

5 Litología y Estructura Geológica

5.1 INTRODUCCION

Cada formación geológica posee una susceptibilidad específica a los deslizamientos y los mapas de inventario de deslizamientos presentan densidades de número o tamaño de los movimientos que son característicos de determinadas áreas dentro de cada formación geológica.

Cuando un talud está formado por varios tipos de roca, el comportamiento geotécnico del conjunto es diferente al de cada material por separado. Deben estudiarse las propiedades de cada tipo de roca, las características de sus discontinuidades y a su vez la interacción de las propiedades y discontinuidades dentro del conjunto (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Clasificación general de ingeniería de los diversos materiales litológicos.

Tipo de material	Formación	Características	Detalles prioritarios
Roca	Ignea Metamórfica	Rocas formadas por cristales de minerales	Estructura geológica. Fracturas.
	Sedimentaria (debe definirse el tipo de roca en la forma más detallada posible).	Rocas formadas por granos cementados, depositados en capas.	Planos de estratificación.
Roca meteorizada (saprolito)	Ignea Metamórfica Sedimentaria	Permanecen algunos rasgos de la roca pero ésta se encuentra descompuesta, en las discontinuidades.	Estructura geológica Discontinuidades Estado de meteorización.
Suelo	Residual	Roca meteorizada en la cual ya no aparecen las características físicas de la roca.	Estructura geológica. Discontinuidades. Propiedades fisicoquímicas.
	Aluvial Coluvial. Glacial Loess	Grupos de partículas o bloques de suelo o roca.	Propiedades físicas.
Materiales heterogéneos	Roca, roca meteorizada, suelo.	Mezcla de diversos materiales en un mismo perfil.	Estructura geológica. Discontinuidades. Meteorización. Propiedades fisicoquímicas.

5.2 LITOLOGIA

Desde el punto de vista litológico los materiales se clasifican de acuerdo a su génesis o formación (Abramson, 1996) diferenciándose dos grupos de materiales diversos que son: la roca y el suelo. Las rocas a su vez se clasifican de acuerdo a su origen así:

Rocas Ígneas intrusivas

Las rocas Ígneas intrusivas son el producto del enfriamiento del Magma, antes de aflorar este a la superficie. Las rocas ígneas forman el 98% del volumen de la corteza terrestre, aunque en superficie son más comunes las rocas sedimentarias y en menor proporción las ígneas y metamórficas.

Las rocas ígneas intrusivas poseen generalmente, una microestructura desordenada e isotrópica con uniones muy fuertes entre los cristales, en su estado intacto. Generalmente, son rocas muy duras y densas, y en su estado natural inalterado poseen una resistencia al cortante muy alta, sin embargo, al fracturarse y meteorizarse pueden ser blandas y débiles. El comportamiento de las rocas ígneas sanas o no meteorizadas en los taludes es controlado por su estructura, conformada por las juntas o diaclasas, fallas y zonas de corte, las cuales actúan como superficies de debilidad. Las principales rocas ígneas intrusivas son el Granito, la Diorita, la Dolerita, y el Gabro.

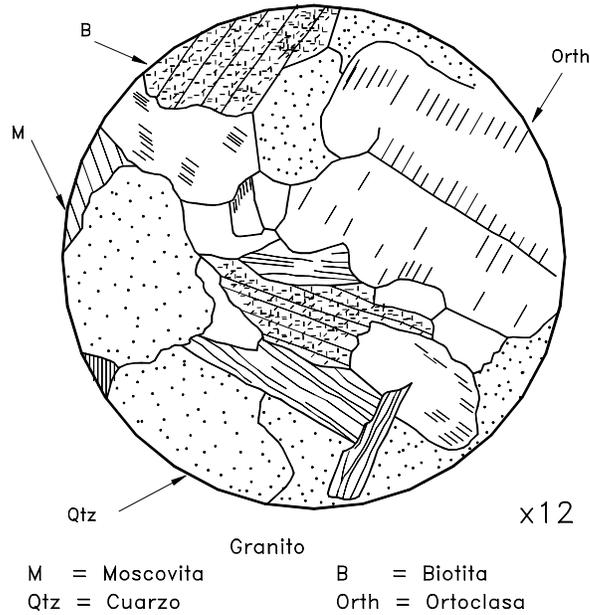


Figura 5.1 Sección delgada de Granito vista al microscopio (Blyth y de Freitas 1984).

Granito

El Granito es una roca ígnea ácida de grano grueso, compuesto principalmente por cuarzo, feldspatos y algo de mica con algunos otros componentes secundarios (Figura 5.1).

El granito se forma por la cristalización lenta del magma, debajo de las cadenas montañosas que se encuentran en proceso de elevación, ocasionado por los intensos movimientos de la corteza terrestre. Las grandes masas graníticas se llaman Batolitos. Las inclusiones menores forman diques, generalmente, de textura fina. La Pelmatita es de composición similar al granito pero posee cristales mucho más gruesos. El granito es muy importante como roca estructuralmente sana, dura y relativamente resistente a la descomposición.

Diorita

La Diorita es una roca ígnea intermedia de grano grueso compuesta principalmente, de feldespatos, plagioclasa, así como hornblenda, que es un material ferromagnesiano de color verde. El contenido del cuarzo puede llegar hasta el 10%. La roca tiene un color que varía de blanco verdoso a verde, dependiendo del contenido de Hornblenda. La granodiorita es una roca intermedia entre el granito y la diorita y su textura es generalmente gruesas. La diorita se encuentra en masas más pequeñas que los granitos, y frecuentemente forma modificaciones locales a granodiorita, tonalita e inclusiones de granito.

Gabro

El Gabro está compuesto esencialmente por plagioclasas y piroxeno y puede tener pequeñas cantidades de cuarzo, su color es un gris moteado. El tamaño de los cristales es mayor que el de la Dolerita (Figura 5.2).

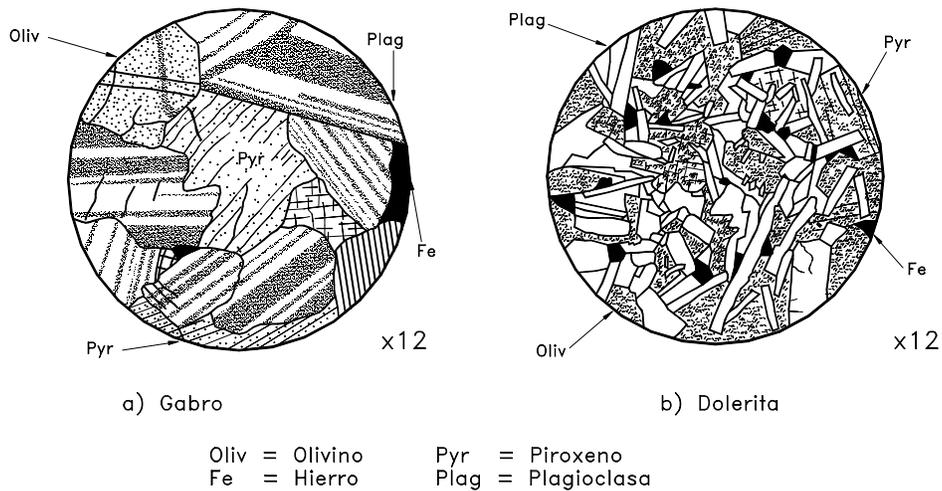


Figura 5.2 Secciones delgadas de Gabro y Dolerita vistas al microscopio (Blyth y de Freitas 1984).

Dolerita

La Dolerita es una roca ígnea básica con alto contenido de magnesio, calcio o sodio en su composición química. Aproximadamente la mitad de la composición mineral, está constituida por los ferromagnesianos olivino, piroxeno y hornblenda. Su color varía de verde grisáceo a verde oscuro. El color más oscuro indica un mayor contenido de hierro. Al meteorizarse produce hidróxidos de hierro y arcilla color café.

Las Doleritas son rocas muy resistentes porque su estructura cristalina se compone de cristales de feldespato de forma tubular y orientados al azar, de modo que toda la masa se comporta como un elemento reforzado.

Las discontinuidades en las Doleritas tienen densidad y orientaciones regulares, a diferencia de los sistemas regulares de juntas que se observan en los granitos. Los planos de las diaclasas son irregulares y es difícil de excavar en la roca porque se requieren generalmente, la utilización de explosivos.

Rocas Volcánicas o ígneas extrusivas

Las rocas Volcánicas o Piroclásticas también conocidas como rocas Ígneas extrusivas son producto de la cristalización de los materiales expulsados por los volcanes. Las propiedades ingenieriles de las rocas volcánicas dependen del grado de solidificación y de acuerdo a ésta presentan una variedad de resistencias y permeabilidades. El principal problema de las rocas volcánicas es su fácil desintegración al secarse y humedecerse y la presencia de arcillas activas como la Montmorillonita como subproducto del proceso de meteorización.

Las principales rocas volcánicas son la riolita, la andesita y el basalto y las tobas. La microestructura es muy variada de acuerdo a su proceso de formación.

Riolita

La Riolita es el componente exclusivo de grano fino, del magma granítico que escapó de la superficie a través de una erupción volcánica y presenta algunas características similares a un granito. La roca líquida pudo haber emergido formando una masa de Riolita que se enfrió y solidificó. Muestra un bandeamiento formado por el flujo viscoso de la lava durante la destrucción. Los megacrístales de cuarzo o feldespatos le dan a las Riolitas diferencias de carácter y comportamiento.

Tobas

Las Tobas volcánicas son rocas formadas por material suelto arrojado por un volcán en erupción. Son materiales muy porosos y ricos en vidrio. En ocasiones, las tobas presentan depósitos de materiales arcillosos, expansivos o arcillas inestables.

Andesita

La Andesita es una roca de grano fino volcánica, que se le encuentra como flujo de lava y ocasionalmente, como pequeñas inclusiones. Generalmente, es de color marrón y es muy común en las áreas volcánicas de Sur América. Los minerales constituyentes son esencialmente plagioclasa, hornblenda y biotita con muy poco cuarzo. Tiene básicamente la misma composición de la Diorita, pero tiene un grano más fino y puede contener algunos cristales de Plagioclasa de varios milímetros de largo.

Basalto

El Basalto es una roca ígnea básica de grano fino, formada por la erupción volcánica que se cristaliza en forma muy rápida. El tamaño de los cristales es menor de 0.05 mm. y para observarlo se requiere microscopio (Figura 5.3). La composición mineral del basalto es aproximadamente mitad piroxeno y mitad plagioclasa, hasta con 5% de óxido de hierro.

El Basalto en las zonas volcánicas forma grandes depósitos. Por general, el color es negruzco o verde oscuro pero en ocasiones puede ser rojizo o marrón, debido a la oxidación de los minerales que se convierten en óxidos de hierro. El suelo formado por los Basaltos es muy rico en nutrientes como el potasio y el fósforo y por esta razón, las

zonas de basaltos son utilizadas para agricultura intensiva en las zonas cafeteras de Colombia.

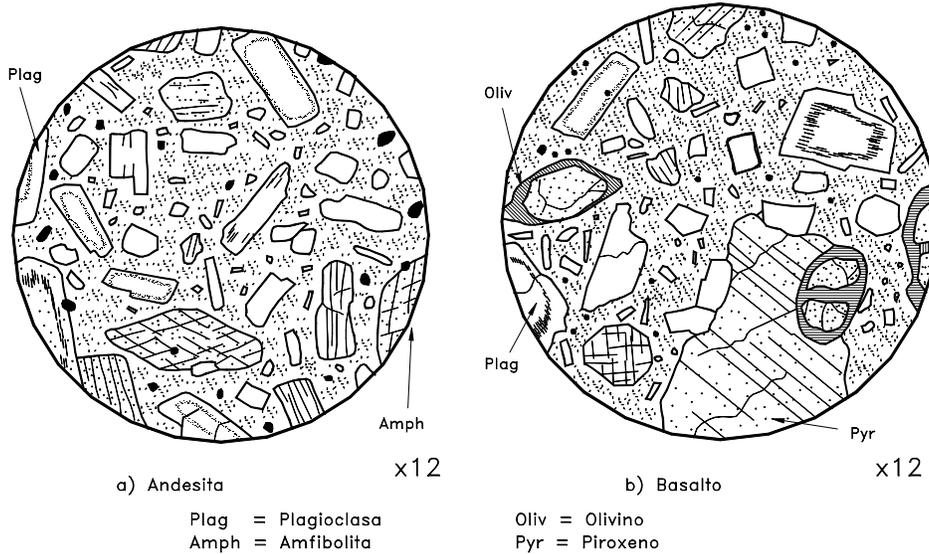


Figura 5.3 Secciones delgadas de Andesita y Basalto vistas al microscopio (Blyth y de Freitas 1984).

El Basalto sano es duro y difícil de excavar y se requiere el uso de explosivos. Es generalmente, un material excelente para construcción. Se puede esperar que durante las excavaciones se encuentren capas o lentes de Basalto meteorizado y pueden desprenderse grandes bloques. El Ingeniero debe estar preparado para manejar las zonas de debilidad que se encuentran debajo de la roca.

Acidez de las rocas ígneas

La acidez es una de las características de las rocas ígneas que más afecta su comportamiento, especialmente por su efecto sobre la meteorización. Las rocas ígneas ácidas son aquellas que poseen un alto contenido de cuarzo y las básicas son las que contienen poco o ningún cuarzo (Tabla 5.2); este se meteoriza con mayor dificultad que los Feldespatos y forma suelos más granulares. El contenido de cuarzo se reconoce como acidez.

Tabla. 5.2 Acidez de las rocas ígneas (Attewell, 1976)

Modo de ocurrencia	Ácida > 66% SiO ₂	Intermedia 52-66% SiO ₂	Básica < 52% SiO ₂
Extrusiva volcánica	Riolita	Andesita	Basalto
Diques e intrusiones menores	Cuarzo Porfirita	Porfirita	Dolerita
Intrusiones mayores Plutónicas	Granito	Diorita	Gabro

La mayoría de las rocas ígneas en estado sano son muy competentes pero al meteorizarse forman suelos que pueden ser poco resistentes.

