

# Expansión de los suelos arcillosos parcialmente saturados

## Primera parte

**LISANDRO BELTRÁN MORENO**

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

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia.

**RESUMEN.** En esta primera parte del artículo se presentan 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, a las condiciones ambientales, y de otros que han sido cubiertos por obras de ingeniería. De acuerdo con ellos se establecen perfiles característicos del contenido de humedad, y de los esfuerzos efectivos en los suelos ubicados encima de la tabla de agua.

En la segunda parte del artículo se hará una breve descripción de los factores que influyen sobre la expansividad de los suelos arcillosos, y se indicarán 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 fué presentado en el Primer Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y de Estructuras, evento que se se realizó en Santafé de Bogotá entre el 4 y el 6 de Septiembre de 1991.

### INTRODUCCIÓN

Los depósitos de suelos arcillosos parcialmente saturados sometidos a determinadas condiciones ambientales pueden presentar hinchamientos y expansiones, en cambio de las disminuciones de volumen debidas a la consolidación, cuando sobre ellos se levantan las obras de ingeniería. Si estas obras no han sido diseñadas y construidas para resistir dicho tipo de movimientos, se presenta su agrietamiento y rotura, que en casos extremos pueden conducirlos al colapso. Además del conocimiento de los factores que influyen en la expansión, es importante tener alguna idea sobre el mecanismo que sigue el proceso de expansión. El procedimiento más adecuado para establecer este mecanismo debe utilizar observaciones y mediciones en el terreno, en el suelo expansivo y bajo las estructuras. Beltrán (1991-c) presentó una

descripción detallada del mecanismo de la expansión; a continuación se hace un resumen de los aspectos más relevantes.

### COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS ARCILLOSOS EXPUESTOS AL AIRE LIBRE

#### 1. DISTRIBUCIÓN DE LA HUMEDAD

Diferentes autores han presentado perfiles de la variación de la humedad con el tiempo, considerando condiciones ambientales y geotécnicas diferentes. Kassiff et al (1969) muestran en la Figura N° 1 la variación del contenido de humedad con la profundidad observada en cercanías de Afulah, Israel, entre Septiembre de 1956 y Julio de 1957, en la que además se incluyó el efecto de la irrigación al final del invierno. La inundación

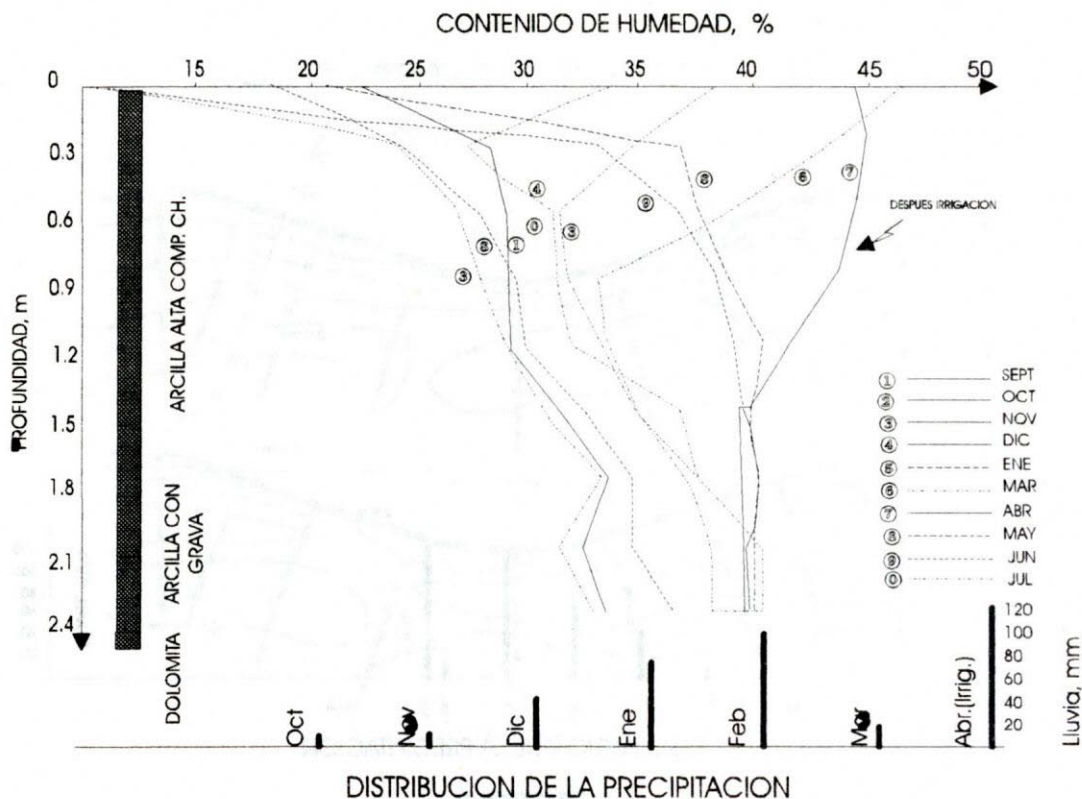


FIGURA N° 1.

