



COMPORTAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS

1.1. INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

Los suelos parcialmente saturados (presiones negativas del agua intersticial) que han recibido mayor atención por los investigadores debido a los daños y pérdidas económicas que ocasionan, son las "arcillas expansivas" (Fredlund & Rahardjo, 1993). Estructuras ligeras tales como: autopistas, aeropistas, viviendas, edificios pequeños, etc. a menudo sufren daños severos posteriores a su construcción como resultado de cambios ambientales tales como: remoción de árboles, raíces, cambios del contenido de agua del suelo, ocasionado por el riego excesivo de árboles, pastos, fugas, infiltración de agua de lluvia, etc. (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Las principales partes del planeta con mayores porciones de suelos arcillosos expansivos son aquellas regiones áridas y semiáridas y aquellas de clima tropical con alternancia de estaciones secas y húmedas. La zona de suelo que sufre cambios de volumen como consecuencia de la variación de humedad se llama "zona activa"; entre mayor sean las propiedades de expansión del suelo de dicha zona, mayor será la cantidad de expansión que sufra la estructura. Usualmente se obtienen muestras inalteradas del suelo para someterlas a pruebas de laboratorio que permitan hacer estimaciones cuantitativas del potencial de expansión del suelo y se aplican criterios basados en propiedades índice para estimar el posible carácter expansivo de los suelos (Fredlund & Rahardjo, 1993; Juárez & Rico, 1992).

Es bien sabido que el comportamiento macrofísico de las arcillas expansivas se debe a la interacción de las superficies de las partículas sólidas con los constituyentes iónicos y moleculares del agua presente en los vacíos del suelo. Debido a la naturaleza molecular de dicha interacción, se hace necesario entender la estructura molecular de las superficies de las partículas.

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica acerca de la físico – química de las arcillas, así como los estudios y trabajos que se han realizado para entender el comportamiento de las arcillas expansivas.

I.2. ORIGEN Y FORMACIÓN DE LOS SUELOS

I.2.1. AGENTES GENERADORES DE SUELOS

Todos los suelos tienen su origen directa o indirectamente de las rocas sólidas, que se clasifican de acuerdo con su proceso de formación en (Whitlow, 1993): a) rocas ígneas; b) rocas sedimentarias y c) rocas metamórficas. Las rocas ígneas se forman por el enfriamiento de material fundido (magma) dentro o sobre la superficie de la corteza terrestre. Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos en cuerpos de agua, como mares y lagos y las rocas metamórficas son las que se forman por la modificación de rocas ya existentes a causa de calor extremo o presiones muy altas.

La corteza terrestre constantemente es atacada en varias formas principalmente por el aire y el agua. Todos los mecanismos de ataque de las rocas pueden incluirse en dos grandes grupos: a) intemperismo mecánico y b) intemperismo químico.

Intemperismo mecánico. El intemperismo mecánico se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos tales como: a) cambios periódicos de temperatura; b) acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas (que actúa como cuña) y c) efectos de organismos vivos (plantas y animales). Por estos fenómenos las rocas llegan a formar arenas o cuando mucho, limos y sólo en casos especiales arcillas (Juárez & Rico, 1992).

Intemperismo químico. El intemperismo químico se refiere a la acción de agentes que atacan las rocas modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es desde luego el agua y los mecanismos de ataque más importantes son: a) la oxidación; b) la hidratación y c) la carbonatación. Los efectos químicos de la vegetación juegan un papel no despreciable. Estos mecanismos generalmente producen arcilla como último producto de descomposición. Todos los efectos anteriores suelen acentuarse con los cambios de temperatura, por lo cual es frecuente encontrar formaciones arcillosas de importancia en zonas húmedas y cálidas, mientras que son típicas de zonas más frías formaciones arenosas o limosas, más gruesas. En los desiertos cálidos la falta de agua hace que los fenómenos de descomposición no se desarrollen, por lo cual la arena predomina en esas zonas; allí los efectos de ciclos de tensión y compresión sobre las rocas, producidos por elevaciones y descensos periódicos y continuas de temperatura, son los mecanismos de ataque determinantes (Juárez & Rico, 1992). No debe creerse que las reglas anteriores siempre se cumplen, la naturaleza suele actuar con una complejidad que desafía cualquier regulación. Los suelos deben su origen a una tal variedad de causas que excede todo poder de descripción detallada (Juárez & Rico, 1992).

I.2.2. TIPOS DE SUELOS

El término "suelo" ha sido definido de diferentes maneras, dependiendo del área de conocimiento de que se trate; a continuación, se exponen algunas de tales definiciones:

Los agrónomos (*Juárez & Rico, 1992*) definen al suelo como la delgada parte superior del manto de roca en que penetran las raíces de las plantas y de donde éstas toman el agua y las demás sustancias necesarias para su existencia.

Los geólogos definen al suelo como todo material intemperizado en el lugar en que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie (*Juárez & Rico, 1992*).

Algunos ingenieros civiles (*Rico, Del Castillo, 1984*) definen al suelo como el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes.

Según *Alfred R. Jumikis*, el suelo es un conjunto de sedimentos no consolidados y depósitos de partículas sólidas derivadas de la desintegración de las rocas (*Crespo, 1995*).

Tierra o suelo se define en ingeniería como cualquier material no consolidado compuesto de distintas partículas sólidas con gases o líquidos incluidos (*Sowers et al., 1990*).

Juárez y Rico, (1992) definen al suelo como todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidas de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablandan o desintegran rápidamente por acción de la intemperie. El agua contenida juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo.

Como se expuso en los párrafos anteriores, la concepción de suelo depende del área que lo estudie; asimismo, su clasificación también depende del objetivo o de la referencia que se considere. Por ejemplo, si los productos del intemperismo son o no alejados del sitio de intemperización, los suelos se clasifican en: a) residuales y b) transportados. Si la estructura de los suelos cambia con variaciones en su contenido de agua, los suelos pueden clasificarse en a) estables y b) no estables; estos últimos a su vez se pueden subdividir en suelos colapsables y expansivos. A continuación se definen brevemente cada uno de los tipos de suelo mencionados anteriormente.

Suelos residuales. Los productos del ataque de los agentes de intemperismo pueden quedar en el lugar, directamente sobre la roca de la cual se derivan, dando así origen a suelos llamados residuales (*Juárez & Rico, 1992*). Estos suelos aparecen particularmente cuando los procesos químicos del intemperismo predominan sobre los físicos, lo que sucede en los terrenos llanos de las áreas tropicales (*Whitlow, 1993*).

Suelos transportados. Los suelos residuales pueden ser removidos del lugar de formación, por los mismos agentes geológicos y redepositados en otra zona. Así se generan suelos que sobreyacen sobre otros estratos sin relación directa con ellos; a estos suelos se les denomina transportados. Existen en la naturaleza numerosos agentes de transporte, de los cuales pueden citarse como principales: a) los glaciales; b) el viento; c) los ríos; d) corrientes de agua superficial; e) los mares y f) las fuerzas de gravedad; estos factores actúan a menudo combinándose (*Juárez & Rico, 1992*).

Suelos colapsables. Muchos suelos colapsables se originan por flujo de lodo o depósitos eólicos que son sedimentos depositados casi siempre en climas áridos o semiáridos como los desiertos, pero los climas secos no son necesarios para la existencia de suelos colapsables. Un suelo colapsable con el contenido natural de agua puede soportar la carga que le transmite una estructura dada con un asentamiento insignificante, pero cuando este suelo incrementa su contenido de agua, su volumen puede disminuir rápida y significativamente causando asentamientos considerables a la cimentación, aun al aplicar esfuerzos o sobrepresiones relativamente pequeñas. La magnitud del asentamiento depende de: a) la relación de vacíos inicial; b) la historia de esfuerzos del suelo; c) el espesor del suelo colapsable y d) la magnitud de las presiones aplicadas por la cimentación. El colapso puede iniciarse debajo del nivel de terreno natural y prolongarse hasta la superficie llevando al asentamiento repentino y no uniforme de las capas superiores. Los suelos típicos colapsables son de colores claros, de plasticidad baja con límite líquido menor a 0.45 kg kg^{-1} e índices de plasticidad menores a 0.25 kg kg^{-1} y gravedades específicas relativamente pequeñas entre 1.04 y 1.68 (60 a 40 % de porosidad). El colapso raramente ocurre en suelos con porosidad menores a 40 % (*Lizardi, 1997*).

Suelos expansivos. Algunos suelos no solamente se retraen cuando se secan, sino que también se expanden cuando se incrementa su contenido de agua. El mecanismo es causado por diferentes fenómenos (*Sowers et al., 1990*): a) la recuperación elástica de los granos del suelo; b) la atracción del agua por los minerales arcillosos; c) la repulsión eléctrica de las partículas de arcilla y de sus cationes adsorbidos de unos a otros y d) la expansión del aire atrapado en los poros del suelo.

Se pueden desarrollar grandes presiones si el agua puede llegar al suelo y se impide la expansión por confinamiento. Si la causa es precompresión, la presión de expansión puede llegar a ser tan grande como la carga de preconsolidación. Si la adsorción y la repulsión son las causas predominantes, como en las arcillas de la familia de la montmorillonita, se pueden desarrollar presiones de varios kilogramos por centímetro cuadrado (*Sowers et al., 1990*).

1.3. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURACIÓN DE LAS ARCILLAS

Los minerales arcillosos son complejos silicatos de aluminio, magnesio e hierro. Las dos unidades básicas para la formación de los cristales de arcilla son: a) un tetraedro de silicio – oxígeno y b) un octaedro de aluminio o magnesio. Una unidad tetraédrica (figura 1.1a) consiste de cuatro átomos de oxígeno alrededor de un átomo de silicio. Varias unidades tetraédricas combinadas entre sí, forman una lámina de sílice (figura 1.1b) note que los tres átomos de oxígeno localizados en la base del tetraedro están compartidos con un tetraedro vecino. Cada átomo de silicio (Si^{+4}) está unido a cuatro átomos de oxígeno (O^{-2}); esto permite que un átomo de oxígeno de cada tetraedro cargado con una valencia negativa pueda ser compensada. La figura 1.2a muestra una unidad octaédrica, consistente de seis unidades de hidroxilo rodeando a un átomo de aluminio o magnesio. La combinación de unidades octaédricas de aluminio forma una lámina de gibsita (figura 1.2b.). Si el principal átomo metálico en la unidad octaédrica es el magnesio, estas láminas son de brucita (Das, 1983).