Rocas Metamórficas

Son el resultado del Metamorfismo o recristalización de rocas ígneas y sedimentarias. En este proceso las rocas son sometidas a cambios texturales y mineralógicos, en tal forma que sus características originales son alteradas o completamente perdidas. Como consecuencia de esto, las rocas metamórficas exhiben un alto rango de características ingenieriles y comúnmente son muy útiles como materiales de construcción.

Las características de comportamiento de los taludes en rocas metamórficas sanas dependen de sus patrones de fracturación y bandeamiento (Microestructura textura y estructura). La foliación y la esquistosidad presente en algunas rocas metamórficas las hacen muy susceptibles a la meteorización (Tabla 5.3). Las rocas metamórficas más comunes son la Cuarcita, el Neiss, el Esquisto, La Serpentinita, la Pizarra, la Filita y el Mármol.

Tabla 5.3 Clasificación de Textura de Rocas Metamórficas

Textura	Roca	Características
Granular	Chert, Cuarcita	Grano fino con predominio de partículas de cuarzo
	Mármol	Granos finos a gruesos, partículas de caliza o dolomita
Bandeada	Neiss	Granos de minerales laminares elongados con bandeado composicional
Foliada	Esquisto, Serpentinita, Pizarra, Filita	Rocas foliadas finas con proporciones altas de filosilicatos

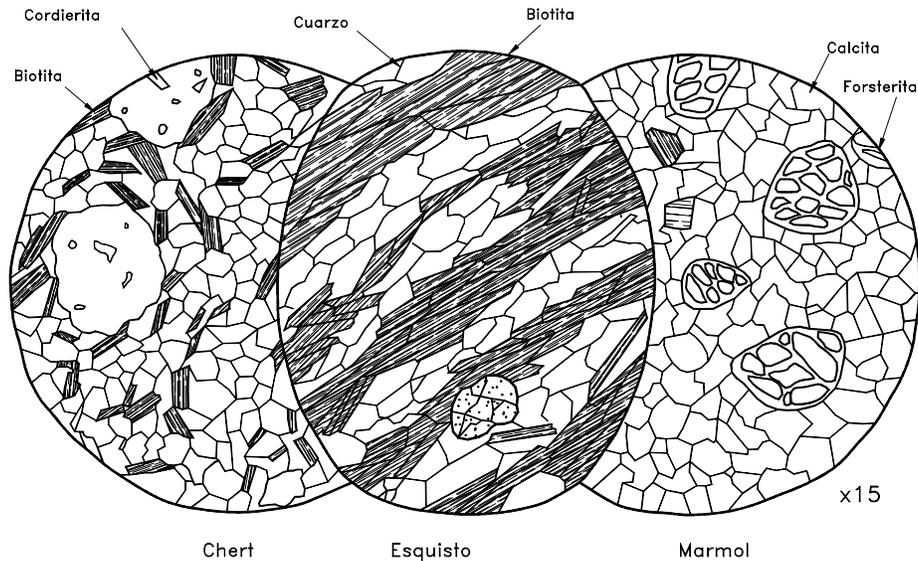


Figura 5.4 Secciones delgadas de rocas Metamórficas vistas al microscopio (Blyth y de Freitas 1984).

Neiss

El Neiss es una roca bandeada o foliada, en la cual bandas de color claro, de cuarzos y feldespatos forman microestructuras paralelas con bandas de otros minerales como

biotita y hornblenda y en algunos casos piroxeno. La biotita está generalmente, acompañada de moscovita.

El ortoneiss es una roca derivada del granito por metamorfismo regional y el paraneiss es derivado de sedimentos. Algunos ortoneisses tienen la composición de un granito o granodiorita. Los Neisses son más resistentes que los esquistos, aunque menos que los granitos.

Esquisto

Los Esquistos son rocas metamórficas que se componen de cristales planos de micas, clorita verde, hornblenda, cuarzo. Los cristales son tubulares y se alinean, de tal manera que las rocas se rompen con facilidad en fragmentos planos (Figura 5.4). Esta roca es muy físil y se parte muy fácilmente. Las superficies de las fracturas son menos lisas que las pizarras. Los esquistos son materiales muy inestables en los taludes debido a su microestructura y a la facilidad con que se meteoriza.

Pizarra

La Pizarra es una roca dura formada bajo la influencia de esfuerzos muy altos sobre sedimentos arcillosos. El proceso de cristalización forma minerales laminares tales como clorita y sericita y algunos granos de cuarzo. Algunas pizarras son derivadas de rocas volcánicas finas como las tobas. En ocasiones, la roca tiene muchos planos de clivaje, de tal manera que se forman láminas planas de roca que se utilizan como material de construcción. En ocasiones, estas capas o láminas son muy delgadas y físilas. La pizarra es una roca relativamente resistente a la meteorización pero se resquebraja muy fácilmente.

Filita

La Filita es una roca similar a la pizarra pero posee cristales planos ovalados como hojas de árbol, que dan a los planos de clivaje una textura característica. Estos planos de clivaje están cruzados por fracturas que a menudo presentan un dibujo geométrico regular, ocasionando que la roca se rompa en forma romboédricas o rectangulares.

Chert

El Chert es un precipitado orgánico e inorgánico de sílica. La sílica es principalmente cuarzo criptocristalino. El chert puede presentarse en forma de precipitación o nodular.

Rocas Sedimentarias

Las rocas Sedimentarias están formadas por la sedimentación y cementación de partículas de arcilla, arena, grava o cantos (Tabla 5.4). Sus características de estabilidad dependen generalmente, del tamaño de los granos, los planos de estratificación, las fracturas normales a la estratificación y el grado de cementación. Las rocas sedimentarias más comunes son el Conglomerado, Breccia, las Lutitas, Areniscas Limolitas, Calizas, Dolomitas, y Evaporitas.

Conglomerado y Breccia

El conglomerado y la Breccia son dos variedades de roca sedimentarias de grano grueso. Se compone de guijarros de materiales resistentes cementados por otros materiales más finos. El nombre depende de la forma de los guijarros, si son redondeados se les llama conglomerados y si son angulosos se les denomina breccias o brechas. En algunos casos contienen material tanto redondeado como anguloso. La porosidad de estas rocas es muy alta y pueden conformar acuíferos importantes.

Los conglomerados son bastante estables y permiten cortes relativamente pendientes debido a su cementación y a que los materiales gruesos tienen un efecto de refuerzo sobre la masa de roca.

Tabla 5.4 Características de las rocas sedimentarias

Roca	Componente	Características
Conglomerado	Partículas grandes redondeadas de roca y fragmentos de minerales.	Más del 50% de los granos mayores de 2 mm y menos del 25% de arcilla
Breccia	Partículas angulares de roca y fragmentos de minerales	Más del 50% de los granos mayores de 2 mm y menos del 25% de arcilla
Arenisca	Partículas redondeadas menores de roca	Más del 50% de los granos entre 2 y 0.06 mm y menos del 25% de arcilla.
Limolita	Partículas del tamaño de limos	Más del 50% de los granos menores de 0.06 mm y menos del 25% de arcilla
Arcillolita	Partículas de arcilla	Más del 50% de arcilla.
Lodolita	Rocas arcillosas con alto contenido de limos	Más del 50% de los limos.
Caliza	Granos de calcita	Más del 50% de calcita y menos del 25% de arcilla.

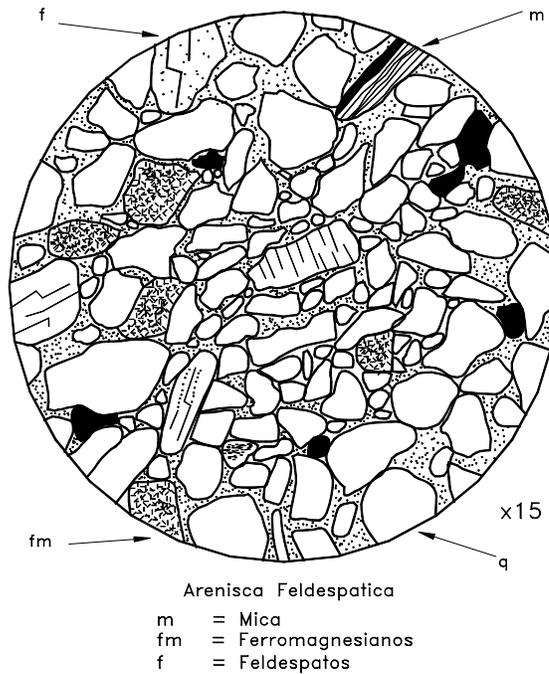


Figura 5.5 Sección delgada de arenisca vista al microscopio (Blyth y de Freitas 1984).

Areniscas

Las areniscas son una forma de arena endurecida por procesos geológicos. El tamaño de los granos varía de 60µm. a varios mm. y están cementados por otros minerales, con frecuencia por el cuarzo precipitado (Figura 5.5).

Las Areniscas se clasifican de acuerdo al tamaño de sus granos como fina, media o gruesa y de acuerdo a la naturaleza de los materiales cementantes. Las areniscas aunque tienden a ser resistentes, en ocasiones son relativamente débiles cuando su cementación ha sido pobre.

El comportamiento de la arenisca meteorizada depende de la clase de cemento. Si es de calcita se disuelve con mayor facilidad que el de sílice. El cemento de óxido de hierro puede dar un color rojo a la roca y el dióxido de hierro un color marrón a amarillo. Algunas areniscas son de color verde grisáceo, debido a cambios ligeros en la composición química. Las areniscas compuestas casi de puro cuarzo se denominan Cuarcitas.

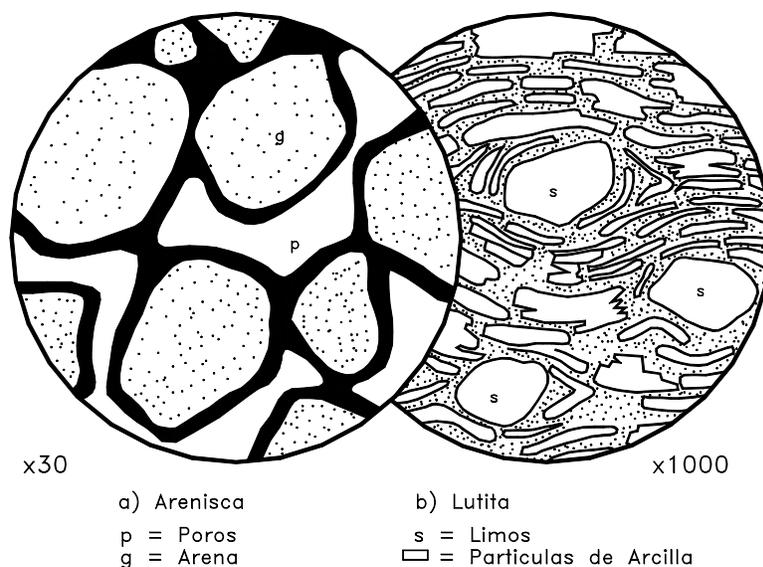


Figura 5.6 Secciones delgadas de areniscas y lutitas vistas al microscopio (Blyth y de Freitas 1984).

Lutitas o Arcillolitas

Las rocas que contienen cantidades importantes de arcilla se les denomina genéricamente como Lutitas, y a ellas pertenecen las limolitas, arcillolitas y lodolitas (Figura 5.6).

Las Lutitas son uno de los materiales más complejo desde el punto de vista de estabilidad de taludes. De acuerdo con el grado de solidificación las Lutitas varían en su comportamiento. Las lutitas de grado bajo tienden a desintegrarse después de varios ciclos de secado y humedecimiento. Algunas Lutitas son muy resistentes pero la mayoría presentan una resistencia al cortante, de mediana a baja. Las lutitas pueden ser arcillosas, limosas, arenosas o calcáreas de acuerdo a los tamaños y composición de las partículas. En ocasiones tienen una presencia de roca cementada y en otras el de un suelo con capas relativamente sueltas.

Las arcillolitas son las lutitas con alto contenido de arcilla, lo cual las hace muy físciles y susceptibles a deslizamiento. Es muy común encontrar lodolitas negras con alto

contenido de carbón de grano fino y sulfuro de hierro, las cuales son muy fisiles y producen una gran cantidad de deslizamientos.

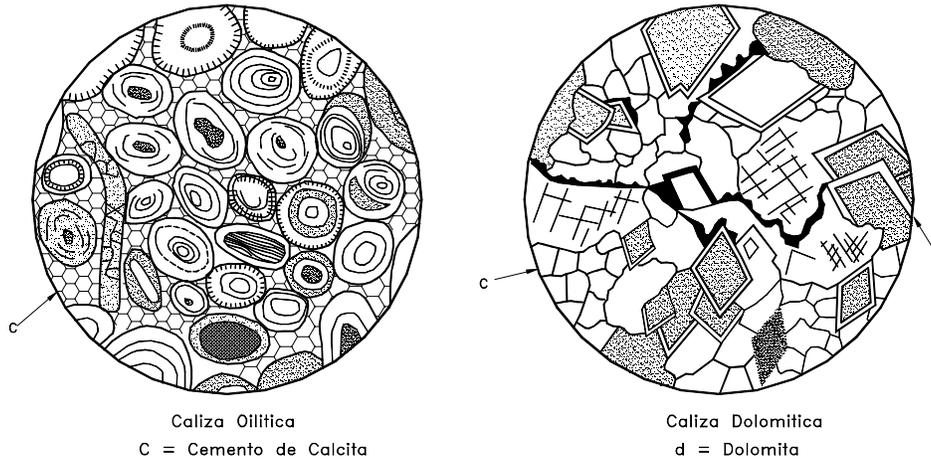


Figura 5.7 Secciones delgadas de caliza vistas al microscopio (Blyth y de Freitas 1984).

Calizas y Dolomitas

La Caliza es una roca sedimentaria con más del 50% de carbonato de calcio (Figura 5.7). Esta roca es por lo general dura y compacta, pero se presentan problemas geotécnicos relacionados con la disolución del CaCO_3 .

