas, foliaciones, planos de estratificación, laminaciones, diques, orientaciones de los minerales y demás discontinuidades de la roca original, se convierten en discontinuidades dentro de la masa de suelo residual, las cuales actúan generalmente como superficies de debilidad por su baja resistencia, relacionadas no solo por la fractura en sí, sino también con la meteorización preferencial a lo largo de estas, ya que actúan como conductos del agua y demás agentes meteorizantes que facilitan no solo el transporte y depósito de subproductos, sino la formación de redes de presión de agua y de disipación de succión a lo largo de los planos de discontinuidad.

Los cambios en la presión de poros pueden producir modificaciones de los parámetros de resistencia al corte dentro de la discontinuidad.

Las juntas heredadas controlan en la mayoría de los casos, el régimen del agua infiltrada después de una lluvia y se conoce en Colombia de deslizamientos, en los cuales la masa de suelo estaba en estado semiseco pero las discontinuidades se encontraban saturadas y afectadas por presiones internas de agua muy grandes.

En la mayoría de los deslizamientos que ocurren en suelos residuales, la superficie de falla coincide en áreas importantes con grupos de discontinuidades heredadas, las cuales algunas veces están rellenas de materiales débiles, comúnmente arcillas, las cuales absorben agua, se expanden y se ablandan muy fácilmente y es común que su existencia y significancia solo se identifica después de que ha ocurrido una falla.

La anterior afirmación es basada en el trabajo de Massey y Pang (1988) sobre las fallas de los taludes en Hong Kong y en la revisión de una gran cantidad de historias de casos.

Observaciones del flujo de agua subterránea indican que el agua fluye a lo largo de rutas tales como las discontinuidades heredadas y conductos internos de erosión.

Las discontinuidades debidas a procesos de metamorfismo de las rocas, conocidos como pizarrosidad, esquistocidad, foliación etc., forman superficies paralelas de baja cohesión, a través de las cuales los materiales se pueden partir fácilmente o producirse fenómenos de desmoronamiento y flujos secos de material desintegrado. Muchos tipos de relleno diferente se pueden encontrar a lo largo de las discontinuidades pero generalmente se trata de materiales arcillosos y su espesor puede variar desde capas microscópicas hasta centímetros. Este relleno puede provenir de materiales lavados de capas superiores o de meteorización en el sitio.

La detección y evaluación de los efectos de las estructuras heredadas es de primordial importancia en los estudios geotécnicos para casos de estabilidad de taludes, pero esto es muy difícil con el sistema de perforaciones con taladro. Irfan y Woods(1988) recomiendan hacer excavaciones de gran tamaño y reportan zanjas de hasta 20 metros de profundidad para establecer el sistema de discontinuidades heredadas y estas excavaciones pueden programarse como parte de los cortes definitivos. Adicionalmente, se recomienda el mapeo de las discontinuidades a medida que se avanza con los cortes, para detectar la necesidad de modificar el diseño.

2. Zonas de cambio de permeabilidad

El proceso de meteorización o las características de formación de los materiales puede generar la presencia de superficies de alta permeabilidad dentro de un perfil de suelos residuales menos permeables. El agua al atravesar el perfil trata de fluir preferencialmente a través de las zonas de mayor permeabilidad, generándose una red diferencial de presiones de poro concentradas. El flujo de agua y las presiones preferenciales a lo largo de las zonas de alta permeabilidad puede convertirlas en superficies de falla. Adicionalmente, en algunos perfiles coinciden los cambios bruscos en conductividad con cambios en la resistencia al cortante de los materiales.

3. Espejos de falla (slickensides)

Los espejos de falla son discontinuidades lisas, las cuales pueden ser el producto de movimientos tectónicos en la roca original, los cuales se preservan en el suelo residual o pueden ser causados también por movimientos diferenciales, ocurridos dentro del Saprolito por acción del proceso de meteorización. Es difícil diferenciar entre superficies antiguas o recientes y en ocasiones se puede observar más de una dirección de estriado en la misma discontinuidad (Irfan y Woods- 1988).

La resistencia al corte a lo largo de los espejos de falla es particularmente baja y muchos deslizamientos son controlados por estas superficies de falla.

4. Los contactos suelo - roca

Los fenómenos que ocurren en la interface suelo - roca están relacionados con la formación de niveles colgados de agua permanentes o temporales, los cuales generan no solo una presión hidrostática sino también un proceso de disolución y lavado de llenantes y cementantes por acción de corrientes de agua. La roca actúa como una

barrera que facilita la formación de corrientes a lo largo del contacto material descompuesto - roca.

Cuando el contacto Suelo Residual - Roca es relativamente uniforme y continuo puede actuar como superficie preferencial para la ocurrencia de movimientos. Un caso común en ambientes tropicales son los deslizamientos de coluviones de materiales arcillosos sobre superficies rocosas (Campos - 1991). Generalmente, los procesos de hidrología interna y descomposición permiten la acumulación de partículas de arcilla sobre el contacto suelo - roca, formando una capa delgada o patín de arcilla sobre el cual se produce el movimiento, esta capa puede ser de solo algunos milímetros.

5. Fallas, planos de estratificación e intrusiones

Es común encontrar en las formaciones residuales contactos o fallas que generan superficies de debilidad, abiertas o rellenas de sedimentos o intrusiones de materiales muy diferentes a los normales de la formación. La presencia de estos puede generar un cambio substancial en el régimen de aguas subterráneas y en el comportamiento del talud. El material a lado y lado de la falla o intrusión puede producir superficies de inestabilidad dentro de una formación considerada como estable. En ocasiones, la presencia de fracturas relacionadas con fenómenos tectónicos relativamente recientes afecta la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, pero su evaluación es difícil porque generalmente no ha transcurrido tiempo suficiente para producir cambios geotécnicos visibles y la localización e identificación de los fenómenos neotectónicos es compleja.

6. Los suelos subsuperficiales o poco profundos

Es muy común que se produzcan fallas de los mantos mas subsuperficiales de suelo relacionados con varios factores:

- a. La presencia de coluviones o suelos sueltos subsuperficiales.
- b. La mayor abertura de las discontinuidades poco profundas y la resultante baja resistencia al cortante.
- c. La meteorización y permeabilidad del manto de suelo más subsuperficial.

6.9 CLASIFICACION DE LA FAO PARA SUELOS TROPICALES

Se han editado mapas de suelos generalmente, para uso agrícola en donde se clasifican los suelos de acuerdo a criterios pedológicos. Se conocen la clasificación pedológica francesa, la clasificación Taxonómica de los Estados Unidos y la clasificación FAO-UNESCO. Estas clasificaciones han sido estudiadas por autores como Morin and Todon y pueden ser útiles a los Ingenieros y geólogos y para ello existen correlaciones cuya interpretación para casos prácticos requiere de mucho criterio y experiencia. La FAO ha definido 25 unidades de suelo de las cuales las más importantes son:

1. Arenosols

Más gruesas que la arena y contenido de arcilla del 18% o menos. Exclusivos de depósitos aluviales recientes no consolidados.

2. Andosols

Suelos formados por materiales volcánicos por lo general con superficies oscuras. Comunes en regiones montañosas. Densidades bajas y humedades naturales altas. Contienen generalmente, minerales de Aloisita. Se caracterizan por su alto contenido de agua y cambios irreversibles cuando se secan. Estos materiales son muy comunes en las zonas volcánicas del sur-occidente de Colombia.

3. Luvisols

Suelos con acumulación de arcilla en el horizonte intermedio, rojo grisáceo. Propios de zonas áridas.

4. Cambisols

Suelos en los cuales han ocurrido cambios en el color, la estructura y consistencia por la meteorización del perfil en zonas de erosión intensa.

5. Acrisols

Suelos muy ácidos normalmente amarillo - crema, provenientes de rocas ácidas en zonas de lluvia intensa.

6. Nitosols

Suelos de color gris rojizo que han sido parcialmente meteorizados pero no han llegado a la madurez total que han alcanzado los Ferralsols.