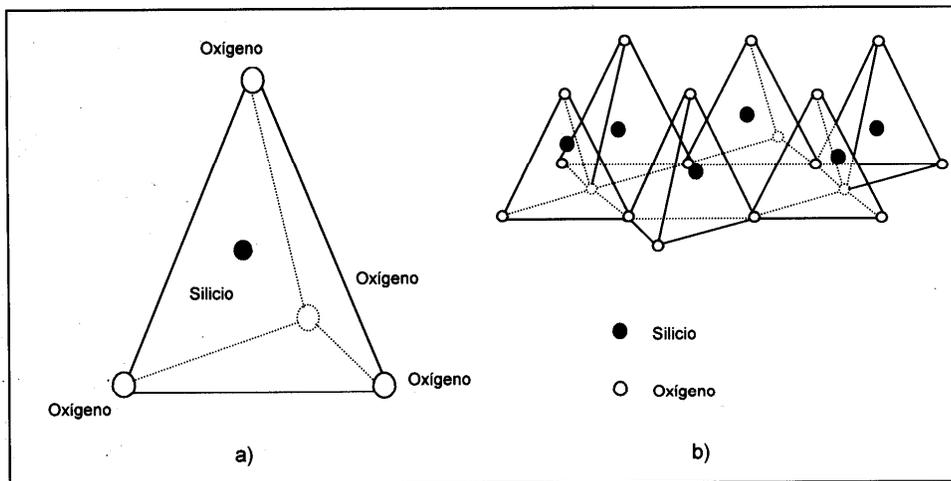


Figura 1.1. a). Unidad tetraédrica de silicio – oxígeno b). Lámina de sílice (Das, 1983).

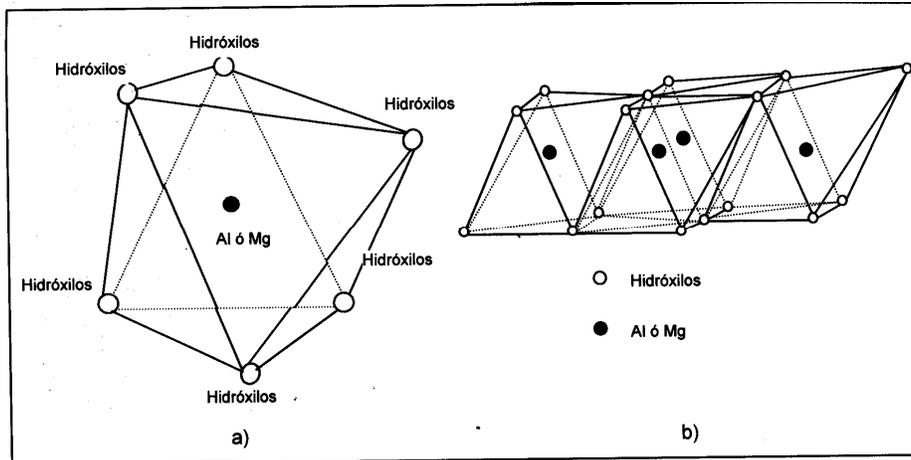


Figura 1.2. a) Unidad octaédrica b) Lámina aluminica (gibbsite), (Das, 1983).

Minerales de arcilla con láminas de dos capas. Algunas arcillas consisten en repetir láminas de dos capas. Una arcilla de dos capas se forma por la unión de una lámina de sílice con una lámina de gibsite, o una combinación de una lámina de sílice con una de brucita, las láminas tienen un espesor aproximado de 7.2 Å. La unión entre las capas es mantenida por ligas de hidrógenos y por fuerzas de valencia secundarias (Das, 1983). La caolinita es la arcilla más importante que pertenece a este tipo (figura 1.3.); otras arcillas comunes que caen dentro de esta categoría son la serpentina y la haloisita. El nombre caolinita es una modificación de "Kauling", el nombre de un risco alto de una colina cerca de Jauchau Fu, China, donde hace varios centenarios se obtuvo una arcilla blanca caolinitica. El término caolín comprende actualmente varios minerales arcillosos distintos. Los ingenieros usan este nombre para describir un grupo de arcillas caracterizadas por una baja actividad (Bowles, 1996). La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de agua entre ellas (adsorción). En consecuencia, las arcillas caoliniticas son relativamente estables en presencia del agua (Juárez & Rico, 1992). La fórmula química de la caolinita es:



La caolinita puede ser producida por la meteorización de los minerales arcillosos más activos, así como también formada directamente como subproducto de la meteorización de la roca. La caolinita tiende a ser encontrada en regiones de fuerte precipitación fluvial como en el sudeste de Estados Unidos, China, partes de Europa, Sudamérica y otras áreas más locales (Bowles, 1996).

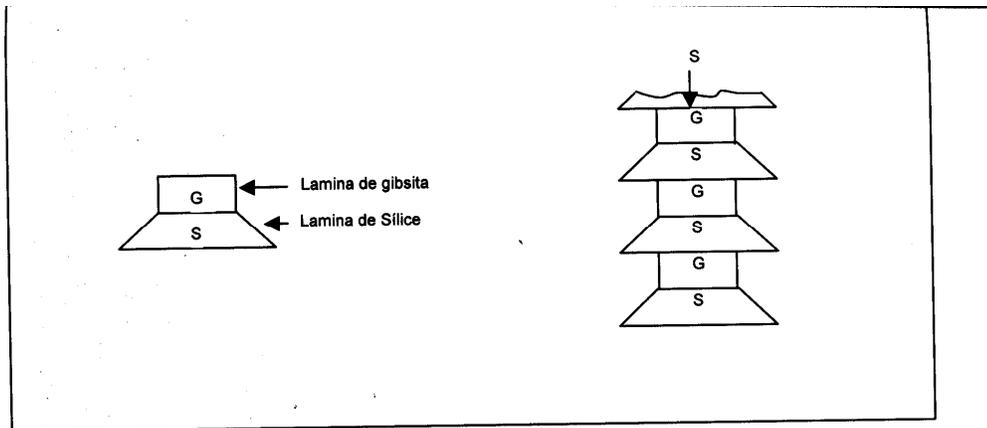


Figura 1.3. Representación esquemática de la estructura de la caolinita (Das, 1983)

Minerales de arcilla con láminas de tres capas. Las arcillas más comunes con láminas de tres capas son la illita y la montmorilonita (figura 1.4.). Una lámina de tres capas consiste de una lámina octaédrica en medio y una lámina de sílice arriba y otra abajo (Das, 1983).

Las capas de illita están ligadas a la vez con iones de potasio, la carga negativa para balancear los iones de potasio viene de la sustitución del aluminio por algún silicio en la lámina tetraédrica. La sustitución de este tipo, de un elemento por otro sin cambiar la forma cristalina es conocida como "sustitución isomorfa". Aunque la montmorilonita y la illita tienen estructuras similares, son diferentes, ya que la montmorilonita no contiene iones de potasio, y una gran cantidad de agua es atraída hacia el espacio entre las tres capas (Das, 1983). La illita es un término genérico para designar un grupo de arcillas descubiertas en Illinois. Las illitas están estructuradas análogamente a las montmorilonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencias a formar grupos de materia, que reduce el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su expansividad es menor que la de las montmorilonitas y, en general, las arcillas illíticas, se comportan mecánicamente en forma más favorable para el ingeniero (Juárez & Rico 1992). Las arcillas illíticas se encuentran por lo común en áreas de precipitación pluvial moderada como en la parte central de Estados Unidos, Inglaterra y Europa (Bowles, 1996). La fórmula química general de las illitas es:



donde y varía entre 1 y 1.5. (Bowles, 1996).

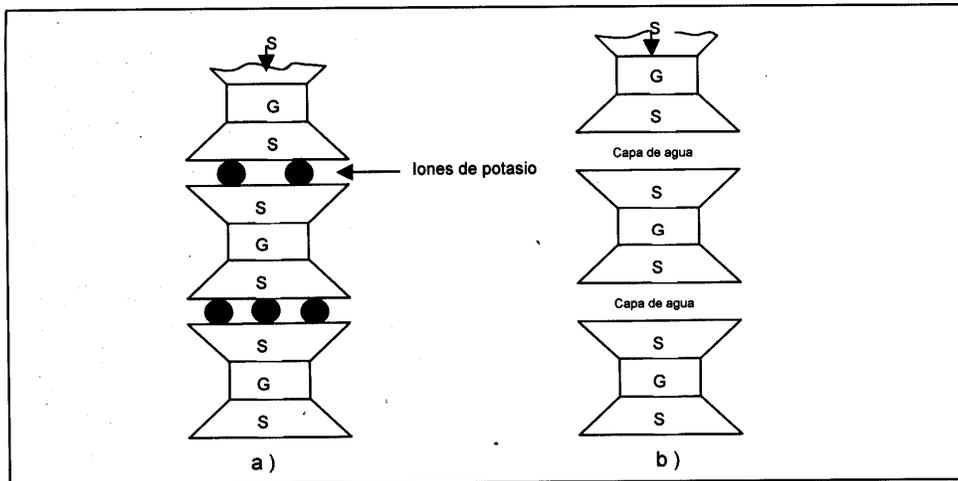


Figura I.4. Representación esquemática de la estructura de a) la illita a) y b) de la montmorillonita (Das, 1983).