Existe una variedad de rocas de la familia de la caliza dependiendo de las cantidades de carbonato de calcio, arena, limos, conchas de animales marinos y arcilla. Las calizas generalmente, son de color gris azulado pero las hay también blancas y de otras coloraciones. En las calizas se pueden formar grandes cavernas que actúan como conductos internos del agua subterránea, las cuales pueden conducir cantidades importantes de agua de un sitio a otro y facilitar la infiltración general.

La denudación de las rocas calizas ocasionada por la infiltración del agua de lluvia conforma una topografía kárstica. En una zona kárstica la mayoría de la precipitación pluvial se infiltra a través de fracturas y cavernas.

Las arcillolitas calcáreas o margas son arcillolitas cementadas con material calcáreo. Las calizas en las cuales la calcita es reemplazada por dolomita, un producto con alto contenido de magnesio se les llaman dolomitas.

Evaporitas

Las Evaporitas incluyen el yeso, la anhidrita y halita. Ellas, generalmente están asociadas con las arcillolitas, las limolitas y las calizas, formando capas de evaporitas.

Suelos residuales

Los suelos residuales son el producto de la meteorización de las rocas y su comportamiento depende de las propiedades de la roca original y del grado de descomposición.

Los deslizamientos de tierra son muy comunes en suelos residuales, especialmente en los periodos de lluvias intensas. En el capítulo 6 se presenta detalle de la clasificación y comportamiento de los suelos residuales.

Suelos aluviales

Los suelos aluviales son depósitos transportados por el agua en movimiento y depositados cuando la velocidad del agua ha disminuido; estos materiales pueden ser de origen fluvial o lacustre y pueden contener partículas finas, gruesas o entremezcladas. Los depósitos aluviales generalmente, son estratificados y la permeabilidad en la dirección horizontal es mayor que en la dirección vertical.

Los suelos aluviales, compuestos por arcilla tienden a ser blandos y los de arena tienden a ser sueltos. Debido a su poca cementación, los materiales aluviales son propensos a erosión y deslizamientos.

En ocasiones, los suelos aluviales presentan una matriz de arcilla cementando los granos de arena, grava y limos. Estos cementantes son generalmente, óxidos de hierro o arcillas. Los suelos aluviales cementados forman, en ocasiones, terrazas altas con niveles freáticos colgados muy susceptibles a los deslizamientos.

Suelos glaciales

Los depósitos glaciales son transportados por los glaciales, los cuales al aumentar la temperatura, se deshuelan y se forman estos depósitos de suelo de origen glacial. Los depósitos glaciales pueden variar en composición de tamaño de granos, desde grandes cantos hasta las arcillas.

Suelos eólicos

Los suelos Eólicos son transportados por el viento y varían desde Dunas de arena hasta Loess, que son depósitos de arena fina y limos. Generalmente, tienen muy poca vegetación y los materiales son muy ricos en cuarzo y poco densos.

El principal problema de los depósitos Eólicos es la erosión.

Depósitos orgánicos

Son depósitos de materiales orgánicos, los depósitos de turba o material orgánico que no se ha descompuesto totalmente, debido a su alto contenido de agua. Los depósitos orgánicos en ocasiones se encuentran estratificados con otros elementos tales como limos o arenas o entremezclados con arcilla. Estos materiales son muy problemáticos para la ejecución de excavaciones por su muy baja resistencia al cortante. Es común, que los materiales orgánicos fluyan al realizar excavaciones o se licúen en los eventos sísmicos.

Suelos coluviales

Los suelos coluviales o coluviones son depósitos de ladera, producto de desprendimientos o deslizamiento de roca o suelo y son materiales muy susceptibles a los deslizamientos.

Al final del presente capítulo se hace una descripción detallada del comportamiento de estos materiales.

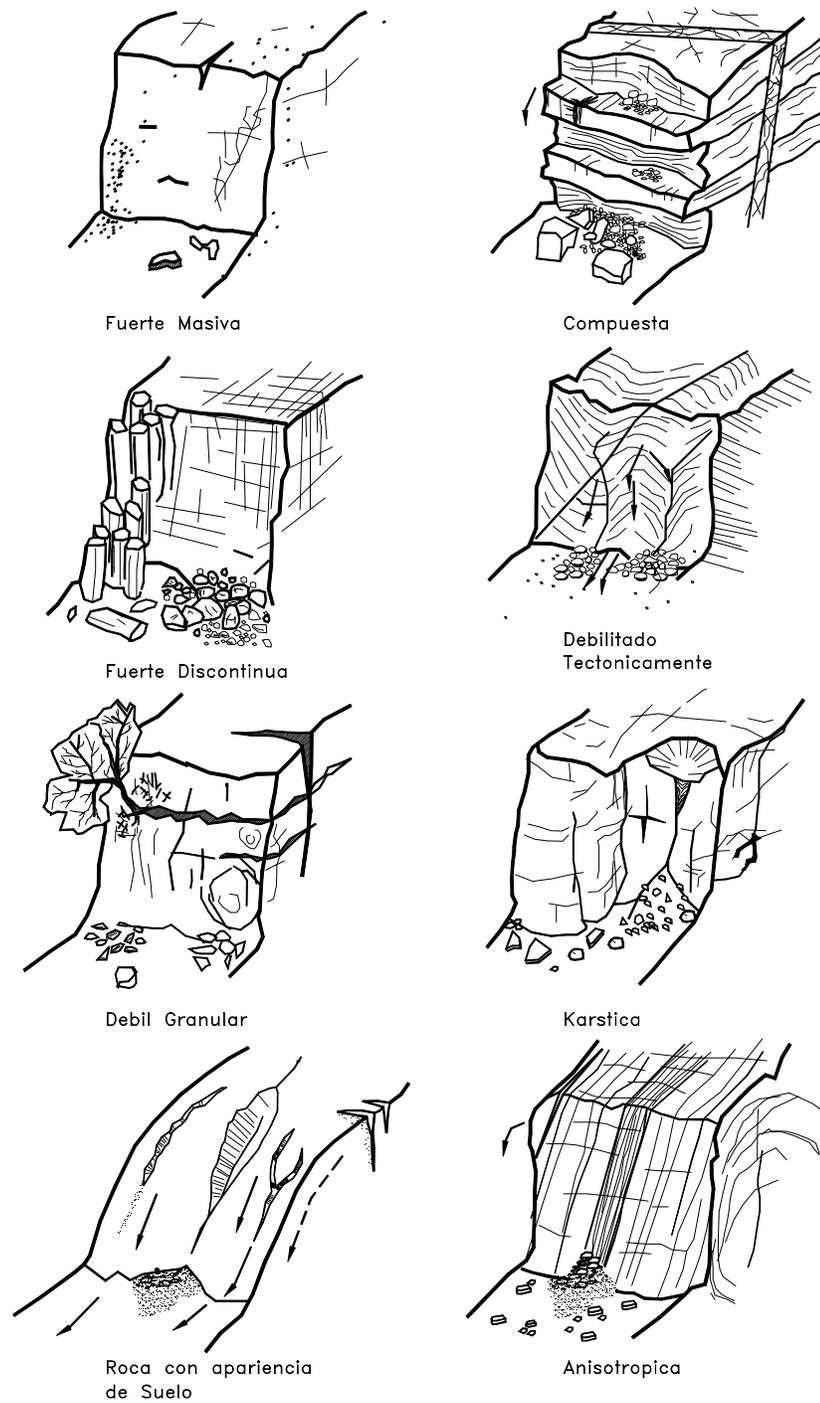


Figura 5.8 Grupos litoestructurales (Nicholson y Hencher, 1997).

5.3 GRUPOS LITOSTRUCTURALES

Nicholson y Hencher (1997) proponen una clasificación de las rocas (Figura 5.8), de acuerdo a grupos litoestructurales, teniendo en cuenta sus susceptibilidades, resistencia y características litológicas, la cual se indica a continuación:

1. Roca fuerte masiva

Tipos de roca

Granito, Gabro, Dolerita, Basalto, Riolita, Metacuarcita, Neiss, Caliza y Mármol.

Características

Resistente a la mayoría de los procesos de deterioro de masas de roca, aunque pueden ser más susceptibles a la meteorización. Puede ocurrir desintegración localizada alrededor de las discontinuidades mayores, conduciendo a caídos de bloques. Los caídos de granos ocurren en las rocas algo débiles.

2. Roca fuerte discontinua

Tipos de roca

Arenisca con uniones de sílica y conglomerados, ortocuarcita, piroclásticos, calizas, dolomitas, mármoles y rocas ígneas fisuradas.

Características

Susceptible a varios modos de deterioro dependiendo del sistema de fracturas. Los caídos de roca y desmoronamiento de los taludes son dominantes con caídos de bloques y de placas de roca e inclinaciones.

3. Roca compuesta

Tipos de roca

Intercalaciones de estratos duros y blandos, rocas bandeadas o con intrusiones ígneas.

Características

Susceptible a meteorización diferencial que conduce al colapso de los overhangs con caídos de bloques y de rocas asociados.

4. Roca debilitada tectónicamente

Tipos de roca

Roca fallada o bandeada con fracturas y zonas de breccia.

Características

Zonas trituradas o cortadas y altamente fracturadas, susceptible a colapso, desmoronamiento, caídos de roca y bloques.

5. Roca débil granular

Tipos de roca

Arenisca friable, arcillolita, arenisca o conglomerado con uniones de yeso, arcilla o calcio, margas y calizas débiles.

Características

Susceptible a meteorización del material y debilitamiento que conduce a la formación de láminas, caída de granos, lavado de granos y ocasionalmente colapso y caída de bloques. La fragmentación se puede asociar con la penetración de elementos extraños por las fisuras.

6. Roca kárstica

Tipos de roca

Calizas generalmente, duras.

Características

Susceptible a la formación de cavidades de disolución y colapso. Generalmente aparecen masas discontinuas de roca dura que son susceptibles a desmoronamiento y caídos de roca que puede acelerarse por la actividad de disolución. Se pueden desarrollar diversos tipos de formas Kársticas.

7. Roca Anisotrópica

Tipos de roca

Lutitas, pizarras, filitas y esquistos con estructura laminar.

Características

Susceptible a la formación de cáscaras y láminas que pueden colapsar. También son susceptibles al lavado superficial y proceso de erosión.

8. Roca con apariencia de suelo

Tipos de roca

Chalk, marl, areniscas muy débiles, roca altamente meteorizada y suelo residual.

Características

Susceptible a procesos de erosión, surcos y cárcavas. El deterioro primario ocurre por lavado superficial y caída de granos con flujos de detritos y colapso como modos secundarios.

5.4 MICROESTRUCTURA DE LAS ROCAS

Minerales

Las rocas de todas las tres clases principales de rocas, están compuestas de un grupo grande y variado de minerales, aunque solamente unos pocos minerales son los principales componentes de la roca. Los minerales más comunes son los feldespatos y en una menor proporción el Cuarzo.

En el caso de las rocas ígneas, los minerales en orden de frecuencia son feldespatos (62%), cuarzo (21%), hornblenda, piroxeno y micas. Las rocas metamórficas contienen otros minerales tales como clorita, granate y epidotita, mientras las rocas sedimentarias contienen carbonatos, arcillas, sales minerales, yeso y anhidrita.

Feldespatos

Los Feldespatos son silicoaluminatos de potasio, sodio y calcio. Hay tres clases principales de albita: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; ortoclasa: KAlSi_3O_8 y anortita: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. Son de color blanco pero pueden tener varias tonalidades. Los cristales de feldespato se fraccionan con facilidad a lo largo de planos suaves y se observan fácilmente en las rocas debido a que estas superficies reflejan la luz.

Cuarzo

Es un mineral duro y químicamente resistente. No se raya con una navaja. Forma hermosos racimos de cristales en cavidades de roca, y se presenta en muy diversos colores, muchos de ellos transparentes. El cuarzo se observa con frecuencia en vetas de color blanco en las areniscas o se le encuentra como grano de arena en los depósitos aluviales.

Partículas que conforman la roca o suelo

Las partículas que conforman la roca y el suelo pueden determinar el comportamiento de los materiales. El tamaño de las partículas puede variar desde grandes bloques de varios metros de diámetro hasta las partículas de arcilla y generalmente, se les subdivide en seis grandes categorías:

- a. *Bloques*: Tamaños superiores a 300 mm.
- b. *Cantos*: Tamaños de 150 a 300 mm.
- c. *Gravas*: Gruesas de 18 a 150 mm. y finas de 4.76 a 18 mm.
- d. *Arenas*: Gruesas de 2 a 4.76mm, medias de 0.42 a 2mm y finas de 0.074 a 0.42mm.
- e. *Limos*: Partículas granulares menores de 0.074 mm.
- f. *Arcillas*: Partículas plásticas de tamaño menor a 0.074 mm.

Las partículas gruesas, tales como bloques y cantos, pueden tener un efecto estabilizante, debido a su tamaño y usualmente las arenas gruesas y las gravas son relativamente estables, si no están afectadas por presiones de poro. Por otro lado los limos y arcillas tienden a ser inestables en estado saturado.

Las partículas de arcilla poseen una composición mineral que la hacen susceptibles a expansión.

Las Arcillas

Las arcillas son esencialmente hidróxido de aluminio microcristalinos formando capas de silicatos, los cuales tienen una estructura en capas o partículas laminares. Los principales tipo de arcilla son las caolinitas, las illitas y motmorillonitas. De las propiedades de las arcillas, la capacidad de intercambio catiónico generalmente, controla su comportamiento frente al agua y su inestabilidad (Tabla 5.5). A mayor capacidad de intercambio catiónico la arcilla es más inestable.

Tabla. 5.5 Capacidad de intercambio catiónico de las arcillas (Grim, 1962).

