



Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Geología y Geotecnia

TIPOS DE SUELOS:

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS Y LIMOSOS

Alumno adscripto: Rodrigo Zapata

Dirección de la adscripción: Dra. Ing. Silvia Angelone

2018

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	Pág. 2
2. ORIGEN Y FORMACIÓN	Pág. 3
3. CLASIFICACIÓN DE SUELOS	Pág. 3
4. SUELOS FINOS	Pág. 7
4.1. Arcillas	Pág. 7
4.1.1. Composición Cristalológica	Pág. 7
4.1.2. Grupos	Pág. 13
4.1.3. Sensitividad	Pág. 16
4.1.4. Arcillas Expansivas	Pág. 17
4.2. Limos	Pág. 20
5. LOESS	Pág. 21
6. DIFERENCIAS ENTRE SUELOS EXPANSIVOS Y SUELOS COLAPSABLES	Pág. 26
7. BIBLIOGRAFÍA	Pág. 27

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del suelo que interviene en cualquier obra civil es de suma importancia para poder estimar el comportamiento futuro que tendrá, tanto durante como después del proceso constructivo, y así evitar cualquier posible imprevisto. Todas las obras se apoyan en el suelo de alguna u otra forma, e incluso algunas lo utilizan como material constructivo (diques, terraplenes, presas de tierra, carreteras, etc.). Es lógico prever que no todos los terrenos responderán de igual forma ante las mismas condiciones que impone una construcción o bien, el propio medio ambiente. Esto es debido a los distintos tipos de suelos existentes, su estructura, origen, composición y antecedentes geológicos. Existen una serie de suelos que requieren de un análisis particular a la hora de encarar un proyecto, por los efectos adversos que puede generar la modificación de las condiciones in-situ de los mismos, como por ejemplo los suelos expansivos o los colapsables.

Se entiende por suelo al conjunto de partículas minerales y/o de materia orgánica en forma de depósito, generalmente minerales, y/o de origen orgánico, que pueden separarse por medio de una acción mecánica sencilla y que incluyen cantidades variables de agua y aire (de acuerdo a las normas UNE-EN ISO 14688-1 y 14689-1). A partir de esta definición, podemos distinguir tres partes componentes, que ayudan a definir el comportamiento físico del suelo en su conjunto y nos permiten representarlo, para su estudio, mediante un modelo trifásico como muestra la *Figura 1.1*. Las fases componentes son:

- Partículas de suelo que constituyen la fase sólida o matriz del suelo.
- El agua presente en los vacíos, que constituye la fase líquida.
- El aire presente en los vacíos, que constituye la fase gaseosa.

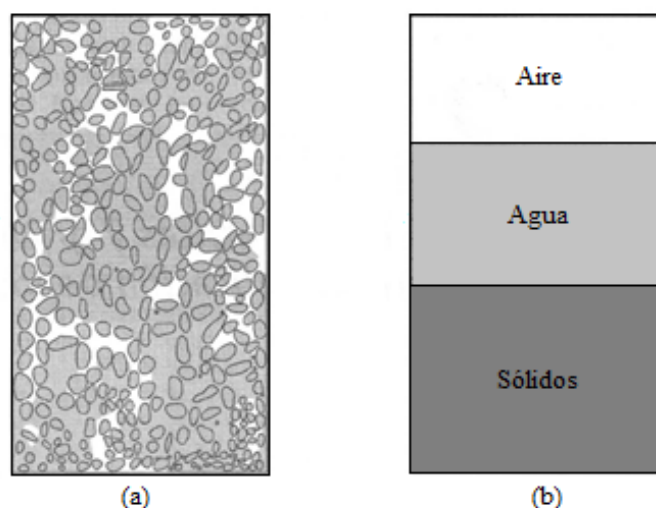
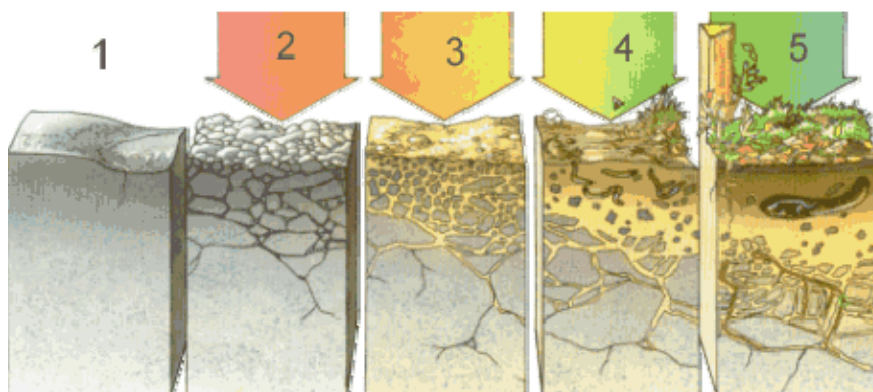


Figura 1.1: (a) Elemento de suelo en estado natural. (b) Modelo trifásico del elemento de suelo.

[1]

2. ORIGEN Y FORMACIÓN

En la formación de los suelos, la roca madre se ve afectada por procesos de meteorización, tanto física (desagregación) como química (alteración). Luego mediante agentes naturales los productos de la meteorización pueden ser transportados causando la erosión de aquellas rocas más superficiales de la corteza terrestre. Estos materiales se depositarán posteriormente y mediante diversos fenómenos se consolidará el suelo propiamente dicho. Los procesos de formación del suelo se denominan edafogénesis, y los factores que intervienen en este proceso son: el clima, la topografía, la acción biológica, la composición litológica y el tiempo de actuación de todos ellos (*Figura 2.1*). Dentro de estas acciones debemos saber que la desagregación dará como producto gravas, arenas o limos, ya que para la formación de arcillas se requiere de transformaciones químicas. Después de la meteorización el suelo formado puede permanecer en el lugar (suelo residual) o ser transportado por agentes naturales como el agua, tanto en estado líquido como sólido, y el aire. [1] [2]



(1) Roca madre; (2) Acción mecánica; (3) Acción química; (4) Acción biológica; (5) Acción conjunta mecánica-química-biológica.

Figura 2.1: Proceso de formación de los suelos. [3]

3. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Un sistema de clasificación de suelos proporciona un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada; consiste en categorizar y agrupar a los suelos junto con otros que posean características semejantes en cuanto a propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas similares.

Según el tamaño de las partículas, podemos distinguir los siguientes tipos de suelos:

- Gravas
- Arenas
- Limos
- Arcillas

Se presenta a continuación un cuadro comparativo (Tabla 3.1) que contempla la clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas componentes, de acuerdo a la Norma IRAM 10535, el MIT (Massachusetts Institute of Technology), y los sistemas de clasificación ASTM D3282-93/97 ó VN - E4 - 84 (H.R.B.) y SUCS (Sistema Universal de Clasificación de Suelos).

	NORMA IRAM 10535	MIT	SUCS	ASTM D3282-93/97
Gravas	5 a 75	> 2	4,75 a 75	2 a 75
Arenas	0,075 a 5	0,06 a 2	0,075 a 4,75	0,075 a 2
Limos	< 0,075	0,002 a 0,060	< 0,075	< 0,075
Arcillas		< 0,002		

Tabla 3.1: Clasificación de suelos según tamaños de sus partículas (medidas en mm).

En la Figura 3.1 se muestran una serie de muestras de suelos en las cuales se puede apreciar la diferencia de tamaños de partículas recién mencionada.

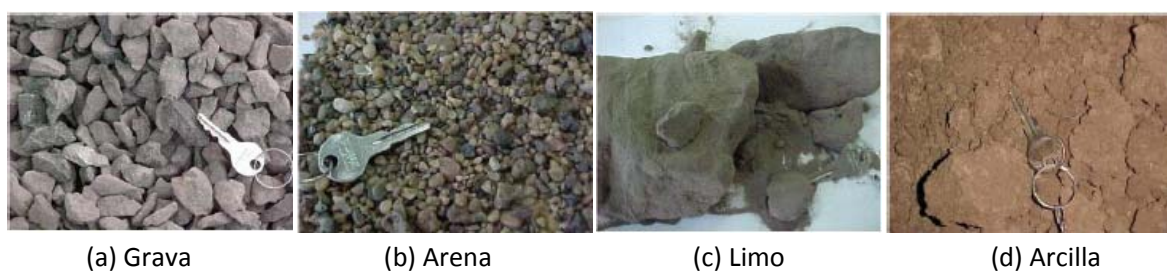


Figura 3.1: Diferentes muestras de tipos de suelos. [4]

Estos, a su vez, podrían ser agrupados en dos grandes grupos: **suelos gruesos y suelos finos**. Algunas de las diferencias más importantes a destacar entre suelos de granos gruesos y suelos de granos finos son las siguientes (Tabla 3.2):

SUELOS GRUESOS (>1mm)	SUELOS FINOS (<1mm)
Sus partículas componentes son visibles a simple vista	Sus partículas componentes no son visibles a simple vista
La forma de las partículas puede ser angular o redondeada	La forma de las partículas puede ser laminar, angular o redondeada
No poseen minerales arcillosos	Pueden poseer minerales arcillosos
Suelos no cohesivos	Suelos cohesivos
Muy alta permeabilidad: $k > 10^{-2} \text{ cm/seg}$	Permeabilidad: Alta (arenas finas), media a baja (limos), muy baja o nula (arcillas) $k < 10^{-2} \text{ cm/seg}$
El tamaño de los vacíos es mayor, pero el volumen total de vacíos es menor: $e < 0,85$	El tamaño de los vacíos es menor, pero el volumen total de vacíos es mayor: arcilla blanda $e > 1,2$; montmorillonita $e > 5$
Si se aplica una sobrecarga importante, el asentamiento del suelo es instantáneo	Si se aplica una sobrecarga importante, se tienen asentamientos diferidos en el tiempo

Tabla 3.2: Diferencias entre suelos gruesos y suelos finos.

