

EXPANSION DE LOS SUELOS ARCILLOSOS PARCIALMENTE SATURADOS

Seguda Parte

RESUMEN

En la primera parte del artículo se presentaron las variaciones típicas con la profundidad del contenido de humedad y de los movimientos verticales que exhiben los depósitos de suelos arcillosos expuestos al aire libre y a las condiciones ambientales, y de otros que han sido cubiertos por obras de ingeniería. De acuerdo con esto se establecieron perfiles característicos del contenido de humedad y de los esfuerzos efectivos en los suelos ubicados encima de la tabla de agua.

En esta segunda parte del artículo se hace una breve descripción de los factores que influyen sobre la expansividad de los suelos arcillosos parcialmente saturados, y se indican las soluciones, más adecuadas, para evitar los problemas causados por la expansión de los suelos arcillosos cuando sobre ellos se construyen estructuras livianas.

El artículo completo fue presentado en el Primer Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y de Estructuras, evento que se realizó en Santafé de Bogotá entre el 4 y el 6 de Septiembre de 1991.

INTRODUCCION

FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA EXPANSIVIDAD

Un breve análisis de los diferentes factores y mecanismos relacionados con los procesos de hinchamiento de un suelo arcilloso debe ayudarnos a establecer los mejores métodos de diseño, tratamiento y construcción. Sin embargo, aunque se han efectuado numerosas investigaciones durante los últimos treinta años, tal vez debido a la complejidad del problema, se

LISANDRO BELTRÁN MORENO

Ing. Civil, M.I.C., M.Sc., DIC,

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia.

ha encontrado dificultad para desarrollar modelos satisfactorios que permitan predecir el comportamiento expansivo. Los diferentes factores que lo afectan son más fácilmente entendibles; la clasificación general que de ellos presentada por Donaldson (1969) parece ser la más completa. Considera que los factores se pueden agrupar en tres clases, cada una de las cuales definen: la expansividad potencial del suelo, sus características físicas y la situación ambiental. Los dos primeros grupos determinan la capacidad expansiva del suelo, mientras que el último define la expansión real, la que se presenta en la naturaleza.

Expansividad potencial del suelo

La capacidad expansiva de un suelo arcilloso está determinada en buena medida por su composición química y mineralógica. Se acepta, que los factores que influyen sobre la expansividad potencial de un suelo arcilloso se encuentran descritos y asociados con el tipo de minerales y la cantidad relativa de cada uno de ellos, el hidróxido de entrecapas, el tipo de cationes absorbidos y, finalmente, la composición del agua de poros. Beltrán (1991-a) presentó una descripción de cada uno de estos factores. A continuación se presenta una breve mención sobre la influencia del tipo de minerales.

Tipos de minerales

Se ha encontrado una gran cantidad de daños causados por el comportamiento expansivo en suelos que contienen los minerales arcillosos montmorillonita y vermiculita. No obstante, según Mitchell (1973), hay casos en los que se han producido considerable expansión y presión de expansión en suelos ilíticos y caoliníticos. Lambe y Whitman (1959), presentan resultados indicando que la capacidad de expansión disminuye en el orden, montmorillonita, illita, atapulguita, caolinita. Esta diferenciación, que ha sido reconocida por muchos años, se debe en parte a la deficiencia en carga eléctrica por unidad de cada mineral, siendo las mayores expansiones para aproximadamente una deficiencia de carga por celda. Se puede indicar así mismo, que el tipo de minerales arcillosos que forma un suelo puede explicar, por lo menos en parte, sus características expansivas. Aceptando esta conclusión algunos autores han señalado (e.g Holtz, 1959; Mielenz y King, 1951; Warkentin, 1958) que si en un depósito de suelo se encuentra una cantidad relativamente grande de minerales arcillosos altamente expansivos, existe un alto grado de cambio potencial de volumen en todo el depósito.

El estado físico del suelo

Considerando tanto los casos de arcilla inalterada y compactada, los subfactores incluidos en el estado físico del suelo que influyen sobre su comportamiento expansivo son los siguientes:

1. Contenido inicial de humedad y tensión en el agua de poros.
2. Densidad seca (peso unitario seco) inicial.
3. Estructura y fábrica del suelo.
4. La historia de esfuerzos.
5. Presión de confinamiento y cambio de volumen.
6. Permeabilidad y el tiempo permitido para la expansión.
7. Espesor del perfil del suelo.
8. Temperatura.