7. Ferralsols

Suelos que contienen una cantidad muy importante de óxidos de hierro, generalmente rojos o amarillos, propios de zonas lluviosas. Es un grupo muy grande de suelos con gran variación de características, los minerales predominantes son la Caolinita y la Aloisita. Dentro de los ferralsols es importante definir a los "Latosols". Un término científico empleado también para la caracterización de lateritas es de Latosol. La identificación sobresaliente es la presencia abundante de sesquióxidos y Cuarzo y la ausencia de los minerales solubles. Por lo general el tipo de arcilla predominante es la Caolinita. Las tierras rojas o latosoles son suelos residuales ferruginosos que se encuentran en el primer ciclo del proceso, habiendo sido recientemente oxidados pero no cementados, comportándose como arcillas y por lo tanto no se considera que sean Lateritas.

8. Vertisols

Son suelos problemáticos de altas características de expansión y contracción y baja resistencia. Poseen grandes cantidades de Esmectita y Montmorillonita entre ellos se incluyen las arcillas negras propias de las zonas tropicales.

Tabla 6.8 Características de algunos de los suelos tropicales, clasificados de acuerdo a la FAO (Wesley, 1988).

Clasificación FAO	Nombre comunes	Minerales de arcilla dominantes	Características importantes
Ferralsols	Suelos lateríticos Latosoles Arcillas rojas	Aloisita Caolinita Gibsita Geotita	Un grupo muy grande con una gran variación de características
Andosols	Cenizas volcánicas	Alofanos Aloisita	Contenidos muy altos de agua y cambios irreversibles al secarse
Vertisols	Suelos negros tropicales. Suelos algodón negro.	Esmectita Montmorillonita	Alta expansión y baja resistencia.

En la región Andina de Suramérica ocurren por lo general, asociación o combinaciones de los tipos de suelo y es muy difícil la clasificación exacta de acuerdo a la nomenclatura de la FAO. En la cuenca amazónica predominan los Ferralsols.

Los suelos que cambian sus propiedades al secarse son generalmente, los Andosols o suelos de origen volcánico (ricos en Aloysita), en zonas donde la actividad volcánica ha sido reciente y algunos Ferralsols que ocurren en zonas de lluvias fuertes, especialmente en la cuenca amazónica.

6.10 SISTEMA DE CLASIFICACION DE SUELOS RESIDUALES DE WESLEY

Los suelos residuales poseen características específicas, las cuales no están representadas adecuadamente en el sistema unificado de clasificación de suelos entre las cuales Wesley (1997) indica las siguientes:

- a. El comportamiento de los suelos residuales depende en forma importante de la mineralogía y la estructura.
 - b. El grado de meteorización no se tiene en cuenta en los sistemas normales de clasificación.
 - c. Los sistemas de clasificación se basan en las propiedades del suelo en estado remoldeado y el comportamiento de los suelos residuales depende de su estado in situ.
- Wesley(1988) propuso un sistema de clasificación de suelos residuales (Tabla 6.9) el cual está basado en tres factores básicos:

1. Composición

Se refiere al material de que está constituido e incluye tamaño, forma y especialmente la composición mineralógica de la fracción fina.

2. Macroestructura

Incluye todos los detalles que se pueden observar visualmente como son discontinuidades, capas, fisuras, poros, presencia de materiales no meteorizados o parcialmente meteorizados y estructuras heredadas.

3. Microestructura

Fábrica, cementación entre partículas, forma y tamaño de los poros, etc.

El sistema de clasificación de Wesley no puede tomarse aislado de otros elementos como son el estado o nivel de meteorización, las propiedades mecánicas, las modificaciones o cambios al profundizarse en el perfil, las superficies de cambios bruscos de propiedades, etc.

Tabla 6.9 Sistema de clasificación de suelos residuales (Wesley –1997)

Grupo	Subgrupo	Ejemplo	Identificación	Comentarios
A Suelos sin influencia mineralógica fuerte	(a) Influencia fuerte de la macroestructura	Suelos de rocas ígneas ácidas o intermedias y rocas sedimentarias muy meteorizadas.	Inspección visual	Este es un grupo muy grande de suelos, incluyendo los saprolitos, cuyo comportamiento en las laderas es dominado por la influencia de las discontinuidades, fisuras, etc.
	(b) Influencia fuerte de la microestructura	Suelos de rocas ígneas y sedimentarias completamente meteorizadas.	Inspección visual y evaluación de la sensibilidad e índice de liquidez.	Son suelos esencialmente homogéneos. Es importante la identificación de la naturaleza y papel de las discontinuidades heredadas, tanto primarias como secundarias para poder entender el comportamiento.
	(c) Poca influencia de la estructura	Suelos derivados de rocas muy homogéneas	Poca o ninguna sensibilidad y apariencia uniforme.	Se comportan en forma similar a los suelos moderadamente sobreconsolidados.
B Suelos fuertemente influenciados por minerales comunes	(a) Grupo de la Smectita y montmorillonita.	Suelos negros tropicales y suelos formados en condiciones pobremente drenadas.	Colores gris a negro y alta plasticidad.	Suelos problemáticos encontrados en zonas planas; son de baja resistencia, alta compresibilidad y características fuertes de expansión y contracción.
	(b) Otros minerales comunes			Subgrupo relativamente pequeño.
C Suelos fuertemente influenciados por minerales arcillosos propios solamente de los suelos residuales	(a) Grupo de los Alófanos	Suelos derivados de ceniza volcánica.	Contenidos de agua muy altos y cambios irreversibles al secarse.	Altos límites líquidos y plásticos. Las características de ingeniería son generalmente buenas, aunque en algunos casos la alta sensibilidad hace difícil el manejo y la compactación.
	(b) Grupo de la Aloysita	Suelos derivados de rocas volcánicas antiguas. Especialmente arcillas rojas tropicales.	Color rojo, topografía bien drenada.	Suelos finos de baja a media plasticidad, pero de baja actividad. Las propiedades de ingeniería son generalmente buenas. (Debe tenerse en cuenta que con frecuencia se traslapan los suelos alófanos y los aloysíticos).
	(c) Grupo de los Sesquioxidos	Suelos lateríticos o lateritas	Apariencia granular o nodular.	Es un grupo muy amplio que van desde arcillas limosas hasta gravas y arenas gruesas. Su comportamiento varía desde la baja plasticidad hasta la grava no plástica.

6.11 CARACTERIZACION DEL PERFIL DE SUELOS RESIDUALES

El perfil de meteorización es muy importante en la estabilidad de los taludes en un suelo residual, porque este generalmente controla la superficie de falla potencial, el mecanismo de falla, el régimen de hidrología subterránea y la distribución de la presión de poros (Brand, 1985). Generalmente, los perfiles de los suelos residuales se componen de zonas de diferente meteorización que van desde el suelo propiamente dicho hasta la roca sana (Figura 6.15).

Se han tratado de definir zonas homogéneas, pero en la práctica no existe zonificación real dentro de un perfil, sino un cambio gradual de las características de los materiales con la profundidad, incluso es muy difícil definir en forma precisa el límite de la roca sana con el suelo residual o la roca descompuesta (Saprolito).

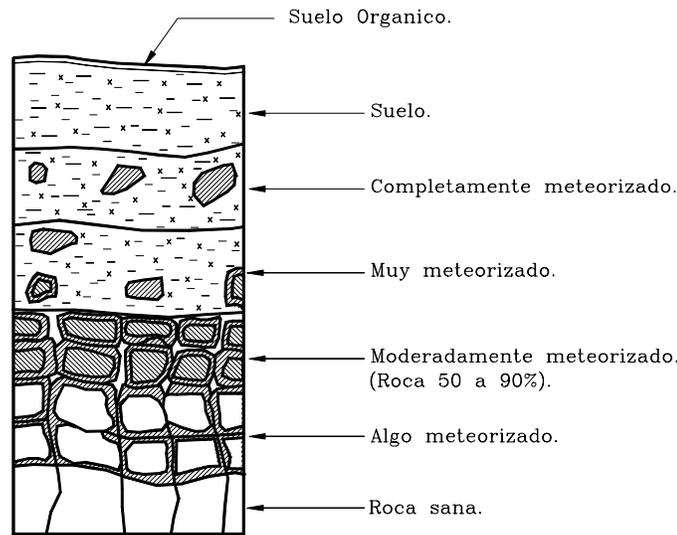


Figura 6.15 Diagrama de un perfil típico de suelo residual tropical (Según Little-1969).