Distribución estacional de la humedad en un depósito de arcilla expuesta, afectada también por irrigación, situado cerca de Afulah, Israel. (Kassiff et al, 1969).

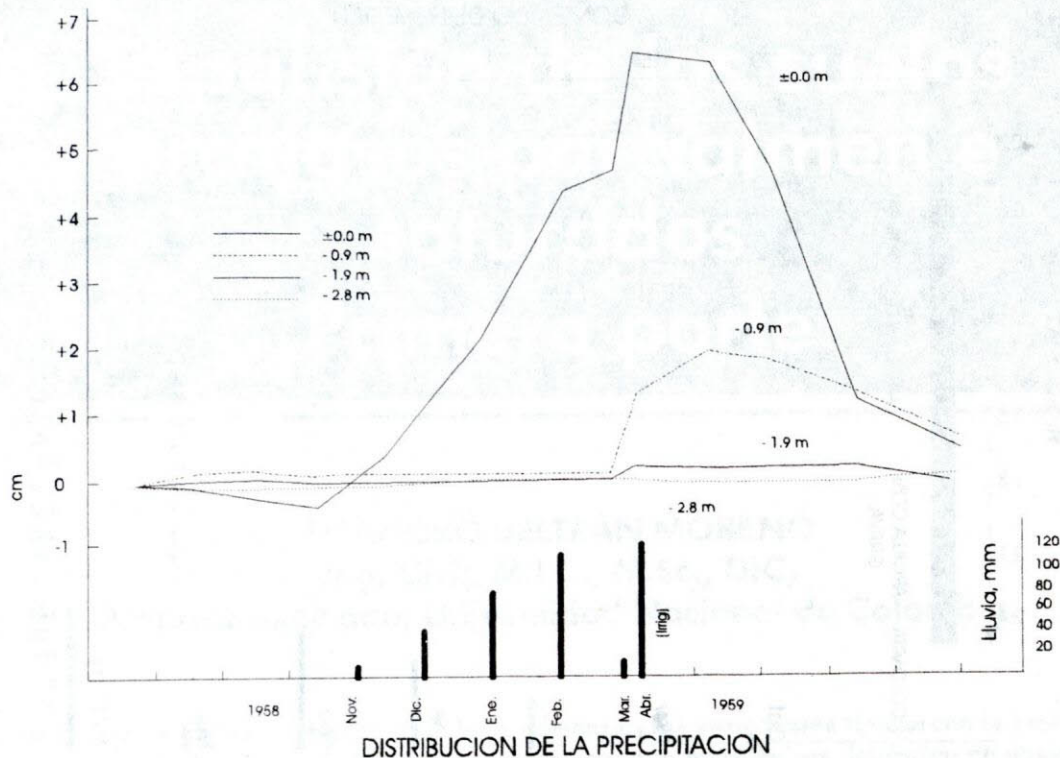
aumenta las variaciones en el contenido de la humedad con la profundidad, ya que a 2 m. es el orden de 8-10%. Los autores resaltan la importancia de estos factores, pues se ha encontrado que muchas edificaciones cimentadas sobre arcillas potencialmente expansivas se comportan satisfactoriamente, a pesar de los efectos estacionales, pero resultan agrietadas por los cambios originados por factores externos, como el riego de jardines y el rompimiento de tuberías de agua.

Como una conclusión de diferentes perfiles encontrados, Kassiff et al (1969), indican que se puede dividir el perfil de humedad del suelo en una zona superior, «activa», hasta una profundidad entre 2.0 m. y 2.5 m. , y una zona inferior, «inactiva», con cambios muy pequeños durante todo el año. Sin embargo, debido a que las características de humedad de un perfil dependen de factores tales como la distribución de la evaporación y precipitación, la plasticidad, la permeabilidad, y la profundidad del nivel freático regional, se deben esperar variaciones notables en diferentes sitios del mundo.

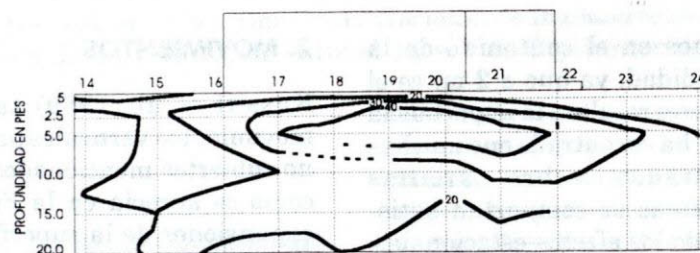
## 2. MOVIMIENTOS

Kassiff et al (1969) también observaron los movimientos verticales presentados por los perfiles no cubiertos mencionados en el numeral anterior, como se aprecia en la Figura N° 2, encontrando expansiones de la superficie cercanos a los 7 cm., las cuales disminuyen con la profundidad. La causa del mayor desplazamiento superficial es sin duda el mayor humedecimiento que se produce en la capa superior del suelo, por lluvia y por irrigación.