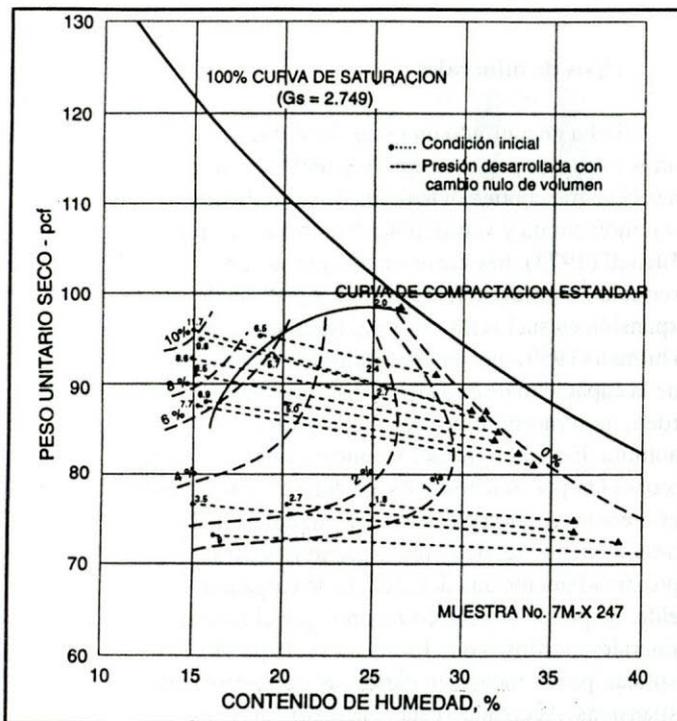


Figura 10. Expansión en función de la humedad y el peso unitario seco, bajo 1 psi (Holtz et al, 1954).

Se debe señalar que la explicación independiente de estos factores no siempre es posible, dado que la mayoría de ellos se encuentran tan inter-relacionados que la variación de uno afecta a los otros. Beltrán (1991-b) describió la importancia de cada uno de estos factores. Enseguida se realiza una breve explicación de los dos primeros, que son los más importantes.

Contenido inicial de humedad y succión en el agua de poros

La gran influencia de la succión en el agua de poros en el proceso de expansión se reconoce desde hace bastante tiempo. Terzaghi (1931) señaló que la causa básica de la expansión es la deficiencia en la presión del agua.

Los valores del contenido de humedad inicial, grado inicial de saturación y la deficiencia en la presión del agua están muy bien interrelacionados. En la Figura N° 10, presentada por Holtz y Gibbs (1954), se ilustra este hecho. Se puede observar que si compactamos dos muestras de un suelo arcilloso con la misma densidad pero una de ellas en el lado seco de la curva y la otra en el lado húmedo, la primera, con los valores más bajos de humedad y grado de saturación, absorbe más agua y se expande más que la segunda. Felt (1953), Ladd (1960), y, Seed y Chan (1959) encontraron resultados similares.

Peso unitario seco inicial

Este factor está muy relacionado con el anterior, ya que el contenido de humedad, el contenido de sólidos y el peso específico (Gs) del material, definen todos juntos el peso unitario seco.

En un suelo denso se encuentran más partículas de arcilla por unidad de volumen que un suelo suelto, y por lo tanto, cuando saturamos muestras de estos dos se presenta un mayor

cambio que en el primero. Holtz y Gibbs (1954) y Holtz (1959), como se muestra en la Figuras N° 10 y 11, dibujaron curvas de isoexpansión sobre relaciones peso unitario seco-contenido de humedad, concluyendo que las arcillas se expanden muy poco cuando se compactan a bajas densidades y altos contenidos de humedad. Otras conclusiones que se pueden obtener de estas gráficas son: 1) Un aumento en la humedad de compactación para cualquier densidad produce disminuciones en la cantidad de expansión y en la presión de expansión y, 2) Un aumento en el peso unitario produce normalmente un incremento en el cambio de volumen, pero también puede causar su disminución, dependiendo de los rangos de contenido de humedad y peso unitario.

Como se indicó antes, la suma de los factores que definen la expansividad potencial y el estado físico del suelo conforman la capacidad expansiva del suelo. Al parecer los parámetros que ejercen mayor influencia sobre la capacidad expansiva del suelo son el contenido inicial de humedad, w_n , el límite líquido, w_l , la actividad, A_c , (definida por Skempton, 1953), y el peso unitario seco, γ_{do} . En la Figura No. 12 se presenta una correlación entre la presión de expansión de Lambe y una expresión que incluye los parámetros anteriores, para los suelos encontrados por la **Investigación de Arcillas Expansivas en Colombia** en una estación de observación situada entre Girardot y Tocaima. Esta expresión da un coeficiente de correlación (r) de 0.94, y es la siguiente:

$$P.E. (Kg/cm^2) = -5.39 + 0.559 * 10^{IL5} - 0.738 * A_c + 3.258 * \gamma_{do} \quad (1)$$

donde,

$$IL5 = (w_l - w_o) / 100,$$

$$A_c = IP / (\% < 2 \text{ micrones}),$$

γ_{do} = peso unitario seco, en tons/m³,

IP = Índice de plasticidad, en porcentaje.