Si se quiere analizar, la distribución granulométrica de la fracción fina de un suelo (partículas menores a 0,075mm) se debe recurrir al método de análisis por sedimentación (sedimentometría). Mientras que para conocer la distribución de la fracción gruesa se utiliza el tamizado (vía seca) y/o vía húmeda. Una vez realizados ambos procesos, se puede construir curvas con los porcentajes en peso que pasan por cada tamiz. A modo de ejemplo, se muestra en la *Figura 3.2* una gráfica con la distribución granulométrica para los distintos tipos de suelos que permite diferenciar los distintos tamaños de partículas.

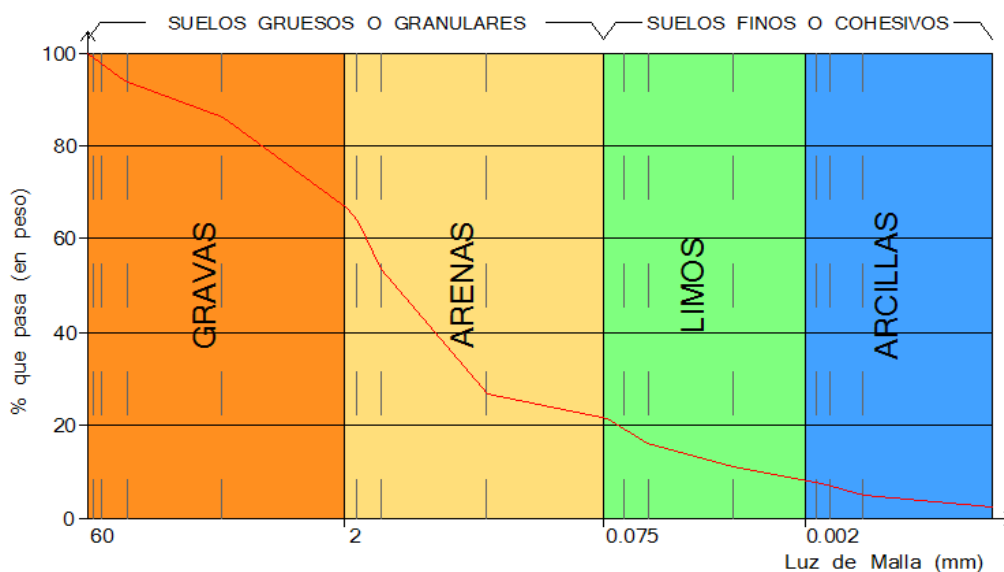


Figura 3.2: Curva granulométrica de un suelo. [5]

La forma de las partículas presentes en la masa de un suelo tiene la misma importancia que la distribución de tamaño de partícula debido a su influencia significativa en las propiedades físicas de un suelo determinado. La forma de la partícula, en general, puede dividirse en tres categorías de importancia:

- Voluminosa: puede ser angular, subangular, subredondeada y redondeada.
- Escamosa o laminar: tienen baja esfericidad (minerales de arcilla).
- Nodulosa: son mucho menos comunes que los otros dos tipos (ejemplo: depósitos de coral). [1]

A raíz de esto, podemos mencionar dos parámetros importantes a la hora de caracterizar la forma de una partícula de suelo:

- Esfericidad: expresa el grado de aproximación de la partícula a una esfera de igual volumen.

$$S = \frac{r_{\text{máx}}}{r_{\text{mín}}} \quad (3.1)$$

Donde:

- $r_{\text{máx}}$: radio máximo de la partícula
- $r_{\text{mín}}$: radio mínimo de la partícula

- **Redondez:** una expresión del grado de agudeza de las aristas y ángulos.

$$R = \frac{\sum r_i / N}{r_{\max}} \quad (3.1)$$

Donde:

- r_i : radio i de la partícula
- N : cantidad de radios medidos de la partícula
- r_{\max} : radio máximo de la partícula

Se muestra a continuación (*Figura 3.3*), ejemplos de diferentes formas de partículas, en función de la esfericidad y redondez que presenten.

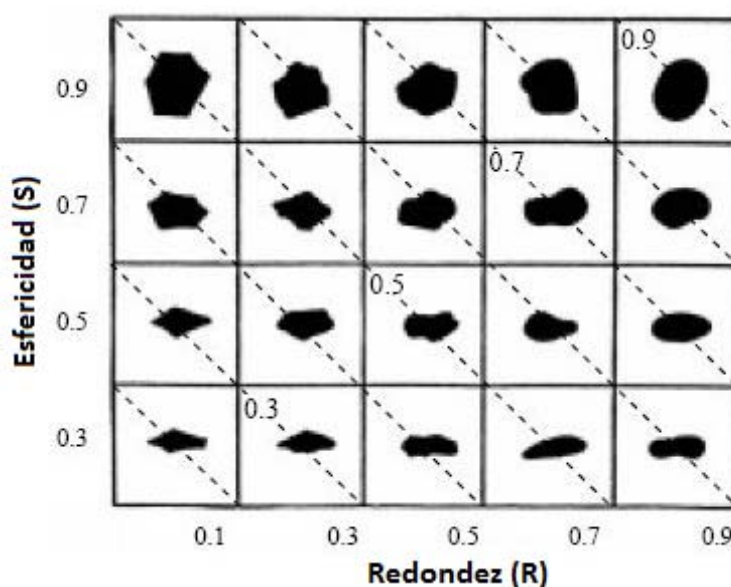


Figura 3.3: Carta de esfericidad y redondez. Las líneas diagonales corresponden a partículas de regularidad constante. [6]

Además, puede establecerse una clasificación particular dependiendo del valor obtenido mediante la Ecuación (3.1), cuyos valores más bajos corresponderán a partículas muy angulares y aquellos cercanos a 1 a partículas bien redondeadas. El caso $R = 1$, indicaría que la partícula es un círculo perfecto. La misma se indica en la *Tabla 3.3*.

Redondez	$R < 0,17$	$R \approx 0,20$	$R \approx 0,30$	$R \approx 0,35$	$R \approx 0,50$	$R \approx 0,70$
Descripción	Muy Angular	Angular	Subangular	Subredondeada	Redondeada	Bien-Redondeada
Imagen						

Tabla 3.4: Clasificación según el valor del coeficiente de redondez R . [6]

4. SUELOS FINOS

4.1. ARCILLAS

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a los 0,002mm, y que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados. Se caracterizan por ser plásticas cuando se las humedecen y por la sonoridad y dureza al calentarla por encima de los 800°C. Como fue mencionado anteriormente, provienen de la alteración físico-química, por acción principalmente del agua, de minerales que forman parte de otras rocas preexistentes (feldespatos, piroxenos y micas), surgiendo así los “minerales de la arcilla”, en función de que roca se altera y en qué grado. Cuando se refiere a la arcilla no se habla de un único material de composición simple, sino de uno muy diverso en origen y composición. Por ejemplo, se pueden observar muestras de arcilla con gamas de colores completamente diferentes en la *Figura 4.1*, poniendo de manifiesto las diferentes composiciones desde un punto de vista visual.



Figura 4.1: Muestras de arcillas de distintos colores.

4.1.1. COMPOSICIÓN CRISTALOQUÍMICA

Las arcillas pertenecen a una clase particular de minerales denominados silicatos, en particular, al grupo de los filosilicatos, o silicatos en hojas (*Figura 4.2*). Su estructura puede entenderse a partir de la combinación de hojas tetraédricas (T) y octaédricas (O). [7]

Es importante indicar algunos aspectos terminológicos importantes:

- Plano atómico: Se dice de aquella superficie que contiene alineaciones de átomos
- Hojas: Conjunto de planos atómicos definidos por la presencia de unidades estructurales básicas.
- Láminas: Apilamiento de varias hojas.

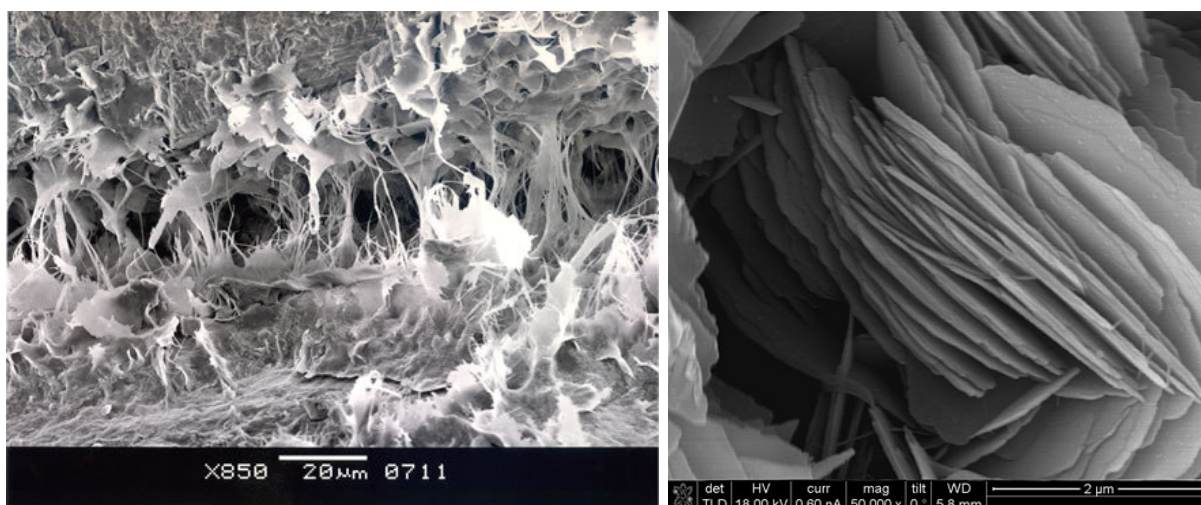


Figura 4.2: Imágenes microscópicas de distintos suelos arcillosos, illita (izquierda) [8] y montmorillonita (derecha).