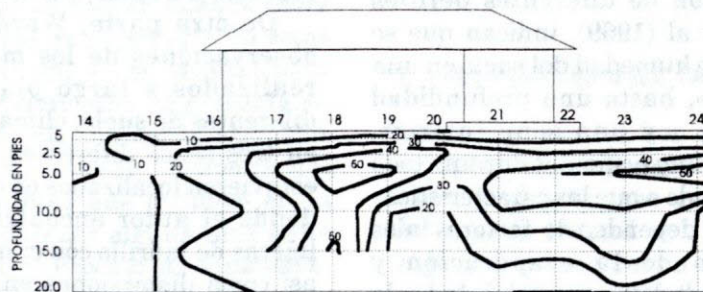
De otra parte, Ward (1953) informó sobre observaciones de los movimientos del terreno realizados a largo plazo y bajo condiciones diferentes de suelo, clima, vegetación y cobertura, en tres sitios diferentes. Los lugares estudiados estuvieron localizados en el Sur-Este de Inglaterra, donde el autor encontró daños en estructuras ligeras de ladrillo con cimentaciones superficiales, así como distorsiones en carreteras y canales de drenaje. En estos tres casos, los movimientos en la superficie alcanzaron un máximo de 6.0 cm., mientras que a una profundidad de 0.60 m. se



**FIGURA 2.**  
Movimientos verticales estacionales de una arcilla expuesta, afectada también por irrigación, cerca de Afulah, Israel. (Kassiff et al, 1969)