Montmorillonita fue el nombre dado (1847) a un mineral arcilloso encontrado en Montmorillon, Francia (también se usa el término "esmeclita" para este grupo de minerales); como se indicó anteriormente, la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente, en una expansión. Las arcillas montmoriloníticas, especialmente en presencia de agua presentarán fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento (Juárez & Rico, 1992; Bowles, 1996). La meteorización de minerales arcillosos montmoriloníticos producen a menudo arcillas caoliniticas y en áreas en las que la meteorización ha progresado ambos minerales están normalmente presentes. La montmorillonita se encuentra en las regiones más áridas del mundo, como en el oeste de Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda y África meridional (Bowles, 1996). La fórmula química de la montmorillonita es:



en la que $n\text{H}_2\text{O}$ es la intercapa (n capas) de agua absorbida.

En la tabla I.1, se muestran los principales tipos de minerales arcillosos.

Tabla 1.1 Silicatos de estructura laminar (Lambe & Whitman 1984).

Mineral	Representación simbólica	Substitución isomorfa (Tipo y porcentaje)	Enlace entre capas (Tipo y resistencia)	Superficie Específica (m ² /gr)	Densidad de carga (A flor)	Capacidad de cambio potencial (me/ 100 gr)	Capacidad de cambio real (me/ 100 gr)	Forma de las partículas	Tamaño de las partículas
Serpentina		ninguna	Enlace de H + valencia secundaria			1	1	Aplanado o fibroso	
Caolinita		Al por Si 1 de 400	Enlace de H + valencia secundaria	10 - 20	83	3	3	Aplanada	d = 0.3 a 3 espesor, e = 1/3 a 1 - 10d
Halosita 4H2O		Al por Si 1 de 400	Valencia secundaria	40	55	12	12	Cilíndrica hueca	D.E.=0.07 D.I.=0.04 L = 0.5
Miscroclita		Al por Si 1 de 4	Valencia secundaria + enlace de K			250	5 - 20	Aplanada	
Vermiculita		Al, Fe, por Mg, Al por Si	Valencia secundaria + enlace de Mg	5 - 400	45	150	150	Aplanada	e=1/10d a 1/30d
Illita		Al por Si, de 7 Mg, Fe por Al, Fe, Al por Mg	Valencia secundaria + enlace de K	80 - 100	67	150	25	Aplanada	d = 0.1 a 2 e = 1/10d
Montmorillonita		Mg por Al, 1 de 6	Valencia secundaria + enlace del ion de cambio	800	133	100	100	Aplanada	d=0.1 a 1 e = (1/100)d

I.4. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Los cristales de arcilla pueden cambiar los cationes adsorbidos en su película superficial; por ejemplo, una arcilla hidrógena (con cationes H^+) puede transformarse en sódica si se hace que circule a través de su masa, agua con sales de sodio en disolución. En realidad, lo que ocurre es un intercambio de cationes entre el agua y las partículas adsorbidas por las partículas minerales, algunas veces en relación rápida. Los cationes intercambiables más usados son: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ y $(NH_4)^+$ (Juárez & Rico, 1992). Las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las montmorilonitas y las illitas poseen la propiedad en grado intermedio.

La capacidad de intercambio catiónico crece con el grado de acidez de los cristales, es decir es mayor si el PH del suelo es menor; la actividad catiónica se hace notable, en general, para valores de PH menores que 7. La capacidad de intercambio catiónico también crece con la velocidad y concentración de la solución que circule por la masa de suelo.

Las propiedades mecánicas de una arcilla pueden cambiar al variar los cationes contenidos en sus complejos de adsorción, pues a diferentes cationes ligados corresponden distintos espesores de la película adsorbida, lo que se refleja sobre todo en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo. Por esta razón el intercambio catiónico forzado se ha usado y se usa para tratar suelos con fines de mejorar su comportamiento mecánico.

En general, los cationes pueden disponerse según su efecto benéfico decreciente en la resistencia de las arcillas de acuerdo con el siguiente orden: $(NH_4)^+$, H^+ , K^+ , Fe^{+++} , Al^{+++} , Mg^{++} , Ba^{++} , Ca^{++} , Na^+ , Li^+ .

I.5. COMPORTAMIENTO DE LAS ARCILLAS EN PRESENCIA DE AGUA

Cuando una partícula cristalina de arcilla queda rodeada de agua, los átomos de oxígeno del cristal quedan en la superficie de éstos como consecuencia de su constitución interna. Si el cristal se considera como un ente ideal sería eléctricamente neutro, con todas sus cargas eléctricas positivas y negativas balanceadas. Aunque la realidad es otra y en los vértices y aristas de los cristales se rompe de hecho la continuidad de la estructura, por lo que verdaderamente se tiene, por lo menos en estas zonas, cargas desbalanceadas, es una hipótesis razonable y muy simplificada en un análisis elemental el considerar que el cristal en conjunto es neutro. Las cargas negativas de los átomos de oxígeno en consecuencia, crean en la superficie del cristal real, un campo eléctrico hacia el exterior con lo cual las moléculas del agua vecina se ionizan, de manera que los iones de hidrógeno positivos resultan captados por el cristal, así como también lo hacen los cationes que pudiera haber en disolución en el agua (Juárez & Rico, 1992).



La atracción eléctrica del cristal disminuye rápidamente con la distancia, de manera que la concentración de cationes en la atmósfera del cristal disminuye también. Puesto que el agua que rodea al cristal es, por lo menos en principio, eléctricamente neutra, la concentración de iones positivos cerca del cristal debe estar balanceada por un número igual de iones negativos moviéndose libremente en el fluido. La distribución de cationes cerca de la superficie del cristal se muestra en la figura 1.5a.

Se supone una distribución uniforme de la carga eléctrica en la superficie del cristal lo cual no es del todo correcto; la atmósfera de cationes muy cercanos fuertemente unidos al cristal por vínculos eléctricos, así como el grupo de cationes ya ligeramente más desvinculados por su mayor lejanía a la superficie de la partícula, suelen considerarse como dos estratos diferentes, de manera que al sistema en conjunto se le suele llamar de la "doble capa difusa". En la parte b) de la figura 1.5, se muestra esquemáticamente la forma de la doble capa difusa cuando al agua se le añadiese un electrolito; el aumento de iones libres reduce la tendencia de tales iones a difundirse en el fluido y tiene el efecto final de reducir el espesor de la atmósfera de adsorción; el espesor de dicha atmósfera se ha estimado en 0.1 a 1 micrones en soluciones muy diluidas y se considera mucho más pequeña en soluciones concentradas. Se admite que el espesor de la doble capa varía inversamente con la raíz cuadrada de la concentración de cationes en la solución y es inversamente proporcional a la valencia de dichos cationes.

Cuando dos cristales de arcilla quedan suficientemente cerca uno del otro, sus respectivas atmósferas de adsorción interaccionan de manera que entre ellas aparece una fuerza neta de repulsión. Los cálculos demuestran que la energía libre de los sistemas de doble capa aumenta cuando la superficie se acerca, de forma que es preciso realizar un trabajo exterior para disminuir la separación entre los dos cristales. Se ha visto también que la fuerza repulsiva entre las partículas disminuye aproximadamente en forma exponencial cuando la distancia entre ellas aumenta, pero de nuevo el fenómeno está influido por la concentración, la valencia y el tamaño de los cationes en la solución, así como por la densidad superficial de carga en la partícula, por la constante dieléctrica del fluido y por la temperatura.

La fuerza repulsiva existente entre dos cristales próximos no es, sin embargo, la única que actúa, pues entre las moléculas de ambos cristales y las moléculas de agua entre ellos se ejercen también fuerzas atractivas, como consecuencia del efecto *Van der Waals* (Juárez & Rico, 1992). La fuerza neta actuante entre dos partículas de arcilla será, por lo tanto, la suma algebraica de las dos fuerzas opuestas mencionadas.

Las fuerzas de *Van der Waals* son independientes de la naturaleza del medio que existe entre las partículas, por lo que para un tipo dado de arcilla, la fuerza neta entre partículas vecinas puede hacerse variar añadiendo cantidades convenientes de electrolitos en una suspensión, naturalmente que en este caso cambia únicamente el potencial repulsivo de las partículas. Cuando en una suspensión de arcilla la fuerza neta es de repulsión las partículas permanecen separadas y si se depositan lo harán en forma de un sedimento relativamente denso, en el que sin embargo, las partículas continúan separadas unas de otras por el efecto repulsivo de sus atmósferas catiónicas. Esto da lugar a una estructura dispersa, el aumentar la concentración de cationes en la suspensión hace disminuir el potencial repulsivo entre las partículas de arcilla, con lo que aumenta la preponderancia relativa de la fuerza de atracción,

de modo que la probabilidad de que dos partículas al acercarse dentro de su movimiento browniano se atraigan en lugar de repelerse aumenta; de hecho en este caso, la fuerza de atracción entre dos partículas aumenta al disminuir su distancia. Si se llega a esta situación, se dice que el suelo se flocula, fenómeno que produce, cuando la sedimentación tiene lugar, un depósito de agrupaciones de partículas muy sueltas, ya que cada unidad depositada posee una alta proporción de vacíos (Juárez & Rico, 1992).