FACTORES AMBIENTALES

Solo muy recientemente se ha tratado de conceder la suficiente importancia a los factores

ambientales en el proceso de cambio de volumen de un suelo arcilloso. Ellos ejercen una gran influencia, dado que proporcionan las condiciones para que se produzca el cambio de volumen. Donaldson (1969) estableció de una manera muy adecuada el papel de los factores ambientales, señalando que los principales son los climáticos fundamentalmente la precipitación y la evaporación. Estos dos últimos se encuentran muy bien relacionados en el proceso de cambio de volumen con la humedad existente en el suelo en el momento de iniciar la construcción. Otros factores que pueden tener gran incidencia en circunstancias especiales son las fuentes locales de humedecimiento (filtración de tuberías, sumideros, tanques subterráneos) o de secado (caldearas, hornos, tuberías de vapor), producidas por las edificación misma o sus instalaciones.

El clima

Según De Brujin (1961), cualquier suelo potencialmente expansivo tiene unos límites mínimos y máximos de contenido de humedad entre los cuales se presentan las expansiones y contracciones, y consecuentemente, fuera de este intervalo, los cambios de humedad no producen variaciones en el volumen del suelo.

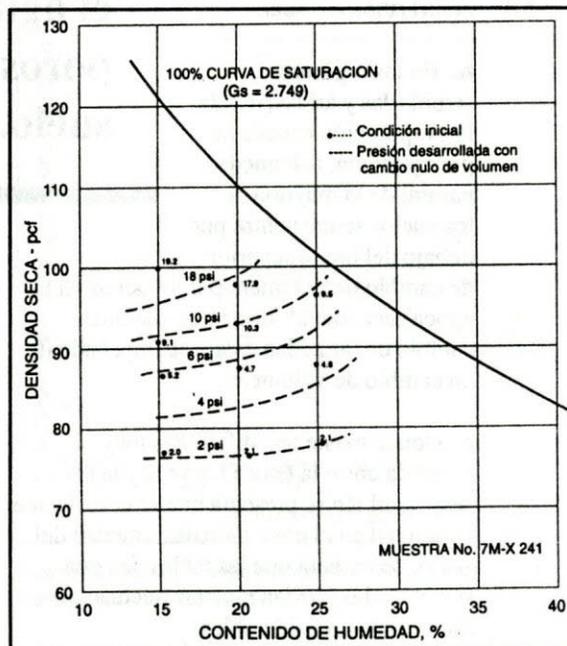


Figura 11. Presión de expansión en función del peso unitario seco y la humedad (Holtz 1959).

Donaldson (1969) explica la influencia del clima sobre el contenido de humedad y los cambios de volumen, así como la importancia de la relación precipitación vrs. expansión, tanto en cantidad como en la distribución con el tiempo, mencionando los siguientes cuatro casos:

- a. Si la precipitación anual sobre el sitio excede la evaporación anual, se presentan climas húmedos, con suelos húmedos y normalmente tablas de agua superficiales. Bajo estas condiciones el contenido de humedad de los suelos se encontraría por encima del límite superior de cambio de volumen, y, los problemas de movimientos se producirían sólo durante épocas de sequía, o debidos al desecamiento por árboles, casos en los cuales se presenta la contracción del suelo.
- b. En las regiones semiáridas y áridas, donde la evaporación excede la precipitación, la humedad natural de la mayoría de los suelos se encuentra por debajo del límite superior de cambio de volumen, por lo menos en la época seca, de tal forma que cualquier cambio de humedad estará acompañado de un cambio de volumen.
- c. Donde existe una diferencia muy marcada entre la época húmeda y la época seca, también se presenta una gran variación estacional en el contenido de humedad del suelo, de manera que las tablas de agua superficiales puedan mostrar fluctuaciones estacionales considerables.
- d. En áreas desérticas, donde la evaporación es mucho más alta que la

precipitación, y las tablas de agua se encuentran muy profundas, o simplemente no existen, el contenido de humedad del suelo permanece virtualmente constante durante todo el año.

Se han realizado algunos intentos para conciliar las características climáticas directamente con los movimientos y la tensión existente en el agua de poros del suelo.

Cuando colocamos una estructura sobre el suelo, las relaciones naturales cambian, complicando aún más el problema. Donaldson explica mediante los siguientes ejemplos las variaciones que se producen:

- a. En climas con marcadas diferencias estacionales entre las épocas húmeda y seca continuará existiendo una definida fluctuación estacional en el contenido de humedad, especialmente debajo de las paredes exteriores de las estructuras, y posiblemente se presentarán algunas pequeñas expansiones acumuladas en el centro del área construida.
- b. Donde la precipitación y la evaporación máximas coinciden, se presenta una expansión acumulada principalmente durante el período húmedo, cuando la humedad emigra debajo de la edificación, siendo retenida allí durante la estación seca. Se pueden esperar ligeros movimientos estacionales, particularmente cerca de los bordes de las edificaciones y un hinchamiento debajo del centro.
- c. En las regiones semiáridas, donde la precipitación es muy baja y la tabla de agua muy profunda, la humedad en el suelo debajo del área cubierta permanece invariable, debido a que no hay humedad disponible que se desplace, y en consecuencia, no se presentan movimientos significativos.