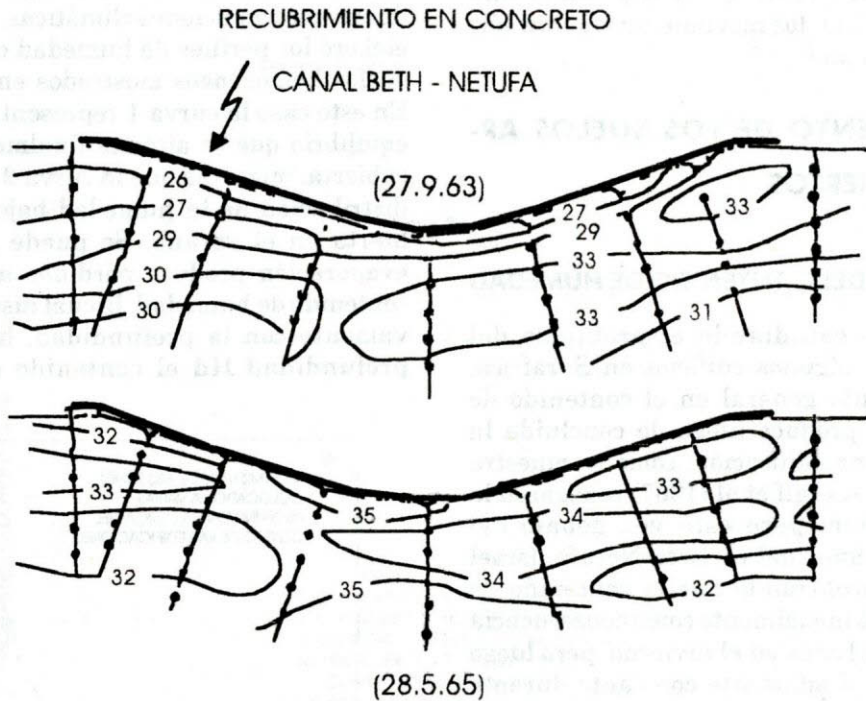


a) Contenido de humedad en el suelo, 8 Marzo 1951

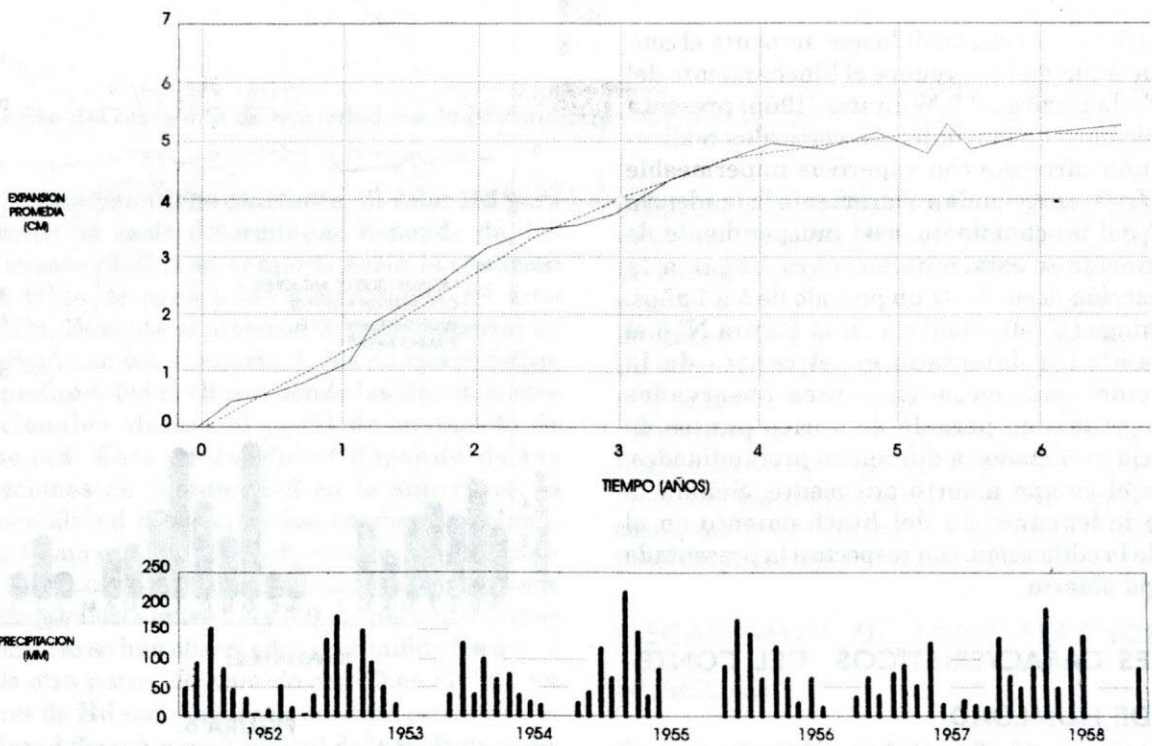


b) Contenido de humedad en el suelo, 7 Enero 1952

**FIGURA 3.**  
Humedad en el suelo de fundación de un edificio experimental, sobre la línea N-S. (Jennings, 1953).



**FIGURA N° 4.**  
Líneas de igual humedad debajo del recubrimiento de concreto en el canal Beth Netufa, Israel. (Kassiff et al, 1967).



**FIGURA 5.** Levantamiento promedio de una carretera en Leevhof. (Williams, 1965).

observaron valores entre 2.0 y 3.0 cm. A una profundidad de 1.5 m. los movimientos fueron sólo del orden de 2 a 3 mm.

## COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS ARCILLOSOS CUBIERTOS

### 1. DISTRIBUCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Jennings (1953) estudiando el problema del levantamiento de algunos edificios en Suráfrica, observó el aumento general en el contenido de humedad que se produce luego de concluida la construcción de una edificación, como se muestra en la Figura N° 3. Kassiff et al (1967) realizaron la misma observación, pero esta vez debajo del recubrimiento de un canal en Beth-Netufa, Israel (Figura N° 4), encontrando que el contenido de humedad aumentó inicialmente como consecuencia del cubrimiento del área en el invierno, pero luego permaneció aproximadamente constante durante el resto del año. Esta última observación se comprobó dentro de un período de dos años, contados a partir del recubrimiento del canal.

### 2. MOVIMIENTOS

Como es de suponer, a medida que aumenta el contenido de humedad se produce el hinchamiento del suelo. En la Figura N° 5, Williams (1965) presenta las mediciones de movimientos verticales realizados en una carretera con superficie impermeable de Suráfrica, apreciándose claramente la tendencia general del hinchamiento, casi independiente de las variaciones estacionales, para llegar a la estabilización después de un período de 5 a 7 años.

Jennings (1953), compara en la Figura N° 6 el levantamiento detectado en el centro de la edificación, con los movimientos observados durante el mismo período de varios puntos de referencia localizados a diferentes profundidades, pero en el campo abierto adyacente. Señala la notable independencia del hinchamiento en el centro de la edificación, con respecto a la presentada en campo abierto.