Una hoja tetraédrica está constituida por una disposición bidimensional de tetraedros de SiO_4^{-4} , compartiendo 3 de los 4 oxígenos que poseen y formando capas de extensión infinita, en la que los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} . [7] [9]

La hoja octaédrica, en general, está formada por un arreglo de octaedros de AlO_6 , denominándose hoja de gibbsita. Aunque en ciertas oportunidades el Al^{3+} puede estar sustituido por Mg^{2+} (hoja de brucita), Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. [8]

Ambas estructuras se pueden apreciar en la *Figura 4.3*.

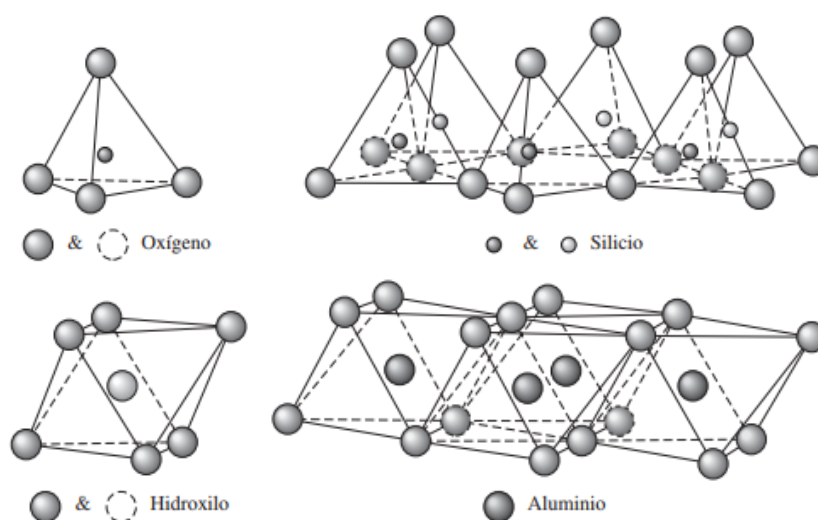


Figura 4.3: Estructuras fundamentales de las arcillas (tetraedro de sílice y octaedro de alúmina). [1]

El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir (oxígenos apicales), y por grupos $(OH)^-$ de la capa brucítica o gibsítica.

Todos los enlaces establecidos entre oxígeno, $(OH)^-$ y cationes, son de tipo covalente y no pueden ser rotos con facilidad, salvo que se suministre una elevada energía para deshacer el enlace. Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica, dándose las siguientes combinaciones:

- **dos capas:** hoja tetraédrica más octaédrica se denominan bilaminares, 1:1, o T-O
- **tres capas:** hoja octaédrica y dos tetraédricas, se denominan trilaminares, 2:1 o T-O-T (Figura 4.4).

A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina **lámina**. Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por lo que existe una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas. [7]

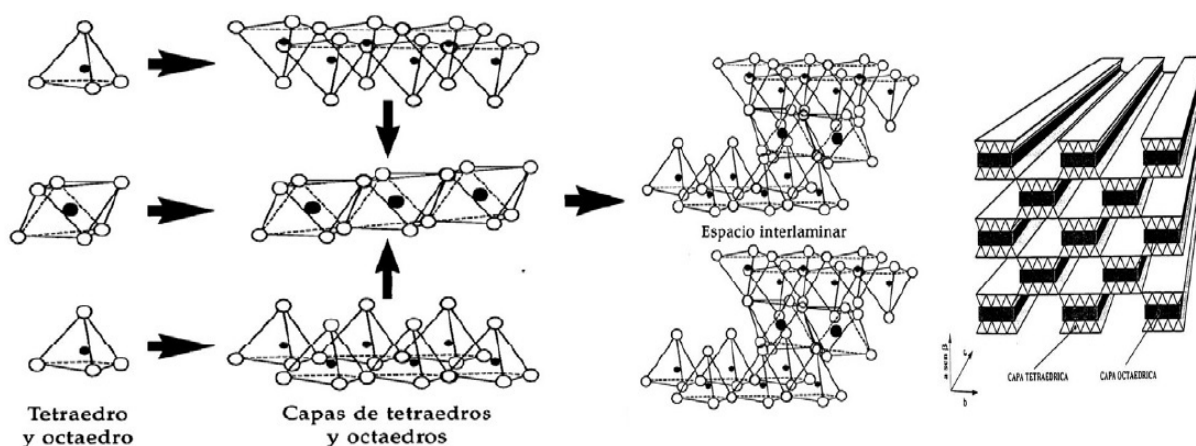


Figura 4.4: Combinación de láminas T-O-T formando una partícula de arcilla.

La forma laminar propia de las partículas de arcilla, da como resultado una gran *superficie específica* (sumatoria de la superficie expuesta de todas las partículas que entran en un gramo del material en estado seco), la cual aumenta considerablemente a medida que el tamaño de las partículas disminuye.

Esta característica da como resultado una importancia significativa de las fuerzas electromagnéticas presentes en la superficie de los minerales, que influye notablemente en su comportamiento. Las cargas negativas se ubican en las caras de la lámina de arcilla y las cargas positivas en el contorno de las mismas (Figura 4.5).

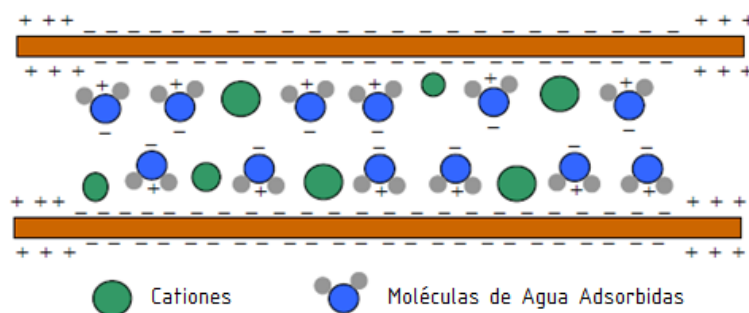


Figura 4.5: Ubicación de cargas negativas y positivas en la superficie de la partícula de arcilla. [2]

Esto se debe a la presencia de enlaces rotos de los bordes o al reemplazo de los átomos de Si o Al, por otros de menor valencia. Una sustitución en la capa octaédrica de Al por Mg o Fe^{2+} , generará un exceso de cargas negativas que hará que la superficie de oxígenos de los tetraedros adquiera una carga que permita ligar cationes. Si además se producen sustituciones de Si^{4+} por Al^{3+} en los tetraedros, la carga negativa, y por lo tanto la capacidad de atracción de cationes se incrementará aún más. A mayor superficie específica, las fuerzas eléctricas aumentarán en relación al peso, incrementando también, la capacidad de intercambio catiónico.

La *capacidad de intercambio catiónico* (CEC) es un proceso dinámico reversible que se desarrolla en la superficie de las partículas. Se origina por desequilibrios eléctricos de las partículas del suelo y por lo tanto, las partículas que tengan mayor cantidad de carga por unidad de superficie son las más activas. Se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral (Figura 4.6).

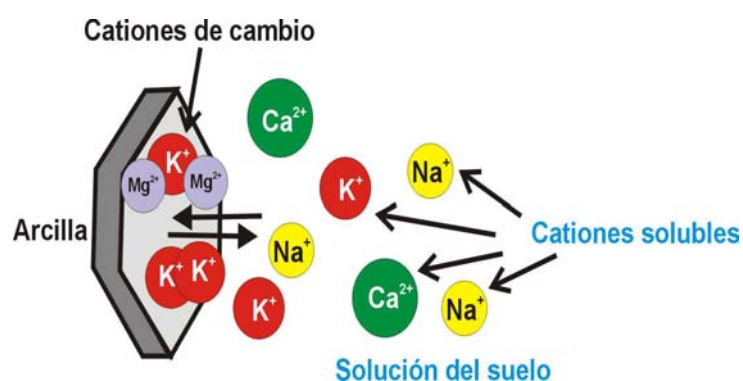


Figura 4.6: Intercambio catiónico en la superficie de una arcilla. [10]

Si decimos que la capacidad de cambio de cationes de los suelos está asociada a las cargas eléctricas negativas que se disponen en las partículas del suelo, es lógico que los suelos con mayor superficie específica (SE) tengan una mayor capacidad de cambio. Esto puede verse a continuación en la *Tabla 4.1*:

Arcilla	CEC [meq/100g]	SE [m ² /g]
Caolinita	2 – 5	15
Halloysita	10 – 50	60
Illita	10 – 50	50
Montmorillonita	80 – 200	80 – 900

Tabla 4.1: CEC de distintos tipos de arcillas. [1]

Cuando a una arcilla se la pone en contacto con agua, alrededor de sus partículas se colocarán moléculas de agua, debido a su polaridad, adhiriéndose a la superficie negativa de la arcilla por enlace puente hidrógeno. Esta capa de agua que rodea a la partícula se denomina **agua adsorbida**, cuya viscosidad es mayor a la del agua libre y tiene un espesor del orden de los 10 Å a los 100 Å. Esta capa está directamente relacionada con la plasticidad del suelo (capacidad de experimentar deformaciones irreversibles sin romperse y a volumen constante) y es muy difícil de eliminar. En forma conjunta con el agua existirá la presencia de cationes, por lo que en la fase líquida alrededor de las partículas habrá una concentración de los mismos y de agua dipolar, formando lo que se conoce como **doble capa difusa**. Estos no se distribuyen uniformemente, sino que es mayor cerca de la superficie de la partícula (Figura 4.7). [2]