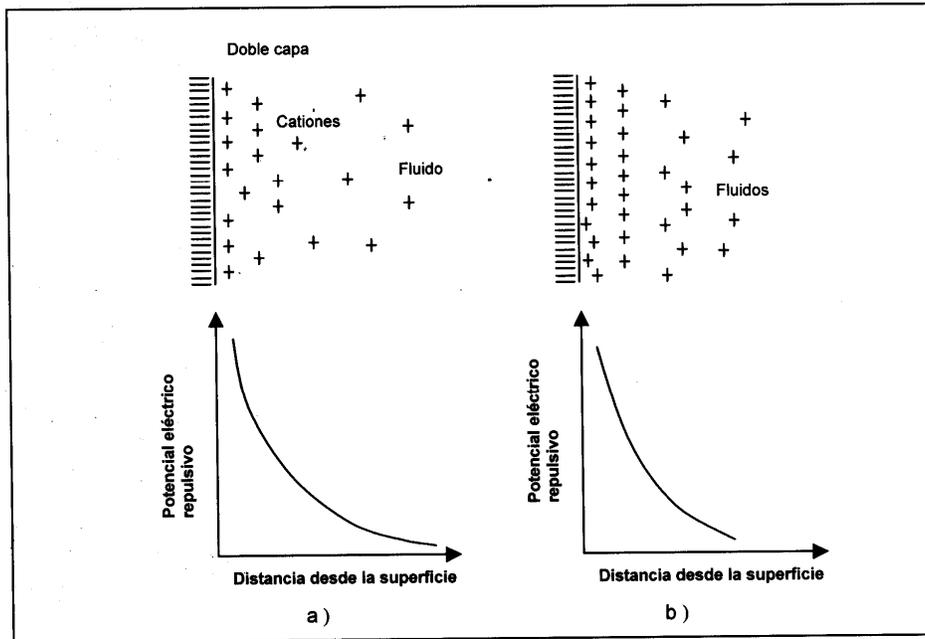


Figura 1.5. Formación de la doble capa en torno a un cristal de arcilla sumergido en agua; a) solución diluida y b) solución concentrada (Juárez & Rico, 1992).

Las principales características de las arcillas expansivas que deben considerarse desde el punto de vista de la ingeniería son (Whitlow, 1993): a) área superficial; b) carga superficial y adsorción; c) capacidad de intercambio básico; d) floculación y dispersión; e) expansión y contracción; f) plasticidad; g) cohesión y h) tixotropía. Algunas de estas características se trataron en párrafos anteriores y se detallan un poco más en lo que sigue.

Área Superficial. Cuanto más pequeña y laminar sea una partícula, mayor será su área superficial (A_s); la relación del área superficial por gramo de masa recibe el nombre de superficie específica del suelo. Considerando un cubo sólido de lado "d" y un peso específico relativo de los sólidos ρ_s , se tiene que la superficie específica de dicho cubo es:

$$\begin{aligned} \text{Área superficial} &= 6d^2 && (\text{mm}^2) \\ \text{Masa} &= d^3 G_s \cdot 10^{-3} && (\text{g}) \\ \text{Superficie específica} &= 6 \cdot 10^3 / d G_s && (\text{m}^2 \text{g}^{-1}) \end{aligned} \quad (1.1)$$

En esta forma, un grano de cuarzo ($G_s = 2.65$) con un diámetro nominal de 1 mm tendrá una superficie específica de $2.3 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$. Cuando esto se compara con una superficie específica de $800 \text{ m}^2 / \text{g}$ de montmorillonita resulta evidente la enorme área superficial de las arcillas. Como ilustración adicional, considere una partícula hipotética de montmorillonita en forma de una sola laminilla con una masa de 1g, su espesor sería de sólo 0.002 mm, pero para tener una superficie específica de $800 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$ sus dimensiones (teniendo en cuenta que tiene dos lados) tendrían que ser 20 x 20 m. En la tabla 1.2 se muestra la superficie específica y el contenido de agua adsorbida aproximado de los principales tipos de minerales arcillosos, así como de una arena de cuarzo.

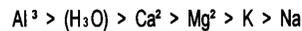
Carga superficial y adsorción. Los iones que forman la superficie de los minerales de arcilla son O^{2-} u $(\text{OH})^-$; por lo que dichas superficies presentan una carga eléctrica negativa. Puesto que las moléculas de agua son dipolares, esto es, tienen un extremo negativo y otro positivo, se forma una capa de agua que queda unida a la superficie del mineral por medio de un enlace de hidrógeno (H, O)⁺. En la zona inmediatamente adyacente a la superficie, las moléculas de agua son retenidas en una capa fuertemente enlazada, pero al aumentar la distancia, los enlaces se debilitan y el agua resulta más fluida. Las propiedades de esta capa de agua adsorbida tienden a ser muy diferentes a las del agua común; su viscosidad, densidad y punto de ebullición son mayores y su punto de congelamiento es más bajo. Al determinar los contenidos de agua de suelos arcillosos es aconsejable secarlos a 105°C , para asegurarse de haber eliminado toda el agua adsorbida. Los valores de la tabla 1.2 muestran la gran diversidad de contenidos de agua adsorbida, así como la superficie específica.

Tabla I.2. Contenido aproximado de agua adsorbida y superficie específica (Whitlow, 1993).

Mineral	Superficie Específica (m ² g ⁻¹)	Contenido aproximado de agua adsorbida (%)
Arena de cuarzo	0.02	0.001
Caolinita	20	1
Ilita	80	4
Montmorilonita	800	40

Capacidad de intercambio básico. La carga superficial negativa total exhibida por todos los minerales de arcilla, se puede neutralizar de varias maneras; parte por los cationes internos, parte por los enlaces de hidrógeno en la capa acuosa adsorbida y parte debida a los cationes en la capa adsorbida. El resto de la carga superficial negativa que no se neutraliza internamente recibe el nombre de capacidad de intercambio del mineral, y sus unidades se hacen miliequivalentes por 100 g (me/100g).

Por lo general, entre los cationes en las capas adsorbidas y los propios del agua de los poros se establece un equilibrio. Sin embargo, las proporciones relativas de cationes puede variar cuando se introducen diferentes cationes del agua en los poros, puesto que algunos tienen mayor afinidad que otros. Los de mayor afinidad tienden a reemplazar a los de afinidad más baja en la capa adsorbida. El orden general de sustitución entre los cationes es:



Floculación y dispersión. Las interacciones que se desarrollan entre dos partículas próximas entre sí en una solución acuosa, serán afectadas por dos tipos de fuerzas: a) atracción entre partículas debida a las fuerzas de enlaces secundarios o de *van der Waals* (inciso I.5) y b) fuerzas de repulsión debidas a la naturaleza de cargas negativas de superficie de la partícula y de la capa adsorbida. Las fuerzas de atracción de *van der Waals* se incrementan si las partículas se acercan, por ejemplo, esto sucede cuando el espesor de la capa adsorbida disminuye por el proceso de intercambio básico. En los suelos cuya capa adsorbida es gruesa, la repulsión será de mayor magnitud y las partículas permanecerán libres y dispersas.

Cuando la capa adsorbida es lo suficientemente delgada para que dominen las fuerzas de atracción, se forman grupos de partículas, en los que se presentan contactos de superficie con aristas (positivo – negativo); en una suspensión, estos grupos se sedimentan en conjunto. A este proceso se le llama floculación, y a los suelos que presentan este fenómeno se les denominan suelos floculados. En las arcillas marinas que contienen altas concentraciones de cationes, las capas adsorbidas son delgadas, por lo que resultan estructuras floculadas, en tanto que las arcillas lacustres (agua dulce) tienden a presentar estructuras dispersas (Whitlow, 1993). En la figura I.6, se muestran ambos tipos de estructuras.

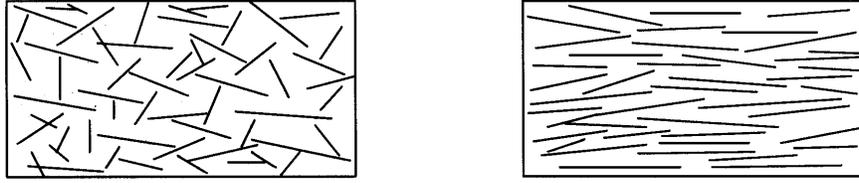


Figura 1.6. Esquema representativo de la estructura de un suelo a) estructura floculada b) estructura dispersa (Whitlow, 1993).

Expansión y contracción. Las fuerzas entre partículas y de las capas adsorbidas pueden alcanzar equilibrio en condiciones de presión y temperaturas ambientales constantes, debido al movimiento de las moléculas de agua que salen o entran de la capa adsorbida. Al contenido de agua del suelo correspondiente a este estado de equilibrio se le llama contenido de agua de equilibrio. Cualquier alteración de las condiciones ambientales producirá cambios en el contenido de agua. Si el agua se integra a la estructura laminar y el suelo está confinado, se desarrollará una presión de expansión. Cuando la capa de agua adsorbida se comprime, se produce una contracción del suelo, lo mismo sucede cuando un efecto de succión reduce el contenido de agua (por ejemplo, por medio de una evaporación climática). La magnitud de la expansión y contracción depende de la humedad inicial; si la humedad del suelo en su estado natural es menor que la humedad correspondiente al límite de contracción, un secado posterior no producirá una contracción apreciable; si está más húmeda, la contracción máxima posible será equivalente a la diferencia entre la humedad real y el límite de contracción.

Plasticidad. Existen suelos que al ser remoldeados cambian su contenido de agua, adoptando una consistencia característica, que desde épocas antiguas se ha denominado "plástico". Estos suelos han sido llamados arcillas. Al tratar de definir la plasticidad de un suelo no solo hay que decir que es aquel que puede deformarse y remodelarse sin agrietamiento, porque hay otros materiales que tienen esa propiedad. En mecánica de suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por medio de la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse (Juárez & Rico, 1992).

El tamaño y la forma de las partículas, en combinación con la naturaleza de la capa de agua adsorbida son los factores que controlan la plasticidad de los suelos (Whitlow, 1993). Además, los suelos con valores de superficie específica altos son los más plásticos y los más compresibles. Se han desarrollado varios criterios para poder medir la plasticidad de las arcillas. Aquí solo se hará mención a los límites de consistencia, los cuales fueron definidos por A. Atterberg, el cual hizo ver que la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con alto contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se

comporta plásticamente. *Atterberg* encontró que según el contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia: a) estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión; b) estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso; c) estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente; d) estado semisólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye de volumen al estar sujeto a secado y e) estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Los anteriores estados de consistencia son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y no existen criterios estrictos para distinguir sus fronteras. El establecimiento de estas ha de hacerse en forma puramente convencional. *Atterberg* estableció las primeras convenciones para ello, bajo el nombre general de límites de consistencia, los cuales se describen a continuación: a) límite líquido (LL), corresponde a la frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico; b) límite plástico (LP), es la frontera convencional entre los estados plástico y semisólido; c) límite de contracción (LC), es la frontera entre los estados semisólido y sólido y d) índice plástico (IP), es la diferencia aritmética que existe entre el límite líquido y el límite plástico; el índice de plasticidad indica el rango de humedad a través del cual los suelos con cohesión tienen propiedades de un material plástico.