Como los suelos residuales se descomponen de la roca parental, el perfil de suelo representa una historia del proceso de meteorización. Los sistemas de clasificación de perfiles presentan diferentes estados de meteorización y separan los perfiles verticales en diferentes zonas.

La permeabilidad y la resistencia al cortante varían gradualmente con la profundidad, las cuales controlan la respuesta a la infiltración de la lluvia y la localización de las superficies de falla.

Los espesores del perfil de suelo y las propiedades dependen de la roca parental, discontinuidades, topografía y clima. Como estos factores varían horizontalmente, el perfil puede variar en distancias relativamente cortas. Además se forman perfiles muy profundos en regiones tropicales en donde los agentes meteorizadores son especialmente fuertes.

El perfil general descrito por Deere y Patton en 1971, distingue tres zonas: suelo residual, roca alterada y roca sana.

Los Saprolitos retienen las estructuras de la roca parental pero solamente un poco de la resistencia de este.

Sowers (1963) y Vaughan (1985) correlacionan las propiedades de los suelos residuales con la relación de vacíos más no con los límites de Atterberg, debido a que la relación de vacíos representa en mejor forma el estado de los suelos en el sitio.

Las discontinuidades afectan en forma significativa la permeabilidad y la resistencia al cortante de la masa de suelo, por esta razón en los ensayos de laboratorio de muestras relativamente, pequeñas se obtienen coeficientes de permeabilidad y resistencias al cortante muy diferentes a la realidad. Además, algunos suelos residuales derivados de los Neisses, con alto contenido de mica, se expanden en el muestreo y esto produce propiedades equivocadas en los ensayos (Bressani y Vaughan, 1989).

A medida que se avanza en el perfil las propiedades de los suelos van cambiando en forma rápida y esto dificulta no solamente los ensayos sino los análisis, debido a que la estructura del material se vuelve muy importante a medida que se va profundizando, pasando de un comportamiento de suelo a un comportamiento de roca.

Tabla. 6.10 Sistema de clasificación del perfil de meteorización empleado en Hong Kong (Oficina de control geotécnico, 1979)

Grado	Descomposición	Detalles de diagnóstico en las muestras
VI	Suelo	No aparece textura reconocible de roca. Las capas superficiales pueden contener materia orgánica y raíces.
V	Completamente descompuesta	Roca completamente descompuesta pero aún aparece textura de roca ligeramente reconocible.
IV	Muy descompuesta	Pedazos grandes que pueden ser destruidos con las manos.
III	Moderadamente descompuesta	Pedazos grandes que no pueden ser descompuestos por las manos (muestras tomadas con broca a rotación).
II	Algo descompuesta	Aparece como roca sana pero tiene manchas muestras de descomposición.
I	Roca sana	

Las clasificaciones más utilizadas para los grados de meteorización de un perfil de suelo residual son las desarrolladas en Hong Kong (Phillipson and Brand - 1985), El Reino Unido (Dearman and Turk -1985) y los Estados Unidos (Sowers - 1985).

La variabilidad de las propiedades de resistencia, humedad y permeabilidad, a través del perfil dificulta la utilización de los modelos tradicionales de la mecánica de los suelos "homogéneos e isotrópicos".

Otros elementos disturbantes son las discontinuidades y la presencia de bloques de materiales diferentemente meteorizados. Las características de un perfil de suelo residual dependen del tipo y propiedades de la roca originaria. Los perfiles son marcadamente diferentes para formaciones de origen igneo-metamórfico y para formaciones sedimentarias.

Los perfiles de suelos residuales producto de rocas foliadas o estratificadas son marcadamente isotrópicos y generalmente son más débiles y permeables a lo largo de los planos de orientación (Sowers, 1985).

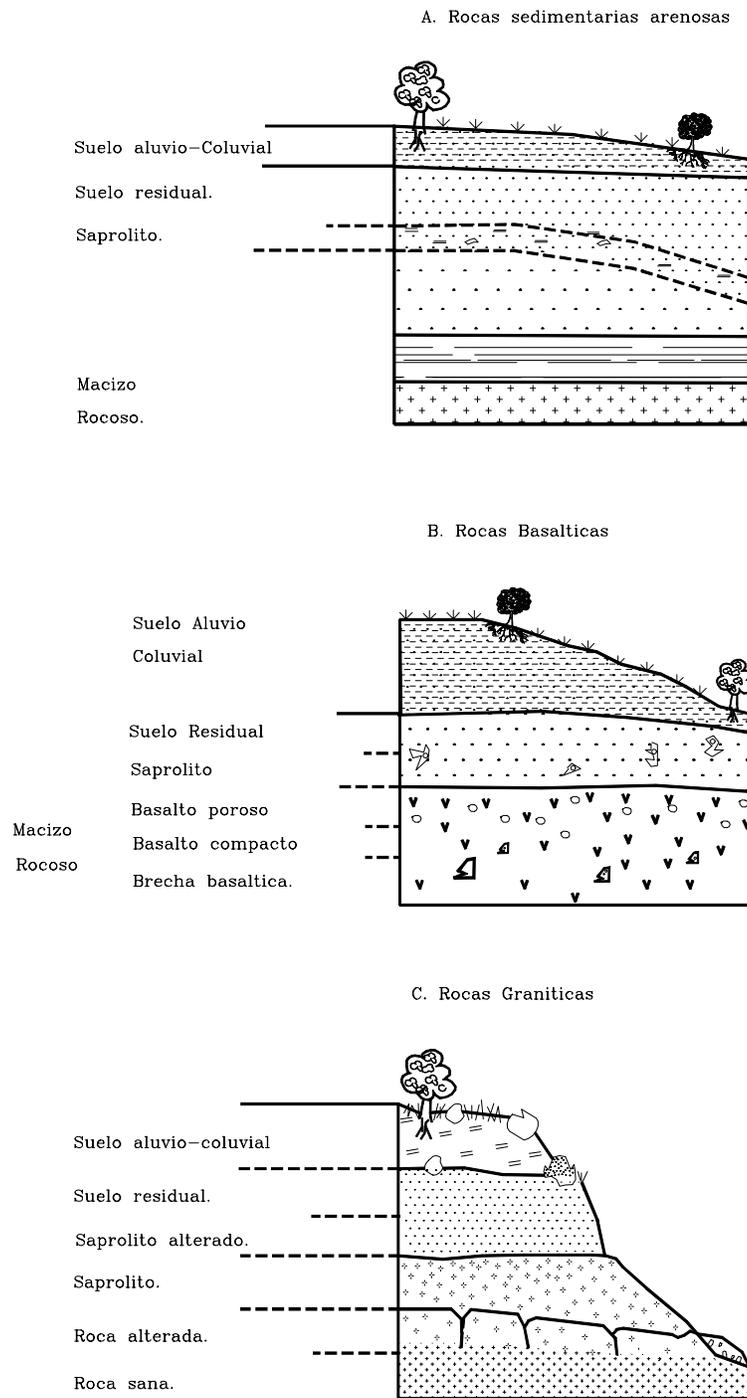


Figura 6.16 Esquema de algunos perfiles típicos en materiales residuales.

6.12 PERFILES DE METEORIZACION Y DESLIZAMIENTOS DE LOS TALUDES EN ALGUNOS SUELOS RESIDUALES

La resistencia a la descomposición química varía de una roca a otra, siendo las Cuarcitas las más resistentes y dentro de las más conocidas por su descomposición rápida se encuentran las Calizas, las Lutitas y los Granitos.

