

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS



### II.1. INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

La inestabilidad de los suelos activos (expansivos y colapsables), se atribuye a los cambios en la humedad del suelo, ocasionados por: a) cambios climáticos; b) condiciones de construcción; c) cambios en la capa superficial y d) procesos de evaporación. Las investigaciones en las áreas que contienen suelos potencialmente expansivos incluyen por lo general pruebas de expansión en el laboratorio (Merritt, F., 1999).

La mayor dificultad que se presenta para poder predecir la magnitud de la expansión y contracción en un depósito de suelo, se debe a que hay pocos datos de campo disponibles para poder determinar los cambios potenciales de humedad debido a dificultades metodológicas (Hillel, 1980, Fredlund & Rahardjo, 1993). Puede ser necesaria una continua observación en el terreno, por varios años, para determinar las fluctuaciones de la humedad que se presenten en una región y estas observaciones deben incluir los efectos de cualquier estructura o de cualquier cambio ambiental producido por el hombre (Sowers *et al.*, 1990).

En el presente capítulo, se presentan solamente los métodos de laboratorio más comunes para estudiar el comportamiento de los suelos expansivos, los factores que tienen influencia en los cambios volumétricos de suelos expansivos, así como las correlaciones que se emplean para su identificación. El caso de los suelos colapsables no se trata en este trabajo.

## II.2. ESTADO DEL AGUA EN EL SUELO

### II.2.1. HUMEDAD Y MASA VOLUMÉTRICA DEL SUELO

Se considera al suelo como un medio compuesto por tres fases (Fig. II.1): "sólida", "líquida" (agua) y "gaseosa" (aire), las cuales se caracterizan por sus masas ( $M_s$ ,  $M_w$  y  $M_a$ ) y volúmenes ( $V_p$ ,  $V_w$  y  $V_s$ ). Se asume que la masa de aire es despreciable ( $M_a = 0$ ). La masa total del suelo es:  $M_T = M_w + M_s$  y el volumen de vacíos:  $V_p = V_a + V_w$ . A continuación se definen una serie de variables:

$$\text{Masa volumétrica del agua (líquida):} \quad \rho_w = \frac{M_w}{V_w} \quad (II.1)$$

$$\text{Masa volumétrica de sólidos:} \quad \rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (II.2)$$

$$\text{Masa volumétrica del suelo:} \quad \rho_d = \frac{M_s}{V_T} \quad (II.3)$$

$$\text{Porosidad del suelo:} \quad \varepsilon = \frac{V_p}{V_T} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (II.4)$$

$$\text{Humedad gravimétrica del suelo:} \quad \omega = \frac{M_w}{M_s} \quad (II.5)$$

$$\text{Humedad volumétrica del suelo:} \quad \theta = \frac{V_w}{V_T} = \left( \frac{\rho_d}{\rho_w} \right) \cdot \omega \leq \varepsilon \quad (II.6)$$

$$\text{Grado de saturación del suelo:} \quad S_r = \frac{V_w}{V_p} = \frac{\theta}{\varepsilon} \leq 1 \quad (II.7)$$

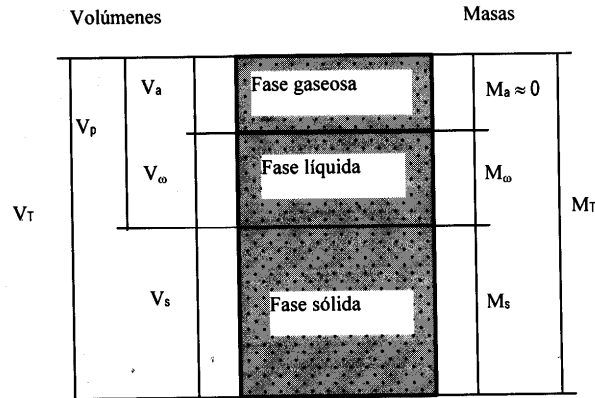


Figura II.1. Diagrama de un suelo representado como un sistema de tres fases (Hillel, 1980).