Según *Atterberg* cuando un suelo tiene índice plástico (IP) igual a cero, el suelo es no plástico; cuando el índice plástico es menor de 7, el suelo presenta baja plasticidad; cuando el índice plástico está comprendido entre 7 y 17 se dice que el suelo es medianamente plástico y cuando el suelo presenta un índice plástico mayor de 17, se dice que es altamente plástico (*Crespo, 1976*).

Cohesión. Puede definirse un suelo cohesivo como una agregación o colección de partículas minerales que desarrollan fuerzas de atracción mutua; esta fuerza de atracción recibe el nombre de cohesión, la cual depende del contenido de agua, a medida que se incrementa el contenido de agua, la fuerza de atracción disminuye y la cohesión se reduce (*Whitlow, 1993*). El grado de cohesión depende de los tamaños relativos y de las cantidades de diversos granos de suelos y materiales arcillosos presentes; generalmente, cuando más del 50 % del depósito está formado por partículas de 0.002 mm y menores, el depósito se comporta como arcilla. Con este porcentaje relativo, las partículas mayores del suelo están suspendidas en una matriz de suelo fino. Cuando del 80 al 90 % del material del depósito es menor que la malla no. 200 (0.074 mm), una pequeña cantidad de arcilla, del 5 al 10 %, puede dar al suelo el comportamiento cohesivo (*Bowles, 1996*).

Tixotropía. Entre las partículas arcillosas se ejercen fuerzas debidas a los enlaces fisicoquímicos que se manifiestan en sus respectivas películas de agua adsorbida y cationes adsorbidos. Un amasado enérgico de la arcilla, puede romper esas ligaduras momentáneamente, lo cual se refleja macrofísicamente por una pérdida sensible de las propiedades de resistencia del material. Sin embargo, la mayoría de las arcillas vuelven mas o menos lentamente a sus propiedades originales; este fenómeno fue llamado tixotropía por *Peterfi*.

El fenómeno es consecuencia del restablecimiento de las películas adsorbidas en su primitiva condición. Las arcillas montmoriloníticas presentan la propiedad en grado máximo y recobran muy rápidamente sus características de resistencia, tras un enérgico amasado. Una medida de la tixotropía puede tenerse determinando una vez el límite líquido de una arcilla inmediatamente tras el remoldeo y otra dejando pasar unos minutos después de éste, si la arcilla es tixotrópica, el valor obtenido en el segundo caso será mayor que en el primero (Juárez & Rico, 1992).

I.6. IDENTIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS

I.6.1. IDENTIFICACIÓN EN CAMPO

Con un reconocimiento visual y manual o bien mediante clasificaciones sencillas se puede determinar las propiedades esperadas de un suelo en el campo. Algunos indicadores de la presencia de los suelos expansivos son: a) grietas por secado; b) plasticidad; c) espejos de fricción; d) textura y e) daños estructurales.

Grietas por secado. Las grietas en los suelos expansivos aparecen en la superficie del terreno durante periodos de sequía, con un arreglo geométrico del tipo poligonal, frecuentemente de gran dimensión. La resistencia del suelo seco es alta.

Plasticidad. En los suelos expansivos, es relativamente fácil hacer un rollito de suelo sin desmoronarlo.

Espejos de fricción. La superficie de suelos recientemente expuestas al aire muestran abundantes fisuras y espejos de fricción.

Textura. Los suelos expansivos son resbalosos y tienden a pegarse a zapatos o llantas de vehículos cuando están húmedos.

Daños estructurales. La presencia de grietas y distorsiones en las estructuras vecinas indican el potencial de expansión.

I.6.2. MÉTODOS MINERALÓGICOS DE IDENTIFICACIÓN

La composición mineralógica tiene una influencia fundamental sobre el potencial expansivo de los suelos (como se trató en el inciso I.4). Las cargas eléctricas negativas que existen en la superficie de los minerales arcillosos, las fuerzas que mantienen unidas a las unidades básicas y la capacidad de intercambio catiónico son factores que contribuyen al potencial expansivo de las arcillas. Por lo anterior, es posible identificar la expansividad de las arcillas al conocer su constitución mineralógica. En la actualidad se dispone de varias técnicas para identificar minerales arcillosos tales como: a) difracción de rayos X; b) análisis térmico diferencial; c) análisis químico y d) microscopio electrónico.

Difracción de rayos X. Es el procedimiento más utilizado, consiste en determinar las proporciones de diferentes minerales arcillosos comparando las intensidades de líneas de difracción con aquellas definidas en sustancias estándares.

Análisis térmico diferencial. Usado junto con el procedimiento de difracción de rayos X y el análisis químico, es capaz de identificar otros minerales arcillosos difíciles de determinar.

Análisis químico. Es un valioso suplemento de otros métodos, para grupos de minerales de montmorilonita, este método permite determinar las características de la sustitución isomorfa y muestra el origen y localización de las cargas que tienen las superficies arcillosas.

Microscopio electrónico. Con este método se tiene una manera directa para observar el suelo, es útil para definir la composición mineralógica, la textura y la estructura interna. Dos materiales con el mismo patrón de difracción de rayos X y curvas térmicas diferenciales pueden mostrar diferentes características morfológicas desde el punto de vista del microscopio electrónico.

Es importante mencionar que para una identificación confiable, se deben usar varios métodos al mismo tiempo. En la identificación mineralógica, particularmente la interpretación de resultados para uso ingenieril, requieren de conocimientos y experiencias que no tiene generalmente un geotecnista, por lo que se debe acudir a expertos en el tema.

1.6.3. MÉTODOS INDIRECTOS DE IDENTIFICACIÓN

Las propiedades índice, particularmente los límites de *Atterberg*, han sido utilizados por mucho tiempo para identificar de manera sencilla las características expansivas de las arcillas. Por lo anterior, se han desarrollado varios métodos indirectos con base a las propiedades índice de los suelos para estimar el carácter expansivo de los mismos; los más importantes son los que se describen a continuación:

Criterio de Holtz & Gibbs (1956). Los autores de este criterio utilizaron el límite de contracción y el índice de plasticidad para definir tres niveles en el cambio de volumen de un suelo con potencial expansivo, los que se muestran en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Clasificación de suelos expansivos con base al límite de contracción.

Cambio de volumen	Límite de contracción	Índice de plasticidad
Probablemente bajo	> 12	0 – 15
Probablemente moderado	10 – 12	15 – 30
Probablemente alto	0 – 10	> 30

Criterio de Holtz (1959). La tabla 1.4. es la que propone W. G. Holtz, para la identificación de las arcillas expansivas. Con este criterio se correlaciona el contenido coloidal (porcentaje de partículas menores que 0.001mm), el índice de plasticidad y el límite de contracción. Estos tres parámetros proporcionan una identificación adecuada para fines prácticos (Juárez & Rico, 1992).

Tabla 1.4. Criterio de Holtz para estimar el cambio volumétrico probable en suelos expansivos (Juárez & Rico, 1992).

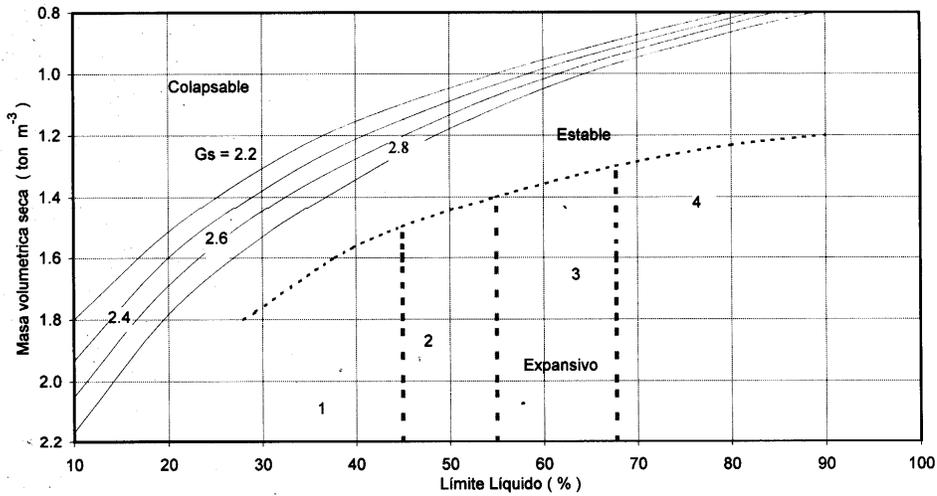
Datos de pruebas de identificación			Expansión probable Cambio volumétrico en % (seco a saturado)	Grado de expansión
Contenido coloidal (% < 0.001 mm)	Índice de Plasticidad	Límite de contracción		
> 28	> 35	< 11	> 30	Muy alto
20 – 31	25 – 41	7 - 12	20 – 30	Alto
13 – 23	15 – 28	10 - 16	10 – 20	Medio
< 15	< 28	> 15	< 10	Bajo

Criterio de Zepeda & Pérez (1995). El límite líquido también ha sido utilizado junto con el índice de plasticidad y la succión del suelo para definir tres niveles de potencial de expansión (tabla 1.5).

Tabla 1.5. Clasificación de suelos expansivos de acuerdo con el límite líquido (Zepeda & Pérez, 1995).