Arcilla	Capacidad de intercambio catiónico en miliequivalentes por cien gramos
Caolinita	3-15
Aloisita -2H ₂ O	5-10
Aloisita - 4 H ₂ O	10-40
Illita	10-40
Montmorillonita	8-150

De las motmorillonitas, la motmorillonita sódica o Bentonita es muy conocida en el ámbito de la ingeniería, la cual posee la capacidad de absorber grandes cantidades de agua. El tipo de mineral de arcilla presente y el porcentaje, en proporción con el total de minerales afecta en forma considerable el comportamiento del suelo. Una forma de poder analizar este comportamiento son los Límites de Atterberg o Límites de Plasticidad (Tabla 5.6). En general, las otras propiedades de las arcillas, como son sus características de expansión y contracción siguen un mismo patrón ante las propiedades de plasticidad, entre más plástico el material mayor su potencial de expansión y menor su resistencia al cortante.

Tabla. 5.6 Valores de Límites de Atterberg para los minerales de arcilla (Mitchell, 1976)

Arcilla	Límite Líquido %	Límite plástico %	Límite de contracción %
Caolinita	30 – 100	25 - 40	25 – 29
Aloysita – 2H ₂ O	35 - 55	30 - 45	
Aloysita – 4H ₂ O	50 - 70	47 – 60	
Illita	60 - 120	35 - 60	15 – 17
Motmorillonita	100 - 900	50 - 100	8.5 - 15

Textura

El concepto de textura se refiere a la manera en la cual los granos individuales o minerales se encuentran en la roca.

Textura Cristalina

Ocurre en las rocas intactas donde todos los granos son parte del proceso de cristalización.

Textura Hipocristalina

Corresponde a rocas intactas, incluyendo algunas rocas volcánicas, las cuales también contienen minerales amorfos vidriosos.

Textura Hidralina

Rocas intactas amorfas por ejemplo, vidrios naturales y algunas rocas volcánicas poseen una textura hidralina.

Textura Clástica

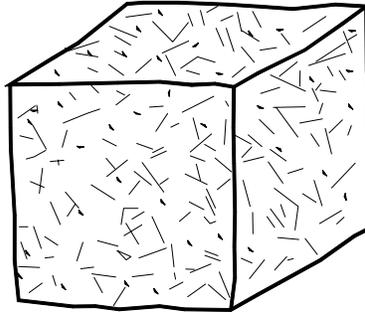
Los granos o minerales se han formado de la desintegración de otros materiales y forman la mayoría de las rocas sedimentarias.

La textura de las rocas intactas también puede clasificarse de acuerdo a la forma de sus granos y minerales. La descripción de la forma de los granos se realiza generalmente, de una manera cualitativa, utilizando términos medios tales como cúbica, prismática, elipsoide, columnar, tabular, etc.

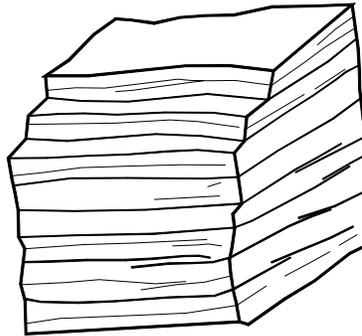
Finalmente, el tamaño absoluto y la distribución de tamaño de los granos o minerales completan la descripción de la textura utilizando términos tales como fino, pequeño, medio, grueso, largo, gigante, etc.

Fábrica

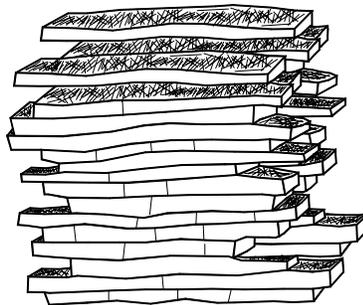
El concepto de fábrica se refiere al arreglo espacial de los granos o minerales en la roca intacta, o sea, la orientación de los minerales entre sí en tres dimensiones (Figura 5.9). El concepto de fábrica también incluye la porosidad y el contenido volumétrico de granos.



Desordenada Isotrópica
Ej: Rocas Igneas y Areniscas



Paralela Plana Anisotrópica
Ej: Rocas Igneas y Sedimentarias



Paralela Lineal Anisotrópica
Ej: Algunas Rocas Metamórficas

Figura 5.9 Algunos modelos de fábrica de rocas.

Fábrica Desordenada

La fábrica aleatoria o completamente irregular ocurre muy frecuentemente en el caso de rocas ígneas. Esta fábrica se caracteriza por la distribución estadísticamente uniforme

de los ejes cristalográficos de los granos. Algunas areniscas homogéneas poseen una fábrica desordenada y generalmente, igual situación ocurre con las calizas.

Fábrica Paralela

Algunas rocas ígneas durante su formación como un resultado de flujo de la lava, al solidificarse forman fábricas paralelas. Esta fábrica puede estar compuesta de arreglos paralelos de cristales o agregados de cristales. Las formaciones tabulares o planares paralelas o paralelas lineales se encuentran dentro de este grupo.

La característica más importante de la fábrica en rocas sedimentarias, es la estratificación, la cual es una forma de fábrica paralela.

Fábrica Fibrosa

Las rocas metamórficas durante el proceso de recristalización cambian en forma importante la fábrica. Las características de cada tipo de fábrica se describen con términos como equistosidad y bandeamiento. Esta fábrica fibrosa también se le encuentra en los Neises y ocasionalmente en las pizarras.

Existe otro tipo de fábricas menos comunes, las cuales no se consideraron importantes para el propósito del presente texto, tales como las estructuras en punta de lápiz, etc.

5.5 ESTRUCTURA DE LA MASA DE ROCA

El término estructura se refiere al sistema de discontinuidades en la masa de roca y el término discontinuidad se utiliza para describir las diversas superficies a lo largo de las cuales, la consistencia de la roca intacta se interrumpe.

Si en la roca sana o meteorizada aparecen discontinuidades o planos de debilidad, estos pueden definir el mecanismo de falla del talud.

Los principios del análisis dependen de:

1. La identificación de los sistemas de juntas y otras discontinuidades.
2. La relación de estos sistemas con las posibles superficies de falla.
3. Los parámetros de resistencia de las juntas y su relleno.
4. La presión de agua en las discontinuidades.

Estratificación

La estratificación corresponde a los contactos de depositación de materiales ,que ocurrieron durante el proceso de formación de la roca . Por ejemplo en las rocas sedimentarias es común encontrar mantos de arenisca formados sobre mantos de lutita o viceversa (Fotografía 5.1). En rocas volcánicas también se presentan superficies de estratificación como se puede observar en la Fotografía 5.2 ,en donde se ve claramente un manto de cenizas volcánicas sobre un Basalto.

Discontinuidades paralelas a la estratificación

Los cambios que ocurrieron durante el proceso de sedimentación pueden haber producido juntas paralelas a ésta. Por ejemplo, cuando en el proceso de sedimentación se depositaron capas de diferente tamaño de grano. Otro caso de estas juntas se debe al agrietamiento por consolidación de las rocas sedimentarias o a procesos tectónicos. Esta estratificación estructural puede también ser el resultado de compresiones u otro tipo de esfuerzos.

Fotografía 5.1 Estratificación de manto de arenisca sobre Lutita

Fotografía 5.2 Estratificación de ceniza volcánica sobre basalto.

Discontinuidades paralelas a la esquistocidad

De manera similar a la estratificación pueden aparecer juntas paralelas a la esquistocidad, las cuales ocurren a espaciamientos diferentes y con persistencia diferida.

Pliegues

La formación de pliegues tanto en rocas sedimentarias como metamórficas es causada por cargas tectónicas, resultando en la formación de plegamientos de la esquistocidad o estratificación. Los esfuerzos sobre la roca que ocurren durante la formación de los pliegues conducen al desarrollo de juntas. Estas juntas se denominan de acuerdo a su posición con respecto al eje del pliegue, utilizando términos tales como diagonal, transversal o longitudinal, los cuales generalmente se forman a ángulos rectos con estratificación o la esquistocidad plegada. Estas juntas ocasionalmente son interrumpidas por las juntas de estratificación o paralelas a la esquistocidad y es importante definir las características de su continuidad (Figura 5.10).

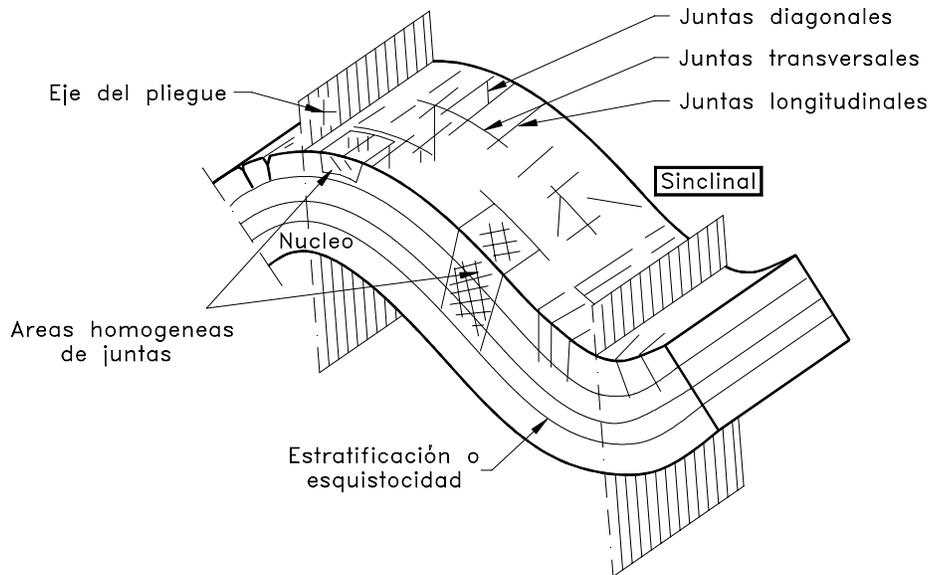


Figura 5.10 Elementos y juntas de un pliegue.

Fallas

Las fallas son un elemento muy importante de la masa de roca, debido a que en ellas ha ocurrido desplazamiento de las masas de roca. Las fallas se clasifican de acuerdo a su dirección de desplazamiento (Figura 5.11). Debe hacerse una diferenciación entre las fallas hacia abajo del buzamiento y hacia arriba, los movimientos ortogonales al buzamiento y los movimientos de rotación de bloques.

Las fallas generalmente, actúan como camino preferido del agua debido a que comúnmente, la roca se encuentra fracturada a lado y lado de la falla. El flujo de agua, produce meteorización química así como lavado y erosión, y éstos a su vez, pueden

conducir a una abertura de la superficie de la falla, formando una especie de grietas discontinuas. Estas fallas con frecuencia se encuentran rellenas de materiales.

La ocurrencia frecuente de milonitas en la zona de falla puede explicarse debido a los esfuerzos muy altos sobre la roca intacta y la meteorización química. Las milonitas están compuestas de roca pulverizada, que en ocasiones se reduce a arcilla. Las zonas de milonitas pueden alcanzar varios metros de espesor y extenderse a largas distancias a lo largo de la falla. Estas milonitas pueden ser muy importantes en el análisis de estabilidad de taludes. La roca intacta en la inmediata vecindad de la superficie de la falla, en ocasiones se inclina en la dirección del movimiento de la falla, formando una zona de deformación de la roca con su correspondiente pérdida de propiedades. Las estrías o espejos de falla (Slickensides) son comunes en las superficies de la falla. Estas superficies son generalmente lisas y poseen muy baja resistencia al cortante.

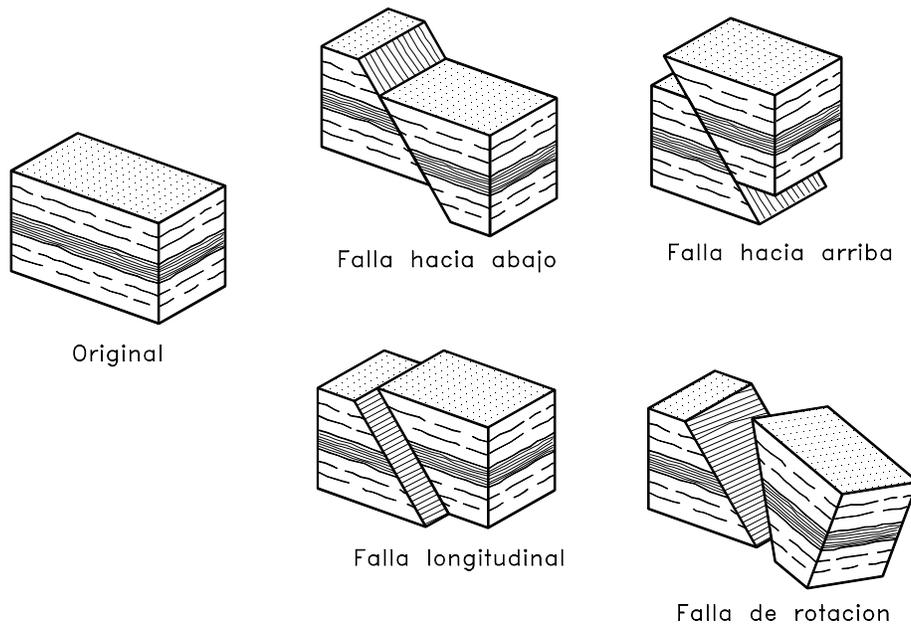


Figura 5.11 Tipos de falla (Wittke 1990).

Rumbo y Buzamiento

En una discontinuidad geológica se requiere cuantificar su rumbo y buzamiento y compararlo con el del talud (Figura 5.12). El ángulo de inclinación que forma el plano de la discontinuidad con la horizontal se le llama buzamiento y puede medirse por medio de un clinómetro en grados y minutos. Normalmente, con el conocimiento de los grados es suficiente ya que el margen de error en la medición es relativamente alto y el buzamiento de la discontinuidad no conserva el mismo valor exacto dentro del talud.

La dirección o rumbo de la discontinuidad va a definir junto con el ángulo de pendiente del talud y su rumbo la ocurrencia o no de ciertos tipos de movimiento, especialmente en rocas. Si la orientación de las discontinuidades favorece una falla, la importancia de otros parámetros disminuye (Figura 5.13).

