

34  
29



# Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

ARCILLAS EXPANSIVAS

T E S I S  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO CIVIL  
p r e s e n t a  
DENIS FAVIO CORTES MATUS

TESIS CON  
VALLA DE ORIGEN



MEXICO, D. F.

1991



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# I N D I C E.

	PAG.
INDICE	1
CAPITULO I INTRODUCCION.	2
" II IDENTIFICACION DE ARCILLAS EXPANSIVAS.	5
Correlaciones entre el porcentaje de expansión y las propiedades índice.	15
Criterios para la identificación de arcillas expansivas.	18
" III PRUEBAS PARA MEDIR LA EXPANSION EN ARCILLAS Y CALCULO DE EXPANSIONES.	22
" IV METODOS DE CIMENTACION EN ARCILLAS EXPANSIVAS.	31
V CONCLUSIONES.	39
RECOMENDACIONES.	42
REFERENCIAS.	43

C A P I T U L O I.

## I N T R O D U C C I O N .

El presente trabajo tiene como finalidad la elaboración de una guía para aquellas personas que deseen conocer un poco acerca de este importante tema de actualidad, esperando pueda servirles a los ingenieros, ya que este tema es de gran importancia para la construcción de las obras civiles de un Ingeniero Civil.

Para las personas que deseen adentrarse más a fondo en este tema pueden consultar las referencias que se encuentran al final del trabajo.\*

El fenómeno de arcillas expansivas ocurre principalmente en climas semi-secos donde año con año la evaporación sobrepasa la precipitación, las arcillas de este tipo no son las únicas que generan problemas, sin embargo, en el país toman importancia por la concentración de población que vive en estas zonas, además de las vías terrestres que comunican al territorio nacional y que se enfrentan con frecuencia con este tipo de material.

En el capítulo II del presente trabajo, se podrá encontrar los métodos, correlaciones y criterios para la identificación de arcillas expansivas.

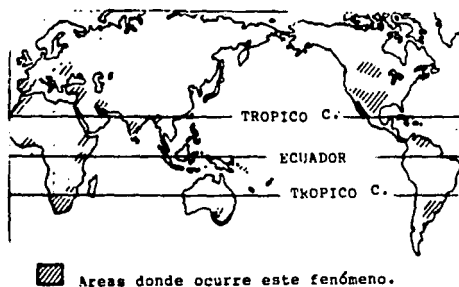
En el capítulo III se encuentran las pruebas que se le hacen a las arcillas expansivas para determinar su expansión, además de los métodos de cálculo.

En el capítulo IV se localizan los tipos de cimentación que pueden ser utilizados en arcillas expansivas.

\* En la Universidad Autónoma de Querétaro existe una materia que se dedica más a fondo a este tema.

En el capítulo V se encuentran las conclusiones de este trabajo, además de algunas recomendaciones que debemos tomar en cuenta.

DISTRIBUCCION DE ARCILLAS EXPANSIVAS EN EL MUNDO(ref.4).



C A P I T U L O II.

## IDENTIFICACION DE ARCILLAS EXPANSIVAS.

Para la Identificación de arcillas expansivas existen una variedad de métodos, de los cuales describo algunos como los siguientes(ref.4):

- METODOS MINERALOGICOS.- Absorción de color.  
Análisis Químico  
Análisis Térmico Diferencial.  
Difracción de Rayos X.  
Microscopio Electrónico.
- METODOS INDIRECTOS.- Contenido de Coloides.  
Contracción Lineal.  
Expansión Libre.  
Límites de Atterberg.
- METODOS DIRECTOS.- Medida Directa.  
Prueba de expansión en el Odómetro.  
Otros.

### METODOS MINERALOGICOS.

Los métodos mineralógicos son usados en la identificación de las arcillas expansivas, estos se efectúan con el fin de determinar la presencia de minerales en las arcillas que puedan causar expansiones; así las arcillas montmorillonitas se expanden cuando son humedecidas, mientras que las illitas y caolinitas lo hacen considerablemente menos.

Los métodos en que se divide este grupo y que son utilizados son los siguientes:

- a) Absorción de Color.
- b) Análisis Químico.
- c) Análisis Térmico Diferencial.
- d) Difracción de Rayos X.
- e) Microscopio Electrónico.