### PERFILES CARACTERÍSTICOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

A partir de las observaciones de los perfiles de humedad de los suelos que presentan movimientos

expansivos, se han establecido perfiles típicos para diferentes condiciones climáticas. Kraynski (1967) elaboró los perfiles de humedad característicos de suelos homogéneos mostrados en la Figura N° 7. En este caso la curva 1 representa la humedad de equilibrio que se alcanza finalmente bajo el área cubierta, mientras que la curva 2 corresponde a la distribución de la humedad bajo un área descubierta en el verano. Se puede apreciar que la evaporación produce pérdidas apreciables en el contenido de humedad, la cual disminuye progresivamente con la profundidad, hasta que a una profundidad  $H_d$  el contenido de humedad de

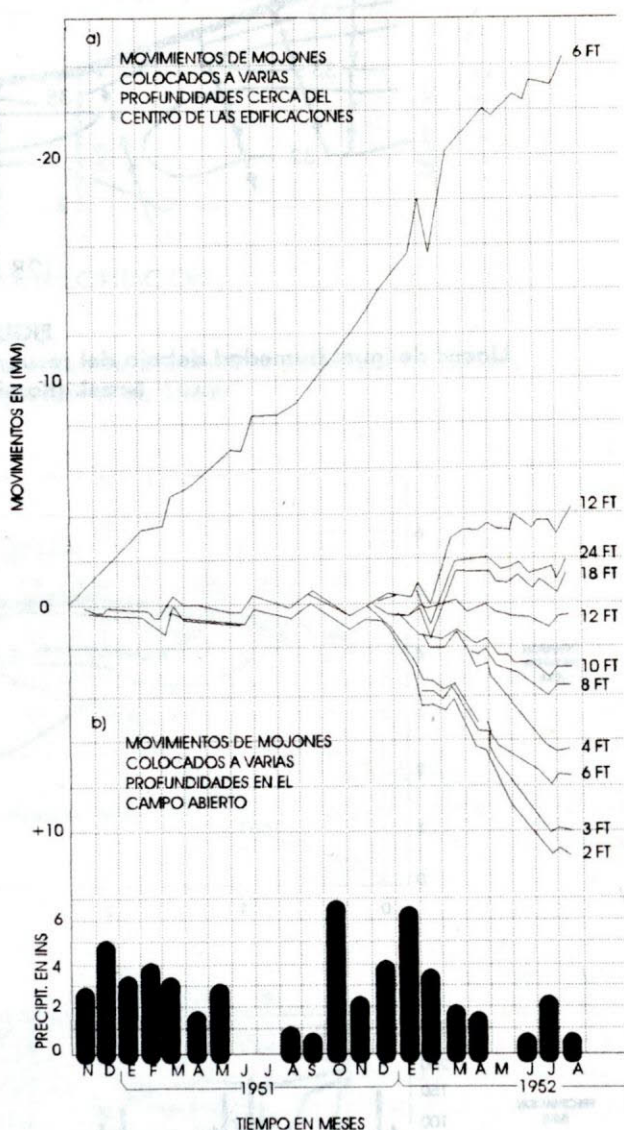


FIGURA 6.  
Los efectos del cubrimiento sobre los movimientos verticales medidos a varias profundidades (Jennings, 1953).