La meteorización produce la pérdida de las propiedades de cementación de la roca original y esta depende del tipo de roca:

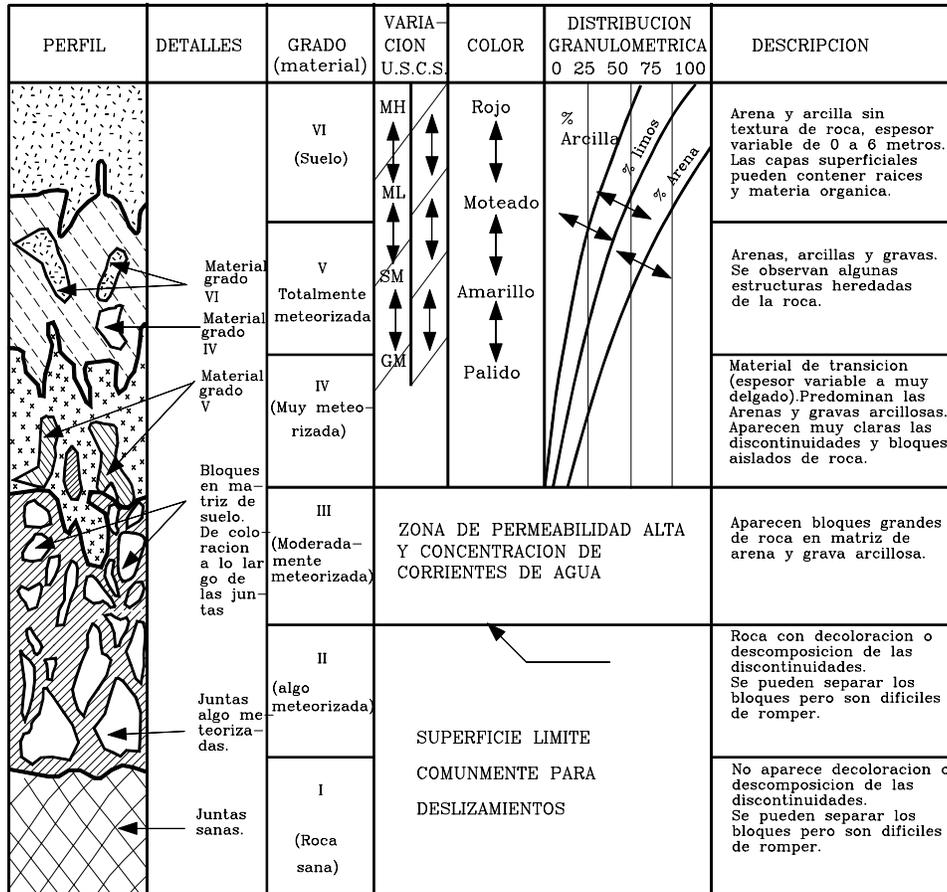


Figura 6.17. Perfil de meteorización en materiales de origen Igneo-Metamórfico.

Suelos residuales de Granitos, Dioritas, Neises y Esquistos

La alteración química afecta los Feldespatos y micas convirtiéndolos en arcilla, mientras el cuarzo permanece como arena. La descomposición ocurre a lo largo de las juntas formando bloques meteorizados esferoidalmente, dejando en el centro volúmenes de granito inalterado.

En áreas de granitos el agua al pasar por las discontinuidades se vuelve ácida y ayuda a acelerar el proceso de descomposición, pudiéndose presentar casos de más de 50 metros de espesor de suelo residual (Blyth and Freitas - 1984).

Fitzpatrick y Le Roux (1977) encontraron que el espesor de los perfiles de suelo residual es mayor en la parte baja de los taludes de granito meteorizado y mientras en la parte alta predomina la caolinita, en las áreas bajas más húmedas predomina la Smectita.

En los Neises los Feldespatos y piroxenos tienden a meteorizarse rápidamente, los Anfiboles se meteorizan a una rata intermedia y el Cuarzo trata de permanecer. Los minerales son segregados en bandas y esta meteorización por bandeamiento afecta su manejo ingenieril.

En suelos de origen ígneo-metamórfico generalmente hay un solo perfil con suelo en la superficie, luego el saprolito y finalmente las rocas alterada y sana (Figura 6.17). Las rocas ígneas intrusivas ácidas (con gran contenido de Cuarzo) como el granito, forman perfiles profundos generalmente arenoarcillosos, mientras las rocas ígneas básicas (poco cuarzo) forman perfiles menos profundos y más arcillosos.

García (1979) reporta perfiles de suelo en granitos meteorizados de diez metros de espesor con una capa superficial delgada de arcilla plástica (MH) sobre limos arenosos (ML) y sobre una arena limosa (SM) y López describe un perfil MH-ML-SM-GM en materiales de Anfibolitas.

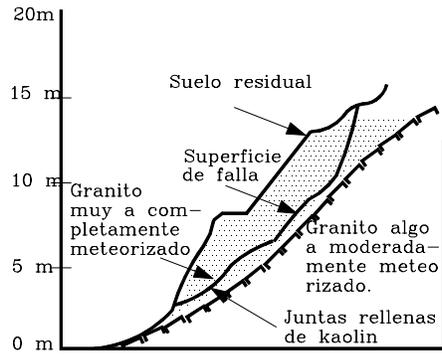
Los Neisses meteorizan generalmente a arenas de grano medio, micáceas, en perfiles menos profundos que los de un granito, pero de comportamiento muy similar dependiente de las diferencias de clima, topografía, etc.

Los esquistos se comportan en forma similar y esto podría generalizarse para la mayoría de los materiales metamórficos e ígneos - intrusivos.

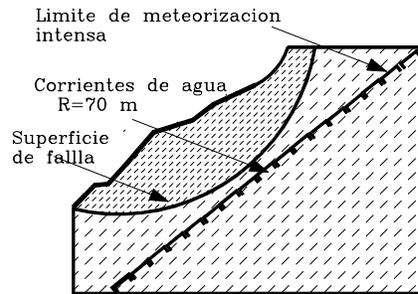
Los esquistos son extremadamente físis a lo largo de la esquistosidad y este factor es muy importante en la meteorización y aunque contienen a veces minerales resistentes a la descomposición, la cual puede ocurrir en forma relativamente fácil.

La profundidad del perfil de meteorización depende no solo de las características de la roca y del medio ambiente sino también de la pendiente del terreno; en zonas de pendiente alta los perfiles son poco profundos y los materiales tienden a ser granulares, mientras en las zonas de pendiente suave los perfiles son más profundos y los materiales más arcillosos. Este fenómeno puede controlar el tipo de deslizamiento que se genera superficial en pendientes altas y profundo en pendientes medianas (Figura 6.18).

Ejemplo 1 (Pendiente alta)



Ejemplo 2 (Pendiente mediana)



Ejemplo 3 (Pendiente original suave)

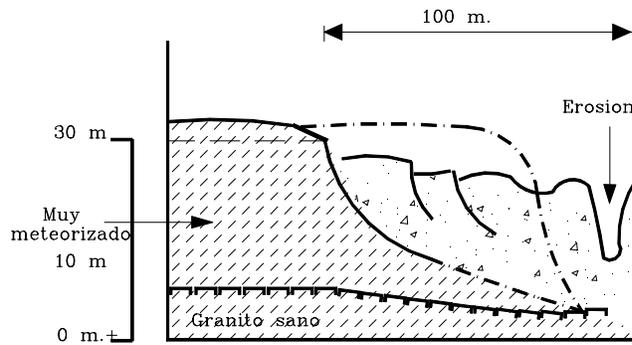


Figura 6.18. Fallas en perfiles de granito meteorizado de diferente pendiente.

Suelos residuales de lutitas y areniscas

Las lutitas constituyen cerca de la mitad del volumen de rocas sedimentarias sobre la corteza terrestre y han sido algunos de los materiales degradados más complicados de manejar en obras de ingeniería civil. Las lutitas al meteorizarse forman inicialmente capas de arcilla de apariencia laminar, las cuales en el proceso final de meteorización se convierten en mantos gruesos de arcilla blanda laminada.

Las diferencias de permeabilidad debidas a la distribución granulométrica y a la estratificación puede generar niveles colgados de corrientes de agua, las cuales a su vez producen meteorización diferencial, de acuerdo a las condiciones de humedad y saturación de cada capa de suelo estratificado (Figura 6.19).