- a) **Absorción de Color.**- Este método consiste en que materiales de tinte y otros agentes que manifiestan características cuando absorben colorantes en arcillas pueden ser usados para identificar arcillas expansivas; el procedimiento relativo de prueba sencilla y la velocidad de tinte manchado justifica su aplicación.

Cuando a una arcilla por ejemplo le penetra ácido, el color asumido por el tinte absorbido depende de la capacidad de cambio de los diferentes minerales presentes en dicha arcilla.

- b) **Análisis Químico.**- Este método es una valiosa ayuda para otros y es semejante al de Difracción de Rayos X para la identificación de arcillas expansivas.

En el grupo de las arcillas montmorlonitas este método puede ser usado para determinar la naturaleza de Isomorfismo y para saber su origen; según Kelley (1958) el carácter de isomorfo de la arcilla montmorlonita no puede ser determinado de otra manera.

- c) **Análisis Térmico Diferencial.**- Este procedimiento debe ser usado en unión con el siguiente (d) y el anterior para la identificación de los minerales que contienen las arcillas, es un buen método para el control de los minerales que experimentan características de cambio cuando son calentados y es la medida diferencial del calor absorbido o liberado por la arcilla, mientras es calentado a temperatura constante, este análisis además revela la estratificación de los minerales.

- d) **Difracción de Rayos X.**- Este método es usado para determinar la proporción de los diferentes minerales presentes en una arcilla, se utiliza para identificar la fracción fina determinando cuantitativamente los minerales constituyentes de la arcilla por medio de la comparación entre los resultados obtenidos y las referencias estándar de cada mineral.

G.W. Brindley (1955) pensó que este procedimiento de ser aplicado con mucho cuidado y que este método es favorable en posibles casos de identificación de arcillas expansivas.

- e) **Microscopio Electrónico.**- Este procedimiento se basa en el microscopio, el cual observa los minerales presentes en la arcilla, es decir, es la observación directa de los minerales basándose en sus propiedades ópticas.

Ravina (1955) hizo estudios de la composición mineralógica de las arcillas con el uso del microscopio y nos dice que puede ser posible la evaluación de algunas propiedades de las arcillas expansivas por observar el grado de ondulación entre partículas en el microscopio.

Este otro grupo de métodos para la identificación de arcillas expansivas nos dicen que las pruebas sencillas propias de suelos pueden ser usadas para la evaluación de la expansión de las arcillas.

Tales pruebas se realizan a través de los métodos siguientes (ref.4):

- a) Contenido de Coloides.
- b) Contracción Lineal.
- c) Expansión Libre.
- d) Límites de Atterberg.

- a) Contenido de Coloides.- Este método consiste en que es tomado el contenido de coloides por ser un importante aspecto en la expansión de una arcilla.

Dado el tipo de arcilla, la relación entre la expansión y el porcentaje del tipo de arcilla es expresada por la siguiente ecuación:

$$S = K C^X$$

Donde:

S= expansión en %.

C= Porcentaje del tamaño de arcilla menor que 0.002 mm.

X= Un exponente dependiente del tipo de arcilla.

K= Un coeficiente " " " " " "

Donde el tamaño de las partículas de arcilla es determinado por una prueba hidrométrica, la calidad de tipo de coloides es reflejada por X y K en la ecuación de arriba controlando la expansión.

- b) Contracción Lineal.- Este procedimiento es ayudado por los porcentajes de contracción límite y lineal para identificar la expansión de las arcillas.

Altmeyer (1955) propuso una posible guía para la determinación de la expansión de diferentes arcillas dependiendo de sus porcentajes de contracción límite y lineal, que es la siguiente:

Porcentaje de contracción límite	Porcentaje de contracción líneal	Grado de expansión.
menor que 10	mayor que 8	CRITICO
10 a 12	5 a 8	MARGINAL
mayor de 12	0 a 5	No-CRITICO.

- c) Expansión Libre.- Este método determina los cambios volumétricos que sufre una arcilla después de saturarla en agua; es presentado por Holtz y Gibbs(1956), como una prueba sencilla para identificar las arcillas expansivas.

Las experiencias de Holtz y Gibbs(1956), indican que una arcilla con 100 % de expansión libre puede llegar a sufrir cambios volumétricos de consideración.