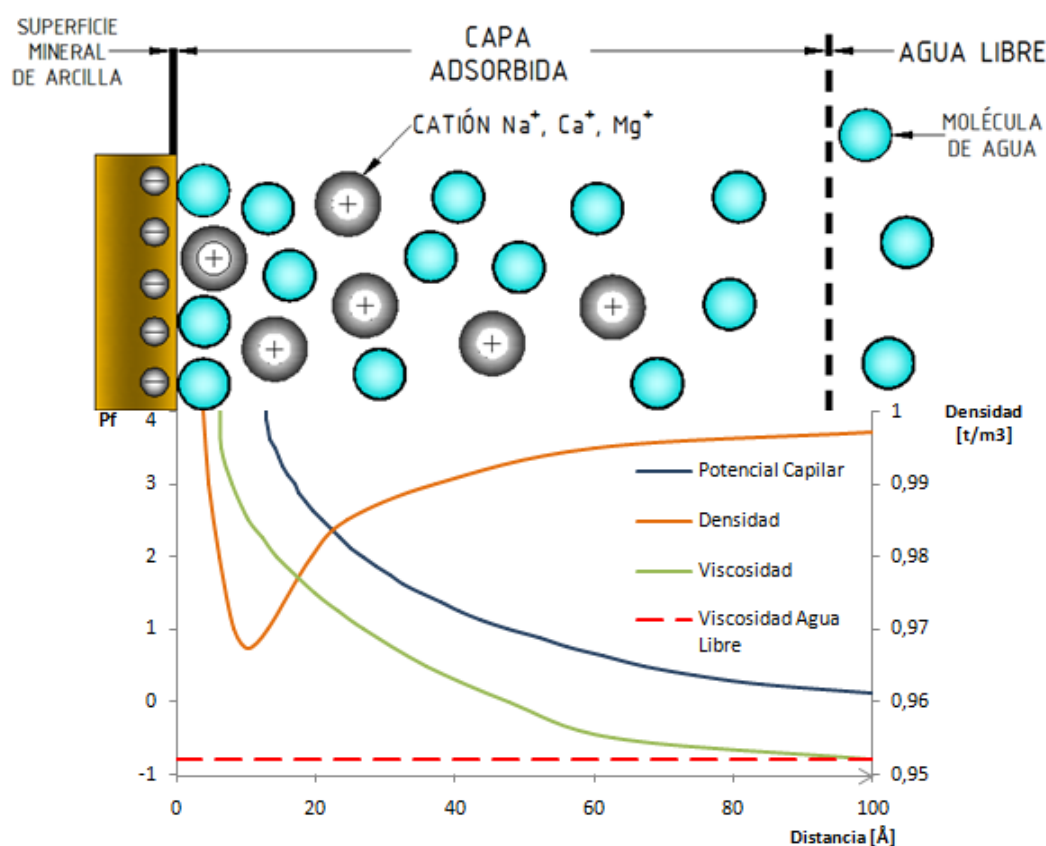


Figura 4.7: Distribución y concentración de iones entre partículas de arcilla.

4.1.2. GRUPOS

La *Tabla 4.2* muestra los grupos arcillosos más representativos presentes en la naturaleza, detallando sus principales diferencias en cuanto a su origen y características físicas y químicas.

Para determinar el tipo de arcilla en estudio se puede recurrir a distintos métodos. Entre los métodos empíricos tradicionales ampliamente utilizados en los laboratorios se pueden citar ensayos de granulometría, límites de Atterberg, el equivalente de arena, etc. los cuales están bien definidos teóricamente, pero que presentan aún ciertas limitaciones en cuanto a la relación directa de las propiedades físico químicas de las partículas. Otros más específicos son:

- Visualización de partículas mediante microscopio electrónico.
- Difracción de RX: se ataca una muestra con rayos X y a partir de los resultados gráficos obtenidos, se cuenta las veces que se repite un ángulo de difracción, el cual es función de los minerales presentes. Se presenta un ejemplo en la *Figura 4.8*.

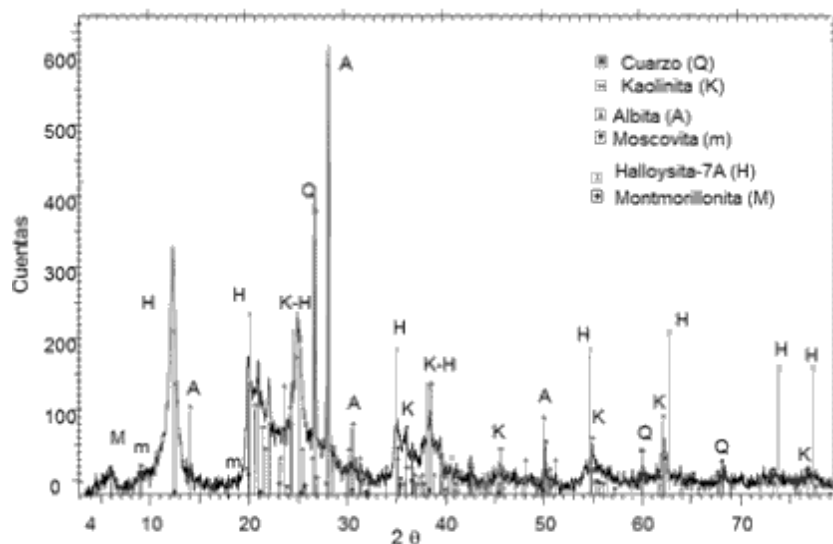


Figura 4.8: Difractograma resultante de un ensayo DRX. [11]

- Ensayo de Azul de Metileno (AM): El ensayo de la “mancha de Azul de Metileno” se hace según Norma UNE-EN 933-9 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo del azul de metileno. Se realiza en base a reacciones químicas activadas por el exceso de carga eléctrica negativa en las partículas de la arcilla y la capacidad de intercambio iónico irreversible que tienen lugar entre el catión de la arcilla y los cationes de la solución acuosa del azul de metileno que se desprenden durante su descomposición en agua. El valor de azul (VA) es la cantidad de azul metileno absorbido por 100 g de finos seco en 200 cm³ de agua destilada. Se agregan 10 a 20 g del material de estudio seco previamente pesado y pasado por el tamiz IRAM 200 en 200 ml de agua destilada, y se dejan humedecer durante 2 horas y se homogeniza por medio de un agitador magnético. Luego se añade pequeñas dosis de

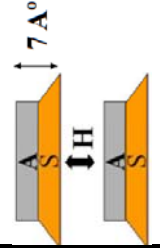
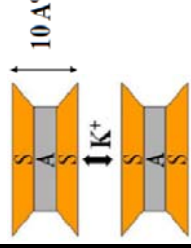
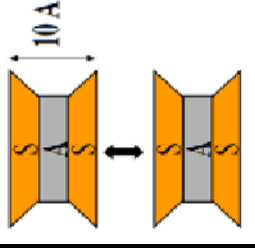
	ORIGEN	ESTRUCTURA	ESPESOR (Å)	SUPERFICIE ESPECÍFICA (m ² /g)	φ/e	TIPO DE ENLACE	ABSORCIÓN DE AGUA	RETRACCIÓN/EXPANSIÓN	REPRESENTACIÓN
ILLITAS	Alteración de feldespatos y micas	T-O / 1:1 (sustitución de Si o Al escasa)	500 - 1000	50	10 a 20	Puente H ⁺ (FUERTE)	BAJA	BAJA	
CAOLINITAS	Alteración de feldespatos y muscovitas en medios marinos	T-O-T / 2:1	200 - 300	50	20 a 50	Enlace iónico de átomos de K ⁺ (FUERTE)	BAJA	BAJA	
ESMECTITAS (MONTMORILLONITAS)	Alteración adicional de los feldespatos presentes en cenizas volcánicas	T-O-T / 2:1 (sustitución de Si ⁴⁺ por Al ³⁺ y de Al ³⁺ por Mg o Fe ³⁺)	200 - 400	80 - 300	10 a 30	Enlace de moléculas de agua adsorbida y iones metálicos (DÉBIL)	ALTA	ALTA	

Tabla 4.2: Grupos arcillosos más representativos.

solución de azul de metileno a suspensión de la muestra de suelo en agua. Pasados unos minutos, para cada dosis, se extrae una gota y se coloca sobre papel de filtro Whatman 42 o similar para comprobar la absorción de solución colorante por parte de la muestra de suelo. Si la mancha no presenta aureola se adiciona otra dosis de la solución y se repite el proceso hasta que aparezca una aureola. Se espera unos minutos, se extrae una gota y se coloca en el papel de filtro. Si la mancha presenta una aureola con un borde azul claro, el ensayo ha culminado (el azul de metileno ha reemplazado al catión en la doble capa difusa y ha cubierto toda la superficie mineral de la arcilla), y se anota el gasto de solución. Si la aureola desapareció se adiciona la mitad de la solución que en el paso anterior. Esto se repite hasta que la aureola se mantenga en dos extracciones de gota (Figura 4.9). [12]

El valor de Azul de Metileno se calcula usando la formula siguiente:

$$V_a = \frac{V_s \times C}{P_{ss}} \cdot \frac{1}{f} \quad (4.1)$$

Donde:

- **V_a**: VA de metileno para 100 g del material, g de AM cada 100 g de suelo seco [g/g]. VA de metileno para 1000 g del material, g de AM cada 1000 g de suelo seco [g/Kg]
- **V_s**: Volumen de la solución de Azul de Metileno añadido [ml]
- **P_{ss}**: Peso de Suelo Seco [g]
- **C**: concentración de la solución de azul de Azul de Metileno [g/l]
- **f**: factor de conversión entre la concentración de la solución de azul de metileno y la masa de azul de metileno absorbida. (igual a 10 si M_{ss} es 100 g e igual a 1 si la misma es 1000 g)

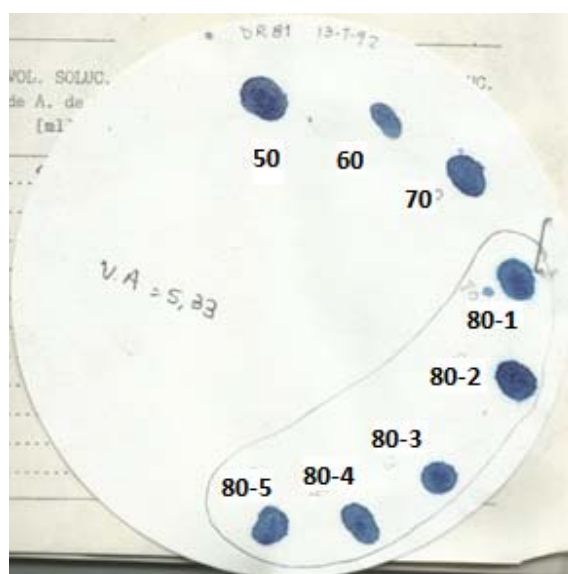


Figura 4.9: Ejemplo de ensayo de azul de metileno.