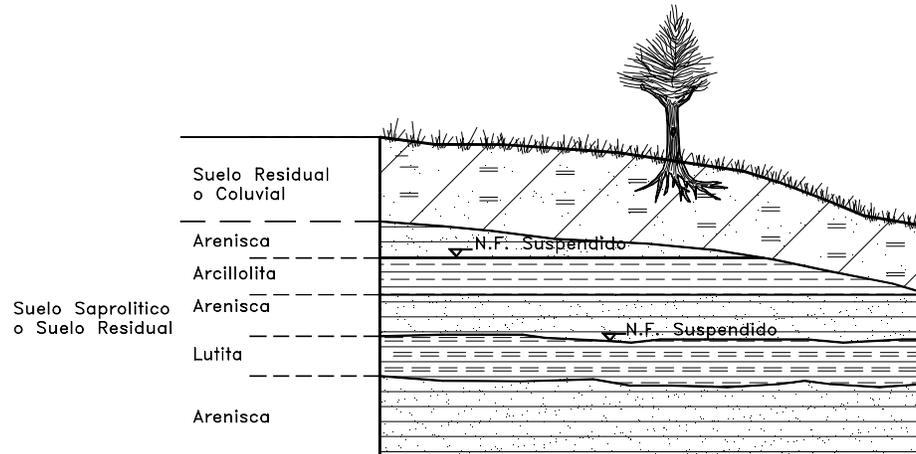


Figura 6.19 Niveles freáticos suspendidos en estratificación de Lutitas y Areniscas.

En perfiles residuales de Lutitas aparece una capa superior blanda, completamente desintegrada, seguida de una zona de desintegración que disminuye con la profundidad (Bjerrum - 1967) y curiosamente el contenido de agua aumenta bruscamente en la zona de contacto de la Lutita inalterada con la zona medianamente alterada. Entre mayor es la meteorización la permeabilidad se hace menor. Se conocen casos de meteorización aislada de capas profundas asociadas con capas delgadas permeables.

Las fallas generalmente, tienden a estar relacionadas con capas algo profundas por superficies de debilidad más o menos planas, intensamente meteorizadas con presiones altas de poros.

En Colombia se conocen muchos deslizamientos de grandes áreas de terreno con superficies de falla profundas en materiales de Lutitas meteorizadas. En Lutitas o en alteraciones de areniscas y Lutitas existe un perfil general similar a los propuestos en los sistemas de clasificación pero a su vez cada capa, entre planos muy definidos de estratificación genera su propio perfil por meteorización diferencial (Figura 6.20).

Los Planos de Estratificación y las Fallas o Fracturas importantes o las capas de materiales algo permeables generan superficies de cambio brusco en el perfil, los cuales

controlan generalmente las fallas. Condiciones similares se presentan cuando aparecen diques, bloques y cantos de grandes materiales geológicamente diferentes.

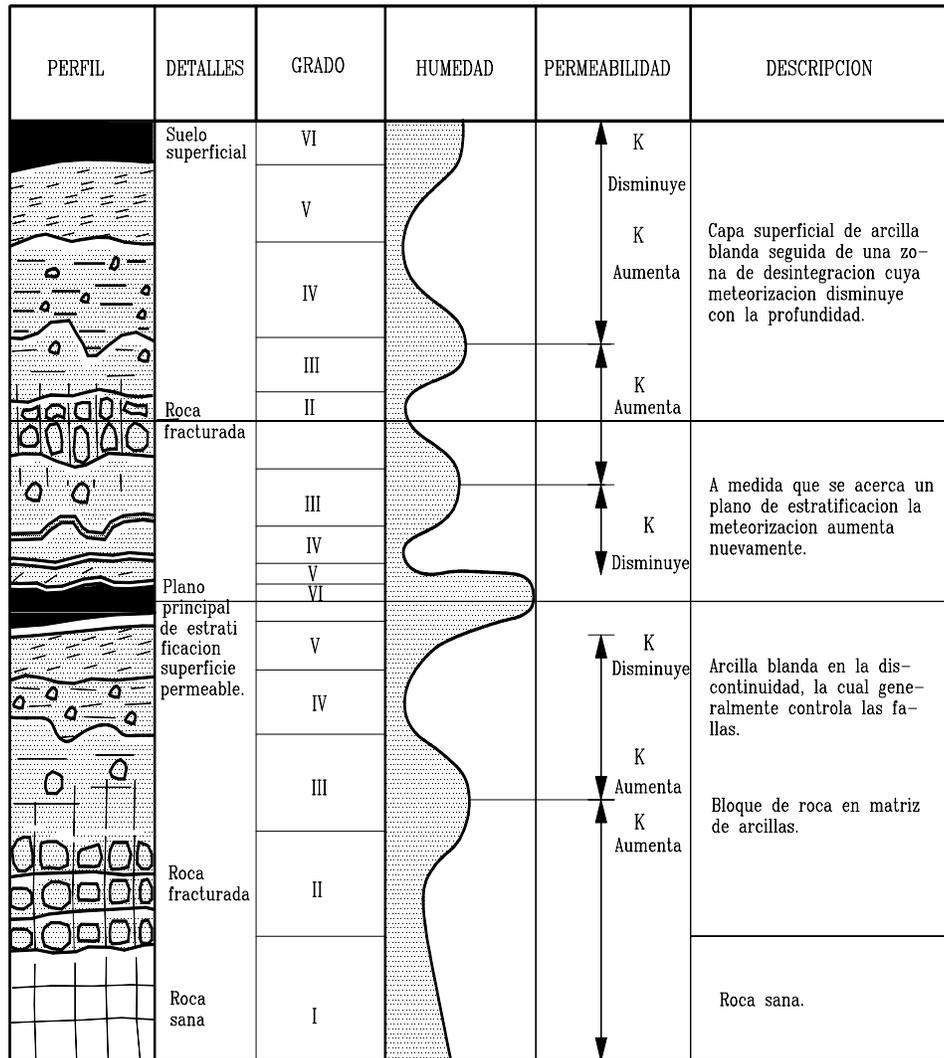
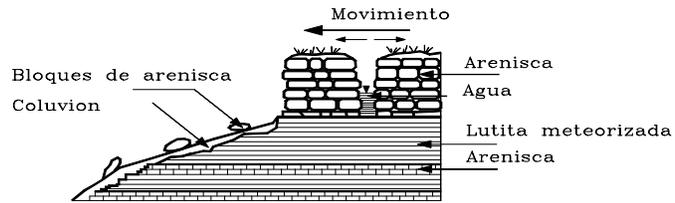
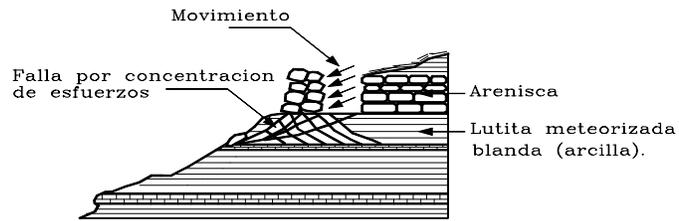


Figura 6.20 Perfil general de meteorización en materiales de origen sedimentario.

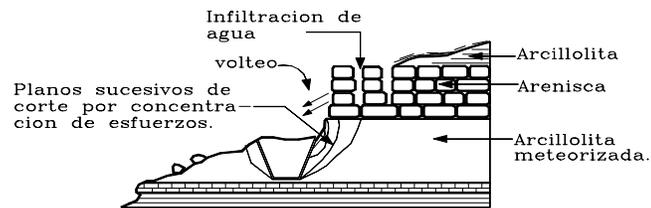
A. Desplazamiento horizontal



B. Aplastamiento de Lutita blanda.



C. Falla al cortante en la arcillolita



D. Falla al cortante en la Arenisca

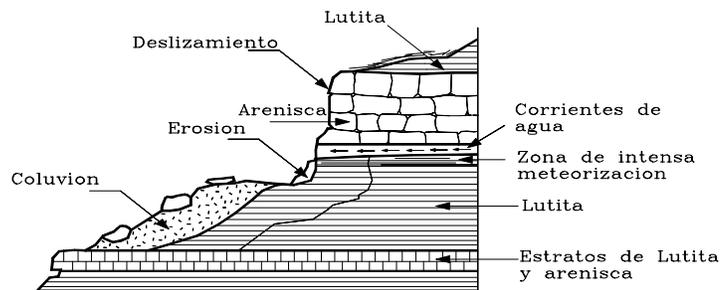
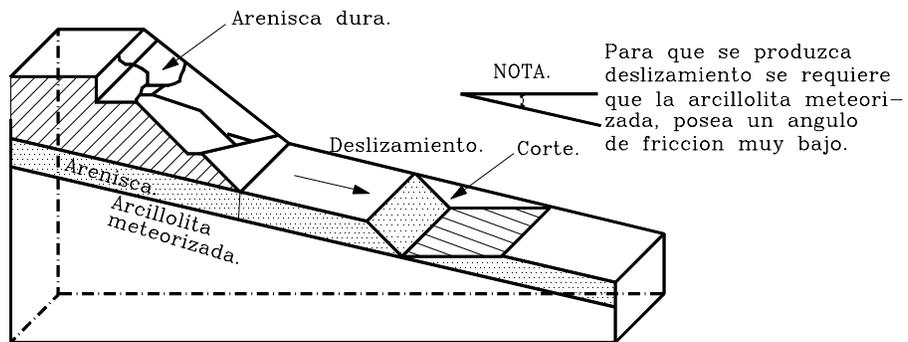


