

## 1. MECÁNICA DE LOS SUELOS I

Por: - Gonzalo Duque E. y Carlos E. Escobar

### 1.1. Introducción

Terzaghi dice: La mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o la descomposición química de las rocas, independientemente de que tengan o no materia orgánica.

La mecánica de suelos incluye:

- a. Teorías sobre el comportamiento de los suelos sujetas a cargas, basadas en simplificaciones necesarias dado el estado actual de la teoría.
- b. Investigación de las propiedades físicas de los suelos.
- c. Aplicación del conocimiento teórico y empírico de los problemas prácticos.

Los métodos de investigación de laboratorio figuran en la rutina de la mecánica de suelos.

En los suelos se tiene no solo los problemas que se presentan en el acero y concreto (módulo de elasticidad y resistencia a la ruptura), y exagerados por la mayor complejidad del material, sino otros como su tremenda variabilidad y que los procesos naturales formadores de suelos están fuera del control del ingeniero.

En la mecánica de suelos es importante el tratamiento de las muestras (inalteradas – alteradas). La mecánica de suelos desarrolló los sistemas de clasificación de suelos – color, olor, texturas, distribución de tamaños, plasticidad (A. Casagrande).

El muestreo y la clasificación de los suelos son dos requisitos previos indispensables para la aplicación de la mecánica de suelos a los problemas de diseño.

### 1.2. Problemas planteados por el terreno en la ingeniería civil.

En su trabajo práctico el ingeniero civil ha de enfrentarse con muy diversos e importantes problemas planteados por el terreno. Prácticamente todas las estructuras de ingeniería civil, edificios, puentes, carreteras, túneles, muros, torres, canales o presas, deben cimentarse sobre la superficie de la tierra o dentro de ella. Para que una estructura se comporte satisfactoriamente debe poseer una cimentación adecuada.

Cuando el terreno firme está próximo a la superficie, una forma viable de transmitir al terreno las cargas concentradas de los muros o pilares de un edificio es mediante zapatas. Un sistema de zapatas se denomina cimentación superficial. Cuando el terreno firme no está próximo a la superficie, un sistema habitual para transmitir el peso de una estructura al terreno es mediante elementos verticales como pilotes o caissons.

El suelo es el material de construcción más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho, el único material disponible localmente. Cuando el ingeniero emplea el suelo como material de construcción

debe seleccionar el tipo adecuado de suelo, así como el método de colocación y, luego, controlar su colocación en obra. Ejemplos de suelo como material de construcción son las presas en tierra, rellenos para urbanizaciones o vías.

Otro problema común es cuando la superficie del terreno no es horizontal y existe una componente del peso que tiende a provocar el deslizamiento del suelo. Si a lo largo de una superficie potencial de deslizamiento, los esfuerzos tangenciales debidos al peso o cualquier otra causa (como agua de filtración, peso de una estructura o de un terremoto) superan la resistencia al corte del suelo, se produce el deslizamiento de una parte del terreno.

Las otras estructuras muy ligadas a la mecánica de suelos son aquellas construidas bajo la superficie del terreno como las alcantarillas y túneles, entre otros, y que está sometida a las fuerzas que ejerce el suelo en contacto con la misma. Las estructuras de contención son otro problema a resolver con el apoyo de la mecánica de suelo entre las más comunes están los muros de gravedad, los tablestacados, las pantallas ancladas y los muros en tierra armada.

### 1.3. Historia de la mecánica de suelos

En la dinastía Chou, 1000 A. C, se dan recomendaciones para construir los caminos y puentes. El siglo XVII trae las primeras contribuciones literarias sobre ingeniería de suelos y el siglo XVIII marca el comienzo de la Ingeniería Civil, cuando la ciencia se toma como fundamento del diseño estructural.

Vauban, 1687, ingeniero militar francés da reglas y fórmulas empíricas para construcción de muros de contención.

Bullet, 1691, (francés), presenta la primera teoría sobre empuje de tierras y a ella contribuyen los franceses Couplet (1726), Coulomb (1773), Rondelet (1802), Navier (1839), Poncelet (1840) y Collin (1846). Más adelante el escocés Rankine (1857) y el suizo Culman (1866).