Cuando obtenemos un valor alto de Azul de Metileno indica que el árido fino es muy reactivo. Con el mismo se puede medir la superficie de la fracción arcillosa activa que depende de la naturaleza de los minerales presentes, determinada por la siguiente expresión:

$$S_e = \frac{1}{319,87 \frac{gr}{mol}} \cdot \frac{W_{s(AM)}}{V_{(AM)sol}} \cdot (N \cdot 0,5ml) \cdot N_{Av} \cdot A_{AM} \cdot \frac{1}{W_{s(Arcilla)}} \quad (4.2)$$

- S_e : Superficie específica de la fracción arcillosa.
- $W_{s(AM)}$: Masa del azul de metileno colocado en la suspensión [g].
- $V_{(AM)sol}$: Volumen total utilizado en la solución [ml].
- N : Número de veces que se agregaron 0,5ml de la solución patrón con azul de metileno.
- N_{Av} : Número de Avogadro ($6,023 \cdot 10^{23}$ partículas/mol).
- A_{AM} : Área cubierta por un catión de azul de metileno (generalmente se considera 130 \AA^2).
- $W_{s(Arcilla)}$: Masa seca de la arcilla en gramos que se utilizó en el ensayo [g].

Se presenta en la *Figura 4.10*, resultados obtenidos de ensayos de distintas arcillas presentado en *BULLETIN DE LIAISON DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES – ESSAI AU BLEU DE MÉTHYLÈNE* [13], en el cual se grafican valores del azul de metileno en función del contenido de arcilla de la muestra estudiada. Puede observarse, la diferencia entre las Montmorillonitas y, las Caolinitas e Illitas, lo que hace referencia a la gran superficie específica existente en las primeras, dado que el valor del azul de metileno está directamente relacionado a esta característica.

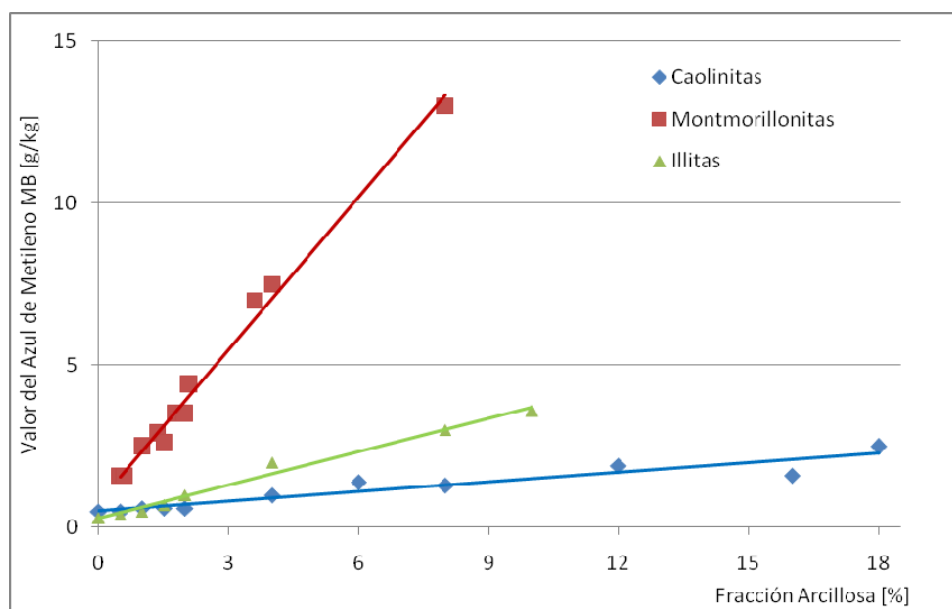


Figura 4.10: Resultados del Ensayo Equivalente de Arena. [13]

- **Ejemplo:**

Datos: V_s : 80 ml, P_{ss} : 15 g, C : 10 g/l, W_s : 1 g (ver Figura 4.9)

Para masa de suelo seco 100g:

$$V_a = \frac{V_s \times C}{P_{ss}} \cdot \frac{1}{f} = \frac{80 \text{ ml} \times 10 \frac{\text{g}}{\text{l}}}{15 \text{ g}} \cdot \frac{1}{10} = 5,33 \frac{\text{g}}{100 \text{ g}}$$

$$S_e = \frac{1}{319,87 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{1 \text{ g}}{80 \text{ ml}} \cdot (160 \cdot 0,5 \text{ ml}) \cdot 6,023 \times 10^{23} \frac{\text{part}}{\text{mol}} \cdot 1,3 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \frac{1}{15 \text{ g}}$$

$$S_e = 163,2 \frac{\text{m}^2}{\text{g}}$$

4.1.3. SENSITIVIDAD

El término sensibilidad se refiere al efecto que el amasado produce sobre la consistencia de las arcillas inalteradas. El grado de sensibilidad (S_t) es diferente para las distintas arcillas y puede también diferir en una misma arcilla según cuál sea su contenido de humedad. Se mide por la relación entre la resistencia de una muestra inalterada y la resistencia de una muestra remoldeada.

$$S_t = \frac{R_I}{R_R} \quad (4.3)$$

Donde:

- S_t : Grado de sensibilidad.
- R_I : Resistencia de una muestra de arcilla inalterada.
- R_R : Resistencia de una muestra de arcilla remoldeada.

En función de los resultados obtenidos, la arcilla en estudio puede ser clasificada de la siguiente manera:

< 2	Insensitiva
2 – 4	Medianamente Sensitiva
4 – 8	Sensitiva
8 – 16	Muy Sensitiva

La **tixotropía** es el fenómeno que consiste en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación en el tiempo. Las arcillas tixotrópicas al amasarlas se convierten en un verdadero líquido. Si a continuación se las deja en reposo, recuperan cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que esto ocurra el contenido de agua debe ser del orden de su límite plástico.

4.1.4. ARCILLAS EXPANSIVAS

Los suelos expansivos son aquellos que parcial o totalmente saturados aumentan significativamente su volumen cuando aumenta su contenido de humedad, a carga constante. Este término implica también la disminución de volumen o contracción si la humedad se pierde, pero debe tener presente que la contracción es simplemente el proceso inverso a la expansión. Los materiales arcillosos que son susceptibles de sufrir hinchamiento, permitiendo una gran incorporación de agua, son principalmente los pertenecientes al grupo de las esmectitas (*Tabla 4.3*). Esto se debe al tipo de enlace débil presente entre las láminas de su estructura. Además, cuando el catión interlaminar es el Na, las esmectitas tienen gran capacidad de expansión, pudiendo llegar a producirse la completa disociación o separación de las láminas, teniendo un máximo desarrollo de propiedades coloidales, dando lugar a propiedades especiales (lodos estabilizadores tixotrópicos o bentonitas). Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

Grupo de las Esmectitas (arcillas expansivas más representativas)		
montmorillonita $((\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	nontronita $(\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	saponita $((\text{Ca}/2, \text{Na})_{0.3}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$

Tabla 4.3: Grupo de las esmectitas. ^[12]

El mecanismo de expansión es la absorción de agua por ósmosis (*Figura 4.11*).

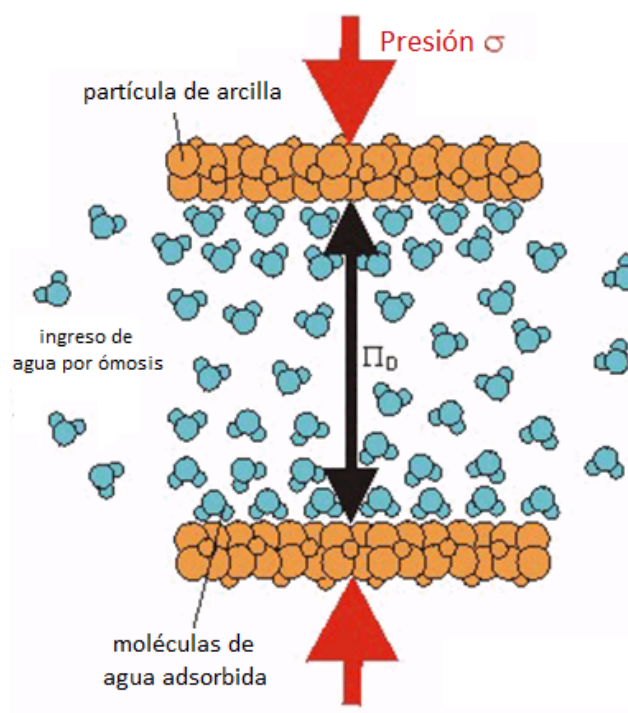


Figura 4.11: Absorción de agua por ósmosis. [10]

En función de los cambios de contenido de humedad se dan diferentes estados físicos, siendo los límites para cada estado de consistencia los Límites de Atterberg: límite líquido, límite plástico y límite de contracción o retracción, que son el punto de partida para la estimación de la expansividad de un suelo. En general, el grado de expansividad se puede determinar en función de las propiedades geotécnicas de los suelos, un ejemplo es la *Tabla 4.4*.