Este procedimiento consiste en colocar una muestra de 10 cc. de suelo seco compactado al 100 % previamente y pasado por la malla 40 en una probeta graduada de 100 cc, la misma que es llenada de agua, el volumen del material expandido y asentado se lee después de 24 horas en términos de la graduación de la probeta; la diferencia entre el volumen final e inicial, expresado en un porcentaje del volumen inicial, es el valor de la expansión libre y es calculado por la fórmula siguiente:

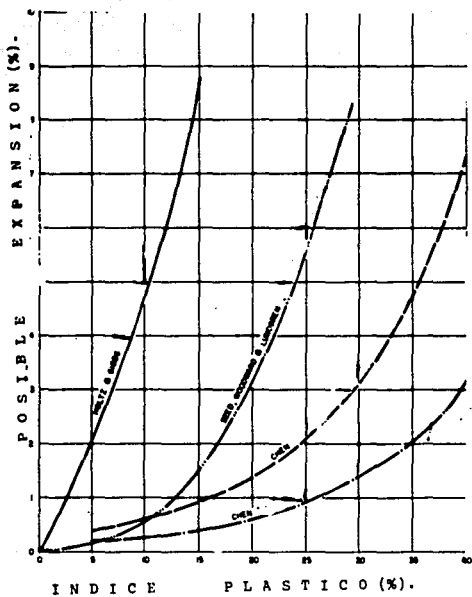
$$(\%) \text{ de expansión libre} = \frac{\text{Vol. final} - \text{Vol. inicial}}{\text{Vol. inicial}} \times 100.$$

Por ejemplo: Para una arcilla con  $V_i = 100 \text{ cm}^3$  y  $V_f = 110 \text{ cm}^3$   
se tendrá:

$$\text{Expansión libre} = \frac{110 - 100}{100} \times 100 = 10 \%$$

Experimentos conducidos por Holtz(1956) indican que la expansión alta que obtuvo por medio de sus experimentos fue la de bentonita comercial la cual posee un valor de expansión libre de 120 % a 200 %.

Varios autores en los últimos años llevaron a cabo miles de pruebas de expansión libre y llegaron a la conclusión de la siguiente figura la cual fue ajustada a una curva de regresión como la siguiente:



- d) Límites de Atterberg.- Este procedimiento fue propuesto por Holtz y Gibbs(1956) quienes demostraron que el índice plástico y el límite líquido son útiles para determinar las características de expansión de la mayoría de las arcillas; según estos autores, este ensayo puede hacerse en un consolidómetro común y se describe enseguida:

La prueba consiste en controlar inicialmente la humedad de 2 muestras que pueden ser alteradas o inalteradas, dejando secar a una de ellas al aire hasta su límite de contracción por lo menos, luego se mide el cambio de volumen debido a este secado; el segundo espécimen es colocado en el consolidómetro bajo una carga vertical de 1 libra/pulgada<sup>2</sup> para luego saturarla completamente produciéndose la expansión libre que indica cambio en el volumen del espécimen, una vez alcanzada la expansión máxima se carga el suelo a incrementos razonables y se determina la consolidación bajo cada carga; los resultados obtenidos combinadamente en ambos especímenes nos permite calcular el cambio de volumen total para condiciones de humedad, inicialmente secadas al aire y saturadas.

En muchas ocasiones es necesario obtener datos con respecto a la carga necesaria para detener la expansión, para ello el proceso seguido es el mismo considerando solamente una carga vertical variable de manera que no se permita el movimiento vertical hacia arriba del espécimen durante el proceso de saturación hasta alcanzar el equilibrio, después de lo cual se descarga en decrementos midiéndose la expansión bajo la carga.

Seed, Woodward y Lundgren(1957) por su parte demostraron que el índice plástico solo puede ser usado como un indicador preliminar de las características de expansión de la mayoría de las arcillas y establecieron la siguiente ecuación:

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

Donde: IP= Índice plástico en % y  $K = 3.6 \times 10^{-5}$  y es cte.  
S= Expansión.

La ecuación anterior es únicamente válida para suelos que contengan arcilla entre 8 y 65 %.