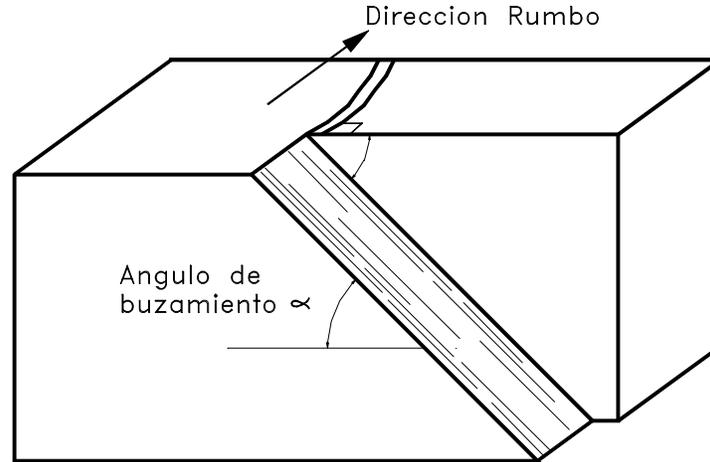


Figura. 5.12 Rumbo y Buzamiento.

Se requiere determinar las discontinuidades cuya orientación es hacia fuera del talud y su peligrosidad aumenta a medida que se acerca su buzamiento a la pendiente del talud. En una vía o excavación de longitud importante la dirección del talud o de las discontinuidades varía, mientras en un sitio determinando la inestabilidad está determinada por una discontinuidad o familia de juntas, en otro sitio cercano puede ser otra la que presenta riesgo más alto de falla. El grado de estabilidad también varía a lo largo de la altura del talud. Un sistema de juntas puede presentar una condición de estabilidad en la parte alta del talud y de inestabilidad en su parte baja y viceversa.

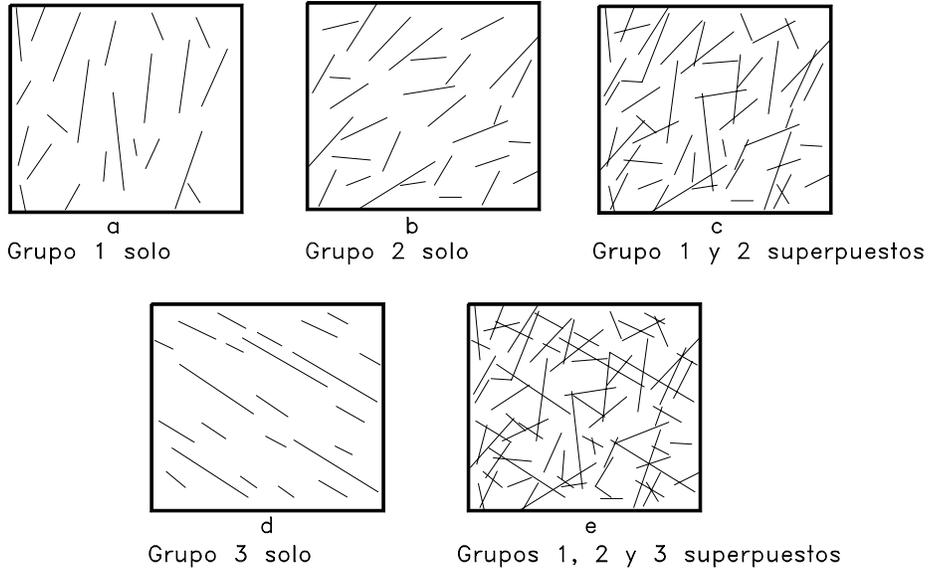


Figura. 5.13 Grupos de Discontinuidades.

Continuidad

La continuidad es una propiedad difícil de evaluar. Este factor puede definir la magnitud de las posibles fallas ocasionadas por la presencia de discontinuidades. La extensión y espaciamiento de las discontinuidades se presenta en la figura, de acuerdo a la clasificación propuesta por Duncan y Goodman (1968). Se propone que se diferencie entre las unidades sencillas no repetidas y aquellas que se repiten en el espacio y que forman un grupo o familia de discontinuidades.

Espaciamiento

El espaciamiento de las discontinuidades indica la extensión hasta donde las propiedades de la roca intacta y de las propiedades de la discontinuidad separadamente, afectan las propiedades mecánicas del bloque de roca. Una roca es más débil si el espaciamiento es muy cercano y más fuerte si el espaciamiento es grande. Dentro de una misma formación el espaciamiento cambia de un punto a otro y se requiere caracterizar este fenómeno en los sitios específicos de los problemas a estudiar.

Tabla 5.7 Espaciamiento de Discontinuidades (Geotechnical Control Office, Hong Kong, 1988)

Descripción	Espaciamiento
Espaciamiento extremadamente ancho	> 6m.
Espaciamiento muy ancho	2m – 6m
Espaciamiento ancho	600mm – 2m
Espaciamiento medio	200 mm – 600mm
Espaciamiento cercano	60 mm – 200 mm
Espaciamiento muy cercano	20 mm – 60 mm
Espaciamiento extremadamente cercano	< 20 mm

Tabla 5.8 Tamaño de Abertura (Geotechnical Control Office, Hong Kong, 1988)

Descripción	Distancia de abertura entre paredes de la Discontinuidad
Ancha	> 200 mm
Moderadamente ancha	60 – 200 mm
Moderadamente angosta	20 – 60 mm
Angosta	6 – 20 mm
Muy angosta	2 – 6 mm
Extremadamente angosta	> 0 – 2 mm
Apretada	Cero

Abertura y relleno

La junta puede ser cerrada, abierta o rellena, tal como se muestra en la figura 5.14 y de acuerdo a su estado es su comportamiento. El movimiento de agua a lo largo de las juntas tiende a producir por depósito o por meteorización la presencia de rellenos o materiales blandos dentro de la junta.

Las propiedades más importantes del relleno son su grosor, tipo y resistencia. Su grosor puede definir si es suficiente para impedir que las paredes de la discontinuidad se toquen entre sí. Si el grosor es suficiente, las propiedades del material de relleno van a

determinar la ocurrencia de las fallas pero si la abertura de la junta es pequeña, las propiedades de aspereza de las paredes son el factor más importante a considerar.

En los casos donde los rellenos son muy delgados, debe medirse la amplitud promedio de la aspereza utilizando una línea recta y comparar estos con el promedio del espesor total del relleno. En algunos casos, es de gran ayuda hacer esquemas de campo en que muestren el estado de la junta y su relleno.

Aspereza

La aspereza mide el grado de rugosidad de las juntas. Se deben definir macro y microasperezas. Las macroasperezas u ondulaciones afectan esencialmente la dirección del movimiento y producen cambio en el buzamiento dentro del talud.

Las microasperezas definen la resistencia al corte de la discontinuidad y la posibilidad o no de una falla.

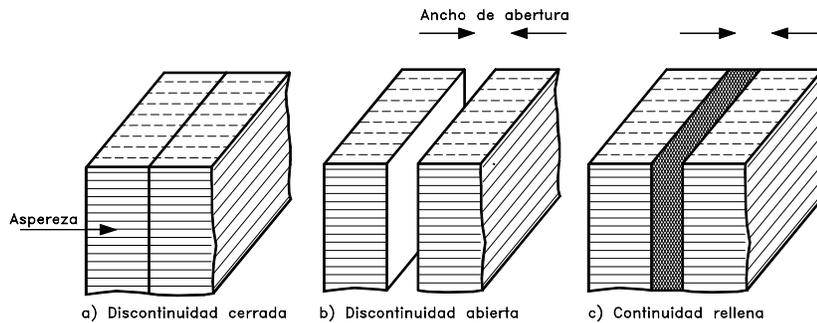


Figura. 5.14 Tipos de discontinuidad.

Resistencia al cortante

La Resistencia al cortante es relativamente alta en discontinuidades naturalmente cerradas, aún en el caso de taludes de alta pendiente. Sin embargo, la resistencia al cortante disminuye en forma muy importante al abrirse la discontinuidad. Además, la naturaleza del material de relleno es el principal parámetro que afecta la resistencia al cortante, dentro de una discontinuidad abierta seguida de la aspereza de la junta. La resistencia al cortante pico dentro de la discontinuidad cerrada no ocurre al mismo desplazamiento que la máxima dilatación sino a desplazamientos mucho menores. (Ferreira, 1997).

Movimientos anteriores en la discontinuidad

Los desplazamientos al corte en una discontinuidad producen la rotura de las asperezas y reducen la resistencia al corte de un valor pico a un valor residual. La dificultad consiste en identificar en una familia de juntas aquellas discontinuidades que han sufrido movimientos y que presenta alto riesgo de deslizamiento, con relación a las demás por la disminución de la resistencia al corte.

5.6 FALLAS CONTROLADAS POR LA ESTRUCTURA

Para el análisis de fallas por grupos de discontinuidades se recomienda utilizar el siguiente procedimiento:

1. Determinar los grupos de juntas más “significativos”, evaluando su valor relativo dentro de la familia de las juntas, en cuanto a posibilidad de ocurrencia de un movimiento (Figura 5.15).
 2. Para cada grupo determinar su orientación, buzamiento, espaciamiento, abertura, resistencia al corte, etc.
 3. Estudiar por medio de bloques en el espacio las diversas posibilidades de ocurrencia de fallas.
 4. Hacer el análisis de estabilidad de cada uno de los bloques identificados.
- Debe en todos los casos estudiarse la posibilidad de ocurrencia, no sólo de fallas al corte sino fallas por volteo y fallas de grupos de bloques. En estos casos el Ingeniero o Geólogo debe estudiar la estabilidad del talud en el espacio en tres dimensiones.

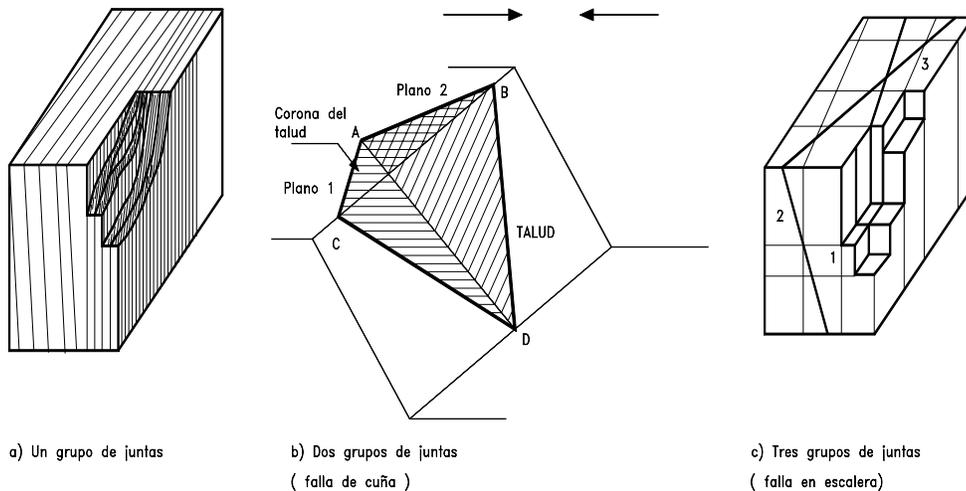


Figura 5.15 Efectos de los grupos de juntas.

Una masa de roca fracturada es altamente anisotrópica con respecto a su resistencia al corte. Una combinación progresiva de grupos de juntas es un problema complejo por la dificultad que existe para definir una superficie de falla, que puede vincular varios grupos diferentes de discontinuidades.

Falla plana

Es la falla por desplazamiento de la roca sobre una discontinuidad; Esta falla se puede analizar como una superficie recta de acuerdo a los procedimientos indicados en el capítulo 3. Debe analizarse la proporción de discontinuidad intacta, separada o rellena y las propiedades de fricción y cohesión a lo largo de cada sector homogéneo de discontinuidad.

Falla en cuña

Un caso importante y común de falla en roca sucede cuando la intersección de planos de discontinuidad forma un vértice en dirección hacia fuera del talud. En estos casos se puede producir una falla de una cuña cuando los planos de discontinuidad son independientemente estables.

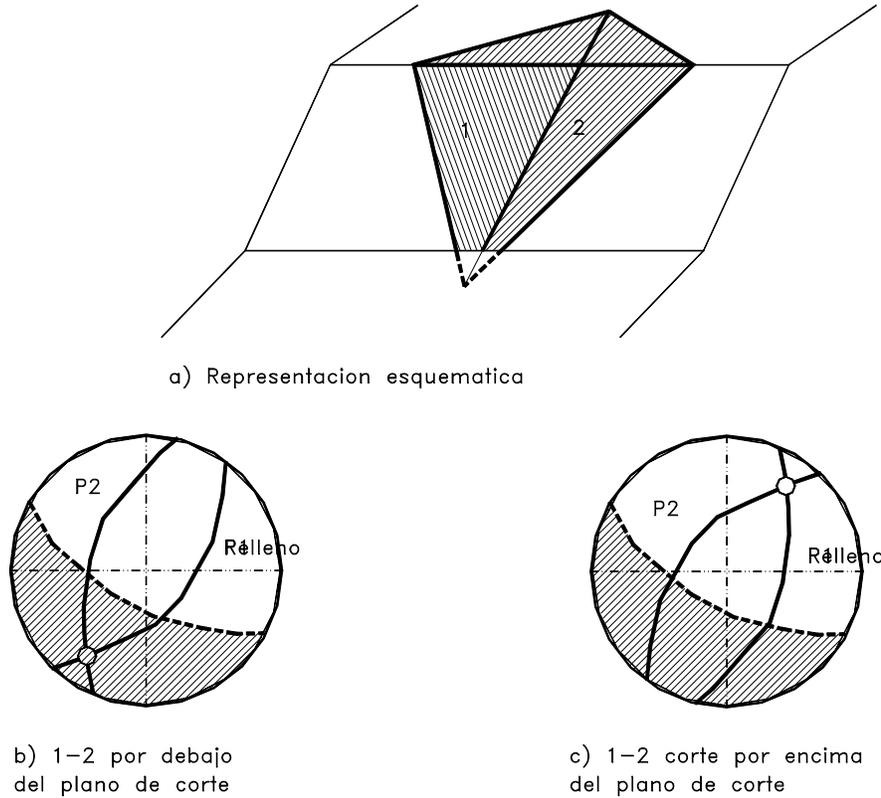


Figura. 5.16 Esquema de la falla de cuña.