Se han realizado algunos intentos para conciliar las características climáticas directamente con los movimientos y la tensión existente en el agua de poros del suelo. Russam y Coleman (1961) por ejemplo, propusieron relaciones entre el «Índice de Humedad de Thornthwaite» y el contenido de humedad de la subrasante (aplicándolas al diseño de pavimentos principalmente), con el propósito de estimar los valores originales de la succión de equilibrio en el suelo. Los mismos autores propusieron tres categorías principales de suelos para estimar la humedad de equilibrio a que se llega debajo del pavimento, considerando la posición y fluctuaciones de la tabla de agua antes de la construcción, el clima y las propiedades plásticas del suelo. Hamilton (1963) obtuvo una expresión para predecir el movimiento del suelo, aplicable con éxito a ciertos casos, utilizando parámetros climáticos. De otra parte, Gromko (1974) menciona que la Oficina del Clima de Estados Unidos (United States Weather Bureau) asignó un parámetro climático, **Cw**, a todas las regiones de los Estados Unidos, encontrando «la incidencia desfavorable de las condiciones climáticas con los problemas relacionados con los suelos expansivos». El parámetro mencionado, **Cw**, se estimó considerando las siguientes cinco variables meteorológicas:

- a. Precipitación anual
- b. Grado de uniformidad y distribución de la precipitación
- c. Número de ocurrencias de la precipitación
- d. Duración de cada ocurrencia
- e. Cantidad de precipitación durante cada ocurrencia.

Cadena y Palomino (1982) aplicaron el índice de precipitación efectiva (p-e) de Thornthwaite a los datos meteorológicos disponibles en nuestro país, de precipitación, evaporación y temperatura, y obtuvieron el mapa preliminar del índice de precipitación efectiva de Colombia que se muestra en la Figura No. 13.

Aunque las líneas de igual índice se trazaron teniendo en cuenta la orografía, la falta de información no permitió precisar muchas regiones. No obstante, concluyeron que las siguientes poblaciones, en las que se encontraron estaciones meteorológicas con los datos necesarios y los registros suficientes, poseen las características de un clima semiárido, con un índice p-e menor de 60, el cual combinado con suelos arcillosos superficiales puede inducir serios daños a las construcciones livianas:

Cúcuta (Norte de Santander), Soledad (Atlántico), Santa Catalina (Bolívar), Mosquera (Cundinamarca), Flandes (Tolima), Tuluá (Valle del Cauca), Palmira (Valle del Cauca), Corozal (Sucre), Riohacha (Guajira), Ciénaga de Oro (Córdoba), Santa Marta (Magdalena), Bucaramanga (Santander)

Como conclusión, puede afirmarse que el clima es el factor decisivo en los cambios de volumen que se produzcan en el suelo, ya que en últimas es el que limita y define la magnitud de expansividad potencial que pueda presentarse, así como la frecuencia de los movimientos.

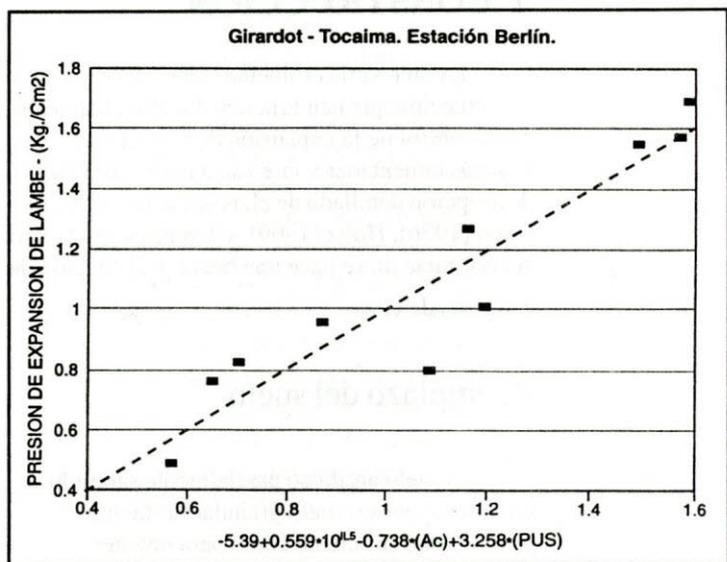


Figura 12. Presión de expansión en función de la capacidad expansiva del suelo.