Realizando un ejemplo de la ecuación anterior:

Tomando IP= 30 %  $S = 60 (3.6 \times 10^{-5}) [(30)^{2.44}] = 8.682 \% .$

## MÉTODOS DIRECTOS.

En este último grupo se incluyen los métodos siguientes:

- a) Medida Directa (ref.4)
- b) Prueba de expansión en el Odómetro.

- a) Medida Directa.- Este es el procedimiento más satisfactorio y conveniente para determinar la expansión de una arcilla, además esta prueba es sencilla para realizarse, no es muy costosa y puede ser realizada con el uso de un consolidómetro; esto consiste en lo siguiente:

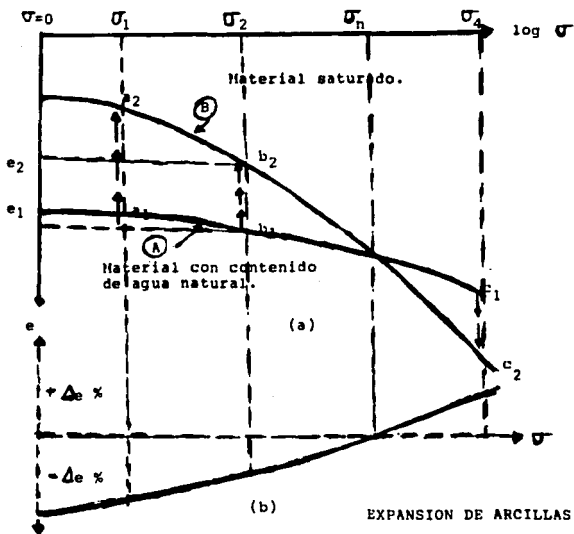
La muestra es puesta entre 2 láminas y confinada en un metal anillado; el diámetro del anillo puede ser de 2 a 4 pulgadas dependiendo del tipo de la muestra, el espesor de la muestra varía de 1 a 1.5 pulgadas; la expansión vertical es medida y reportada como un porcentaje de la altura inicial de la muestra; después de que la muestra alcanza su máximo incremento de volumen, esta puede ser retirada y determinada la expansión, de este modo la expansión puede ser evaluada fácilmente sin recurrir a aparatos sosteniendo el volumen de suelo constante.

Organizaciones académicas en la realización de pruebas de expansión utilizan este aparato.

Indudablemente este procedimiento es sumamente importante y es una prueba segura en la identificación de arcillas expansivas.

- b) Prueba del Odómetro.- Esta prueba consiste en lo siguiente (Zeevaert, 73): Para determinar la magnitud de la expansión de los materiales, como sea que se encuentren en la naturaleza, pruebas en el odómetro pueden ser realizadas; el resultado de estas pruebas son mostradas en la figura de adelante:

La curva A de la figura siguiente representa una prueba de compresibilidad actuando en un material inalterado probado el espécimen con humedad natural y la curva B representa la compresibilidad de la muestra del mismo material cuando esta saturado; por medio de estas 2 curvas, la expansión de cualquier material en la naturaleza puede ser determinada; la máxima expansión puede ser tomada con el material saturado dentro de la condición descargada o con una pequeña fuerza inicial; por seguridad en la humedad natural, las características de expansión pueden asumir valores intermedios limitados por las curvas A y B.



EXPANSION DE ARCILLAS.

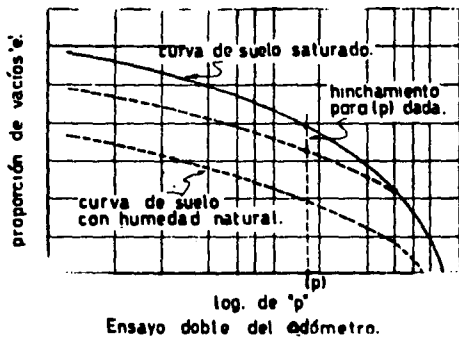
Si el espécimen de una prueba con humedad natural es cargado con una fuerza  $\sigma$  en la curva A y después saturado el material permitiendo la capilaridad, este sufre una expansión pasando de relación de vacíos  $e_1$  a  $e_2$ ; el cambio en tensión a causa de la saturación de la fuerza puede ser expresado de la manera siguiente:

$$\Delta e_s = e_1 - e_2 / (1 + e_1) \quad \text{Donde: } e = \text{relación de vacíos en 1 y 2 respectivamente.}$$