Potencial de Expansión	Expansión potencial (%)	LL (%)	IP (%)	Succión del suelo natural kg/cm ²
Bajo	< 0.5	< 50	< 25	< 1.5
Marginal	0.5 - 1.5	50 – 60	25 -35	1.5 - 4.0
Alto	> 1.5	> 60	> 35	> 4.0

Criterio del "Bureau of Reclamation", E.U.A. A partir del límite líquido, masa volumétrica seca (ρ_d) y la gravedad específica de un suelo (G_s), se puede determinar la susceptibilidad de un suelo a la expansión o colapso. En la figura 1.7. se presenta en forma gráfica este criterio.



No.	Grado de expansividad
1	baja
2	mediana
3	alta
4	muy alto

Nota: Los límites de expansión se definieron de los datos reportados por *W. G. Holtz* en su libro "Propiedades y Problemas de las Arcillas Expansivas"

Figura I.7. Criterio del Bureau of Reclamation para determinar el potencial expansivo o colapsable de un suelo.

Método del potencial de cambio volumétrico (PVC). Este método fue desarrollado por *Lambe (1960)*. Las muestras se compactan en un consolidómetro de anillo fijo con una energía específica de 270 ton-m^{-3} . Después se aplica una presión inicial de 15 kg cm^{-2} ; se agrega agua a la muestra, la cual está parcialmente restringida a expandir verticalmente por un anillo de carga. Después de dos horas se toma la lectura del anillo de carga, la cual se convierte en presión, siendo designada esta como índice de expansión. Este último se transforma en potencial de cambio de volumen mediante la carta mostrada en la figura I.8. La tabla I.6. muestra la clasificación de este método.

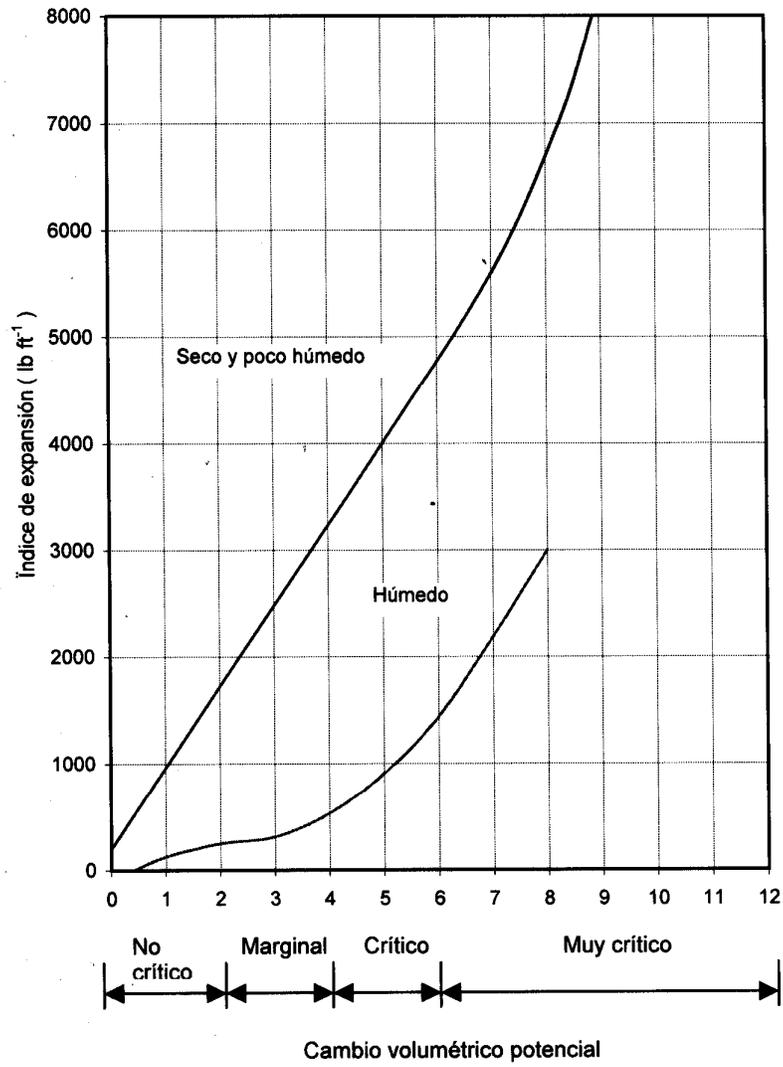


Figura I.8. Carta del potencial de cambio volumétrico PVC.

Tabla 1.6. Clasificación del potencial de expansión, con base al potencial de cambio volumétrico.

Intervalos de PVC	Potencial de expansión
< 2	No crítico
2 - 4	Marginal
4 - 6	Crítico
> 6	Muy crítico

Criterio de Williams & Pidgeon (1982). Williams & Pidgeon en 1982 desarrollaron un criterio de identificación de suelos expansivos con base a los criterios de Holtz y Gibbs (1956), Holtz (1959), Van de Merve (1964) y una clasificación que aparece en el BRE Digest 240 (1980). Este criterio requiere el porcentaje de arcilla, la actividad y el índice de plasticidad. En la figura 1.9 se presenta en forma gráfica dicho criterio.

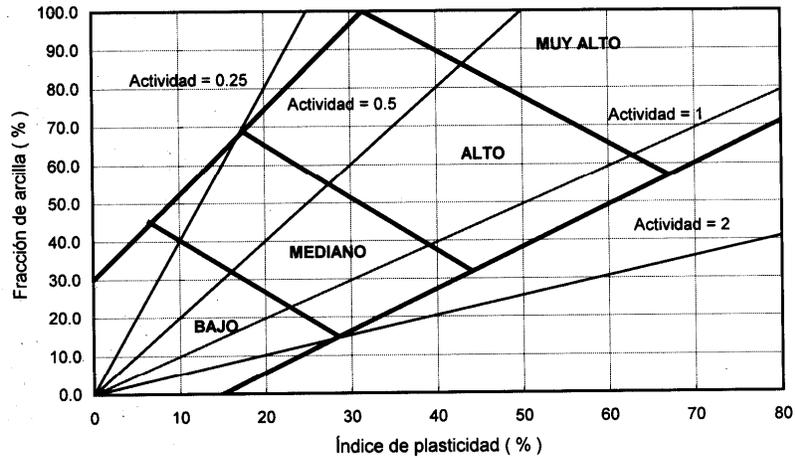


Figura 1.9. Potencial de expansión y contracción de las arcillas (Whitlow, 1993).

1.7. ESTUDIOS DE LABORATORIO SOBRE SUELOS EXPANSIVOS

A causa del riesgo potencial de construir en suelos que sufren gran cambio de volumen, es necesario la identificación de tales suelos. Varios investigadores han intentado desarrollar un método confiable con base a propiedades índice para su identificación, tal como se trató en el inciso anterior. Otros investigadores han medido los cambios de volumen, para establecer correlaciones con su comportamiento.

Seed et al. (1962) realizó varias pruebas de laboratorio con mezclas de arena y arcilla compactadas para determinar su potencial de expansión. El potencial de expansión se definió como el porcentaje de expansión que tiene un espécimen compactado de acuerdo a la prueba Proctor estándar; la humedad de moldeo fue igual a la humedad óptima (w_{opt}), las muestras ensayadas tuvieron el peso volumétrico seco máximo ($\rho_{dmáx}$). Una vez preparadas las muestras, se confinaron lateralmente con una sobrecarga igual a 1 psi (6.9 kN m⁻²). Con base a los resultados obtenidos, fue posible establecer relaciones bien definidas entre el potencial de expansión, la actividad y el porcentaje de la fracción arcillosa (partículas menores que 2 μ m) en el suelo. La relación obtenida se presenta a continuación:

$$S = (3.6 \cdot 10^{-5}) A^{2.44} C^{3.44} \quad (1.2)$$

donde: S es el potencial de expansión (N m⁻²); C es el porcentaje en peso de la fracción de arcilla (%); A es la actividad del suelo (%).

La ecuación (1.2) se extendió en forma empírica para lograr una relación entre el potencial de expansión y el índice de plasticidad, la cual se presenta a continuación:

$$S = K(60)(IP)^{2.44} \quad (1.3)$$

donde K = 3.6 10⁻⁵; por lo que la ecuación (1.4) se vuelve:

$$S = 2.16 \cdot 10^{-3} IP^{2.44} \quad (1.4)$$

donde: IP es el índice de plasticidad del suelo (%).

Con base al criterio del Bureau of Reclamation (1.6.3), *Seed et al (1962)*, hizo una clasificación para relacionar el grado de expansión con el potencial de expansión (ver tabla 1.7); en la figura 1.10 se muestra en forma gráfica clasificación obtenida por el autor.

Tabla I.7. Clasificación del grado de expansión con base al potencial de expansión (Das, 1983).