Falla en Escalera

La presencia de grupos de discontinuidades puede producir una superficie de falla en escalera. El fenómeno puede incluir fallas de tensión y corte a lo largo de las discontinuidades y a través de la roca intacta, formando zonas de corte que no son propiamente planos de falla, pero que para el análisis se pueden asimilar a las de una superficie.

Antes de determinar la resistencia a lo largo de un plano determinado debe establecerse la proporción de juntas y roca sana que cubre la superficie de falla y la proporción de superficies a corte y tensión. Esto puede determinarse estudiando la orientación en el espacio de los varios grupos de discontinuidades y conociendo la resistencia al corte y a tensión de las juntas y de la roca sana. De este análisis pueden salir los parámetros que se deben emplear en el diseño.

5.7 CONDICIONES DE DESLIZAMIENTO Y VOLTEO EN ROCAS

Las grietas en los macizos rocosos son el resultado de deformaciones a gran escala en las cuales ocurrió relajación de energía y se produjeron separaciones de grandes bloques de roca. Se requiere caracterizar la grieta o el sistema de grietas para poder predecir su comportamiento futuro.

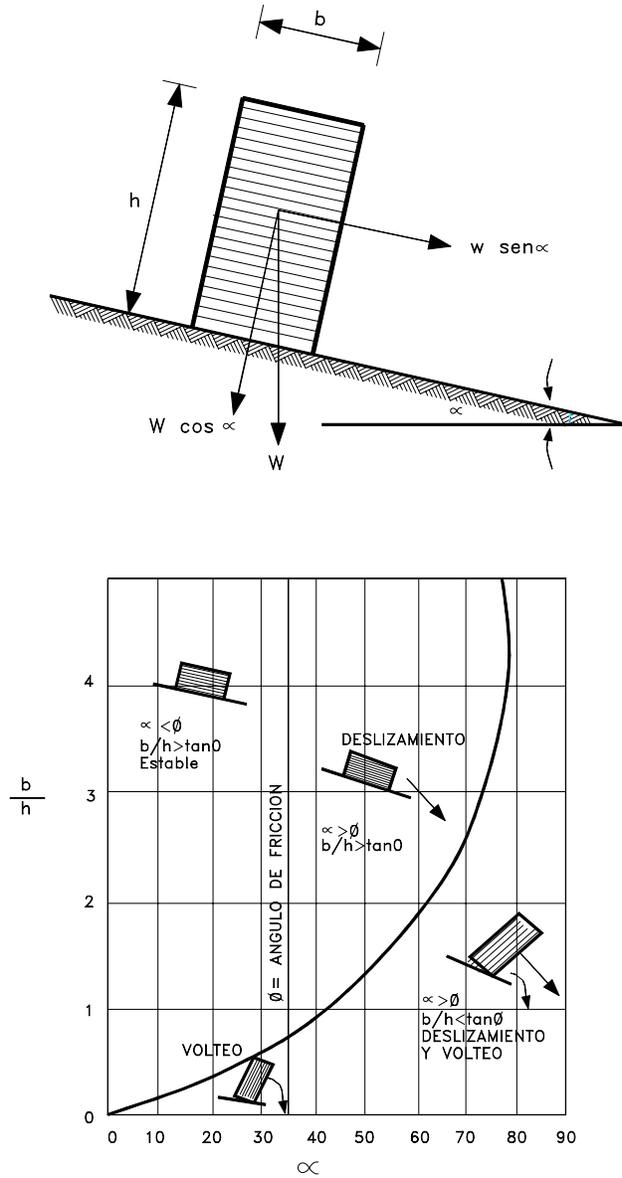


Figura. 5.17 Condiciones de deslizamiento y volteo de bloques de roca.

El análisis debe realizarse en tres dimensiones y si es necesario se deben instrumentar para poder presentar una hipótesis geodinámica, incluyendo su comportamiento bajo eventos sísmicos. En ocasiones es necesario determinar los esfuerzos de compresión y cortante a que están siendo sometidos y los cambios que están ocurriendo en el momento actual; tales como cambios temperatura, reptación, rotación de bloques, etc.

Al estudiar un grupo de discontinuidades en un macizo rocoso se deben analizar las diversas posibilidades (Figura 5.17), de ocurrencia de volteo y/o deslizamiento así:

1. Que la conformación geostática produzca bloques estables. Para que esto ocurra se requiere que la relación ancho/altura del bloque sea mayor que el valor de la tangente del ángulo con la horizontal de las discontinuidades y que el ángulo de la discontinuidad base con el horizontal, sea menor que el ángulo de fricción.
2. Que se presente solamente el riesgo de falla por volteo o inclinación. Se requiere para $b/h < \tan \phi$ el ángulo con la horizontal sea menor que ϕ .
3. Que se presente solamente el riesgo de deslizamiento. En este caso $b/h > \tan \phi$ y $\alpha > \phi$.
4. Que se presente el riesgo combinado de deslizamiento y volteo simultáneamente. En este caso $b/h < \tan \phi$ y $\alpha > \phi$.

5.8 COLUVIONES

Bates y Jackson (1980) definen un coluvión como una masa incoherente de materiales sueltos y heterogéneos, de suelo o fragmentos de roca depositados por lavado de la lluvia, reptación o deslizamiento, los cuales comúnmente se depositan en la base de las laderas. El coluvión típico es una mezcla de fragmentos angulares y materiales finos.

Los coluviones, generalmente consistentes de mezclas heterogéneas de suelo y fragmentos de roca que van desde partículas de arcillas hasta rocas de varios metros de diámetros, se les encuentra a lo largo de las partes bajas de los valles o a mitad de talud, formando áreas de topografía ondulada, mucho más suave que la de las rocas que produjeron los materiales del coluvión. Es muy frecuente que los coluviones generen deslizamientos en las vías al ser cortados por ellas, o que el alineamiento de la vía pase sobre un coluvión en movimiento.

La mayor parte de la superficie en zonas de suelos residuales está cubierta en una u otra forma por coluviones de diferente espesor. Su espesor puede variar desde unos pocos centímetros a más de 20 metros. Los coluviones se les encuentra muy relacionados con los suelos residuales, especialmente como abanicos coluviales en el pie de las laderas y en la literatura técnica se les agrupa dentro de los materiales residuales.

El coluvión es un material derivado de la descomposición de las rocas, el cual ha sido transportado ladera abajo por la fuerza de gravedad. Puede variar en composición desde un conglomerado de bloques sin matriz, hasta una masa de material fino o con solo algunos bloques.

En los coluviones generalmente, se generan corrientes de agua sobre la interface entre el coluvión y el material de base. Debe distinguirse entre coluviones secos y coluviones saturados, siendo por lo general, arcillosos los segundos y de comportamiento friccionante los primeros.

Un coluvión arcilloso saturado se encuentra generalmente, en equilibrio límite y cualquier excavación puede iniciar un movimiento. Se han reportado casos en los cuales aparece material menos arcilloso en el contacto coluvión - roca, pero experiencias en Colombia muestran perfiles con material más permeable (menos arcilloso), arriba del contacto con una capa delgada de arcilla depositada exactamente sobre la interface. Las superficies de falla pueden coincidir con el contacto coluvión - suelo residual o pueden ocurrir fallas a través del coluvión (Figura 5.18).

Los coluviones se comportan en forma similar al suelo residual y en ocasiones es difícil diferenciarlos, especialmente cuando solo se dispone de información de sondeos (Brand, 1985).

Es común encontrar coluviones que abarcan áreas de varios kilómetros cuadrados y que presentan varios movimientos relativos diferentes dentro de la gran masa coluvial.

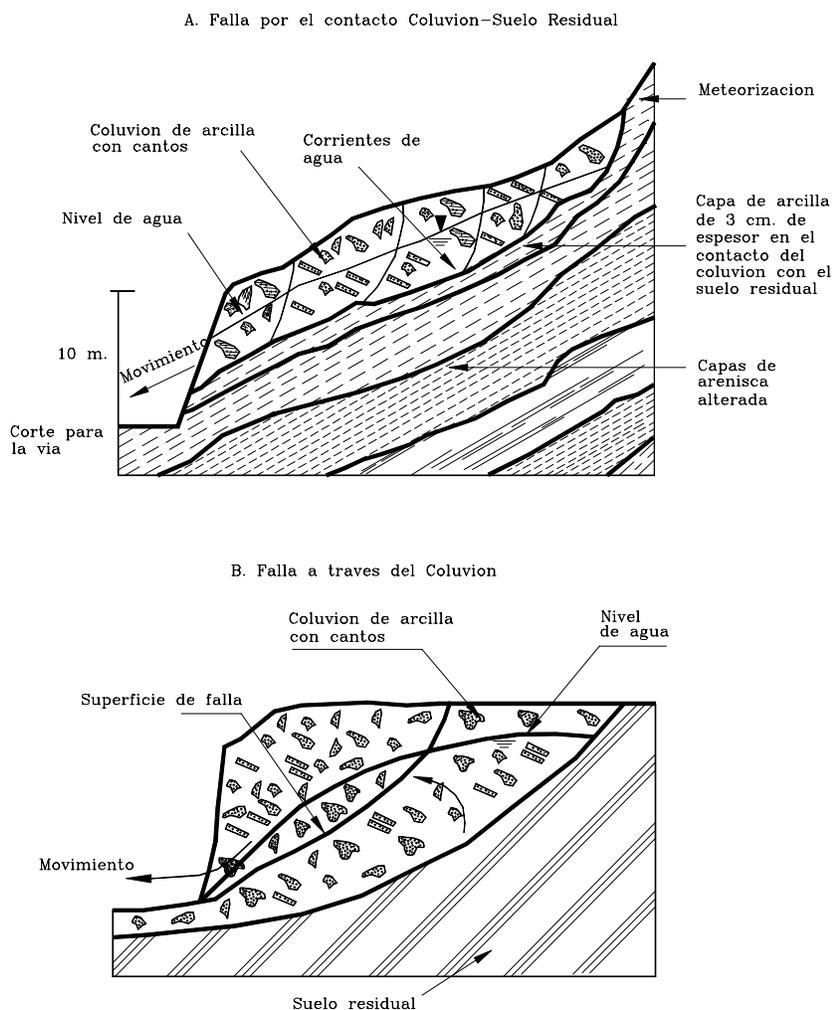


Figura. 5.18 Falla en Coluviones.

Talus

Dentro de los coluviones es importante definir el término de Talus: Bates y Jackson (1980) define Talus como los fragmentos de roca de cualquier tamaño o forma (usualmente gruesos y angulares) derivados de / y apoyados sobre la base de laderas de pendiente muy alta. Estos talus son conformados por bloques de roca depositados por gravedad, especialmente por caídos de roca. Después de caer, los fragmentos se acumulan a la base formando una especie de depósito angular en el pie de la ladera. Con frecuencia las montañas que producen los talus no son rectas sino que contienen una serie de entradas que tienden a concentrar las partículas de roca, formando una especie de tobogán o un depósito en forma de cono, con una base ancha y un ápice, localizado en el canal de origen de los materiales. Los fragmentos de talus pueden variar en tamaño para incluir bloques de hasta más de 10 metros de diámetro. Generalmente, los fragmentos grandes se localizan en el pie del talus y los pequeños en su ápice. El ángulo máximo que forma el talus se le llama ángulo de reposo. Generalmente, estos ángulos varían entre 34 y 37 grados pero en ocasiones pueden alcanzar valores superiores a 45 grados.

Inestabilidad de los coluviones

Los daños generados por coluviones en las áreas montañosas de los Andes son cuantiosos y la mayoría de los grandes deslizamientos en las vías en las áreas de montaña están relacionados con coluviones.

Las fallas en los coluviones generalmente presentan dos etapas así:

En la primera etapa se produce un deslizamiento rotacional o translacional, bien sea por la base del coluvión o formando una línea a través de este y en la segunda etapa se produce un flujo de la masa removida. Esto produce un escarpe en la corona del movimiento inicial y una longitud larga de flujo hasta la zona de nueva depositación del coluvión. En ocasiones estos movimientos bloquean los cauces de las quebradas o corrientes de agua. Los coluviones son muy susceptibles a sufrir fenómenos de licuación en sismos debido a su baja cohesión.

En ocasiones los deslizamientos de coluviones pueden exceder velocidades de tres metros por segundo y se les clasifica como avalanchas. Los deslizamientos de coluviones también pueden clasificarse como flujos de lodo o torrentes de residuos (Varnes, 1978).

En zonas sujetas a glaciación, los coluviones pueden ser depósitos producto de los movimientos de los glaciales y pueden formar masas gigantescas de materiales depositados en diferentes épocas, con superficies de depositación claramente definidas.

Características que afectan la estabilidad de los coluviones

Sidle (1985) identificó cinco factores naturales que afectan la estabilidad de las laderas en coluviones, pero la experiencia en los últimos años ha demostrado que existe un número mucho mayor de factores, algunos de los cuales se indican a continuación:

a. Tipo de material de suelo

Dentro de un determinado coluvión la gradación de las partículas y la densidad varían con la profundidad, siguiendo un patrón irregular a través de la extensión del depósito. El tipo, gradación y propiedades de los suelos afectan el comportamiento de los suelos relacionado con sus características hidrológicas y mineralógicas, las cuales pueden

controlar la resistencia al cortante. Los coluviones de suelos granulares se comportan en forma diferente a los coluviones en suelos arcillosos.

Estructura de soporte

Es de suprema importancia determinar si la resistencia al cortante es controlada por la fábrica de los clastos o si el porcentaje de matriz es muy alto y es ésta la que controla el comportamiento (Figura 5.19).

Los coluviones clasto-soportados generalmente, son más estables que los matriz-soportados.