Expansividad	Límite de retracción	Índice de plasticidad	Límite líquido	Contenido en finos	Hinchamiento en superficie [cm]	Presión de hinchamiento [KPa]
Baja	> 15	< 15	< 30	< 30	0 – 1	< 50
Media	11 – 15	15 – 30	30 – 45	30 – 60	1 – 2	50 – 12
Alta	< 11	> 30	> 45	> 60	2 – 3	> 12

Tabla 4.4: Grado de expansividad en función de distintas propiedades geotécnicas. [14]

Por lo tanto, para la determinación de la expansividad de un suelo los ensayos a realizar son:

- **Granulometría, Límites de Atterberg y Humedad natural:** solo son valores indicativos del comportamiento.
- **Hinchamiento Libre:** (Retomado de UNE 103 601/96 / Expansión Libre-Retomado de ensayo de Presión de hinchamiento ASTM D-4546). Mide el potencial de hinchamiento que experimenta una muestra parcialmente saturada por hidratación, bajo una sobrecarga de 1 KPa, a la cual sólo se le permite la expansión vertical dado que se previamente fue confinada (el confinamiento impide deformaciones horizontales).
- **Presión de hinchamiento en edómetro:** (Retomado de UNE 103 602/96 / Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro ASTM D-4546) Se añaden cargas para no permitir el hinchamiento de la muestra. La presión máxima aplicada, se conoce como presión de hinchamiento. Una vez alcanzada, se van quitando cargas y se miden los hinchamientos que se producen.

Otro ensayo muy usado en la caracterización mecánica de suelos para pavimentos es la **Prueba de VSR (Valor Soporte Relativo) o CBR (California Bearing Ratio):** (Según norma VN - E6 – 84) Se mide el hinchamiento durante 96hs bajo una sobrecarga de diseño para pavimentos. Se efectúa un ensayo de penetración bajo un pistón normalizado hasta alcanzar los 12,7 mm de recorrido.

Un parámetro que resulta importante para caracterizar la expansividad es el **índice de actividad** (*Figura 4.12*). Este índice mide la actividad eléctrica de la arcilla, en forma indirecta, a través de la siguiente expresión:

$$A = \frac{IP}{\% < 2\mu} \quad (4.4)$$

Donde:

- **A**: Índice de actividad (eléctrica) de la arcilla
- **IP**: Índice de plasticidad
- $\% < 2\mu$: Porcentaje de partículas menores 2μ

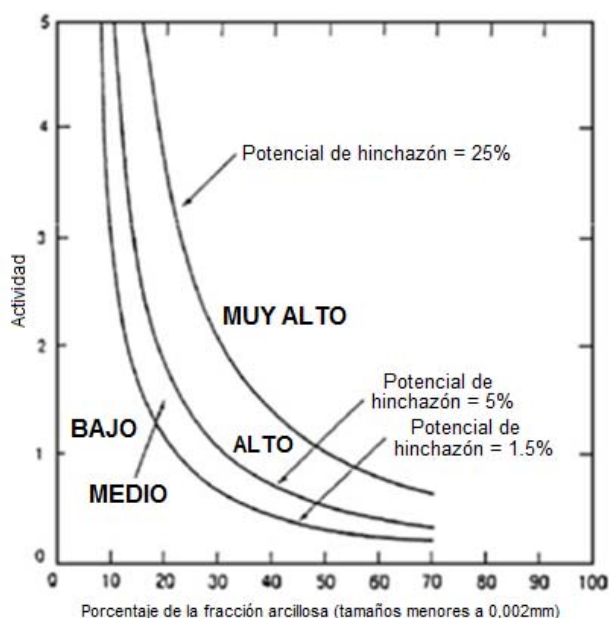


Figura 4.12: Grados de actividad eléctrica de la arcilla. [15]

Los daños causados por la expansión o retracción de arcillas expansivas son muy variados y pueden ocasionar desde grietas, fisuración y rotura de elementos estructurales, rotura de cimientos y conducciones o deformación en pavimento. La gravedad de los mismos dependerá del potencial expansivo del suelo y las características estructurales de la obra, pudiendo ocasionarse daños irreversibles. En la *Figura 4.13* se muestran algunos ejemplos.



Figura 4.13: Daños en edificios (izquierda) [14] y pavimentos (derecha) por arcillas expansivas.

[16]

Para atenuar los efectos adversos que pudiesen producirse, deben seguirse una serie de medidas durante el proyecto y en la ejecución de la obra, las cuales pueden ser combinadas para obtener mejores resultados en función de cada caso particular. Algunas de ellas son:

- Profundidad de apoyo: La cimentación propuesta deberá apoyar a una profundidad suficiente sobre las zonas del sustrato menos expuestas a los cambios de humedad y oscilaciones del nivel freático.
- Cargas: Las cargas transmitidas por la cimentación al sustrato deberán compensarse con la tensión máxima admisible del suelo, asentamientos y la presión de hinchamiento, sin que esta última supere la tensión de trabajo de los cimientos.
- Sistema de cimentación: El cemento utilizado deberá estar perfectamente arriostrado en dos direcciones, con vigas armadas. Tanto la cimentación como las vigas riostras deben separarse del terreno en todas sus caras por una capa que amortigüe los posibles empujes del suelo sobre las mismas.
- Drenaje: Sistemas de drenaje perimetral efectivos, con sistemas que eviten la colmatación de los mismos y permitan la correcta evacuación de aguas superficiales.
- Ejecución: Debe evitarse la exposición prolongada del sustrato de apoyo a la acción de la naturaleza, excavándose y hormigonándose en el menor tiempo posible. [14]

4.2. LIMOS

Los limos son sedimentos clásticos transportados en suspensión por los ríos o el viento, o bien resultantes de procesos de glaciación. Son suelos no cohesivos cuyas partículas de forma redondeada (*Figura 4.14*), y el diámetro de las mismas varía entre 0,060mm y 0,002mm. Al no tener cohesión, es un terreno problemático para edificar sobre él, por lo que deben adoptarse sistemas especiales de cimentación.

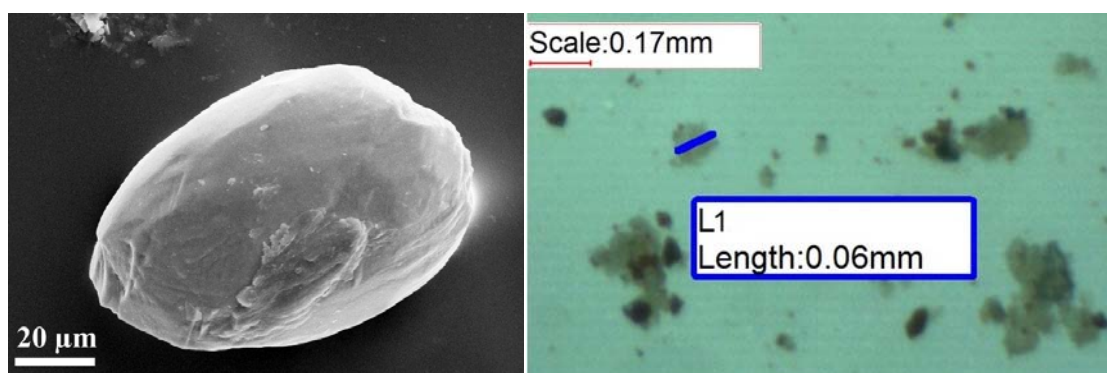


Figura 4.14 Partícula de limo redondeada por acción eólica tomada por microscopio electrónico (izquierda) [17] y fracción de suelo limoso que pasa por el Tamiz #200 tomadas con lupa electrónica, pudiéndose observar el aglutinamiento de ciertas partículas (derecha).

Entonces, teniendo en cuenta las propiedades ya descriptas de las arcillas, se puede establecer un cuadro comparativo contemplando las principales diferencias entre los dos tipos de suelo en cuestión (Tabla 4.5).

Limos (entre 0,002 y 0,060 mm.)	Arcillas (<0,002 mm.)
No suelen tener propiedades coloidales	Suelen tener propiedades coloidales
A partir de 0,002 mm y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de minerales no arcillosos	Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos
Partículas de forma redondeada	Partículas de forma laminar
Tacto áspero	Tacto suave
Mayor permeabilidad: $10^{-5} > k > 10^{-7} \text{ cm/seg}$	Menor permeabilidad: $k < 10^{-6} \text{ cm/seg}$
Predominan las características de masa	Predominan las características de superficie
Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos	Se secan lentamente y se pegan a los dedos
Pueden ser colapsables	No son colapsables
No son expansivos	Pueden ser expansivos

Tabla 4.5: Diferencias entre limos y arcillas. [18]

5. LOESS

Son suelos predominantemente limosos formados por acción eólica, es decir, por la deposición de partículas con tamaños entre los 10 a los 50 micrómetros, (loess primario) que pueden ser retransportados y redepositados por otros medios (loess secundario o loessoides) (Figura 5.1). Generalmente presenta un color amarillento y carece de estratificación. Está formado principalmente por silicatos (cuarzo, feldespato), carbonato de calcio, finísimos detritos orgánicos y minerales del grupo de las arcillas.

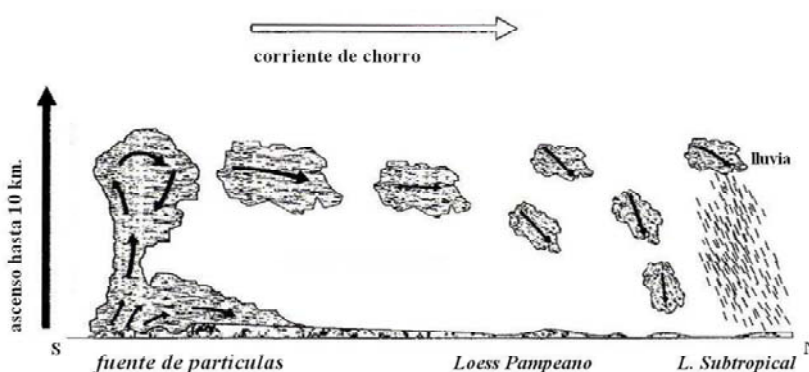


Figura 5.1: Deposición y transporte por acción eólica del Loess Pampeano. [19]

Los suelos loessicos de Argentina constituyen el principal depósito de su tipo en Sudamérica, cubriendo más de 600.000 km² de superficie, y distribuidos en función de los vientos predominantes de la región (Figura 5.2).