Fuentes locales de humedecimiento y secado

Estos factores, que en muchas ocasiones se consideran de menor importancia, pueden producir movimientos diferenciales críticos si durante su presencia el suelo se encuentra en las condiciones apropiadas. Algunas veces son causados por la tendencia general al hinchamiento de los movimientos acumulados y movimientos estacionales. Entre ellos se incluyen, la humedad suministrada por una tubería rota, la infiltración a partir de pozos o de acumulaciones de agua superficial contra las paredes de la edificación, la desecación debida a la succión de las raíces de los árboles, la contracción producida por tuberías de conducción calientes o por el calor irradiado por maquinaria, y aún, el regadío de los jardines. A todos estos factores se les debe prestar suficiente atención, especialmente si se prevé la posibilidad de altos cambios de volumen, o en el caso del diseño de estructuras rígidas pequeñas.

SOLUCIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCION

Existen varias soluciones de diseño y construcción que han funcionado adecuadamente en el control de la expansión de estructuras livianas cimentadas sobre zapatas y losas. Una descripción detallada de ellas se encuentra en Chen (1976), Holtz (1969), y Jennings (sin fecha). A continuación se hace una breve presentación de cada una de ellas.

Reemplazo del suelo

El suelo arcilloso parcialmente saturado se reemplaza por un suelo granular hasta una profundidad suficiente como para obtener expansiones dentro de valores tolerables. Este procedimiento es en muchos casos la solución más fácil, pero puede ser muy costosa cuando no se encuentra el suelo granular cerca del sitio, y cuando el espesor del suelo que se debe reemplazar es grande. En estos casos puede

resultar más conveniente efectuar la estabilización mecánica y/o química del suelo arcilloso.

Inundación

Puesto que se produce un aumento en el contenido de humedad del suelo después de cubrir su superficie con la estructura, es aconsejable predecir la humedad de equilibrio y tratar de suministrársela al suelo antes de efectuar la construcción. Esta humedad de equilibrio se encuentra más cerca del perfil de humedad correspondiente a la época de invierno, y por tanto también es recomendable iniciar la construcción al final del período de lluvias. La solución de inundar el terreno se ha empleado exitosamente en algunos casos, pero debe estimarse su duración, el procedimiento y el momento en que debe suspenderse la inundación. No funciona bien cuando después de la inundación el suelo se ve sometido nuevamente a los ciclos de secado y humedecimiento causados por el clima, razón por la cual debe complementarse con el uso de membranas impermeables laterales o verticales, colocadas a lo largo del perímetro de la estructura. Blight (1965) recomienda la determinación de un coeficiente de expansión del suelo en el laboratorio para determinar el espaciamiento más adecuado entre las perforaciones, a través de las cuales se propicia el humedecimiento rápido y completo del suelo expandible. Se ha encontrado exitosa la introducción de una mezcla suave de agua con cal, ya que la cal aparentemente vuelve más permeable el suelo remoldeado alrededor de la perforación, facilitando el humedecimiento.

El tiempo que dura el proceso de inundación puede ser un factor indeseable desde el punto de vista de la construcción, ya que puede tomar varios meses.

Inundación y estabilización

Cuando se incrementa el contenido de humedad de un depósito de suelo por inundación, se produce disminución en su resistencia al corte y se presentan asentamientos de la estructura por

consolidación. Estos efectos se controlan estabilizando con cal la capa de suelo que se satura durante el proceso de inundación, situada cerca de la superficie.

Control de la humedad-densidad

En la construcción de terraplenes, rellenos y durante el mejoramiento de la subrasante de las carreteras, se pueden controlar los cambios de volumen compactando el suelo con contenidos de humedad relativamente altos y densidades relativamente bajas, siguiendo procedimientos recomendados por la estabilización mecánica. Generalmente se recomienda suministrar al suelo contenidos de humedad superiores del óptimo, de 2 a 4%, y densidades de entre 90 y 92 % de la máxima obtenida con el ensayo de compactación Proctor Estandar. Esta solución también tiene la desventaja de producir una disminución en la resistencia al corte del suelo y hacerlo susceptible a los ciclos de humedecimiento y secado inducidos por el clima.

Estabilización del suelo

Con el fin de reducir el límite líquido y la plasticidad del suelo, y de esta manera su expansividad potencial, se han empleado numerosos productos, muchos de ellos recomendados por la estabilización química. Los más utilizados han sido, la cal, el cemento, el asfalto, y una amplia gama de químicos, obteniéndose variados grados de éxito. El uso de la cal y del cemento ha predominado en este tipo de estabilización debido a que además de reducir las características de cambio de volumen del suelo, le proporcionan una resistencia adicional por la acción cementante y reducen rápidamente su plasticidad. Para que su efecto sea máximo es necesario garantizar que todo el suelo tratado esté en contacto con el agente estabilizante en la proporción adecuada, efecto que se logra únicamente removiendo la capa de suelo que se desea tratar, disgregándolo en forma completa el material, mezclándolo y compactándolo con las densidades recomendadas por el laboratorio.