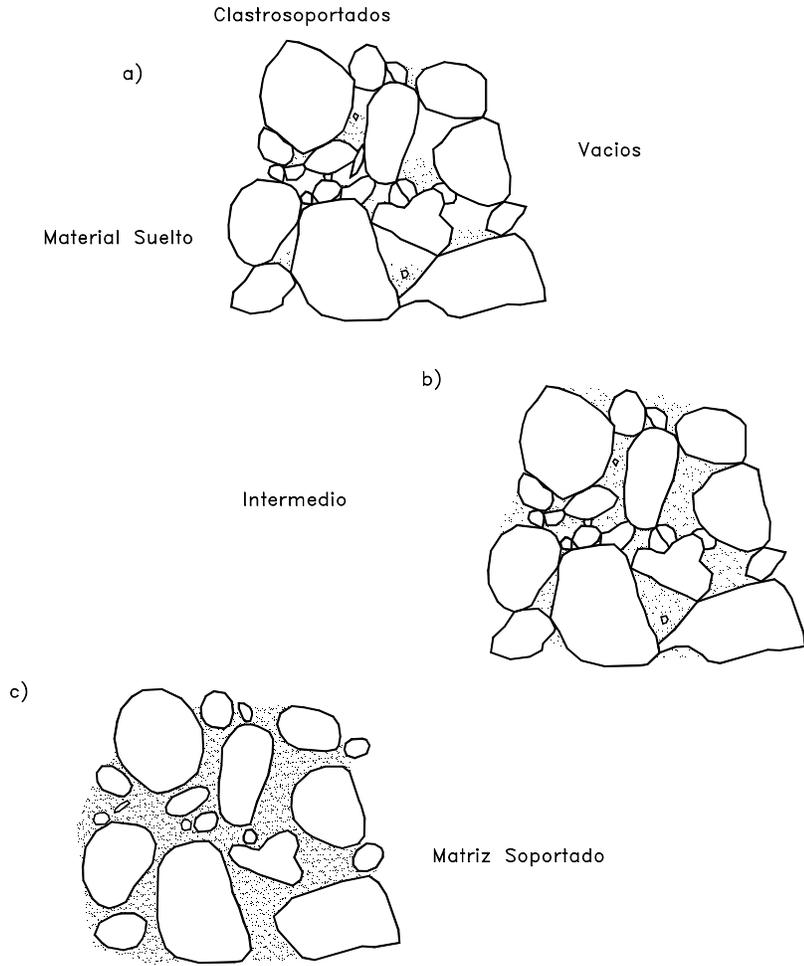


Figura 5.19 Clasificación de los coluviones por la estructura de soporte.

b. Contenido de arcilla humedad y Límite líquido

Un factor muy importante es el contenido de arcilla. Los coluviones arcillosos tienden a tener mayor cohesión y al mismo tiempo mayor espesor. Los coluviones arcillosos tienden a fluir al aumentar su contenido de agua, especialmente cuando este se acerca al

límite líquido. Por esta razón es importante analizar la humedad del coluvión en su estado saturado con el valor del límite líquido para poder determinar la posibilidad de ocurrencia de flujos de lodos.

Ellen y Fleming (1987) proponen la determinación de un índice de movilidad

$$\text{AMI (Índice de movilidad)} = \frac{\text{Humedad del suelo saturado}}{\text{Límite líquido}}$$

Generalmente, los coluviones arcillosos tienen baja permeabilidad pero alta porosidad y acumulan grandes cantidades de agua. Estos suelos tienen relaciones de vacío muy grandes que generan humedades fácilmente superiores al límite líquido. Esta característica hace que estos materiales sean muy susceptibles a flujo y a licuefacción en los eventos sísmicos. Turner (1996) indica que ésta licuefacción es casi instantánea y ocurre a muy bajas deformaciones, lo cual hace que un evento sísmico pequeño pueda producir un deslizamiento o flujo de tamaño importante.

c. Permeabilidad

Los coluviones granulares aunque porosos tienden a ser mucho más permeables y su drenaje, en el caso de lluvias, mucho más fácil. Por esta razón, aunque se trate de suelos granulares, la ocurrencia de licuefacción es menos común y al ser más densos y tener menor relación de vacíos tienden a moverse más lentamente.

Las grietas en los coluviones tienden a canalizar el agua infiltrada hacia ciertas áreas seleccionadas, permitiendo la ocurrencia de deslizamientos relativos, de acuerdo a los patrones de agrietamiento.

Los agrietamientos en los coluviones son muy comunes debido generalmente, a que la base de ellos tiende a deslizarse más fácilmente que la cima y la generación de movimientos relativos es muy frecuente.

d. Geomorfología

Incluye sus características geológicas, tectónicas, pendiente y forma de los coluviones.

e. Horizontes estratigráficos

Los coluviones generalmente, tienen horizontes estratigráficos que representan cambios en las tasas de depositación. Por ejemplo, largos periodos de inestabilidad pueden producir el desarrollo de horizontes orgánicos que luego son cubiertos durante periodos de depositación intensa. Estos horizontes pueden ser observados fácilmente en las excavaciones pero son difíciles de detectar en sistemas convencionales de perforación.

f. Superficies de cortante

Las Lutitas y otras rocas blandas, generalmente producen coluviones de grano fino con proporciones altas de arcilla. El movimiento lento de reptación del coluvión produce un alineamiento de los granos de minerales y la creación de numerosas y microscópicas superficies de cortante. Estas superficies reducen en forma importante la resistencia al cortante de los materiales coluviales.

g. Superficie de Base

La superficie de base del coluvión puede ser una roca que forma un plano de estratificación uniforme o puede ser una superficie irregular con canales internos. Estos canales en la base del coluvión afectan su estabilidad (Dietrich, 1986).

h. Espesor

La velocidad de los movimientos en los coluviones depende de su espesor. Los coluviones de gran espesor generalmente, producen deslizamientos profundos

relativamente lentos, mientras los coluviones de poco espesor, producen deslizamientos someros de mayor velocidad (Figura 5.20).

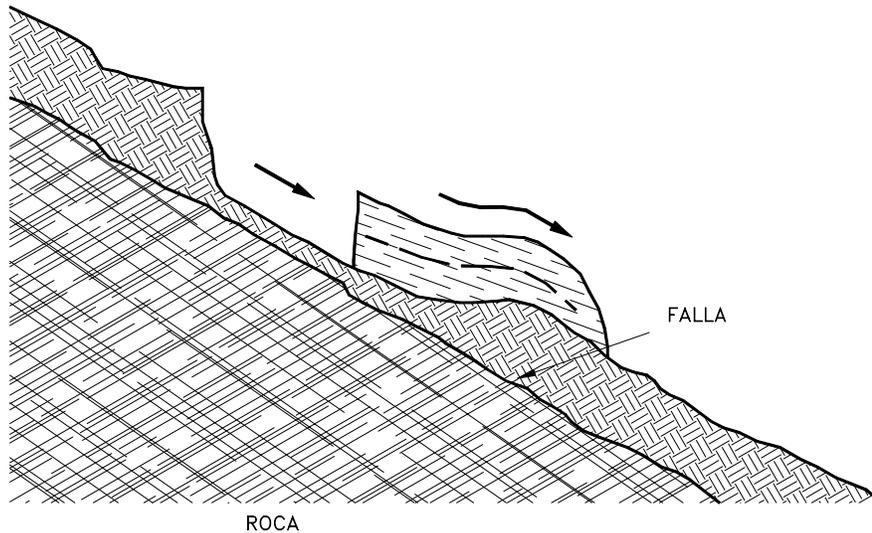


Figura 5.20 Deslizamientos de coluviones arcillosos someros.

i. Hidrología

La lluvia intensa es uno de los más comunes mecanismos de activación de deslizamiento en coluviones, por ejemplo, Campbell (1975) sugiere que una lluvia de 5 a 6 mm por hora es necesaria para activar flujos de detritos y que se requiere una lluvia acumulada de 267 mm para obtener un contenido de agua, en el cual el agua que se infiltra es igual al agua que drena. Estas características varían de acuerdo al tipo de coluvión, especialmente la recarga de agua, su capacidad de acumulación y las tasas de evapotranspiración.

El agua puede concentrarse en ciertos sitios dentro del coluvión, formando bolsas de agua y la presencia de canales internos en la base del coluvión puede generar corrientes o áreas de acumulación en la base. Las diferencias de permeabilidad representan un papel muy importante en las acumulaciones de agua dentro del coluvión.

Parte del agua acumulada en el coluvión puede provenir no directamente de la lluvia sino de afloramientos de agua internos de la roca debajo o lateralmente al coluvión.

j. Cobertura vegetal

Los coluviones son afectados en forma positiva por el refuerzo de los sistemas de raíces y la pérdida de esta resistencia, cuando se deterioran las raíces debido a la deforestación, puede producir grandes deslizamientos. Los sistemas de plantas pueden incrementar la estabilidad de los taludes en altas pendientes. El efecto es el agrupar las partículas, en tal forma que estas solo puedan moverse en forma integrada, formando una gran masa. En ocasiones las raíces de la vegetación anclan el coluvión a la roca subyacente, especialmente en coluviones de poco espesor.

k. Sismicidad

La sismicidad es un factor importante en la activación de muchos tipos de deslizamiento, especialmente en los coluviones. Los coluviones como se indicó

anteriormente, tienen un alto potencial de licuefacción, debido a su poca cohesión y a la falta de confinamiento por sus taludes de alta pendiente.

REFERENCIAS

- Abramson L.W. (1996) "Engineering geology Principles". Slope stability and stabilization methods. Wiley-interscience, pp. 60-106.
- Attewell P.B., Farmer I.W. (1976) "Principles of engineering geology". Chapman and Hall. John Wiley & Sons, New York. 1045 p.
- Bates, R.L, Jackson J.A., (1980). "Glossary of Geology", 2nd ed. American Geological Institute, Falls church, Va., 751 pp.
- Blyth, F.G.H., Freitas, M.H. (1984) "A Geology for Engineers", Edward Arnold, London. 325p.
- Dietrich, W.E., C.J. Wilson, Reneau S.L.. (1986). "Hollows, Colluvium and Landslides in Soil-Mantled landscapes. In Hillslope processes" (A. Abraham, ed.), 16th Annual geomorphology Symposium, Binghampton, N.Y., Allen and Unwin Ltd., Winchester, Mass., Pp. 361-388.
- Ellen, S.D., Fleming R.W.. (1987). "Mobilization of Debris flows from soil slips, San Francisco bay region, California. In Debris flows/avalanches: Process, Recognition, and mitigation" (J.E. Costa and G.F. Wieczorek, eds.) , Review in engineering geology, Vol. 7, Geology Society of America, Boulder, Colo., Pp. 31-40.
- Ferreira, S.B., (1997) "Experimental Study of the Shear Strength of Naturally Filled". II Simposio Panamericano de Deslizamientos, Río de Janeiro (pp.339-345).
- Grim R.E.(1962) "Applied clay mineralogy". Mc Graw-Hill Book Co., Inc, New York.
- Mitchell, J.K. (1976) "Fundamentals of Soil Behavior", John Wiley & Sons. New York. 422 pp.
- Nicholson D.T, Hencher S. (1997) "Assessing the potential for deterioration of engineered rock slopes". Proceeding International Symposium on Engineering Geology and the environment. Athens , pp- 911-917.
- Side, R.C., Pearce A.J., O'loughlin C.L. (1985) "Hillslope stability and land use". Water Resources monograph 11. American Geophysical union, Washington, D.C., 140 pp.
- Turner A.K. (1996) "Colluvium and talus". Landslides investigation and mitigation. Special report 247. Transportation research Board. National research council. Pp. 5225-554.
- Varnes, D.J. (1978). "Slope movements types and processes" Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, EDS), TRB, National research council, Washington D.C. pp. 11-33.
- Wittke, W. (1990) "Rock Mechanics", Springer-Verlag, Berlin, 1074 pp.

6 Suelos Residuales

6.1 INTRODUCCION

La definición de “suelo residual” varía de un país a otro pero una definición razonable podría ser la de un suelo derivado por la meteorización y descomposición de la roca in situ, el cual no ha sido transportado de su localización original (Blight, 1997). Los términos residual y tropical se usan indistintamente pero en los últimos años se está utilizando con mayor frecuencia el término residual.

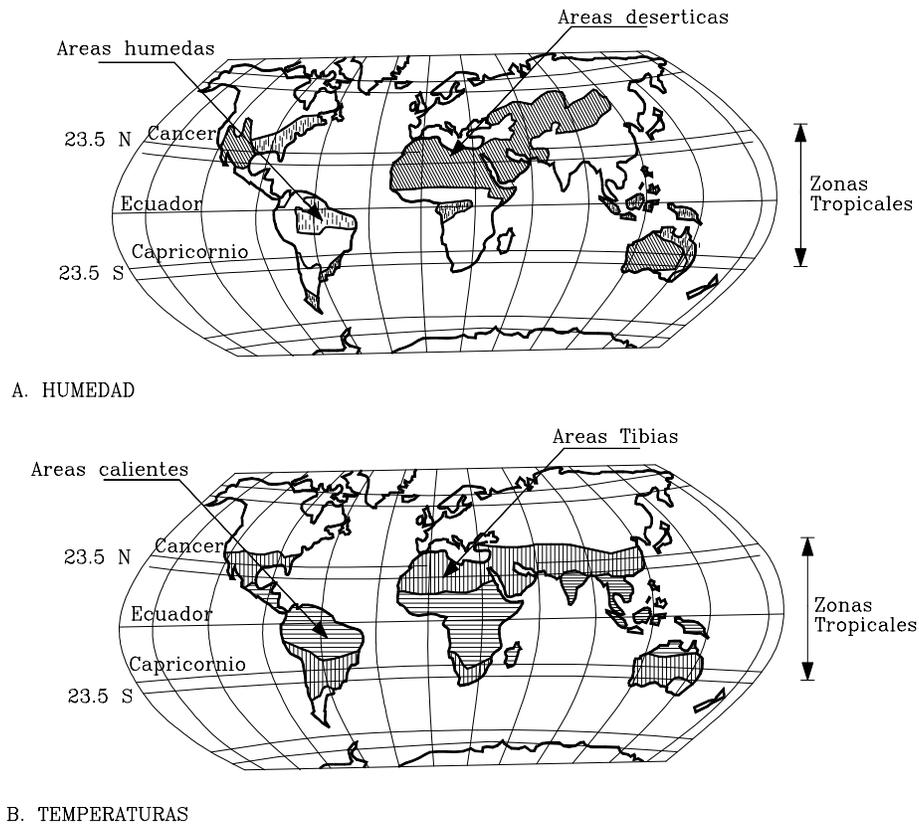


Figura 6.1 Localización de las Zonas Tropicales.