### II.3. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN

El índice de expansión de los suelos se define como la relación entre la diferencia entre la altura final e inicial del espécimen dividida por la altura inicial ec. (II.8).

$$EI = \frac{h_f - h_o}{h_o} \times 1000 \quad \text{ec. (II.8)}$$

donde: EI es el índice de expansión del suelo (l l<sup>-1</sup>); h<sub>o</sub> es la altura inicial del espécimen (l); y h<sub>f</sub> es la altura final (l). Si la altura de la muestra inicial es más grande que la altura final, el índice de expansión es cero.

Para obtener el índice de expansión, la muestra se introduce en un anillo metálico y se satura hasta alcanzar un grado de saturación entre el 40 y 60% una vez montada en un consolidómetro y sometida a una presión vertical de 6.9 kPa (0.069 kg cm<sup>-2</sup>), la muestra se inunda con agua destilada y la deformación vertical se registra durante 24 horas o hasta que la velocidad de deformación sea menor que 0.0005 cm h<sup>-1</sup>, o lo que ocurra primero. La prueba debe durar por lo menos tres horas (ASTM D4829, 1988). El potencial expansivo de los suelos arcillosos se ubica de acuerdo a la clasificación dada en la tabla II.1 (ASTM D4829, 1988).

Tabla II.1. Clasificación del potencial expansivo de los suelos (ASTM D4829, 1988).

Índice de expansión	Potencial de expansión
0 - 20	Muy baja
21 - 51	Baja
51 - 90	Medio
91 - 130	Alto
> 130	Muy alto

## **II.4. DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN**

La expansión de un suelo se puede determinar en laboratorio en un ensayo parecido al de la consolidación unidimensional; la presión de expansión depende, entre otros factores, de la sobrecarga que se imponga a la muestra. La norma ASTM D 4546 – 85, especifica los siguientes métodos de prueba: a) expansión libre; b) expansión bajo la presión *in situ* o la equivalente a la de la estructura y c) expansión a volumen constante. Los métodos de prueba anteriores, cubren tres alternativas para determinar la magnitud de expansión o contracción de suelos cohesivos en estado natural o compactados. A continuación, se describe cada uno de los métodos de prueba antes citados.

### **II.4.1. EXPANSIÓN LIBRE**

Esta prueba de expansión se realiza inundando la muestra y permitiendo que expanda verticalmente bajo una presión de contacto (sobrecarga) de 1 kPa (0.01kg cm<sup>-2</sup>), aplicada a la piedra porosa superior y placa de carga, hasta que la expansión primaria haya ocurrido totalmente (ver figura II.2). Posteriormente, la muestra se somete a varios incrementos de carga hasta que se recupere su relación de vacíos que tenía antes de la saturación; la presión total aplicada hasta este punto, se define como presión de expansión (figura II.3). La prueba deberá continuar con cargas adicionales y subsecuentes descargas como lo establece una prueba de consolidación convencional ( 5, 10, 20, 40, 80, etc. kPa). Con la prueba de expansión libre puede determinarse: a) la expansión libre; b) el porcentaje de expansión para una presión vertical menor que la presión de expansión y c) la presión de expansión.