Figura 6.21 Deslizamientos en intercalaciones de Arcillolitas y Areniscas con estratificación horizontal.

De las rocas sedimentarias, las Lutitas son las más susceptibles a deslizamientos. Las Lutitas están conformadas por capas de diferente composición y por lo tanto de diferentes propiedades, tales como capas de Bentonita, zonas de margas y planos de estratificación que pueden controlar las superficies de deslizamiento y las trayectorias de infiltración.

Las intercalaciones de rocas permeables e impermeables pueden representar situaciones propicias para la ocurrencia de deslizamientos, como en el caso de mantos de areniscas y arcillolitas intercaladas. De acuerdo a la posición de los diversos mantos y el buzamiento de los estratos se puede presentar un mecanismo de falla.

A. Buzamiento Suave.



B. Buzamiento Fuerte.

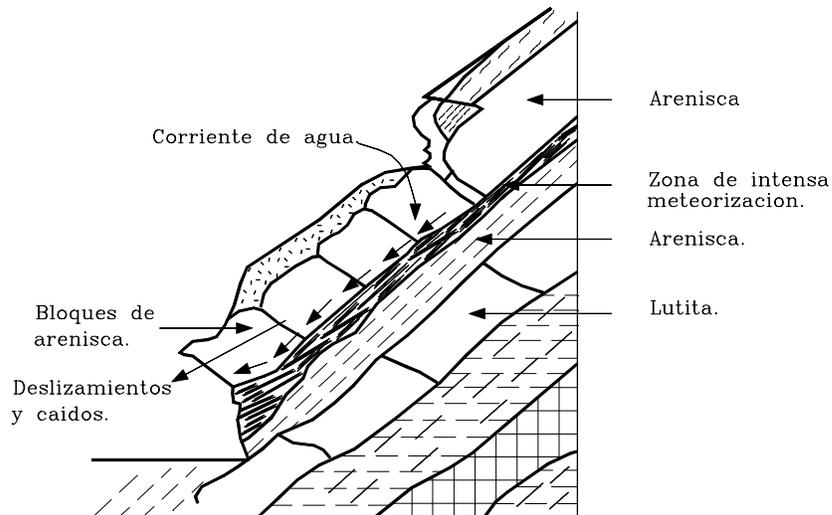


Figura. 6.22 Deslizamientos en intercalaciones de Areniscas y Lutitas.

Suelos residuales de Calizas

Las calizas presentan perfiles relativamente profundos de meteorización en presencia de humedades altas en pendientes suaves. En las Calizas o Rocas Carbonatadas la meteorización es controlada por el proceso de disolución en agua (Sowers - 1985); los materiales no solubles o que no han tenido suficiente contacto con el agua para disolverse se mantienen intactos mientras los solubles se descomponen totalmente.

El resultado de este proceso de meteorización por disolución, es una mezcla heterogénea de materiales blandos y duros con cambios bruscos pero irregulares.

El suelo residual es generalmente más duro en superficie y se hace más blando al profundizarse. A lo largo de juntas o planos importantes de estratificación se generan colchones de materiales blandos por disolución, los cuales actúan como superficies preferenciales de deslizamiento.

Los deslizamientos generalmente están controlados por los planos de estratificación siendo las superficies de falla comúnmente tangentes a estos (Figura 6.23). Adicionalmente, se pueden presentar ductos internos o cavernas, los cuales generan corrientes concentradas de agua subterránea y es común encontrar deslizamientos en los sitios de afloramiento de estas corrientes.

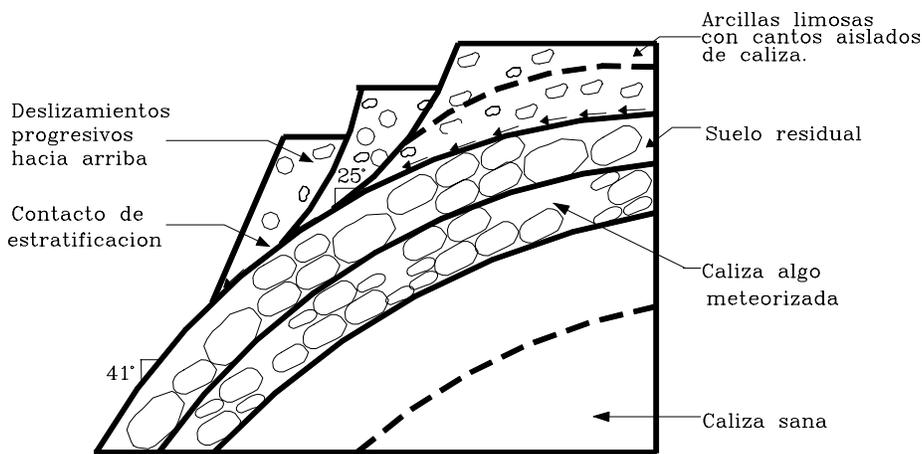


Figura 6.23. Deslizamientos en suelos residuales de Calizas (Málaga-Colombia).

Suelos residuales de origen volcánico

Los perfiles de meteorización en suelos de origen volcánico son similares en su apariencia general a los de los suelos de origen ígneo intrusivo, pero en este caso las discontinuidades tienden a ser horizontales y verticales y los deslizamientos tienden a ser controlados por las características del perfil de meteorización, aunque las discontinuidades pueden afectar el mecanismo de movimiento. El tipo de falla que se presenta depende del espesor y la pendiente inferior del manto de meteorización intensa,

donde aparecen diques, bloques o cantos grandes de materiales geológicamente diferentes.

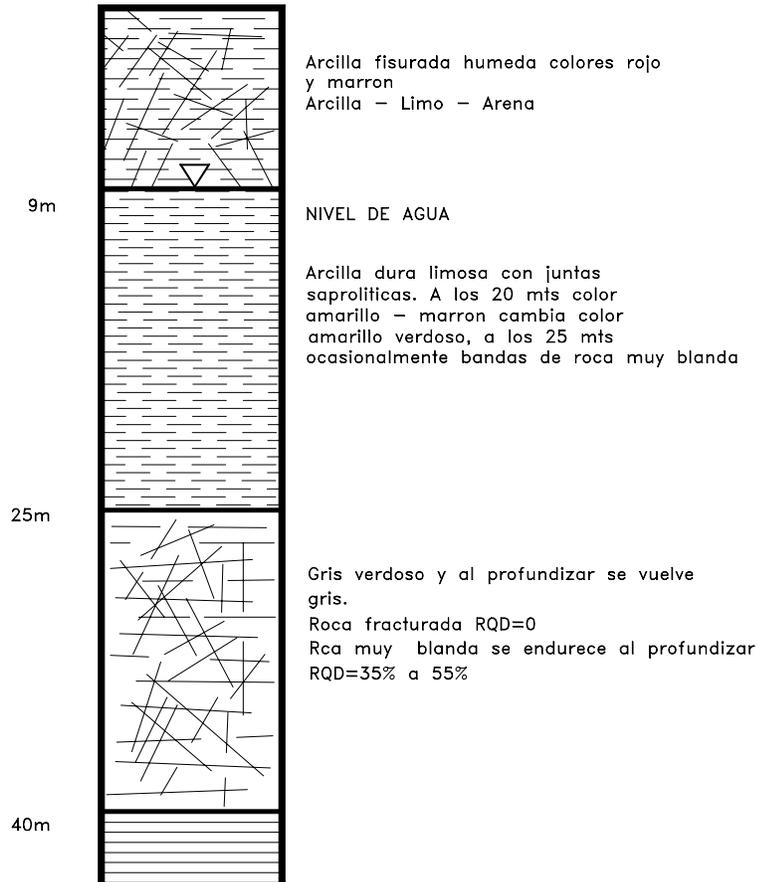
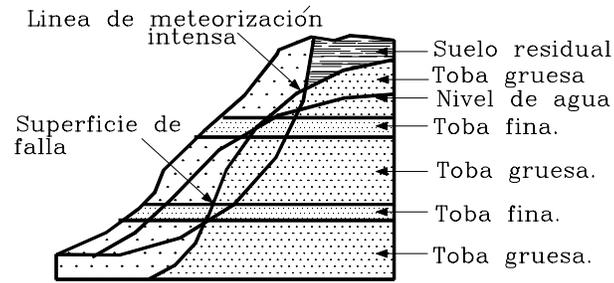