Para una fuerza neutral  $\sigma_n$  para que no sufra expansión o contracción, la valuación de  $\Delta e$  debe ser contra las fuerzas efectivas verticales después de que el suelo fue saturado.

b) Jennings y Knight (1957) propusieron "El ensayo doble del Odómetro", este ensayo consiste en efectuar 2 pruebas paralelas de consolidación con especímenes del mismo suelo de los cuales uno tiene humedad natural o de campo y el otro está saturado; las muestras se cargan hasta valores mayores que la presión máxima de expansión del suelo en estudio y luego se supone que para cierto valor de la presión final, las 2 curvas de consolidación deben coincidir.

En la siguiente figura es visto este ensayo:





**CORRELACIONES ENTRE EL PORCENTAJE DE EXPANSION Y LAS PROPIEDADES INDICE.**

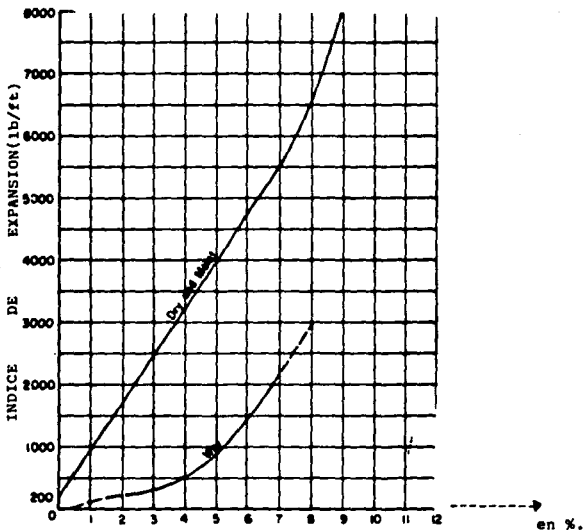
Estas correlaciones se realizan a través de los métodos siguientes(ref.4):

- a) Método U.S.B.R.
- b) " PVC.
- c) " Activo.

a) Método U.S.B.R.- Este procedimiento fue desarrollado por Holtz y Gibbs (1956), esta basado en propiedades de varios suelos y se presenta en la tabla siguiente:

CONTENIDO DE COLOIDES Porcentaje menor de 0.001 mm.	INDICE PLASTICO (IP)	LIHITE DE CONTRACCION (LC)	EXPANSION LIBRE (%)	GRADO DE EXPANSION.
Mayor de 26	Mayor de 34	Menor de 6	Mayor de 30	Muy Alto
19 a 26	25 a 34	6 a 8	20 a 30	Alto
10 a 19	15 a 25	8 a 14	10 a 20	Medio
Menor de 10	Menor de 15	Mayor de 14	Menor de 10	Bajo.

b) Método PVC.- Este procedimiento determina el posible cambio de volumen(PVC) de suelos y fue desarrollado por T.W.Lambe(1958); fue realizado a través de muestras remoldeadas, las cuales fueron probadas en un consolidómetro, de donde se obtuvo la lectura que fue convertida a presión y designada como índice de expansión, este índice puede ser convertido a PVC a través de la siguiente figura:



POSIBLE CAMBIO DE VOLUMEN(PVC).

1e-----1e-----1e-----1e-----1e-----1e  
 No Marginal Critico Muy Critico Critico.

c) Método Activo.- Este método fue propuesto por Seed, Woodward y Lundgren(1958) y fue basado en la actividad de cada arcilla y su índice plástico.

Para una muestra artificial realizada la actividad fue definida por los autores anteriores como:

$$\text{Actividad} = \text{IP} / (\text{C} - 10) \quad \text{Donde: IP} = \text{Índice Plástico en \%}$$

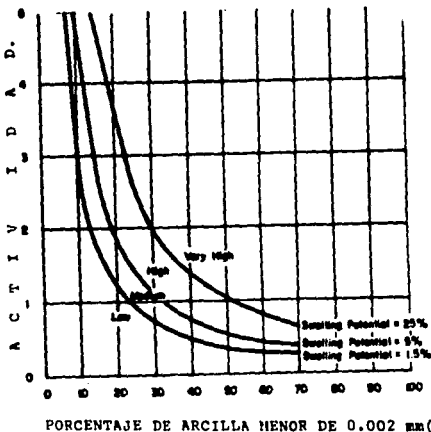
C = Es el porcentaje de arcilla de tamaño menor de 0.002 mm.