Grado de expansión	S
Bajo	0 -1.5
Medio	1,5 - 5
Alto	5 - 25
Muy alto	> 25

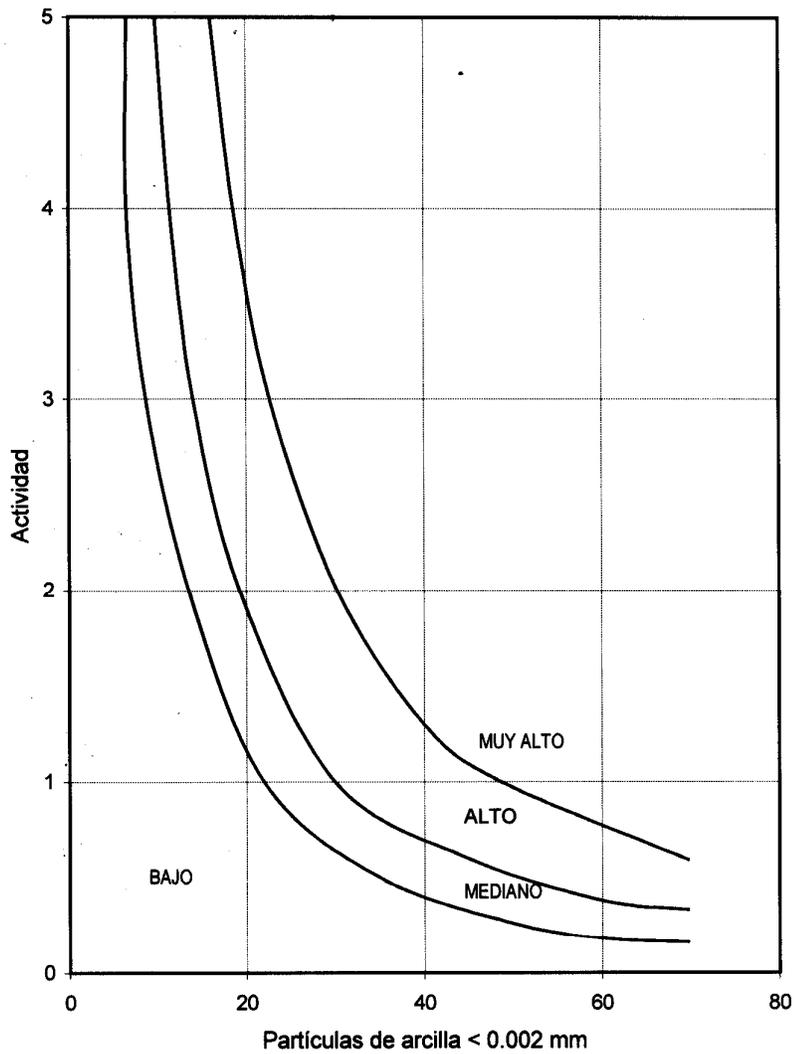


Figura I.10. Carta de clasificación del potencial de expansión (Das, 1983).

Das en 1983, investigó la variación de la presión de expansión de una arcilla arenosa en muestras compactadas con diferentes humedades de moldeo y masas volumétricas; las pruebas de presión de expansión se hicieron a volumen constante, sin sobrecarga y con acceso libre del agua a la muestra compactada. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 1.11).

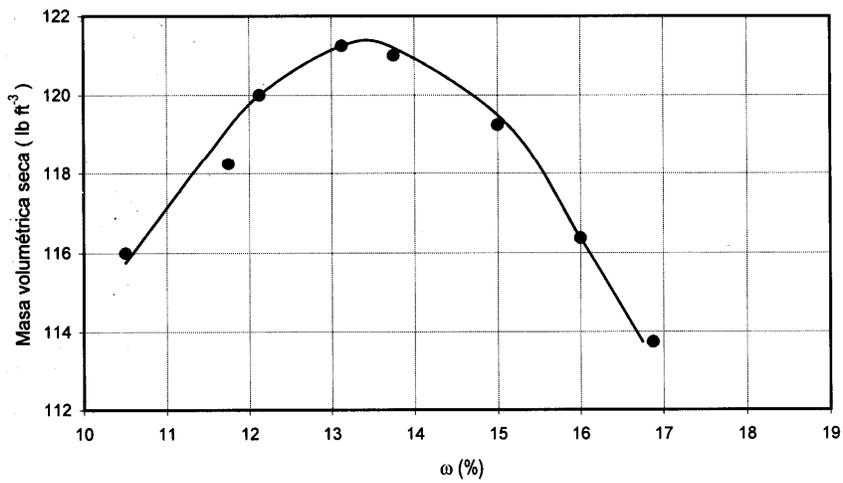
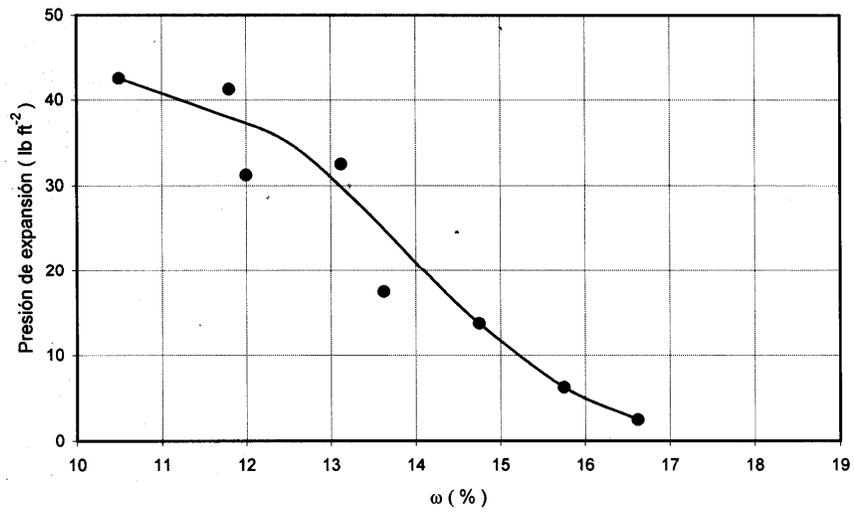


Figura 1.11. Influencia de la humedad de moldeo sobre la presión de expansión de una arcilla arenosa (Das, 1983).

Ranganatham & Satyanarayana (1965), sugirieron una correlación para el potencial de expansión similar a la establecida por Seed et al. en 1962; la correlación de los autores está basada en el índice de plasticidad (IP), la actividad de expansión (SA) y el porcentaje de arcilla en el suelo (C). La actividad de expansión se determina con la ecuación siguiente:

$$SA = \frac{IP}{C} \quad (1.5)$$

En la figura I.12 se presenta la variación del índice de plasticidad con el porcentaje de la fracción de arcilla.

La correlación del potencial de expansión (S) con la actividad de expansión (SA) y con el porcentaje de la fracción de arcilla determinada por Ranganatham & Satyanarayana es:

$$S = (4.57 \cdot 10^{-5})(SA)^{2.67} C^{3.44} \quad (1.6)$$

$$S = (41.13 \cdot 10^{-5})(SI)^{2.67} \quad (1.7)$$

En la tabla I.8 se presenta la clasificación para el grado de expansión del suelo con base en el índice de plasticidad.

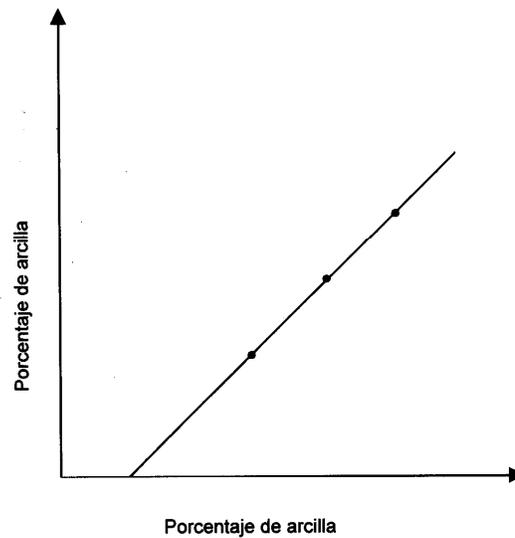


Figura I.12. Variación del índice de plasticidad con el porcentaje de la fracción de arcilla (Das, 1983).

Tabla 1.8. Clasificación del grado de expansión con base en el índice de contracción (Das, 1983).

Grado de expansión	SI
Bajo	0 - 20
Medio	20 - 30
Alto	30 - 60
Muy alto	> 60

Donde: SI es el índice de contracción.

Zepeda & Pérez en 1995, recopilaron una serie de datos geotécnicos sobre suelos expansivos en toda la República Mexicana con el objetivo de establecer correlaciones que permitieran determinar el potencial de expansión de dichos suelos. Sin embargo, no se han podido establecer correlaciones mediante criterios convencionales, ya que las correlaciones empíricas son difíciles de extrapolar a otras regiones. Los datos recopilados por los autores se muestran en la tabla 1.9.

Tabla I.9. Límites de plasticidad y resultados de pruebas saturadas bajo carga de varios suelos expansivos del país.

Lugar	Gravedad específica	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice plástico	Grado de saturación inicial (%)	Expansión (%)	Esfuerzo vertical usado en la prueba (kPa)
Hermosillo		47	25	22		18 -48	0
Hermosillo	2.66	24	15	9		2 - 6	0
Cd.Obregón		70	24	46	42.8	2.4	24.5
					44.3	1.64	49.1
					52.8	1.85	98.1
Cd. Obregón		68	24	44		1.8	192.4
Cd. Obregón	2.68	80	26	54	71.2	6.5	0
					71.2	1.8	78.5
					71.2	1.07	157
	2.7	55	24	31	63	2.21	0
					63	0.53	294.3
Cd. Obregón	2.63	66	26	40	78.8	1	323.7
Cd. Obregón	2.7	85	25	60	65.5	0.49	49.1
	2.71				65.4	0.08	98.1
Cd. Obregón		54	21	33		11.8 - 21	0
Culiacán	2.4	71	26	45	94	10.33	4.9
Culiacán	2.41	76	28	48	99	20	0
Culiacán	2.4	69	29	40	99	1.33	9.8
Cd. Juárez		63	22	41		7.24	7.1
León	2.7	55	27	28	80.6	2.39	0
					78.5	0.18	24.5
					75.6	0.21	49.5

Cont. Tabla I.9. Límites de plasticidad y resultados de pruebas saturadas bajo carga de varios suelos expansivos del país.