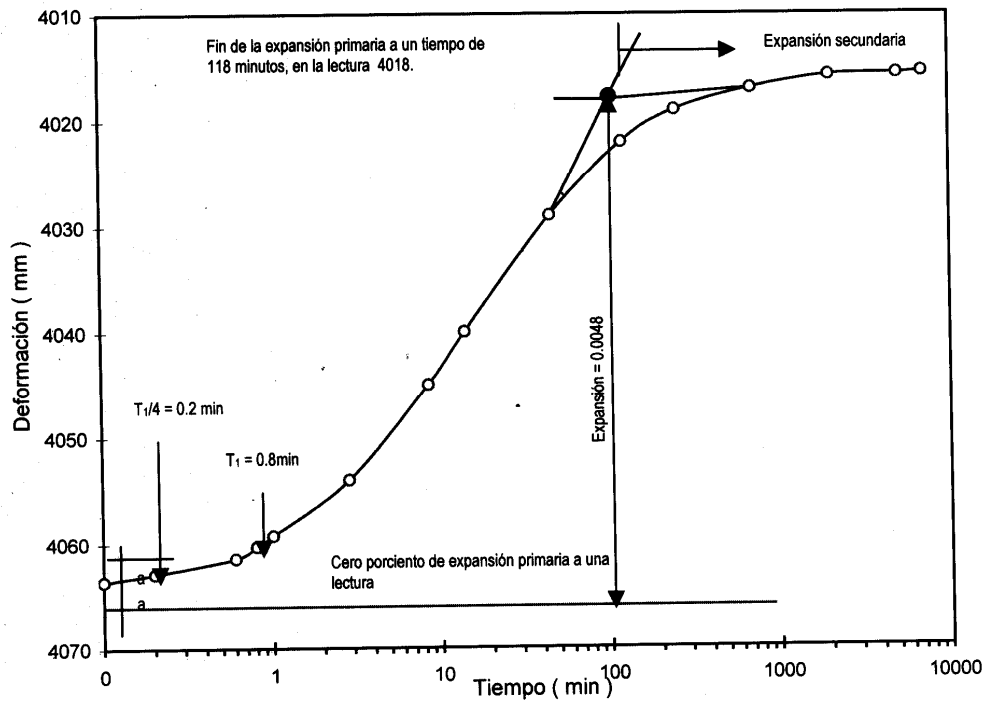


Figura II.2. Curva expansión libre - tiempo; se aprecia el punto en que ocurre la expansión primaria (ASTM D-4546, 1988).

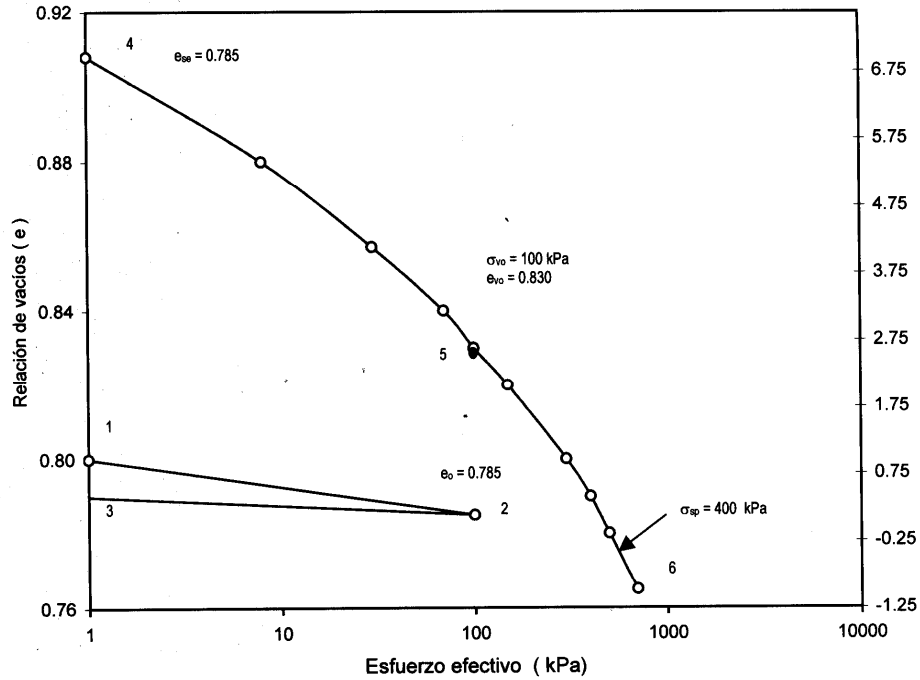


Fig. II.3. Curva de compresibilidad obtenida en la prueba de expansión libre (ASTM D-4546, 1988).

La expansión libre bajo la presión de contacto aplicada (§ II.4.1) con respecto a la relación de vacíos inicial, se obtiene con la ecuación:

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{e_{se} - e_o}{1 + e_o} \times 100 = \left( \frac{\rho_{do}}{\rho_{dse}} - 1 \right) \times 100 \quad (II.9)$$

donde:  $\Delta h$  es el cambio en la altura del espécimen (L);  $h_o$  es la altura inicial del espécimen (L);  $e_{se}$  corresponde a la relación de vacíos alcanzada cuando la expansión libre se ha estabilizado ( $L^3 L^{-3}$ );  $e_o$  es la relación de vacíos inicial ( $L^3 L^{-3}$ );  $\rho_{do}$  es la masa volumétrica seca para una relación de vacíos  $e_o$  ( $M L^{-3}$ ) y  $\rho_{dse}$  es la masa volumétrica seca del espécimen correspondiente a la relación de vacíos  $e_{se}$  ( $M L^{-3}$ ).