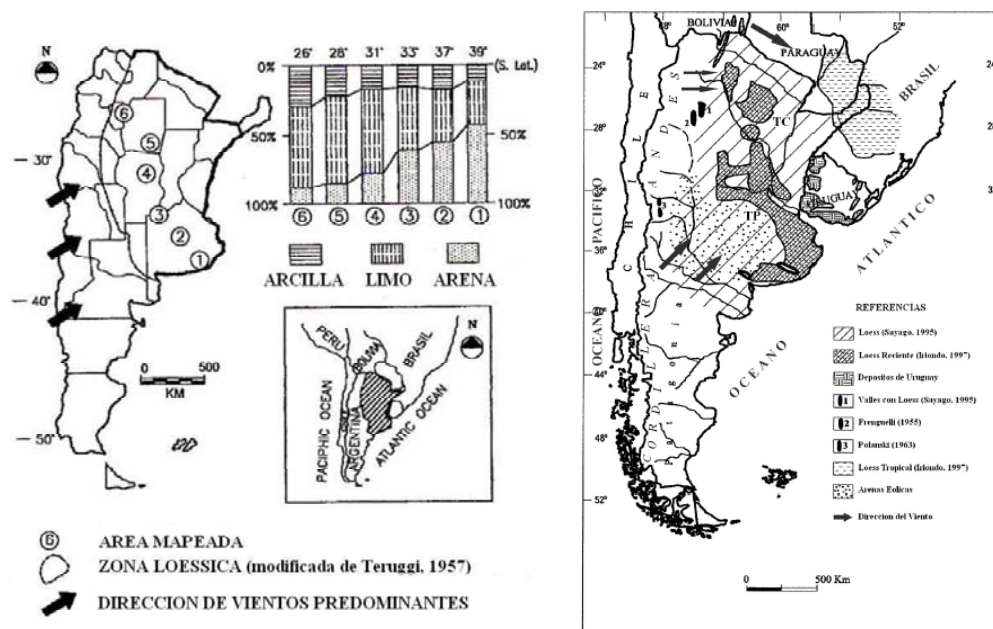


Figura 5.2: Distribución y composición de loess en Argentina. [19]

En primera instancia se debe diferenciar si los depósitos corresponden a loess primario o si han sufrido procesos que han alterado su estructura metaestable, ya que en función de ello cambiarán sus propiedades y comportamiento. A medida que los mismos son más antiguos, son más estables, siendo un problema menor para las obras.

El agua tiene un rol muy importante en la formación y comportamiento posterior del loess primario. Con la disminución del contenido de humedad, las partículas finas se desplazan hacia el menisco, la concentración iónica en los fluidos de los poros se incrementa, el espesor de la doble capa disminuye y las fuerzas de atracción de Van der Waals prevalecen sobre las fuerzas de repulsión de la doble capa. Cuando las fuerzas de atracción interpartículas dominan, las partículas arcillosas floculan formando puentes de arcilla y contrafuertes en los contactos entre granos de arena y limo. Una mayor reducción del contenido de humedad, hace que los cationes hidratados de la doble capa se deshidratan y se vinculen iónicamente a las partículas arcillosas contiguas. Mientras tanto, la concentración de sales alcanza la saturación y las sales precipitan como cristales que robustecen la estructura del suelo. El aumento contemporáneo de la succión aumenta también la resistencia, que es más efectiva entre partículas arcillosas, que en los meniscos entre partículas gruesas. El efecto combinado de estos procesos confiere a los loess alta resistencia cohesiva que permite cortes verticales y la aptitud para soportar cargas importantes.

El incremento del contenido de humedad revierte los procesos: las sales solubles se hidratan y debilitan, y la concentración iónica en el fluido continúa decreciendo con el incremento de la humedad. Esta disminución incrementa la doble capa formada alrededor de las partículas. La rigidez al corte y la resistencia de las formaciones arcillosas decrece a medida que se incrementa la capa hidratada. Las fuerzas de repulsión se vuelven dominantes y las partículas arcillosas se dispersan. También, la succión gradualmente disminuye a medida que se incrementa el grado de saturación. Eventualmente, la estructura se debilita y colapsa aún sin alcanzar la saturación. Muy poca carga externa se requiere para alcanzar el colapso final, y a veces el propio peso de la masa del suelo es suficiente. Los loess no colapsan cuando son permeados por fluidos no polarizados. Esto señala la importancia de las arcillas y las sales de hidratación en el comportamiento metaestable. La resistencia, la rigidez y el grado de colapso están condicionados por la relación de vacíos inicial y el contenido de humedad del suelo. Otros parámetros relevantes son la composición química del fluido saturante, la cantidad de sales solubles, la cantidad de agentes cementantes no solubles, la profundidad y el nivel de cargas externas. [19]

Por medio de ensayos edométricos, se observa un quiebre en la curva de compresibilidad en condición saturada a partir del cual se producen cambios significativos en los vínculos de la estructura del suelo, el cual presenta mayores deformaciones. La presión a la cual se produce este cambio de comportamiento se la denomina **presión inicial de colapso** o **presión de fluencia saturada** ($\sigma_{F.SAT}$). En la *Figura 5.3* se presenta la gráfica Presión vs Deformaciones de un ensayo edométrico o de compresión confinada en el que se observa el método gráfico para obtener el valor de la presión de fluencia saturada.

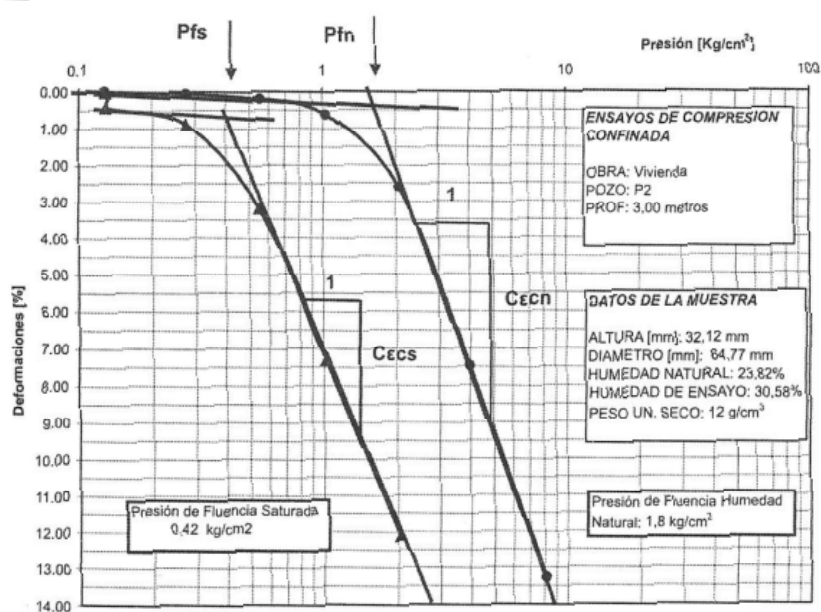


Figura 5.3: Ejemplo de ensayo edométrico de compresión confinada. Obtención de $\sigma_{F.SAT}$. [20]

La relación entre la presión de fluencia saturada, que es una propiedad del suelo, y el estado de tensiones in-situ (σ_0), conducen a la división en dos tipos de suelos:

- **Loess potencialmente colapsables:** cuando la presión de tapada es menor que la presión de fluencia luego de humedecimiento, $\sigma_0 < \sigma_{F.SAT}$. La estabilidad dependerá de la magnitud de una carga externa al suelo.
- **Loess autocolapsables:** cuando la presión de tapada es mayor que la presión de fluencia saturada. $\sigma_0 > \sigma_{F.SAT}$. En este caso la masa de suelo colapsará espontáneamente sin la necesidad de una carga exterior.

Cuando se grafican estas relaciones en profundidad, se generan los perfiles de colapsabilidad, en los que se compara la tensión in-situ ($\sigma_0 + \Delta\sigma$), con la presión de fluencia saturada ($\sigma_{F.SAT}$). Durante un proceso de incremento de humedad, se producirán asentamientos por colapso, en aquellos sectores en donde la presión actuante sea mayor que la presión de fluencia (Figura 5.4).

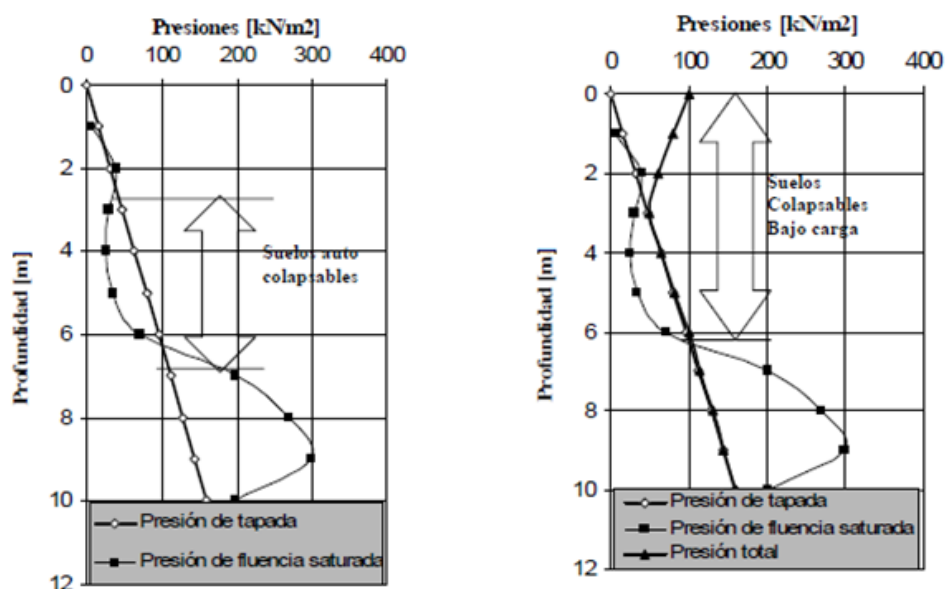


Figura 5.4: Perfiles de colapsabilidad a) Presiones de tapada b) Presiones de tapada + Incremento de presión. [19]

Para caracterizar los suelos loessicos se puede recurrir a ensayos de campo o de laboratorio, siendo esta última la más adecuada. Los ensayos in-situ tradicionales como el SPT tienen serias limitaciones, ya que la resistencia y la rigidez de los loess primarios dependen fuertemente del contenido de humedad a la que se realiza el ensayo, y no puede medir o evaluar la principal característica geotécnica de estos suelos. Asimismo, la estructura desmoronable del suelo se puede compactar dentro del sacamuestras, lo cual produce un incremento artificial de resistencia. Existen una serie de ensayos in-situ específicos para determinar la colapsabilidad pero en general se los reserva para casos en donde no es posible conservar la estructura de la muestra para ensayarlo en laboratorio.