En 1773, Coulomb (francés), relaciona la resistencia al corte con la cohesión y fricción del suelo. En 1857, Rankine (escocés), presenta su teoría del empuje de tierras. En 1856, se presenta la "Ley de Darcy" (Francia) y la "Ley de Stokes" (Inglaterra), relacionadas con la permeabilidad del suelo y la velocidad de caída de partículas sólidas en fluidos.

Culman (1866) aplica gráficamente la teoría de Coulomb a muros de contención. En 1871, Mohr (Berlín) desarrolla el cálculo de esfuerzos (una representación gráfica) en un punto del suelo dado.

1873, Bauman (Chicago) afirma que el área de la zapata depende de la carga de la columna y recomienda valores de carga en arcillas.

En 1885 Boussinesq (Francia) presenta su teoría de distribución de esfuerzos y deformaciones por cargas estructurales sobre el terreno.

En 1890, Hazen (USA) mide propiedades de arenas y cascajo para filtros.

En 1906, Strahan (USA) estudia la granulometría para mezclas en vía.

En 1906, Müller, experimenta modelos de muros de contención en Alemania.

En 1908, Warston (USA), investiga las cargas en tuberías enterradas.

En 1911, Atterberg (Suecia), establece los límites de Atterberg para suelos finos.

En 1913, Fellenius (Suecia), desarrolla métodos de muestreo y ensayos para conocer la resistencia al corte de los suelos y otras propiedades. Además, desarrolla el método sueco del círculo para calcular la falla en suelos cohesivos.

En 1925, Terzagui, presenta en Viena el tratado ERDBAUMECHANIK que hace de la Mecánica de Suelos una rama autónoma de la Ingeniería. El científico de Praga, Karl Terzagui, es el padre de la Mecánica de Suelos.

En la Sede de Manizales cuando la entonces Facultad de Ingeniería creada en 1948, hacia 1952 se dictó por primera vez el curso de M de S por el Ingeniero Civil Julio Robledo Isaza

#### 1.4. Origen formación y constitución del suelo


El geotecnista debe conocer el contexto geológico del suelo, e incluso el climatológico y agrológico. Sin ese entendimiento, su trabajo estará lleno de incertidumbres que pueden traducirse en pérdidas de oportunidades al desconocer propiedades inherentes y sobretodo, se podrán incorporar elementos de riesgo para el diseño, por omitir circunstancias fundamentales intrínsecas y ambientales.

##### 1.4.1. Generalidades

Suelo, en Ingeniería Civil, son los sedimentos no consolidados de partículas sólidas, fruto de la alteración de las rocas, o suelos transportados por agentes como el agua, hielo o viento con contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva, y que pueden tener materia orgánica. El suelo es un cuerpo natural heterogéneo.

La mecánica de suelos es la aplicación de la mecánica a los problemas geotécnicos. Ella estudia las propiedades, comportamiento y utilización del suelo como material estructural, de tal modo que las deformaciones y resistencia del suelo ofrezcan seguridad, durabilidad y estabilidad de las estructuras.

La estructura del suelo puede ser natural (la del suelo “in situ”), como un talud, canal en tierra o artificial (suelo como material de construcción), como un terraplén o un relleno.

MECÁNICA DE SUELOS		VI Suelo con humus	Fábrica textural heredada. Zona de lixiviación susceptible a la erosión.
		V Suelo sin humus	
IV Completamente descompuesto		Fábrica textural y estructural. Zona de acumulación. Inicia el control estructural.	
III Altamente descompuesto			
II Parcialmente descompuesto		Fábrica estructural heredada.	
I Roca sana		Falla planar, en cuña o por caída.	
MECÁNICA DE GRANOS GRUESOS			
MECÁNICA DE ROCAS			

**Figura 1.1** Perfil del suelo (en geotecnia). El perfil geotécnico describe con seis horizontes, del I en la base al VI en la superficie, pudiendo en ocasiones estar el perfil incompleto, por faltar en el algún horizonte.

## 1.4.2. Definiciones

Saprolito: Suelo que mantiene la estructura de la roca madre.

Regolito: Material suelto constituido por partículas de roca.

Suelo residual: El que se forma sobre la roca madre (autóctono).

Suelo transportado: El que se forma lejos de la roca madre (alóctono).

Lixiviación: Remoción de material soluble del suelo por agua infiltrada.