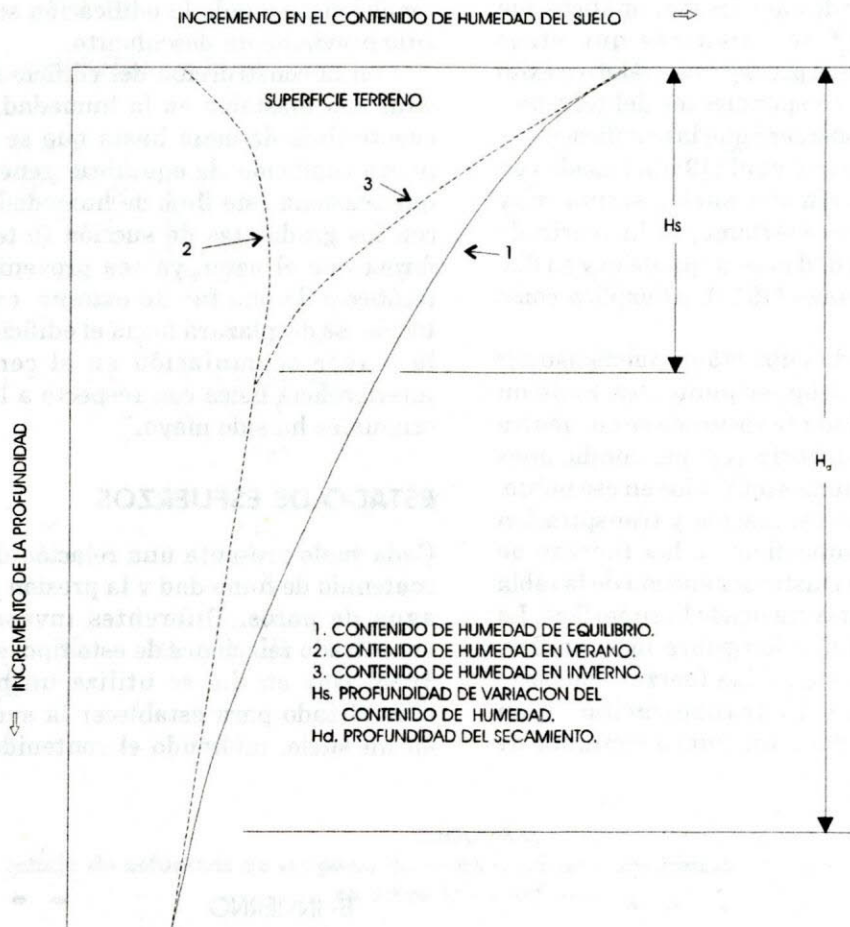


FIGURA 7.

Variación del contenido de humedad con la profundidad debajo de la superficie del terreno. (Kraynski, 1967).

equilibrio se mantiene constante. El valor  $H_d$  para un perfil de suelo determinado depende de, las condiciones climáticas, el tipo de suelo, la situación de la tabla de agua y las dimensiones del área cubierta. Durante el invierno la parte superior de la curva 2 cambia a la curva 3. Así mismo se define una profundidad  $H_s$  hasta donde las fluctuaciones estacionales afectan el perfil de contenido de humedad. Esta profundidad depende de las variaciones de la humedad en la superficie, la permeabilidad del suelo y las condiciones climáticas. Como se explicó anteriormente, la profundidad de la capa activa, definida por  $H_s$ , puede alcanzar valores entre 2.5 y 3.0 m., pero en algunas situaciones se han observados profundidades de 7.5 m. De otra parte, de acuerdo con Chen (1976), los valores de  $H_d$  son difíciles de conocer, pero su valor máximo debe ser la profundidad de la tabla de agua.

Como conclusión de las explicaciones dadas, se puede decir que en la naturaleza se produce un

desplazamiento desde el perfil de humedad existente antes de cubrir el suelo, representado por las curvas 2 y 3 de la Figura N° 7, hacia el perfil de equilibrio dado por la curva 1. Como consecuencia, durante el desplazamiento de los perfiles se origina un aumento importante del contenido de humedad (dependiendo de los valores  $H_s$  y  $H_d$ ) y, correspondientemente, en cualquier caso se detectan hinchamientos o levantamientos. Obviamente, los movimientos finales serán más bajos en aquellos casos donde el cubrimiento del área se realiza al final del invierno.

## MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE HUMEDAD

Se han expuesto varias teorías que tratan de explicar la forma como se produce el aumento de humedad bajo un área cubierta. Algunas de ellas

se expresan por medio de modelos matemáticos que continúan mejorándose, mientras que otras presentan fórmulas para predecir con relativo éxito los levantamientos correspondientes del terreno.

Jennings (1953) consideró que las explicaciones suministradas por Croney et al (1950), basadas en la humedad de succión del suelo, serían muy prometedoras. Esta es ciertamente la teoría de transferencia de humedad más aceptada hoy en día. En palabras de Jennings (1953), se explica como sigue:

"(...). En un sitio descubierto se puede asumir que la humedad de cualquier punto dentro de un perfil de suelo parcialmente saturado se encuentra generalmente en equilibrio con las condiciones impuestas por los esfuerzos aplicados en ese punto, las fuerzas debidas a evaporación y transpiración aplicadas sobre la superficie, y las fuerzas de capilaridad que deben existir por encima de la tabla de agua, y a cierta distancia desde la superficie. La presencia de una edificación sobre la superficie elimina casi completamente las fuerzas causadas por la evaporación y la transpiración, y en consecuencia, se produce un nuevo conjunto de

condiciones cuando la edificación se levanta en el sitio previamente descubierto.

Con la construcción del edificio se origina una situación inestable en la humedad, con el consecuente flujo de agua hasta que se establece una nueva condición de equilibrio general. La fuerza que ocasiona este flujo de humedad está asociada con los gradientes de succión (o tensión), de tal forma que el agua, ya sea proveniente del nivel freático o de una fuente externa, como la precipitación, se desplazará hacia el edificio, produciendo la mayor acumulación en el centro donde la interferencia física con respecto a las condiciones originales ha sido mayor".