Las características de los suelos residuales son muy diferentes a las de los suelos transportados. Por ejemplo, el concepto convencional de grano de suelo o tamaño de partícula es inaplicable a muchos suelos residuales, debido a que las partículas de suelo residual con frecuencia consisten en agregados o cristales de mineral meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente finos, si el suelo es manipulado. Lo que parece en el sitio como una grava arenosa puede convertirse en un limo fino durante las actividades de excavación, mezclado y compactación.

Las propiedades de los suelos residuales son generalmente, controladas por la fábrica micro o macro, las juntas y demás detalles estructurales, los cuales eran parte integral de la masa de roca original y son heredados por el suelo.

La estabilidad de taludes es particularmente complicada en un medio tropical, debido a que la mayoría de los suelos son residuales, el régimen hidrológico complejo, la humedad ambiental y la temperatura muy altas, la geología compleja, la topografía escarpada y los demás factores ambientales generalmente, desfavorables.

Los suelos residuales se les encuentra predominantemente en las zonas tropicales, donde aparecen en grandes espesores y con frecuencia se les denomina como “suelos tropicales” y son escasos en las regiones no tropicales. La zona de suelos residuales se concentra en el sector norte de América del sur, Centroamérica, Africa, Australia, Oceanía y el sur de Asia (Figura 6.1).

La mayor parte de las teorías y desarrollos en la geotécnica han tenido su origen en trabajos realizados sobre suelos en climas no tropicales, generalmente, en depósitos de suelos sedimentarios especialmente, arenas y arcillas y por lo tanto están condicionados al comportamiento de ese tipo de suelos. La aplicabilidad de las teorías y los criterios de diseño geotécnico que existen actualmente, podría no ser completamente válida en el caso de suelos residuales, debido a diferencias importantes que existen en la constitución y estructura de los suelos y de las formaciones residuales, y las de los suelos que sirvieron de modelo para el desarrollo de la mecánica de suelos tradicional.

Esta diferencia es debida principalmente, al fenómeno de la meteorización que es extenso y profundo en la mayoría de las formaciones de suelos tropicales.

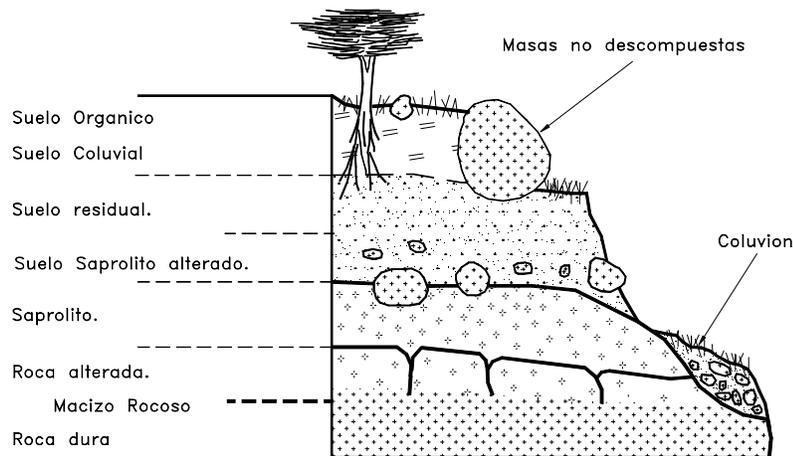


Figura 6.2 Esquema general de una ladera en un suelo residual de granito.

Debido a la alta concentración de hierro, los suelos resultantes son de tendencia a coloración roja en el proceso más completo de meteorización y por esta razón algunos Autores los denominan como “suelos rojos tropicales”.

Los suelos residuales son el producto de la meteorización en el sitio de las formaciones rocosas. También en algunas formaciones de suelos aluviales, estos han sido meteorizados en tal forma que pueden asimilarse en su comportamiento a los suelos residuales. Adicionalmente, a los suelos residuales comúnmente se les encuentra acompañados por coluviones y un gran porcentaje de los movimientos de las laderas de suelos residuales están relacionados con la inestabilidad de los coluviones (Figura 6.2). El resultado es un perfil compuesto por materiales muy heterogéneos que van desde la roca sana pasando por rocas meteorizadas o “Saprolitos”, hasta el "suelo" o material completamente meteorizado (Brand y Phillipson -1985) y a coluviones. Como características de los suelos residuales pueden mencionarse las siguientes (Brand, 1985):

1. No pueden considerarse aislados del perfil de meteorización, del cual son solamente una parte componente. Para definir su comportamiento y la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, pueden ser más importantes las características del perfil que las propiedades del material en sí (Figura 6.3).
2. Son generalmente muy heterogéneos y difíciles de muestrear y ensayar.
3. Comúnmente, se encuentran en estado húmedo no saturado, lo cual representa una dificultad para evaluar su resistencia al corte.
4. Generalmente, poseen zonas de alta permeabilidad, lo que los hace muy susceptibles a cambios rápidos de humedad y saturación.

6.2 METODOLOGIA PARA LA CARACTERIZACION INTEGRAL DE LOS SUELOS RESIDUALES

La caracterización de un suelo residual debido a su heterogeneidad, requiere de un análisis integral que tenga en cuenta todos los factores que afectan su comportamiento, lo cual incluye el grado y proceso de meteorización, su mineralogía, microestructura, discontinuidades, estado de esfuerzos, propiedades mecánicas, clasificación y caracterización del perfil.

En la tabla 6.1 se muestra un resumen de los elementos, características y procedimientos de análisis para una caracterización integral y en el texto del presente capítulo se analizan los diferentes elementos.

Del detalle con que se realice la caracterización del suelo residual depende la exactitud del diagnóstico.

En ocasiones el ingeniero o geólogo no observa el que puede ser el detalle clave para determinar la estabilidad de un talud.

Debe dedicarse esfuerzo especial a la determinación de la microestructura y estructura para de esta manera identificar las superficiales preferenciales de falla.

Tabla 6.1 Metodología para la Caracterización integral de un suelo residual

Elemento	Factores a caracterizar	Procedimiento
Medio Ambiente externo	Topografía, régimen de lluvias, humedad ambiental, temperatura, vegetación, sísmica, factores antrópicos.	Mediciones topográficas, hidrológicas, caracterización de cobertura vegetal. Índice climático.
Litología	Tipo de roca, minerales presentes, discontinuidades y microestructura de la roca original.	Caracterización geológica de los afloramientos de roca sana, secciones delgadas, micropetrografía.
Estado de Meteorización	Proceso de desintegración física y descomposición química. Grado de meteorización.	Ensayo de arenosidad, Martillo de Schmidt, Índice micropetrográfico, ensayos de penetración.
Mineralogía	Minerales resultantes del proceso de meteorización, tipos y % de arcilla, sesquioxidos.	Análisis termogravimétrico, escaneado con electromicroscopio, Microscopio óptico, Difracción de rayos X.
Microestructura	Textura, Arreglo de partículas, Ensemble, Fábrica, matriz, tamaño de granos, terrones, sistema de soporte. Cementación entre partículas, Alteración o remodelo, Anisotropía.	Análisis al microscopio y electromicroscopio.
Estructura	Discontinuidades heredadas, juntas, diaclasas, foliaciones, estratificación, fallas intrusiones. Separación, continuidad, relleno y propiedades de las discontinuidades.	Análisis visual de apiques, sondeos y afloramientos de suelo residual. Microscopio optico.
Propiedades Mecánicas	Resistencia al cortante, Cohesión y, ángulo de fricción de la masa de suelo y de las discontinuidades, envolventes de falla, Relación de vacíos, Permeabilidad, Dispersividad, Factores que afectan estas propiedades.	Ensayos de campo y de laboratorio. Resistencia al cortante, permeabilidad, Peso unitario, relación de vacíos, porosidad, Dispersividad.
Régimen de aguas subterráneas	Humedad, grado de saturación, succión, Posibilidad de aumento rápido de humedad, avance del frente húmedo. Régimen interno de agua permanente y ocasional.	Ensayos de humedad, succión, velocidad de avance del frente húmedo. Redes de movimiento de agua permanente y por acción de lluvias.
Clasificación del suelo residual	Definición de la unidad de suelo, grupo y subgrupo, utilizando todos los elementos anteriores.	Sistema FAO Sistema de Wesley Nombre especial del suelo.
Caracterización del Perfil	Definición de las características del perfil. Profundidad del perfil.	Clasificación por el Método de Hong Kong (grados I a VI).
Superficies preferenciales de falla	Superficie de falla, tipo de falla.	Análisis geotécnico incluyendo agua, sismo, etc.

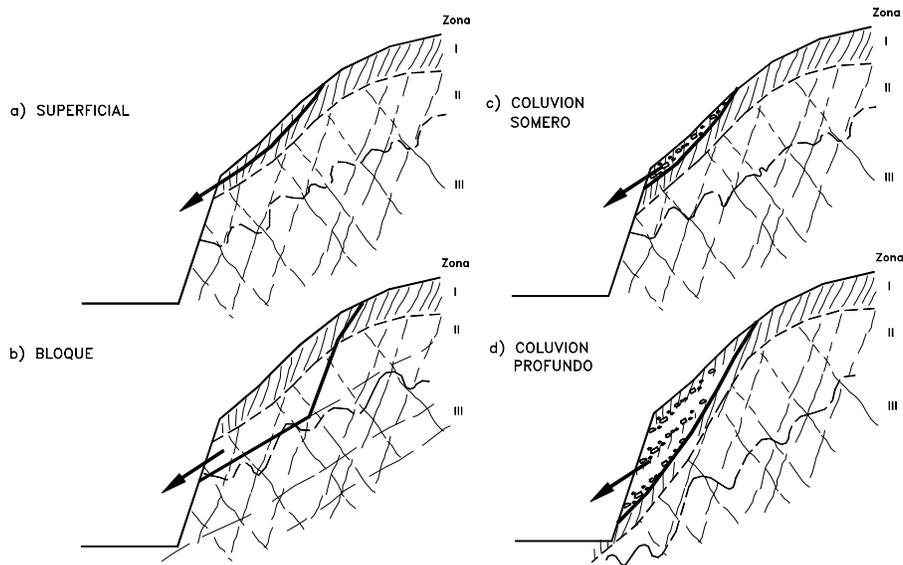


Figura 6.3 Tipos de deslizamiento en suelos residuales (Deere y Patton 1971).

6.3 EL PROCESO DE METEORIZACION

En ambientes tropicales, dominados por temperaturas altas y cambiantes y por lluvias abundantes, la meteorización de los materiales es muy fuerte, caracterizándose por la descomposición rápida de feldspatos y minerales ferromagnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de Sílice y de las bases Na_2O - K_2O - CaO - y MgO (Gidigasú-1972). Los feldspatos se meteorizan inicialmente a Kaolinita, Óxidos de Hierro y Óxidos de Aluminio y los compuestos más resistentes como las partículas de Mica y Cuarzo permanecen.

La meteorización de rocas y cenizas volcánicas conducen a la formación de Montmorillonitas, Aloysitas, óxidos de hierro y aluminio en las etapas iniciales de la meteorización y finalmente se pueden formar Caolinitas, Esmectitas y Gipsitas (González y Jiménez - 1981)(Tabla 6.2).

Algunas rocas que contienen sales (NaCl), Cal (CaSO_4) y Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se disuelven fácilmente en agua, especialmente en presencia de CO_2 , acelerando el proceso de meteorización.

A medida que el proceso de meteorización continúa los contenidos de Caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a Fe_2O_3 y Al_2O_3 . Existen investigaciones que demuestran la disminución de los contenidos de Caolinita, con el aumento del promedio anual de lluvias (Lohnes y Demirel, 1973).

El proceso generalmente es:

Material volcánico \Rightarrow Montmorillonita \Rightarrow Aloisita \Rightarrow Caolinita.

Tabla 6.2 Tipos generales de minerales en los suelos residuales

Material de origen	Minerales resultantes
Roca cristalina	Caolinita Oxido de hierro Oxido de aluminio.
Roca volcánica	Montmorillonita Aloisita Esmectita Oxido de hierro Oxido de aluminio

Etapas del proceso de meteorización

En general un proceso de meteorización involucra tres etapas así:

a. Desintegración

Se abren las discontinuidades y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión. En la meteorización la sal es generalmente un silicato y el producto de la reacción es una arcilla.

b. Descomposición

Se incrementa el contenido de arcilla y de suelo en general y se disminuye la fricción. La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos químicos incluyen la hidrólisis y el intercambio cationico. Los procesos biológicos pueden incluir efectos de las raíces, oxidación bacteriológica y reducción de hierro y compuestos del azufre.

Hidrólisis

El proceso químico más importante en la meteorización química es la hidrólisis. Esta ocurre cuando una sal se combina con agua para formar un ácido o una base.

Intercambio catiónico

Es la descomposición de un mineral de arcilla para formar otro a través de la transferencia de iones entre soluciones percolantes y el mineral original. Los cationes tales como el sodio y el calcio son fácilmente intercambiables. El intercambio de cationes no altera la estructura básica del mineral de arcilla pero modifica el espaciamiento entre capas, convirtiendo por ejemplo una illita en una motmorillonita.

c. Oxidación y recementación

Se aumenta el contenido de óxidos de hierro y aluminio, los cuales pueden cementar grupos de partículas aumentando la cohesión y el suelo tiende a estabilizarse.

En la mayoría de los procesos de meteorización en las rocas ígneas predominan los procesos químicos, mientras en las rocas sedimentarias predominan los procesos físicos, sin embargo estos procesos se interrelacionan.

La meteorización generalmente, avanza hacia abajo de la superficie y a través de las juntas y demás conductos de percolación, produciendo variaciones de intensidad, de meteorización y dejando bloques internos de material no descompuesto.