Humus: Residuo de la descomposición de tejidos orgánicos, que da el color al suelo.

Relictos: Estructuras heredadas por el suelo, de la roca madre (diaclasas, etc.).

Eluviión: Depósito in situ (autóctono). Origina talus y coluviones.

Coluviión: Depósito de ladera; proviene de los movimientos masales (del talus).

Aluviión: Depósito de corriente (alóctono).

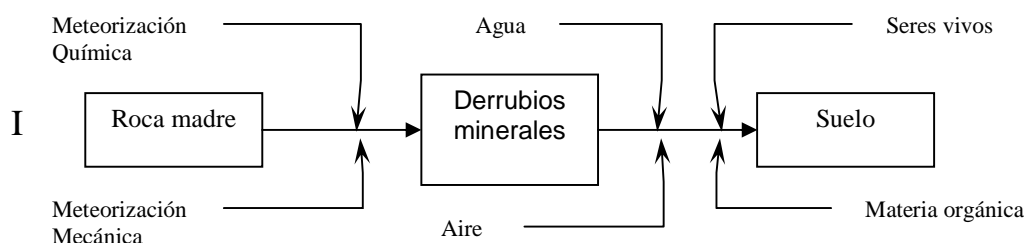
Subsistencia: Hundimiento por presencia de cavernas kársticas o fallas activas.

Fixible: Que se exfolia, es decir, se separa en láminas delgadas.

Abrasión: Efecto de lija sobre las rocas, producido por viento, olas, glaciares, ríos.

Gelivación: Agrietamiento del suelo por acción del hielo.

## 1.4.3. Etapas y procesos en la formación del suelo (I) y de las arcillas (II)



**Figura 1.2** Etapas y procesos en la formación del suelo

## 1.4.4. Factores de Formación y Evolución del Suelo (F.F.E.S.):

Los factores de formación y evolución del suelo son cinco:

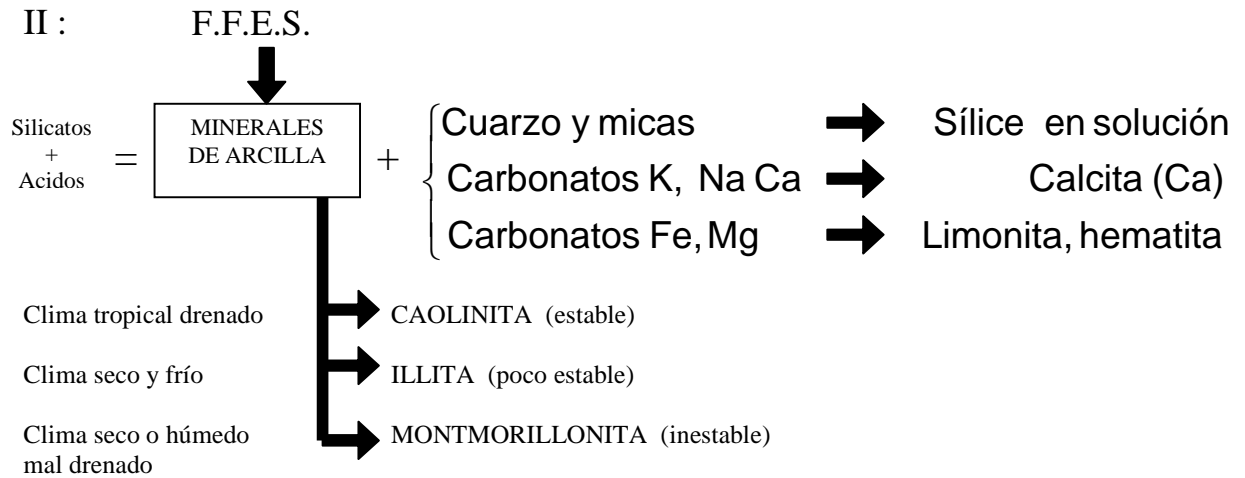
Material Parental: Permeabilidad y constituyentes minerales de la roca madre.

Tiempo: El clímax puede ser de decenas a miles de años. Por ejemplo siglos.

Topografía: Pendientes, drenaje; orientación de la ladera y barreras topográficas.

Formadores biológicos: Micro y macro fauna como fuente de humus.

Clima: Temperatura, balance hídrico, intensidad de acción y velocidad de procesos.