### ESTADO DE ESFUERZOS

Cada suelo presenta una relación directa entre el contenido de humedad y la presión existente en el agua de poros. Diferentes investigadores han encontrado relaciones de este tipo, e.g. Black et al, 1958. Hoy en día se utiliza un papel de filtro normalizado para establecer la succión existente en un suelo, midiendo el contenido de humedad

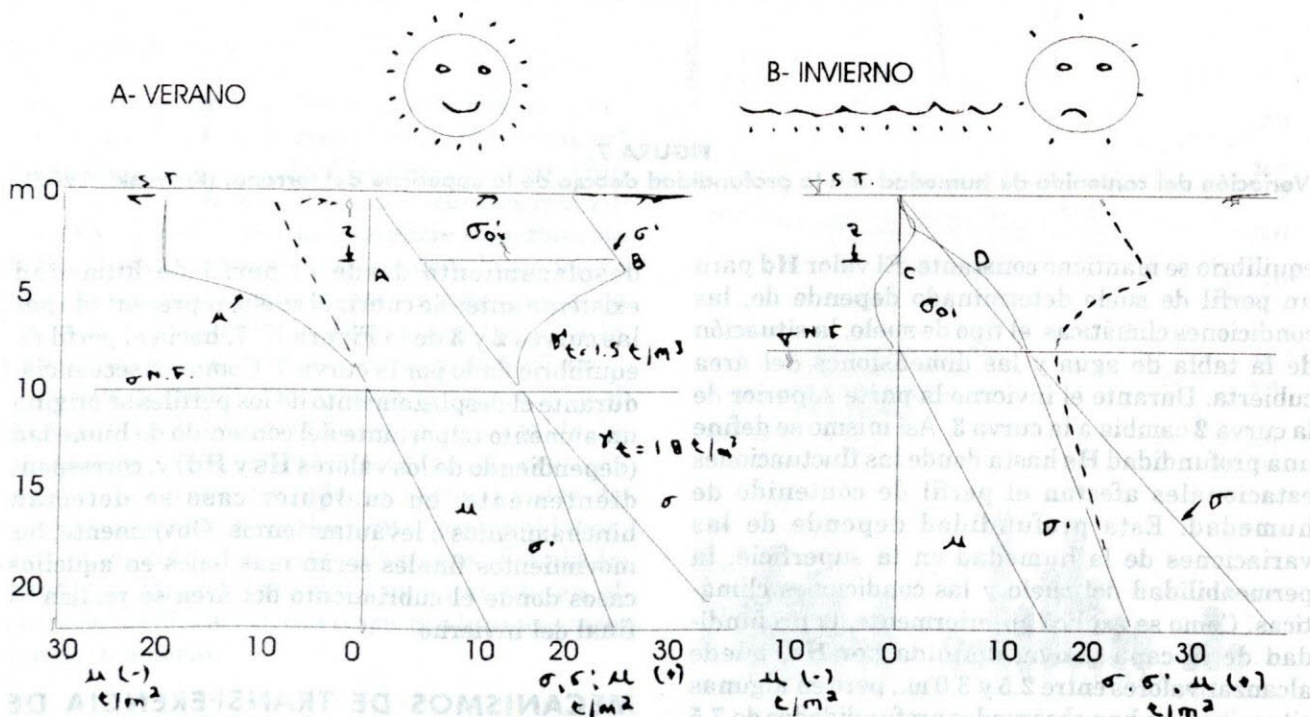


FIGURA 8.

Estado de esfuerzos en un perfil homogéneo de suelo arcilloso parcialmente saturado, en verano y en invierno.