Métodos estructurales

Las soluciones que se pueden adoptar están relacionadas con la magnitud de los movimientos expansivos que se prevean con el estudio de suelos del sitio. De acuerdo con Jennings (sin fecha), para el caso de viviendas las soluciones se pueden agrupar en los siguientes casos :

- a. Cuando se anticipa una expansión pequeña, del orden de 0,5 cm., como en el caso de estratos de suelo delgados, no se deben tomar precauciones especiales, puesto que se pueden tolerar agrietamientos pequeños.
- b. Cuando se estiman expansiones entre 0,5 y 1,0 cm. se debe reforzar la estructura introduciéndole acero en cuantía nominal en las paredes. De esta manera, se logra también alguna redistribución de las presiones de contacto de la fundación.
- c. Cuando el suelo arcilloso que se puede expandir se encuentra cerca de la superficie y su espesor es menor de 2,0 m., se puede remover completamente, facilitando así la construcción de un sótano, o reemplazándolo con suelo estable.
- d. Si la expansión calculada está entre 1,0 y 3,0 cm., se construyen estructuras articuladas, con juntas que permitan movimientos de 1,0 cm. Entre las juntas de construcción se levantan secciones articuladas suficientemente fuertes para producir una redistribución importante de las presiones de contacto. Se recomienda que los diseños se realicen considerando la mitad de los momentos y fuerzas de cortante calculados asumiendo un apoyo puntual en el centro de la sección, o con apoyos puntuales en los extremos.
- e. Cuando la expansión estimada es grande, mayor de 3,0 cm., se recomienda el uso de pilotes con pata de campana. Además, los pisos no deben quedar en contacto con el suelo, y el espacio entre ellos debe ser de 1 orden de 2 a 3 veces la expansión

anticipada, y todos los elementos que conectan el suelo con la estructura, como las escaleras, deben tener juntas de expansión positivas. En muchos casos puede resultar conveniente emplear las paredes como elementos estructurales para unir los pilotes.

Debido a la rotura sufrida por muchos pilotes, causada por la fricción negativa que el suelo en expansión les aplica, se recomienda emplear pilotes con camisa, en los que se funde **in situ** la parte de la campana, y luego se introduce dentro del concreto fresco de la campana un pilote prefabricado con acero de enlace sobresaliente. Una vez que se endurece el concreto se retiran las formaletas que mantenían centrado el pilote dentro de la perforación y se procede a llenar ésta con ceniza.

El metro superior se llena con suelo que se compacta para evitar la entrada de agua en la ceniza. Pilotes de este tipo son relativamente económicos hasta profundidades de 10 m., debido a que después de ella se incrementa notoriamente la cantidad de acero de refuerzo, el cual debe ser continuo pues el pilote puede trabajar a tensión en algún momento.

En todos los casos en los que se encuentre posible el fenómeno de la expansión, se deben colocar tuberías flexibles para los servicios de acueducto y alcantarillado, con el fin de que puedan absorber movimientos sin que se produzca su rotura, y por lo tanto, acumulaciones de agua. Se pueden utilizar cintas asfálticas para unir las tuberías del acueducto, y se deben adoptar medidas especiales en los puntos de entrada al terreno de las tuberías del alcantarillado.

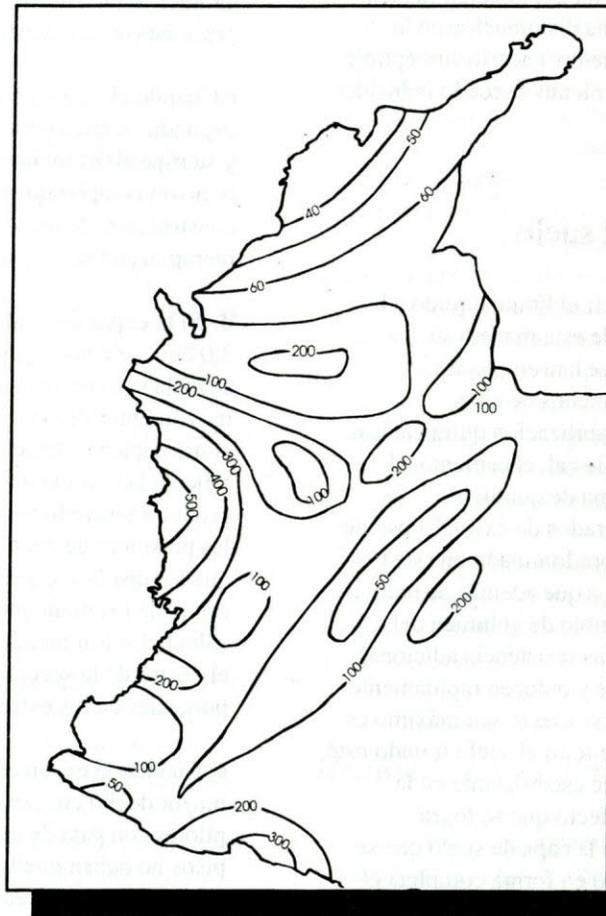


Figura 13. Índice del P-E en Colombia. cadena y Palomino, 1982.