Ejemplo: la expansión libre determinada a partir de los datos de la figura II.3 sería:

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{0.908 - .785}{1 + 0.785} \times 100 = 6.9 \%$$

También es posible determinar la presión de expansión con la curva de compresibilidad obtenida con esta prueba, a partir de la relación de vacíos inicial, a la correspondiente relación de vacíos para una presión vertical dada con la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{e - e_o}{1 + e_o} \times 100 = \left( \frac{\rho_{do}}{\rho_d} - 1 \right) \times 100 \quad (II.10)$$

donde: e es la relación de vacíos para la presión vertical considerada ( $L^3 L^{-3}$ ) y  $\rho_d$  es la masa volumétrica seca para la relación de vacíos e ( $M L^{-3}$ ).

Ejemplo: la expansión correspondiente para una presión vertical igual a 100 kPa es (fig. II.3):

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{0.830 - .785}{1 + 0.785} \times 100 = 2.5 \%$$

La presión de expansión corresponde a la presión con la cual la muestra vuelve a su relación de vacíos inicial, en este caso la presión de expansión libre es igual a 400 kPa (ver figura II.3).

#### **II.4.2. EXPANSIÓN BAJO CARGA**

Este método de prueba para determinar la presión de expansión, consiste en aplicar una sobrecarga superior a 1 kPa a la muestra antes de saturarla en el consolidómetro. La magnitud de la presión aplicada usualmente es equivalente a la presión de sobrecarga *in situ*, o la presión que transmitirá la estructura que se pretende construir o ambas, pero puede variar dependiendo de la aplicación que vaya a darse a los resultados de la prueba. Una vez que se aplica la presión vertical y la muestra se deforma, se agrega agua al espécimen, pudiendo ocurrir dos cosas: a) la muestra aumenta de volumen o b) la muestra se contrae; el comportamiento anterior depende del potencial de expansión de la arcilla y de la magnitud de la sobrecarga aplicada. Las deformaciones de la muestra bajo la presión aplicada se registran hasta que el movimiento es despreciable. La prueba deberá continuar con cargas adicionales y subsecuentes descargas como lo establece una prueba de consolidación convencional ( 5, 10, 20, 40, 80, etc. kPa). En la figura II.4 se presenta una curva de compresibilidad obtenida con este método de prueba. Con este método de prueba puede medirse: a) el porcentaje de expansión o asentamiento para una presión vertical aplicada, que puede ser la sobrecarga de campo u otra, incluso la presión de expansión y b) la presión de expansión.