. **Figura 1.3** Etapas y factores de formación de las arcillas

#### 1.4.5. Depósitos

El nombre de los depósitos depende del agente, el lugar y su estructura. El geotecnista debe reconocer y advertir las propiedades ingenieriles de un depósito, como su densidad, resistencia, permeabilidad, naturaleza, etc., recurriendo al análisis de su génesis y a los materiales y procesos que lo explican.

Por el agente: Coluvial (gravedad), eólico (viento), aluvial (agua), glacial (hielo).

Por el lugar: Palustre (pantanos), marino (mar), lacustre (lagos), terrígenos (continentes).

Por la estructura: clástico (fragmentos), no clástico (masivo).

#### 1.4.6. Alteración de las rocas

Existe un equilibrio dinámico entre las tasas de alteración y denudación, TA y TD, respectivamente.

TA > TD ⇒ predominio de material residual; ejemplo, zona tórrida.

TD > TA ⇒ predominio de la roca fresca y los sedimentos; ejemplo, zona templada.

Los suelos tropicales son fundamentalmente suelos residuales, mientras los de zonas templadas son fundamentalmente suelos transportados; así, la Mecánica de Rocas se ha hecho para latitudes diferentes a las nuestras, donde las capas de suelo son horizontales, sin relictos caóticos e impredecibles, como los que afectan nuestros macizos y suelos.

Las alteraciones tectónica e hidrotermal, no son formas de meteorización; ambas formas de meteorización son típicas de los ambientes andinos, donde el clima también es intenso y hace su aporte.

No son la humedad y la temperatura, sino las variaciones de ambas las que hacen intensa y rápida la meteorización o intemperismo.

Alteración física: Incluye la desintegración por meteorización mecánica, ejemplo:

A: Tectónica. B: Climática. C: Biológica. D: Hidrotermal.

Alteración química: Incluye la descomposición por meteorización química, ejemplo:

Por agua (hidratación, hidrólisis, solución). Por CO<sub>2</sub> (Carbonatación). Por O<sub>2</sub> (Oxidación, reducción).

Los coluviones son por lo general depósitos heterogéneos, sueltos y con bloques angulosos. Los aluviones son depósitos conformados por materiales gruesos y matriz de finos en los tramos de ambiente montañosos y por materiales finos en los valles amplios. La gradación está ligada a la velocidad de la corriente, por lo general baja en los valles amplios. Los depósitos lacustres generalmente son de grano fino. Los depósitos marinos suelen ser estratificados. En los lacustres el medio es tranquilo y la potencia menor.

Los depósitos glaciares son heterogéneos, los till no presentan estratificación clara, los fluvio glaciares sí. Los primeros por el efecto aplanadora del hielo y los segundos por formarse a partir de las aguas de fusión.

Los depósitos eólicos son homogéneos, los loes son de limos y las dunas son de arena; los loes no son transportados y las dunas sí (emigran).

Los principales minerales que constituyen suelos gruesos son: Silicato principalmente feldespato (K, Na, Ca), micas (moscovita y biotita), olivino y serpentina. Oxidos, en especial el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), limonita, magnetita y corindón. Carbonatos, principalmente calcita y dolomita; y sulfatos como yeso y anhidrita.

En los suelos gruesos el comportamiento mecánico e hidráulico depende de su compacidad y orientación de partículas, y poco de la composición mineralógica.

*Roca Vs Suelo:* Depende de la resistencia a la compresión

Roca dura sí  $\sigma_c > 300 \text{ Kg/cm}^2$ .

Roca blanda sí  $200 \text{ Kg/cm}^2 < \sigma_c < 300 \text{ Kg/cm}^2$

Suelo si  $\sigma_c \approx 10 \text{ Kg/cm}^2$  (El concreto normalmente es de  $\sigma_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ )

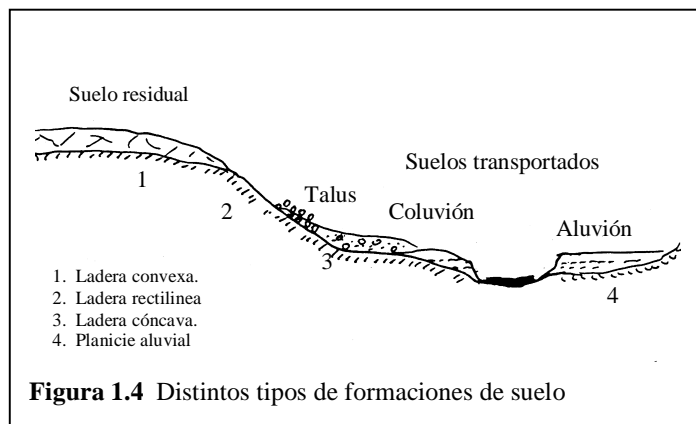
#### 1.4.7. Vertiente de montaña

Los talus y los coluviones son depósitos de ladera; el talus es clastosoportado y el coluvión es matriz soportado. Ambos están en la ladera de acumulación. La infiltración se da en la ladera convexa donde se da la reptación. La ladera rectilínea es denutativa y exhibe los horizontes I y II.

#### 1.4.8. Componentes del suelo.

El aire y el agua son elementos constitutivos, además de los sólidos y gases. Los guijarros son fragmentos de roca con diámetros  $\phi > 2 \text{ cm}$ . Las gravas tienen dimensiones de  $2 \text{ cm}$  a  $2 \text{ mm}$ . La arena gruesa desde  $0,2 \text{ cm} < \phi < 0,2 \text{ mm}$ ; la arena fina, entre  $0,2 \text{ mm} < \phi < 0,005 \text{ mm}$ . Llamamos limo a las partículas con diámetro aparente entre  $0,05 \text{ mm}$  y  $0,005 \text{ mm}$ .

Con los análisis granulométricos, arcilla son los constituyentes de diámetro aparente inferior a  $0,002 \text{ mm}$  (o  $2\mu$ ), pero el término arcilla tiene otro sentido, adicionalmente, no granulométrico.

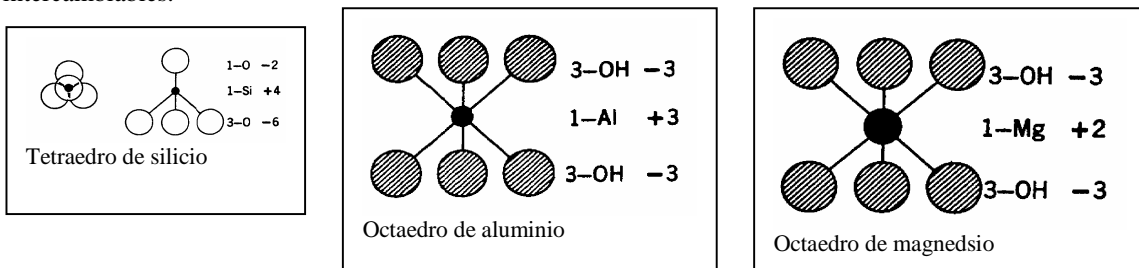


**1.5. Arcilla.**

Son grupos minerales definidos, como caolinita, illita y montmorillonita, donde participan estructuras octaédricas y tetraédricas. La arcilla, como el humus, posee propiedades coloidales. Las arcillas, en el sentido mineralógico, son cristales microscópicos cuyos átomos están dispuestos en planos.

Al interior de una trama de átomos de oxígeno, cuyas esferas iónicas son voluminosas, se encuentran cationes de sílice (Si) y aluminio (Al). Si el volumen lo permite, cationes de hierro (Fe), magnesio (Mg), calcio (Ca) o potasio (K) reemplazan al sílice (Si) y al aluminio (Al).

Las arcillas tienen una capacidad de intercambio iónico grande. Otros iones diferentes a los enunciados pueden completar las capas y unir las, y también, las cargas eléctricas libres pueden ser equilibradas por iones intercambiables.



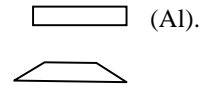
**Figura 1.5** Tres unidades estructurales básicas y radios iónicos

Gibsita: (G) Lámina de alúmina, fruto de la combinación de octaedros de aluminio

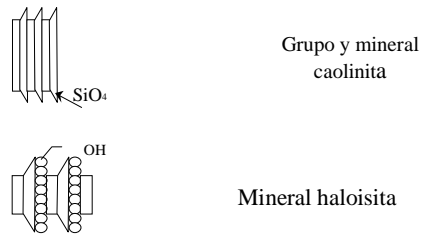
Brucita: (B) Lámina hidratada, fruto de combinar octaedros de magnesio (Mg).