En todos los casos en los que se encuentre posible el fenómeno de la expansión, se deben colocar tuberías flexibles para los servicios de acueducto y alcantarillado, con el fin de que puedan absorber movimientos sin que se produzca su rotura, y por lo tanto, acumulaciones de agua. Se pueden utilizar cintas asfálticas para unir las tuberías del acueducto, y se deben adoptar medidas especiales en los puntos de entrada al terreno de las tuberías del alcantarillado.

Como un colorario, debe prestársele atención a las actividades de jardinería, y se debe evitar la siembra de árboles que requieran de altas cantidades de agua para su alimentación, como los urapanes, eucaliptos, acacias y pinos, cerca de las viviendas, carreteras u otras obras de ingeniería. También se debe evitar la siembra de flores cerca de las paredes de las viviendas.

CONCLUSIONES

1. En un depósito de suelo arcilloso expuesto al aire libre se producen cambios en el contenido de humedad y de volumen, en la zona cercana a la superficie, debidos a las variaciones del clima y a las fuerzas que éste aplica sobre el suelo.

2. El comportamiento expansivo de un suelo arcilloso, que se produce durante y después de terminada la construcción de una obra, es el que debe esperarse de cualquier depósito de suelo arcilloso parcialmente saturado. El cubrimiento del suelo desequilibra las condiciones de humedad del suelo, disminuyendo las fuerzas naturales causadas por la evaporación y la transpiración, creando gradientes de humedad de succión o de tensión en el agua (de un valor inicial alto en el sitio descubierto, a un valor bajo en el sitio cubierto). Este gradiente induce un flujo de agua hacia la edificación, causando las mayores acumulación y cambio de volumen en la zona central, donde la interferencia con las condiciones originales es más grande.

3. En los depósitos de suelos arcillosos parcialmente saturados, las expansiones o hinchamientos responden a las disminuciones que se producen en los esfuerzos efectivos, cuando se

alteran las condiciones naturales con el cubrimiento del terreno.

4. Los factores mineralógicos y químicos definen la expansividad potencial del suelo, los que sumados a los factores del estado físico del suelo definen su capacidad expansiva. Los parámetros que mayor influencia tienen sobre dicha capacidad expansiva son en su orden: el contenido de humedad inicial y su posición relativa con el límite líquido, la actividad, y el peso unitario seco.

5. Las condiciones impuestas por el medio ambiente, especialmente por el clima, definen y limitan la expansión real que puede presentar un depósito de suelo. Pueden existir muchos casos en los que, a pesar de que el suelo posea altos contenidos de montmorillonita y vermiculita, y que por lo tanto tenga un potencial expansivo alto, en la realidad nunca presente cambios de volumen, debido a que las condiciones ambientales no le producen cambios de humedad, y así mismo, no permiten que se presenten cambios de volumen.

6. De acuerdo con la experiencia obtenida por diferentes investigadores, las condiciones impuestas por los climas semiáridos, en los que se presentan divisiones muy bien definidas entre los períodos secos y lluviosos, son las que propician los mayores hinchamientos y expansiones de los suelos arcillosos, cuando se los cubre con obras de ingeniería civil.

7. Existen varias soluciones para controlar la expansión de los suelos arcillosos parcialmente saturados, las cuales pueden combinarse para obtener los mejores resultados. De ellas, el humedecimiento previo del suelo para llevarlo a una humedad cercana a la del equilibrio y el control posterior de los cambios de humedad inducidos por el clima, pueden ser las más económicas y eficientes para la cimentación de edificaciones livianas.

RECONOCIMIENTOS

Este artículo hace parte de la **Investigación de Arcillas Expansivas en Colombia**, que la Universidad Nacional de Colombia realizó con financiación de **COLCIENCIAS**.