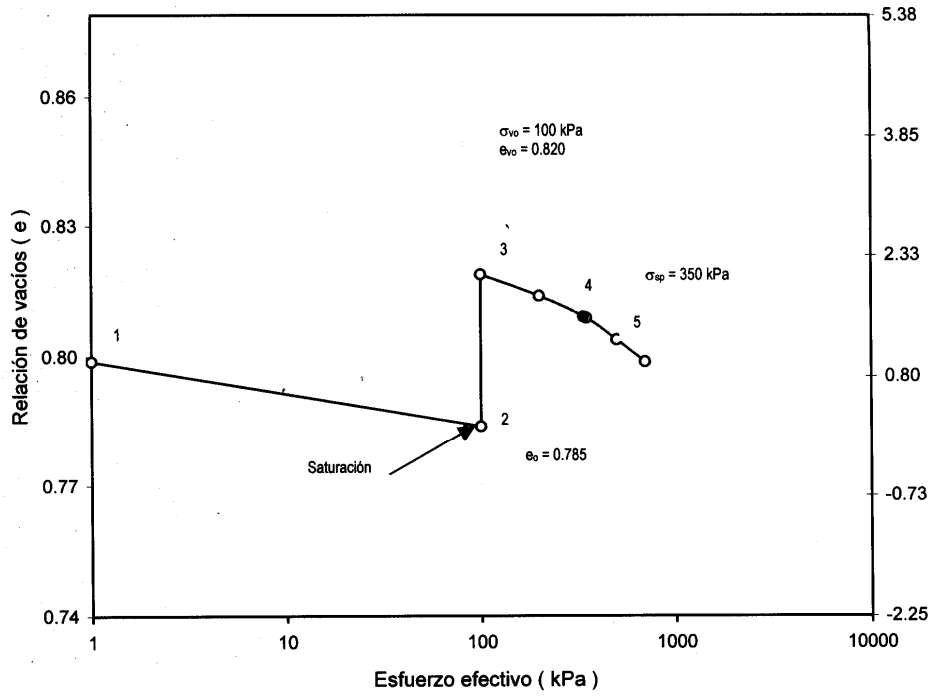


Fig. II.4. Curva de compresibilidad obtenida en la prueba de expansión bajo carga (ASTM D - 4546, 1985).

El porcentaje de expansión bajo la presión vertical aplicada ( $\sigma_{vo}$ ), con respecto a la relación de vacíos inicial ( $e_o$ ), se determina como sigue:

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{e_{vo} - e_o}{1 + e_o} \times 100 = \left( \frac{\rho_{dvo}}{\rho_{dvo}} - 1 \right) \times 100 \quad (II.11)$$

donde:  $e_{vo}$  es la relación de vacíos después de que la expansión se ha estabilizado ( $L^3 L^{-3}$ ) y  $\rho_{dvo}$  es la masa volumétrica seca para una relación de vacíos  $e_{vo}$  ( $M L^{-3}$ ).



Ejemplo: el porcentaje de expansión determinado a partir de los datos de la figura II.4 para una presión vertical  $\sigma_{vo}$  igual a 100 kPa es:

$$\frac{\Delta h}{h_0} \times 100 = \frac{0.820 - .785}{1 + 0.785} \times 100 = 2.0 \%$$

### II.4.3. EXPANSIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

Básicamente esta prueba consiste en mantener al espécimen de prueba a su altura inicial constante, lo anterior se logra ajustando la presión vertical sobre el espécimen después de haber sido inundado con agua. El método de prueba consiste en aplicar una sobrecarga inicial  $\sigma_1$  equivalente a la presión vertical estimada *in situ* o la presión de expansión a los cinco minutos después de haber colocado la presión de contacto. Se toma la lectura de deformación a los cinco minutos de haber colocado la presión inicial e inmediatamente se inunda la muestra con agua; para mantener a la muestra a su altura inicial, se aplican incrementos de carga. Las variaciones de las lecturas de deformación del espécimen con el tiempo deben mantenerse preferiblemente dentro de 0.005 mm y no más de 0.010 mm. Cuando el espécimen no presente tendencia a seguir expandiendo, se aplican incrementos de carga sucesivos en la misma forma a la descrita en el método de prueba "A" (II.4.1) descrito anteriormente, los incrementos de carga deben ser suficientes para definir el punto de máxima curvatura de la curva de consolidación y determinar la pendiente del tramo virgen de la curva de compresibilidad; la muestra se descarga en la forma especificada en la norma ASTM D - 2435. En la figura II.5 se muestra esquemáticamente una curva de compresibilidad típica obtenida con este método de prueba. Con este método se puede determinar: a) la presión de expansión; b) la carga de preconsolidación y c) el porcentaje de expansión o asentamiento dentro del rango de presiones verticales aplicados.