Láminas de sílice: Tetraedros (SiO<sub>4</sub>) de sílice dispuestos en lámina. Ver trapecios.

Las arcillas 1:1 son arreglos de octaedro G o B (rectángulo) y Tde Silicio ( trapecio)

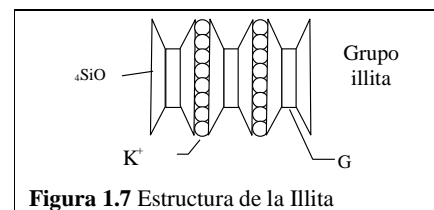


1.5.1. Caolinitas: Principal grupo de arcillas que presenta baja capacidad de intercambio, 10 - 12 me (miliequivalentes) cada 100 gr, y con dos capas de cationes, las llamadas arcillas 1:1 (capa tetraédrica más capa octaédrica de alúmina hidratada). El arreglo, que se repite indefinidamente da una carga eléctrica neutra del mineral caolinita, cuya estructura no es expansiva, por no admitir agua en sus retículos. Estas arcillas son moderadamente plásticas, de mayor permeabilidad y mayor fricción interna. Del grupo son: HALOISITA, CAOLINITA (por definición), ENDELLITA, DICKITA, ALOFANO, NACRITA Y ANAUXITA. La haloisita, aunque tiene la misma fórmula del caolín, contiene moléculas extra dentro de su estructura. En la figura = Gibsita = SiO<sub>4</sub> (En la “Carta de Plasticidad” las caolinitas están bajo la línea A = limos).



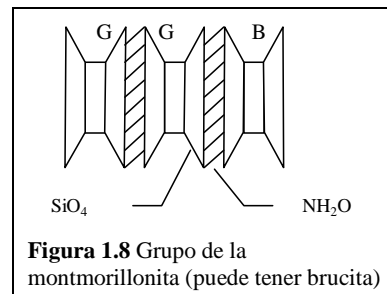
**Figura 1.6** Estructuras básicas y radios iónicos

1.5.2. Illita: Es una arcilla 2:1, cuya capacidad de intercambio es de unos 40 me/100gr, lo que las hace algo expansivas. Las láminas de alúmina están entre dos láminas de SiO<sub>4</sub>, y estas se ligan por iones de potasio, que le dan cierta estabilidad al conjunto. La actividad de la illita es 0,9, de la caolinita es de 0,38. El coeficiente de fricción interno y la permeabilidad son menores que en la caolinita y mayores que en la montmorillonita.



**Figura 1.7** Estructura de la Illita

1.5.3. Montmorillonita: Arcilla 2:1 cuya capacidad de intercambio es de unos 120 me/100gr, lo que las hace muy expansivas. Entre las dos láminas de sílice se encuentra una brucita o una gibsita, y este arreglo se repite indefinidamente. La unión entre minerales individuales es débil, por lo cual el agua se inserta, introduciendo  $n$  moléculas para producir el hinchamiento del suelo. Además de ser expansiva, la montmorillonita es muy plástica y se contrae al secarse, mejorando su resistencia y haciéndose impermeable. La actividad de la montmorillonita es de 7,2. Entre las montmorillonitas tenemos: La MONTMORILLONITA (por definición), HECTORITA, SAPONITA, BEIDELLITA, SAUCONITA, TALCO, PORFILITA y NONTRONITA.



Bentonitas: Suelos montmorilloníticos altamente plásticos y altamente expansivos, de grano tan fino que al tacto es jabonoso (sí es húmedo). Se utilizan para cellar fugas en depósitos y canales.

Vermiculita, clorita, sericita, etc., son otros minerales arcillosos no clasificados en los anteriores tres grupos.

1.5.4. Actividad: este parámetro lo ha expresado Skempton (1953) como la pendiente de la línea que relaciona el Índice Plástico de un suelo con su contenido de minerales de tamaño arcilloso, como se verá en el numeral 4.1 y en la fórmula 4.3. Una actividad normal es de 0,75 a 1,25. Más de 1,25 es alta y menos de 0,75 es inactiva. Actividad supone cohesión, expansividad y plasticidad.

Regresar a Contenido  
del libro M d S