Figura 6.24 Perfil típico de Andesita (Bligh, 1997).

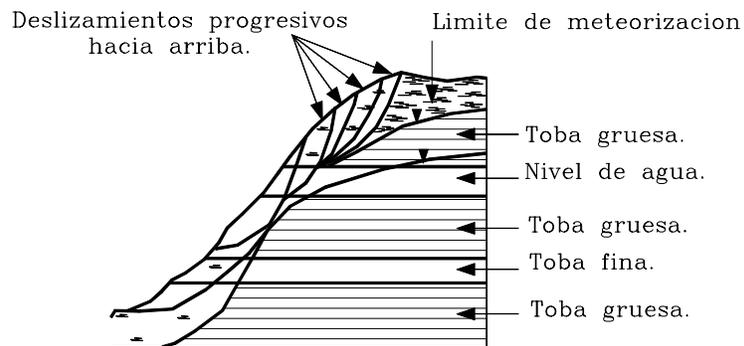
Andesita

La Andesita es una roca oscura de origen volcánico. Los minerales de la andesita se descomponen definiendo una secuencia de colores muy bien definida. Los minerales ferromagnesianos (Piroxenos) se alteran a clorita lo que le da un color verde a las zonas profundas del perfil de meteorización.

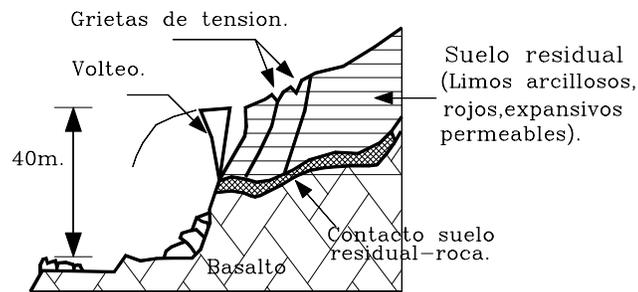
La clorita se altera en la parte superior del perfil oxidándose, lo que le da un color amarillo o marrón formando ferricrete que equivalen a una acumulación gradual de óxidos e hidróxidos de hierro. Este ferricrete puede ser grueso impermeable y compacto.



A. Falla en un talud natural de materiales de origen volcánico con perfil profundo de meteorización



B. Falla al hacer un corte en un talud de materiales de origen volcánico con perfil profundo de meteorización



C. Falla al hacer un corte en un talud de suelos residuales de origen volcánico con perfil de meteorización semi-horizonta profundo

Figura 6.25. Fallas en materiales de origen volcánico.

Basaltos

En el basalto de acuerdo a Ollier (1969) ataca primero a lo largo de los planos de juntas, conduciendo eventualmente a meteorización esferoidal. La mayoría de los minerales son eventualmente convertidos en arcilla y óxido de hierro, con bases sueltas en la solución y como no hay cuarzo en la roca original, el subproducto último de la descomposición es comúnmente un suelo marrón pastoso, blando.

Formaciones aluviales meteorizadas

En ocasiones se encuentran formaciones aluviales de edad Cuaternario o Terciario que han sufrido procesos de meteorización por descomposición, desintegración, oxidación y recementación.

Los perfiles de meteorización son poco profundos en las formaciones poco permeables, pero pueden alcanzar grandes profundidades en los materiales permeables y son escasas las discontinuidades heredadas, las cuales son comúnmente verticales y discontinuas, ocasionadas por fenómenos de secamiento - humedecimiento o por sismos (Figura 6.26); sin embargo en los materiales que han sufrido procesos de neotectónica se pueden presentar discontinuidades similares a las diaclasas de las rocas.

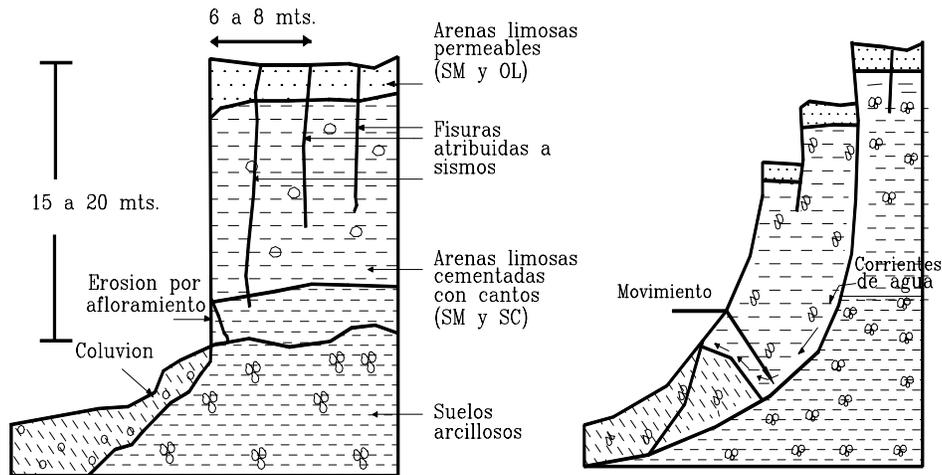


Figura 6.26. Deslizamientos en taludes verticales de suelos aluviales

La meteorización de los suelos aluviales ocurre en tres formas así:

- Meteorización o descomposición de los cantos o partículas gruesas dentro del conjunto. Cada material meteoriza en forma diferente y algunas partículas presentan una resistencia muy alta a la descomposición.
- Oxidación. Los materiales finos se oxidan formando óxidos de hierro, el cual le da una coloración roja al suelo.
- Lixiviado. En suelos permeables se produce el lavado de las partículas finas por acción de las corrientes de agua.

El perfil meteorizado es más cementado y posee una cohesión mayor en la superficie del terreno que en los mantos más profundos pero las partículas gruesas y cantos se encuentran más descompuestos en la superficie.

Las formaciones aluviales de arenas y gravas tienden a formar superficies de falla en planos más o menos rectos y en casos de alturas grandes de capilaridad, se presentan fallas casi verticales, con la presencia de grietas de tensión y una componente pequeña de volteo. En formaciones arcillosas las fallas de deslizamiento tienen superficies generalmente curvas.