Lugar	Gravedad específica	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice plástico	Grado de saturación inicial (%)	Expansión (%)	Esfuerzo vertical usado en la prueba (kPa)
León	2.58	75	25	50	92	0.76	73.6
	2.58	72	22	50	99	0.15	98.1
León	2.54	87	30	57	91.1	1.28	0
					90.4	0.55	24.5
					89	0.2	73.6
					96	0.05	147.2
León	2.54	91	38	53	75	32.75	1.2
	2.56	70	27	43	61.4	0.91	24.5
León					69.2	0.76	49.1
					60.5	0.16	98.1
León	2.64	52	20	32	62	4.22	18.8
León	2.64	39	17	22	62	2.6	29.9
Nuevo Laredo		50	16	34		1.3	0
Querétaro		74	30	44		8	0
Reynosa		50	27	23		3.67	0
Salamanca		48	16	32		0.5	0
Cuernavaca		77	26	51	80.9	6.4	0
		50	25	25		6.92	6.9

1.8. DAÑOS OCASIONADOS A OBRAS DE INGENIERÍA POR SUELOS EXPANSIVOS

Los problemas referentes a suelos expansivos son bastante generales y de importancia económica en aquellos países que tienen regiones áridas. Evidentemente cuanto más ligera es una estructura, tanto más la levantará el terreno expansivo. Así pues, los problemas de expansión suelen estar asociados con estructuras ligeras como pequeños edificios (especialmente viviendas), vertederos de presas y pavimentos de carreteras y aeropistas (*Lambe & Whitman, 1984*).

Los suelos expansivos generan daños a estructuras causados por el movimiento del suelo a consecuencia del cambio de humedad; cuando el suelo está confinado lateralmente, el potencial de expansión se traduce en un empuje lateral. Se distinguen cinco tipos de efectos dañinos: a) movimiento céntrico; b) movimiento perimetral; c) movimiento cíclico; d) empuje lateral y e) agrietamiento de suelo.

Movimiento céntrico. Ocurre en la parte central de una estructura en una forma de domo con su valor máximo en el centro. El movimiento no es brusco y se desarrolla durante varios años, mismo que está asociado con una reducción en la evapotranspiración. La construcción de la estructura rompe el equilibrio en las condiciones de evaporación y elimina la presencia de la vegetación, de manera que la humedad se acumula en el subsuelo. La figura 1.13. muestra el patrón de daños que comúnmente se observan en estructuras ligeras construidas con muros de tabique. Las grietas se presentan en forma vertical, horizontal y diagonal, siendo esta última desde la parte central inferior de la estructura hacia sus esquinas superiores. El ancho de las grietas es mayor en la parte superior cercana al techo; este restringe la propagación de grietas verticales generando grietas horizontales adicionales a lo largo del contorno del techo. Los daños son severos y progresivos en regiones cuyo clima es semiárido, caluroso y seco, y en el que el nivel freático se encuentra profundo.

Movimiento perimetral. Forma un patrón de disco en la periferia de la estructura. El retiro de vegetación preexistente y encharcamiento en la inmediación de sitios de construcción causan un aumento de humedad en el subsuelo; los efectos dañinos se observan con prontitud después de la construcción. El levantamiento de las esquinas de la estructura genera grietas horizontales, verticales y diagonales, siendo estas últimas desde las esquinas inferiores hacia la parte central superior (figura 1.14). El ancho de la grieta es mayor en la parte inferior de la estructura.

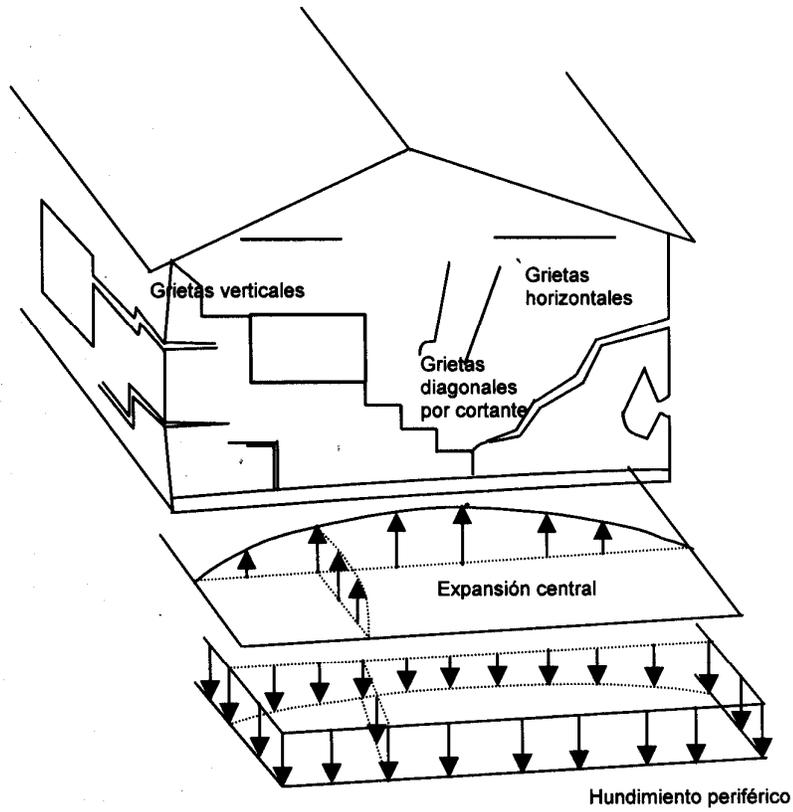


Figura I.13. Agrietamiento de estructura por movimiento céntrico (Fredlund & Rahardjo, 1993).

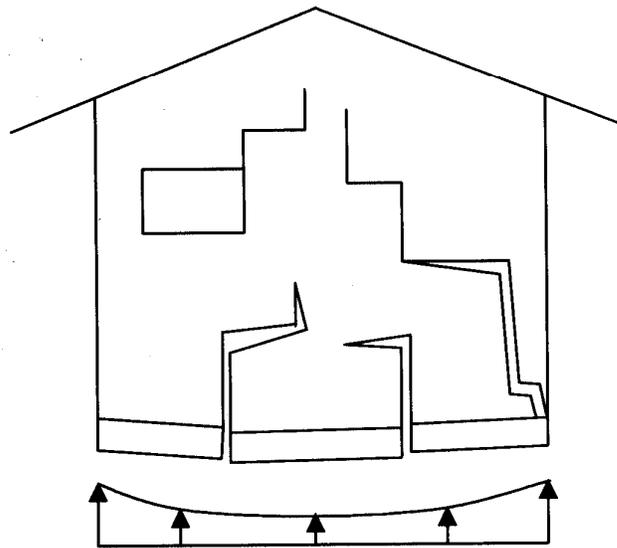


Figura I.14. Agrietamiento de estructura por movimiento perimetral (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Movimiento cíclico. Este movimiento está asociado con el cambio cíclico de expansión y contracción en que el drenaje, la precipitación y la evapotranspiración generan pérdidas o incrementos de humedad en el subsuelo. El movimiento está controlado por fugas de agua locales, cambio climático estacional o efectos de desecación de la vegetación cercana a la estructura. Los daños son más severos cuando el suelo posee una buena permeabilidad en el que intensas lluvias generan levantamientos perimetrales. El patrón de daños en los muros de tabique no están bien definidos, presentándose generalmente grietas diagonales cruzadas (figura I.15).

En la tabla I.10. se presenta una clasificación de daños estructurales de acuerdo con el ancho de las grietas y la correspondiente expansión del terreno.

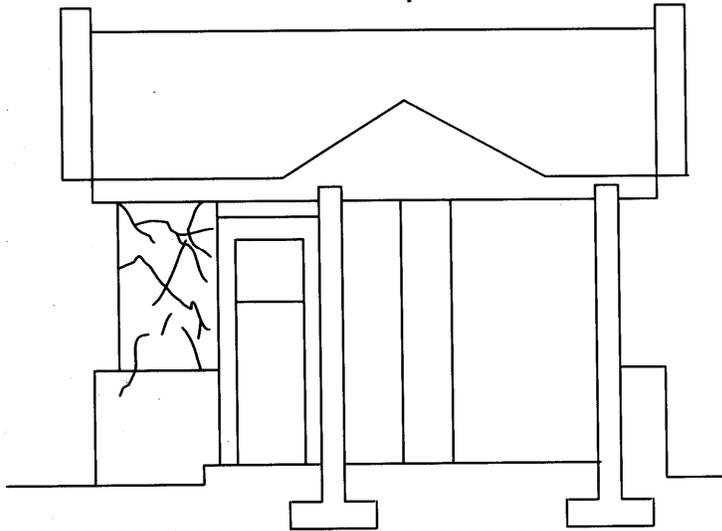


Figura I.15. Agrietamiento de estructura por movimiento cíclico (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Tabla I.10. Clasificación de daños estructurales por suelo expansivo.

Daño	Ancho de grieta (cm)	Expansión (cm)
Severo	> 5.0	> 7.0
Medio	1.5 - 5.0	3.5 - 7.0
Ligero	< 1.5	1.5 - 3.5

Empuje lateral. La expansión del suelo es un fenómeno de cambio de volumen, por lo que genera movimientos del terreno en todas las direcciones. Los movimientos horizontales del terreno se notan de dos maneras: el movimiento o inestabilidad de un talud o empujes laterales sobre un muro de contención. Dependiendo del potencial de expansión, los empujes laterales generados por el aumento del contenido de agua, pueden alcanzar grandes magnitudes.

Agrietamiento de suelo. Como la tensión capilar se ejerce en todas direcciones, la contracción se produce vertical y horizontalmente. La contracción horizontal del suelo genera esfuerzos de tensión en la misma dirección; si este esfuerzo rebasa la resistencia a la tensión del suelo que es de baja a nula, se forman grietas por secado, las cuales son todavía más peligrosas que un simple cambio de volumen. Estas grietas reducen el confinamiento lateral a las estructuras, propician la acumulación de agua y disminuyen el factor de seguridad contra la estabilidad de un talud.

I.9. CONCLUSIONES

En este capítulo se describió la composición mineralógica de las arcillas y su influencia en el comportamiento de éstas en presencia de agua. Se trataron los distintos criterios utilizados actualmente para identificar los suelos expansivos con base a sus propiedades índice. También se presentaron algunos de los trabajos de investigación realizados por investigadores interesados en el tema, para evaluar cuantitativamente el comportamiento macrofísico de las arcillas expansivas.

En el siguiente capítulo se presentan los fundamentos de Mecánica de Suelos para estudiar el comportamiento de tales suelos.