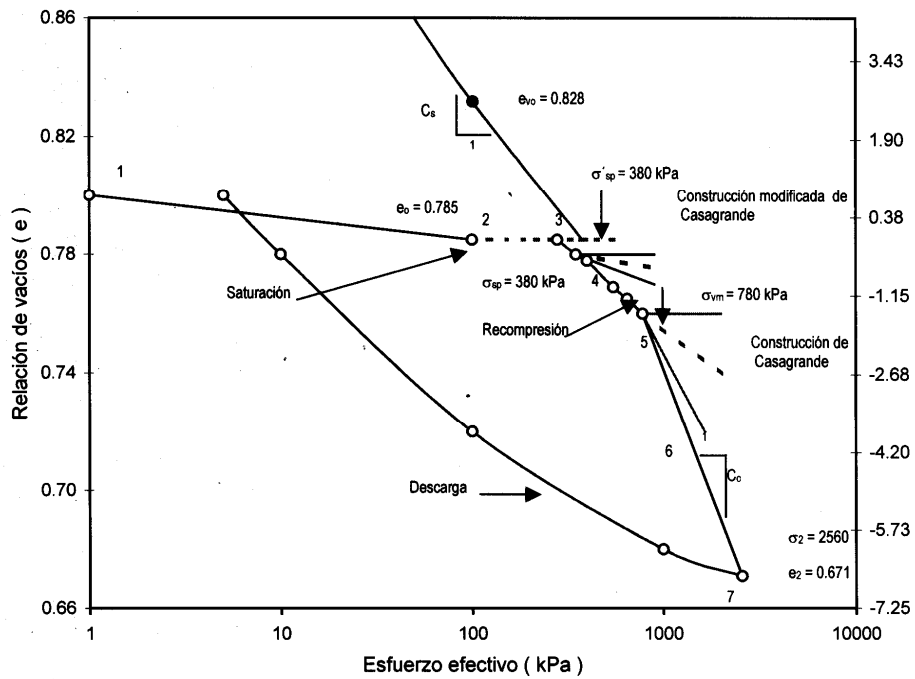


Fig. II.5. Curva de compresibilidad obtenida en la prueba de expansión a volumen constante (ASTM D - 4546, 1985).

La presión de expansión  $\sigma_{sp}$  (punto 3 de la figura II.5) debe corregirse cuando la curva de compresibilidad quebra sobre el tramo de recompresión usando un procedimiento de construcción adecuado; dicho procedimiento consiste en localizar el punto de máxima curvatura (punto 4 de la figura II.5), trazar por él una línea horizontal, una tangente y una bisectriz, prolongar la línea de recompresión hasta intersectar la bisectriz, dicha intersección corresponde a la presión de expansión corregida  $\sigma'_{sp}$ . La alteración del suelo y el proceso de ajuste de presiones verticales puede ocasionar alguna expansión, lo que reduce la máxima presión de expansión observada.

Para calcular el porcentaje de expansión que ocurriría en la muestra si estuviera sometida a cierta presión vertical inicial ( $\sigma_i$ ), distinta a la aplicada en la ejecución de la prueba, es necesario dibujar una curva paralela al tramo de descarga o de recompresión de la curva de compresibilidad obtenida a través del punto correspondiente a la presión de expansión corregido,  $\sigma'_{sp}$  a la relación de vacíos inicial  $e_0$  (punto 3 de la figura II.5), en este caso el porcentaje de expansión se calcula en la forma siguiente:

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{e_{vo} - e_o}{1 + e_o} \times 100 \quad (II.12)$$

donde:  $e_{vo}$  es la relación de vacíos correspondiente a cierta presión vertical aplicada, distinta a la de la prueba ( $L^3 l^{-3}$ ), los demás parámetros ya fueron definidos en la sección anterior.

Ejemplo: el porcentaje de expansión determinado a partir de los datos de la figura II.5 para una presión vertical  $\sigma_{vo}$  igual a 100 kPa es:

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{0.828 - .785}{1 + 0.785} \times 100 = 2.4 \%$$

El porcentaje de asentamiento puede calcularse con base a la relación de vacíos  $e_2$  que es menor a la correspondiente a la de la presión de expansión como sigue:

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{e_2 - e_o}{1 + e_o} \times 100 \quad (II.13)$$

Ejemplo: el porcentaje de asentamiento para una presión vertical  $\sigma_2$  igual a 2560 kPa determinado a partir de los datos de la figura II.5 es:

$$\frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{0.671 - .785}{1 + 0.785} \times 100 = -6.4 \%$$

## II.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS CAMBIOS DE VOLUMEN DE SUELOS ARCILLOSOS

El cambio volumétrico de los suelos expansivos está influido por diferentes factores, entre los principales se encuentran: a) contenido de agua inicial; b) masa volumétrica seca inicial; c) estado inicial de esfuerzos y sus cambios posteriores; d) estructura del suelo y e) cantidad y tipo de arcilla presente. A continuación se describe la influencia de cada uno de los factores antes mencionados.