REFERENCIAS

- Asanza M.- Nieto G.P., Yepes H., Schuster R.L., Ribadeneira S. (1991) "Landslide blockage of the Pisque River", Northern Ecuador. Proceedings of the sixth International symposium on Landslides, New Zealand.
- Bjerrum L. (1967) "Progressive Failure in Slopes of Overconsolidated Plastic Clay and Clay Shales". Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division ASCE Vol 93 SM5.
- Bjerrum L. (1967) "Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales". JSMFD. ASCE. Vol. 93, sms.
- Blight G.E., Van Heerden A., Brackley I.J.S. (1970) "Landslides at Amsterdamhoek and Bethlehem - an examination of the mechanics of stiff fissured clay". Civil Engineering in South Africa.
- Blight G. (1977) "Slopes and excavations in residual soils". IX ICSMFE Tokyo.
- Blight G. E. (1988) "Construction in Tropical Soils". Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils. Singapore.
- Blight G.E. (1997) "Mechanics of residual soils". Balkema/Rotterdam, 237 p.
- Blyth F.G.H., De Freitas M.H. (1984) "A Geology for Engineers". Edward Arnold, London.
- Brand E.W., Phillipson H.B. (1985) "Review of International Practice for the Sampling and Testing of Residual Soils". Sampling and Testing of Residual Soils. A Review of International Practice.- Hong Kong.
- Brand E.W. (1982) "Analysis and design in residual soils". Geotechnical office, Hong Kong.
- Brand, E.W. (1985). "Predicting the performance of residual soil slopes". In Proc., 11th International conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, Vol. 5, pp. 2541-2578.
- Bressani, L.A., Vaughan P.R. (1989). "Damage to soil structure during Triaxial testing". In Proc., 12th International conference on soil mechanics and foundation engineering, Río de Janeiro, Brazil, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Campos T.M.P., de-Andrade M.H.N., Vargas Jr E.A. (1991) "Unsaturated Colluvium over rock slide in a forested site in Rio de Janeiro, Brazil". Proceedings of the sixth International symposium on Landslides, New Zealand.
- Carrillo A. (1983) "Problemas de estabilidad de taludes en Iquitos", Perú. VII Conferencia Panamericana. Canadá.
- Cascini L., Critelli S., Gulla G., Di Nocera S. (1991) ". Proceedings of the sixth International symposium on Landslides, New Zealand. P 899-904.
- De Melle, V.F.B. (1972). "Thoughts on soil engineering aplicable to residual soils". Proc., Third South-east Asian conference on soil engineering, Hong Kong, Hong Kong Institution of engineers and Southeast Asian Geotechnical Society, pp. 5-34.
- Dearman W.R., Turk N. (1985) "Sampling and Testing of Residual Soils in The United Kingdom". Sampling and Testing of Residual Soils. A Review of International Practice.- Hong Kong -.
- Deere D.V., Patton A.D. (1971) "Estabilidad de taludes en suelos residuales". IV congreso panamericano de mecánica de suelos y cimentaciones. San Juan Puerto Rico.
- Deere D.V., Patton A.D. (1971) "Estabilidad de Taludes en Suelos Residuales". IV Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Puerto Rico.
- Deere, D.V., Patton F.D. (1971). "Slope stability in residual soils". In Proc., Fourth Panamerican conference on soil mechanics and foundation engineering, San Juan Puerto Rico, American Society of civil engineers, New York, Vol. 1, pp. 87-170.
- Egboka B.C.E., Okpoko E.I. (1984) "Gully erosion in the Agulu-Nanka region of Anambra State, Nigeria ". Challenges in African Hydrology and Water Resources. Proceedings of the Harare Symposium.

- Fitzpatrick R.Q., Le Roux J. (1977). "Mineralogy and chemistry of a transvaal black clay topo sequence. Jour , soil Sci. 28:pp165-179.
- Foes, Y. (1973) "Red soil from Kenya as a foundation material". Proceedings of the eight international conference on soil mechanics and foundation engineering, Moscú, Vol. 2, p.p. 73-80.
- Fourie A.B. (1997) "Classification and index tests" Mechanics of residual soils" Blight G.E. editor, pp. 57-64.
- García M. (1980) "Factores que intervienen en los problemas de estabilidad de taludes". II Seminario colombiano de Geotécnia. Bogotá.
- García M. . (1979) "Aspectos geotécnicos de las carreteras Ibague - La línea y Yarumal Puerto Valdivia." II Conferencia regional de geotécnia del occidente colombiano. Popayán.
- Garga V.K. (1997) "Permeability". Mechanics of residual soils" Blight G.E. editor. Pp. 79-94.
- Gidigasú, M.D. (1972) "Mode of formation and geotechnical characteristics of laterite materials of Ghana in relation to soil forming factors". Engineering geology, Amsterdam, Vol. 6, No. 2, p.p. 79 - 150.
- Gómez S. (1992) "Metodologías para Predicción de Movimientos de Masa Asociados con Lluvias en Medios Tropicales". VII Jornadas Geotécnicas, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Santafé de Bogotá.
- González L., Jiménez J. (1981) "Engineering geology of the tropical volcanic soils of La Laguna, Tenerife". Engineering geology., Vol. 17, No. 1, p.p. 1 - 17.
- Grant, K. (1974). "Laterites, ferretes, bauxites and silcrettes". Proceeding of the Second international Congress of the International Association of Engineering Geology, Sao Paulo, Brasil, Vol. 1.
- Gray D. H. (1978) "Role of Woody Vegetation in Reinforcing Soils and Stabilizing Slopes". Proceedings symposium of Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques, Sydney.
- Gray D.H. (1974) "Reinforcement and stabilization of soil by vegetation". Journal of the geotechnical division ASCE. Vol. 100. gtg.
- Greenway D. R. (1987) "Vegetation and Slope Stability". Slope Stability Geotechnical Engineering and Geomorphology, Edited by Anderson y Richards, John Wiley, Chichester-England.
- Gregory K. J. -Walling D. E. (1973) "Drainage Basin Form And Process: A geomorphological approach". Edward Arnold Publishers, London.
- Irfan T.Y. (1988) "Fabric variability and index testing of a granitic saprolite" Second international conference on Geomechanics in Tropical Soils. Sigapore. Pp. 25-35
- Irfan T.Y., Dearman W.R. (1978). "Engineering Classification and index properties of a weathered granite" Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 17 pp. 79-90.
- Irfan T.Y., Powell G.E. (1985). "Engineering geological investigations for pile foundations on a deeply weathered granitic rock in Hong Kong. Bulletin of IAEG 32 . p. 67-80.
- Irfan T.Y., Woods N.W. (1988) "The Influence of Relict Discontinuities on Slope Stability in Saprolitic Soils". Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils. Singapore.
- Lambe P.C. "Residual soils". Landslides investigation and mitigation. Special report 247. Transportation Research Board. National council. pp. 507-524.
- Little, A.L. (1969) "The engineering classification of residual tropical soils". Proceedings of the specialty session on the engineering properties of laterite soils, Vol. 1, 7th. International conference on soil mechanics and foundation engineering, Mexico City, p.p. 1 - 10.
- Lohnes R, Demirel T. (1973) "Strength and structure of laterites and lateritic soils". Engineering geology, Amsterdam, Vol. 7, No. 1, p.p. 13-33.
- López J.H. "Aspectos de la estabilidad de las laderas al norte de Medellín".
- Lumb, P. (1962). "Effect of rain storms on slope stability". In Proc., Symposium on Hong Kong soils, Hong Kong, Hong Kong Joint group of the Institutions of civil, mechanical and electrical engineers, pp. 73-87.
- Lumb, P. (1975) "Slope Failures in Hong Kong". Quarterly Journal of engineering geology, Geological Society of London, Vol. 8, pp. 31-65.
- Mac Gregor J.P., McManus K.J. (1991) "Management of Landslides subject to mass movement". Proceedings of the sixth international symposium on Landslides, New Zealand.
- Massey J.B., Pang P.L.R. (1988) "Stability of Slopes and excavations in Tropical Soils". Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore.
- Mitchell, J.K., Sitar N. (1982). "Engineering properties of tropical residual soils". In Engineering and construction in Tropical and residual soils, Honolulu, Hawaii, America Society of civil engineers, New York, pp. 30-57.
- Mora S. (1991) "The Puriscal, Costa Rica Landslide and its dynamic. Proceedings of the sixth international symposium on Landslides, New Zealand.
- Morein, W. y Todor., P. (1975) "Laterite and lateritic soils and other problem soils of the tropics". An engineering evaluation A.I.D. Lyon Associates Inc. Baltimore. p. 369.
- Morgenstern N. R., Matos M.M. (1975) "Stability of slopes in residual Soils". 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol 3 . Buenos Aires.
- Ollier. C.D. (1969). "Weathering". American Elsevier, New York, 304 pp.