REFERENCIAS

- 1- BELTRÁN M., L., (1991-a). **Factores que afectan el comportamiento expansivo de un suelo arcilloso. Expansión potencial y ambiente.** Octavo Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, Universidad del Cauca, Popayán.
- 2- BELTRÁN M., L., (1991-b). **Factores que afectan el comportamiento expansivo de un suelo arcilloso. Las características físicas del suelo.** Octavo Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, Universidad del Cauca, Popayán.
- 3- BLIGHT, G.E., and, DE WET, J.A., (1965). **The acceleration of heave by flooding.** Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Butterworths, Sydney, pp. 89 a 92.
- 4- CADENA V., R.E., y, PALOMINO M., J.E., (1982). **Propiedades geotécnicas de suelos expansivos colombianos. Proyecto de Grado.** Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 338 p.
- 5- CHEN, F.H., (1976). **Foundations on Expansive Soils.** Elsevier, The Netherlands, 275 pp.
- 6- DE BRUIJN, C.M.A., (1961). **Swelling characteristics of a transported soil profile at Leeuhof, Vereeniging, (Transvaal).** Proc. 5th ICSM, Paris, Vol. 1, pp. 43-49.
- 7- DONALDSON, G.W., (1969). **The occurrence of problems of heave and the factors affecting its nature.** Proceedings 2nd IRECECS, Texas, pp. 25-36.
- 8- FELT, E.J., (1953). **Influence of soil volume change and vegetation on highway engineering.** Circular, University of Colorado Experiment Station, High. Series, N 26, pp. 52-76.
- 9- GROMKO, G.J., (1974). **Review of expansive clays.** Proceedings ASCE, JGED, Vol. 100, No. GT6, pp. 667-687.
- 10- HAMILTON, J.J., (1963). **Volume changes in undisturbed clay profiles in Western Canada.** Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 27-42.
- 11- HOLTZ, W.G., and GIBBS, H.J., (1954). **Engineering properties of expansive clays.** Proceedings ASCE, Vol. 80, Separate No 516.
- 12- HOLTZ, W.G., (1959). **Expansive clays - properties and problems.** Quart. Colorado School of Mines, Vol. 54, No. 4, pp. 89-117.
- 13- HOLTZ, W.G., (1969). **Volume change in expansive clay soils and control by lime treatment.** 2nd. International Research Conference on Expansive Soils, Texas.
- 14- JENNINGS, J.E., (1953), **The Heaving of Buildings on Desiccated Clay,** Proceedings 3rd. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol I, pp. 390-396.
- 15- JENNINGS, J.E. and KERRICH, J.E., (1962), **The Heaving of Buildings and the Associated Economic Consequences, with Particular Reference to the Orange Free State Goldfields,** Transactions, South African Inst. of Civil Engineers, July.
- 16- JENNINGS, J.E., (sin fecha). **The theory and practice of construction on partly saturated soils as applied to South African conditions.** National Build. Research Inst., South African Council for Scientific and Industrial Research.
- 17- KASSIFF, G., ETKIN, E. and ZEITLEN, J.G., (1967). **Failure Mechanism of Canal Lining in Expansive Clays,** Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 96, N° CM 1, pp. 95-118.
- 18- KASSIFF, G., LIVNEH, M. AND WISEMAN, G., (1969), **Pavements on Expansive Clays,** Jerusalem Academic Press, Jerusalem.
- 19- KRAYNSKI, L.M., (1967), **A Review Paper on Expansive Clay Soils,** Woodward-Clyde & Assoc., Portland Cement Assoc., Vol. 1.
- 20- LADD, C.C., (1960). **Mechanisms of swelling by compacted clay.** Bulletin Highway Research Board, No. 245, pp. 10-26.
- 21- LAMBE, T.W., and, WHITMAN, R.V., (1959). **The role of effective stress in the behaviour of expansive soils.** Quarterly Colorado School of Mines, Vol. 54, No. 4, pp. 33-60.
- 22- MIELENZ, R.C., and, KING, M.E., (1951). **Identification of clay minerals by staining tests.** Proc. ASTM, Vol. 51, pp. 1213-1233.
- 23- MITCHELL, J.K., (1973). **Influences of mineralogy and pore solution chemistry on the swelling and stability of clays.** Proceedings 3rd ICES, Haifa, pp. 11-24.
- 24- RUIZ P., D., y, BUITRAGO R., L.H., (1991). **Características geomecánicas de algunas arcillas expansivas presentes en la Sabana de Bogotá.** Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- 25- RUSSAM, K., and, COLEMAN, J.D., (1961). **The effect of climatic factors on subgrade moisture conditions.** Geotechnique, Vol. 11, No. 1, pp. 22-28.
- 26- SEED, H.B., and, CHAN, C.K., (1957). **Structure and strength characteristics of compacted clays.** Proceedings ASCE, JSMED, Vol. 85, No. SM5, Part. 1, pp. 87-128.
- 27- SKEMPTON, A.W., (1953). **The colloidal activity of clays.** 3rd. Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol 1.
- 28- TERZAGHI, K., (1931). **The influence of elasticity and permeability on the swelling of two-phase systems.** Colloid Chemistry (J. Alexander, Ed.), Vol. III, Chemical Catalog Co., New York, pp. 65-88.
- 29- WARD, W.H., (1953), **Soil Movement and Weather,** Proceedings 3rd. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Vol. 1, pp. 477-482.
- 30- WARKENTIN, B.P., (1958). **The mechanisms of volume change in clays.** Proc., 12th Canadian Soil Mechanics Conference, Ottawa.
- 31- WILLIAMS, A.A.B., (1965). **The Deformation of Roads Resulting from Moisture Changes in Expansive Soils in South Africa,** Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Butterworths, Australia, pp. 143-155.