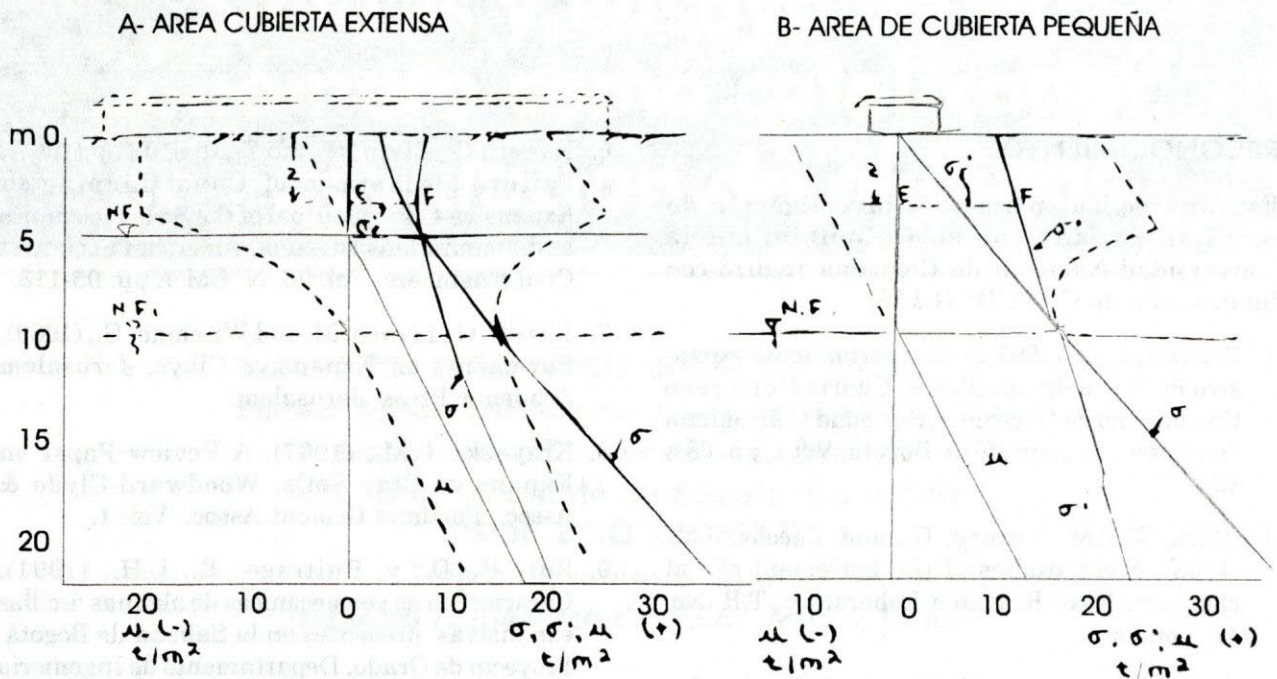


FIGURA 9.

Cambios en el estado de esfuerzos de un perfil de suelo arcilloso homogéneo parcialmente saturado, cuando se cubre la superficie.

que alcanza en el equilibrio, luego de estar en contacto con el suelo. Este papel se calibra previamente, determinando la relación entre el contenido de humedad y la succión. Mayor información sobre esta técnica se encuentra en Ruiz et al (1991). Con base en observaciones realizadas por varios autores, Jennings y Kerrich (1962) expusieron un modelo de comportamiento para el perfil de un suelo desecado basado en la teoría de la consolidación, mediante el cual la expansión se explica en términos de las variaciones que se producen en los esfuerzos efectivos. Como se puede apreciar en la Figura N° 8, en la situación del perfil de humedad de un suelo durante el verano, el esfuerzo efectivo inicial  $s'_{ov}$  a la profundidad  $z$  está definido por la distancia AB, mientras que el esfuerzo efectivo a la misma profundidad en el invierno,  $s'_{oi}$ , está dado por la distancia CD, que es menor que AB, y por lo tanto implica una expansión del suelo.

Cuando se cubre la superficie del terreno con una construcción, como se muestra en la Figura No. 9, después de algún tiempo se puede producir

un ascenso en la tabla de agua si el área cubierta es extensa, y el esfuerzo final  $s'_f$ , correspondiente a la situación de equilibrio luego de colocar la carga sobre el suelo, está dado por la distancia EF. Si el área cubierta es pequeña no se debe esperar un ascenso del nivel freático, pero de todas maneras se produce una disminución del esfuerzo efectivo en la zona del suelo ubicado por encima de este, asumiendo que la construcción se realiza al final del período seco o de verano. De esta manera se explica directamente la forma como se produce la expansión, con base en los conceptos aceptados de la teoría de la consolidación, ya que una reducción en el valor del esfuerzo efectivo necesariamente debe causar expansión.

A pesar de los notables avances que se han realizado en este campo, al menos en teoría, en la práctica subsisten problemas importantes sin resolver, tales como las mediciones adecuadas de las tensiones o succiones en el aire y el agua de un perfil parcialmente saturado, y la representación de estos valores en las muestras que se ensayan en el laboratorio.



# BIBLIOGRAFÍA

## RECONOCIMIENTOS

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

1. Beltrán M., L., (1991-c). Comportamiento expansivo de los suelos arcillosos. Cuarto Congreso Colombiano de Geotecnia, Sociedad Colombiana de Geotecnia, Santafé de Bogotá, Vol 1, pp. 68 a 83.
2. Black, W.P.M.; Croney, D., and, Jacobs, J.C., (1958). Field studies of the movement of soil moisture. Road Research Laboratory, T.R. No. 41, London.
3. Croney, D., Lewis, W.A. and Coleman, D., (1950), Calculations of the Moisture Distribution Beneath Structures. Civil Eng. and Public Works Review, Vol. 45, N° 524, pp.103-106.
4. Jennings, J.E., (1953), The Heaving of Buildings on Desiccated Clay, Proceedings, 3rd. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1, pp. 390-396.
5. 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.
6. 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.
7. Kassiff, G., Livneh, M. and Wiseman, G., (1969), Pavements on Expansive Clays, Jerusalem Academic Press, Jerusalem.
8. Kraynski, L.M., (1967), A Review Paper on Expansive Clay Soils, Woodward-Clyde & Assoc., Portland Cement Assoc., Vol. 1.
9. 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.
10. Ward, W.H., (1953), Soil Movement and Weather, Proceedings 3rd. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Vol. 1, pp. 477-482.
11. 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.