**Contenido de agua inicial.** Ante una misma fuente de saturación, los mismos suelos no se comportan de igual manera, ya que la expansión y/o contracción depende adicionalmente de su contenido de agua 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 húmedo, la contracción máxima posible será equivalente a la diferencia entre la humedad real y el límite de contracción.

En cuanto a la expansión, los suelos expanden en mayor medida cuando están más secos, ya que durante el proceso de saturación se libera una mayor succión en suelos secos, lo que trae como consecuencia una mayor recuperación elástica; los suelos húmedos, en cambio expanden menos. La figura II.6. muestra el cambio del porcentaje de expansión para un suelo con masa volumétrica seca inicial constante y contenido de agua inicial variable, los resultados indican una mayor expansión a menor contenido de agua inicial.

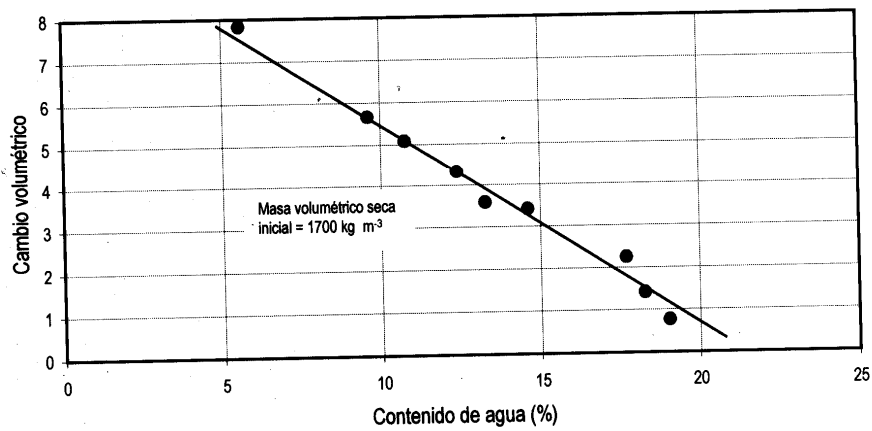


Figura II.6. Porcentaje de expansión producido al variar el contenido de agua inicial para un espécimen con masa volumétrica seca inicial constante (Fredlund & Rahardjo 1993).

**Masa volumétrica seca inicial.** La masa volumétrica de un suelo expansivo tiene gran influencia en sus cambios volumétricos. En un suelo denso las partículas de arcilla forman una masa más compacta, con poros de menor diámetro que los de un suelo suelto; por consiguiente, cuando estos vacíos se humedecen, si la cantidad de agua que puede adsorber tiene espacio suficiente en los poros para ser alojada, la expansión no se genera, de lo contrario, si el espacio existente en los poros no es suficiente, la expansión se llevará a cabo, siendo éstas de mayor magnitud cuanto más compacto esté el suelo (González, 1998). En la figura II.7. se muestra la variación del porcentaje de expansión para un suelo con masa volumétrica seca inicial variable y contenido de agua inicial constante, los resultados indican una mayor expansión a mayor masa volumétrica seca inicial.

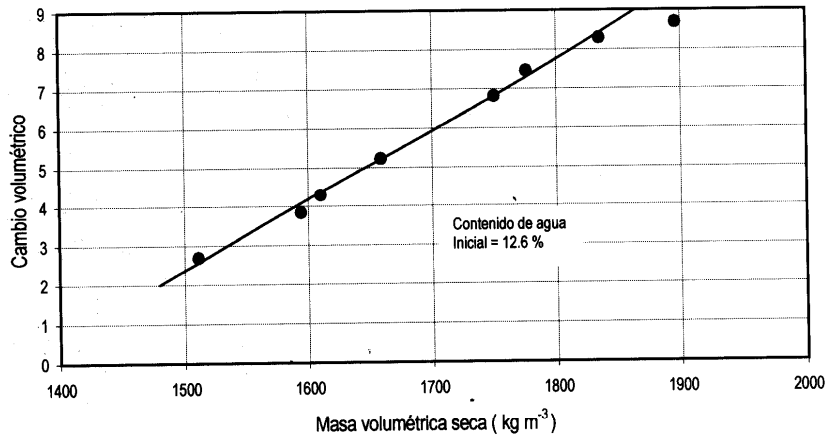


Figura II.7. Porcentaje de expansión producido al variar la masa volumétrica seca inicial para un espécimen con contenido de agua inicial constante (Fredlund & Rahardj, 1993).