El ensayo clásico, lo constituye el ensayo doble edométrico, realizado sobre muestras gemelas en condiciones de humedad natural y saturada. (Figuras 5.5). En la práctica en Argentina se utiliza principalmente el ensayo edométrico en una sola probeta, realizado en estado saturado. Para valores menores a la presión de fluencia saturada, el suelo tiene un comportamiento elástico, con baja deformabilidad y magnitudes pequeñas del colapso relativo. En cambio, para valores mayores a la presión de fluencia saturada el suelo tiene un comportamiento elasto – plástico y la magnitud del colapso relativo es alta.

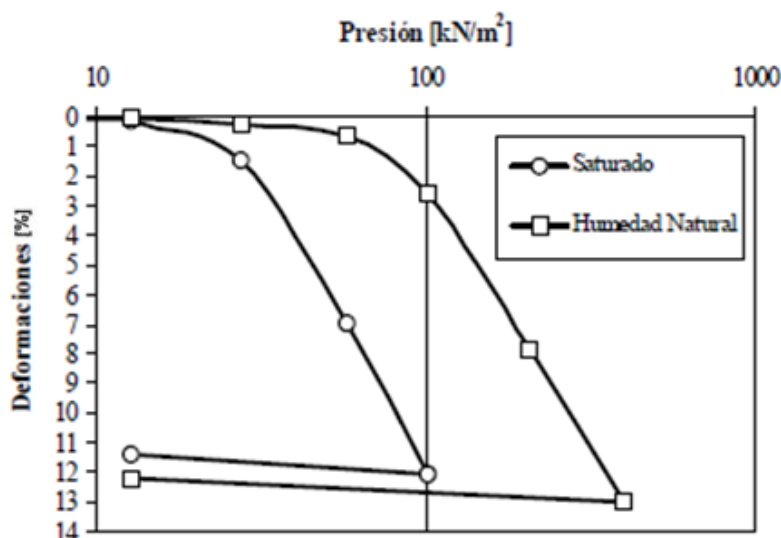


Figura 5.5: Ensayo doble edométrico a humedad natural y saturado. [19]

Por último, en cuanto al desempeño del suelo para efectos de diseño y construcción los depósitos recientes de loess son aquellos que presentan mayores inconvenientes. Las fundaciones directas de obras de arquitectura no tienen un comportamiento satisfactorio cuando se las realiza sobre ellos. Eventualmente, pueden seguirse diversos caminos si esta fuese la única solución constructiva:

- Disminuir las posibilidades de colapso mediante el cambio o mejoramiento de las características intrínsecas de los suelos. Se logra por disminución de la porosidad (compactación hidráulica, dinámica, por voladuras, por hincas de pilotes, etc.), o el refuerzo de los vínculos entre partículas (silicatización, cocción, jet grouting, etc.).
- Minimizar las condiciones que favorecen el colapso de los suelos. Para ello se pueden adoptar medidas que impidan el humedecimiento del suelo (revestimiento de cañerías enterradas, veredas perimetrales, correcto diseño de desagües pluviales, etc.) o bien disminuir la presión actuante sobre el terreno.
- Mitigar los efectos del colapso en las estructuras fundadas en estos suelos. Ello implica la adopción de medidas estructurales o disminuir la carga del suelo mediante aliviamientos por excavación.

6. DIFERENCIAS ENTRE SUELOS EXPANSIVOS Y SUELOS COLAPSABLES

Seguidamente, se muestra un cuadro comparativo (*Tabla 6.1*) en el que se contrastan las principales características entre los suelos expansivos y los colapsables que permiten diferenciarlos, ya que muchas veces, la manifestación exterior puede ser similar a través de un asentamiento o reducción del volumen.

TIPO DE SUELOS	VARIACIÓN DE VOLUMEN FRENTE A CAMBIOS DE HUMEDAD	LÍMITE LÍQUIDO	HUMEDAD SUELO SATURADO (w_{SAT})
EXPANSIVOS	$\downarrow \omega \rightarrow \downarrow Volumen$	> 50%	$\ll LL$
COLAPSABLES	$\uparrow \omega \rightarrow \downarrow Volumen$	<35%	$\cong LL$

Tabla 6.1: Diferencias entre suelos expansivos. [15]

Además, como características comunes de los suelos colapsables se destacan:

- **Estructura macroporosa** con relación de vacíos (e) relativamente alta o muy alta.
- **Granulometría predominantemente fina** con tamaño de granos poco distribuido y con los granos más grandes escasamente erosionados.
- **Estructura mal acomodada**, con partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos, y unidas entre sí por acumulaciones o "puentes" de material predominantemente arcilloso.

En cuanto al escenario para que ocurra el colapso se establecen las siguientes condiciones generales para que el mismo ocurra:

- La estructura del suelo deberá tener las características citadas, de modo tal que se tienda a la ocurrencia de dicho fenómeno.
- Las partículas estarán unidas entre sí por fuerzas o materiales cementantes que son susceptibles, pudiendo ser anulados o reducidos cuando aumenta el contenido de humedad del suelo.
- Cuando este soporte es reducido o anulado, las partículas del suelo deslizan o ruedan, por una pérdida de la resistencia al corte. [21]

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fundamentos de ingeniería geotécnica. Braja M. Das. Capítulos 1 y 2. (2001)
- [2] Propiedades Físicas de los Suelos: Capítulo 1 – Formación de los Suelos. Prof. Ing. Augusto José Leoni. (2005)
- [3] <https://natureduca.com/ecologia-general-el-suelo-formacion.php>
- [4] Tipos de suelos: Arcillas. Ing. Silvia Angelone. F.C.E.I.A. - U.N.R. (2014)

- <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/>
- [5] Manual de carreteras. Tomo 2. España. Luis Bañón Blázquez, José F. Beviá García. Alicante: Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A. Capítulo 15 (Suelos). (2000)
 - [6] Clasificación de suelos y propiedades índice. Alejo O. Sfriso, Ernesto Strina, Mauro Codevilla. U.B.A
 - [7] ARCILLAS. http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_tecic/211/algloki/pdfs/ARCILLAS.pdf
 - [8] Illita. Colección educ.ar. Liliana Amalia Soave (2008)
<http://coleccion.educ.ar/coleccion/CD23/contenidos/familia/index3.html>
 - [9] ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS. Emilia García Romero. Universidad Complutense (Madrid), Mercedes Suárez Barrios. Universidad de Salamanca. (2012)
 - [10] COMPOSICIÓN DE LOS SUELOS Y SEDIMENTOS. Cristina de Santiago Buey. Laboratorio de Geotecnia (CEDEX).
 - [11] Influencia de la succión matricial en el cambio de volumen de un suelo proveniente de un depósito aluvial del Valle de Aburrá. Victoria Elena Meza Ochoa, Fabián Hoyos Patiño. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. (2012)
 - [12] CARACTERIZACIÓN DE ARIDOS FINOS Y MINERALES ARCILLOSOS CON EL EMPLEO DEL AZUL DE METILENO COMO HERRAMIENTA PARA LA CLASIFICACIÓN. Rafael Jiménez Chappotin, Rayda Crespo Castillo. (2013)
 - [13] ESSAI AU BLEU DE MÉTHYLÈNE. Bulletin De Liaison Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussees (1990)
 - [14] Patologías por arcillas expansivas. ASEFA. <http://www.asefa.es/>
 - [15] SUELOS EXPANSIVOS – SUELOS COLAPSABLES – SUELOS CRIÓTICOS. Alejo O. Sfriso, Ernesto Strina, Mauro Codevilla. U.B.A
 - [16] <http://estabilizadora.com/solucion.html>
 - [17] <http://mysteryplanet.com.ar/site/prehumanos-en-los-balcanes-hace-7-millones-de-anos/>
 - [18] Geotecnia y Cimientos I (2da Edición): Diferencias entre limos y arcillas. J. A. Jiménez Salas y J. L. de Justo Alpañes. (1975)
 - [19] CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS LOESS EN ARGENTINA. Ricardo J. Rocca, Emilio R. Redolfi y Roberto E. Terzariol. (2006)
 - [20] MÉTODO SIMPLIFICADO PARA EL CÁLCULO DEL ASENTAMIENTO POR COLAPSO EN SUELOS LOÉSSICOS DE CÓRDOBA. Ricardo José Rocca. U.N.C. (2005)
 - [21] SUELOS COLAPSABLES. Dr. Ing. Emilio R. Redolfi. U.N.C. (2007)

8. AGRADECIMIENTO

Agradecimiento especial al Lic. Héctor Fraga por su colaboración en la confección del presente apunte.