**Estado inicial de esfuerzos y sus cambios posteriores.** La magnitud de la carga aplicada a un suelo influye en el comportamiento expansivo de éste bajo condiciones particulares de masa volumétrica y contenido de agua. Si la carga equilibra las fuerzas internas la expansión se reduce o inclusive se evita, si resultan inferiores a las necesarias para evitar el cambio de volumen del suelo por saturación, se expandirá hasta que las fuerzas externas se equilibren con las internas. En forma semejante, al reducir la carga que actúa sobre una arcilla expansiva saturada al hacer una excavación, se crea un desequilibrio por disminución de la carga por peso propio actuante sobre el suelo, y como consecuencia de ello, la arcilla se expande hasta que se equilibran las fuerzas externas con las internas, durante este proceso la arcilla absorberá agua. Los cambios en el estado de esfuerzos del suelo ocurren durante depósitos geológicos, erosión y cambios ambientales resultado de precipitaciones, evaporación y evapotranspiración (González, 1998).

**Cantidad y tipo de arcilla presente en el suelo.** El contenido de partículas de arcilla en una masa de suelo y su plasticidad, determina si éste es cohesivo. La capacidad de adsorción y su respectivo cambio de volumen dependen del tipo y cantidad de minerales arcillosos, en especial, la montmorilonita es la que ofrece mayor cantidad de expansión (Lambe & Whitman, 1984).

**La estructura del suelo.** Un mismo suelo con diferente estructura tiene distinto comportamiento mecánico, por ejemplo, un suelo floculado tiene mayor resistencia, menor compresibilidad y una mayor permeabilidad que el mismo suelo con la misma relación de vacíos pero en estado disperso (Juárez & Rico, 1996). La mayor resistencia y menor compresibilidad de un suelo con estructura floculada, se debe a la atracción entre las partículas y a la mayor dificultad de desplazarlas cuando se encuentren en una disposición

desordenada. La mayor permeabilidad del suelo floculado se debe a la existencia de canales más grandes para el paso del agua. Mientras que en un elemento floculado y otro disperso con la misma relación de vacíos tienen aproximadamente la misma sección libre para el paso del agua, en el suelo floculado los canales de flujo son menores en número pero mayores en diámetro. Así pues, existe una menor resistencia al paso del agua a través de un suelo floculado que en un suelo disperso (González, 1998).

## **II.6. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO**

Es bien conocido la gran inversión que se hace para reparar los daños que ocasionan los suelos expansivos a distintas obras de ingeniería (Fredlund & Rahardjo, 1993). La manera tradicional de cuantificar los cambios de volumen y la presión de expansión generada por este tipo de suelos, ha sido estudiar su comportamiento macroscópicamente a través de pruebas de laboratorio. Sin embargo, estas pruebas distan de reproducir fielmente las condiciones de humedad que el suelo tendrá en campo y más difícil aún, predecir sus variaciones con el tiempo. Por otra parte, el desarrollo de teorías de la Mecánica de Suelos no saturados que permitan comprender el comportamiento expansivo de los suelos no ha sido satisfactorio, además de que no se cuenta con un único equipo de medición adecuado para medir los parámetros que necesitan medirse en todo el rango de humedad en que puede producirse la expansión de un suelo arcilloso (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Por otro lado, se ha tratado de evitar o disminuir el cambio de volumen de los suelos expansivos, usando métodos de estabilización con distintos agentes estabilizadores, o bien tratando de dar las condiciones de humedad o masa volumétrica a estos suelos de tal forma de que no sufran grandes deformaciones por expansión.

Como se desprende de lo tratado en este capítulo, los métodos de prueba descritos tienen desventajas que hay que tomar en cuenta a la hora de interpretar los resultados que de ellos se obtienen para su aplicación práctica. Por tanto, es importante cuantificar los resultados con cada uno de los métodos de prueba normalizados, con la finalidad de normar criterio ingenieril.