Para realizar un ejemplo de la ecuación anterior:

Teniendo IP=30 % y C=20 % se tendrá:

$$\text{Actividad} = 30 / (20 - 10) = 30 / 10 = 3.$$

Después de realizado lo anterior podemos entrar a la siguiente figura de donde encontraremos la posible expansión:



## CRITERIOS PARA LA IDENTIFICACION DE ARCILLAS EXPANSIVAS.

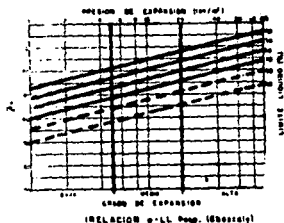
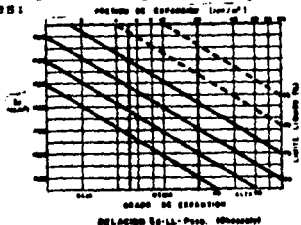
Los criterios para la identificación de arcillas expansivas deben su importancia a la sencillez y economía de estos y a que solo se requieren muestras alteradas, complementadas en algunos criterios con la determinación del peso volumétrico en el lugar; en estudios preliminares de evaluación son de gran importancia para detectar la presencia de arcillas expansivas máxime que los ensayos se pueden efectuar en el propio lugar en laboratorios móviles o locales.

Dentro de los criterios más conocidos se tienen:

- a) Ghazzaly y Vijavergiya.
- b) Holtz y Bureau.
- c) Rangathan y Stayana.
- d) Skempton.
- e) Sovers.

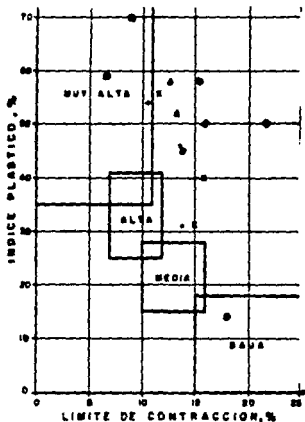
- a) Como ejemplo de un criterio relativamente simple para identificar arcillas expansivas (ref.11), se encuentra el que propone Ghazzaly y Vijavergiya (1953) el cual se basa en una relación estadística entre el contenido de agua de varios suelos, su límite líquido, su peso volumétrico seco y su presión y grado de expansión.

Las gráficas siguientes representan los resultados de dichas relaciones:

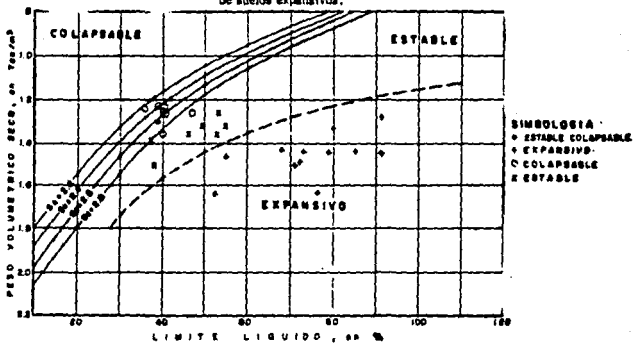


- b) Los criterios más empleados son los de Holtz y el de Bureau (Rodríguez, 1974), estos relacionan la expansión con el índice plástico y el límite de contracción el primero, y con el peso volumétrico seco y el límite líquido el segundo.

Las figuras siguientes representan estos criterios:



Criterio de W. G. Holt para identificación de suelos expansivos.



Criterio del Bureau of Reclamation para identificación de suelos expansivos o colapsables.

En un estudio(Rodríguez,1974) que abarco más de 100 sitios de la República Mexicana, se determinó que con el criterio de Bureau se pueden identificar las arcillas expansivas con un grado de acierto de 90 %, en tanto que el criterio de Holtz difícilmente es aplicable.

El estudio correspondiente a Cd.Obregón(Rodríguez,1974) confirma lo anterior, ya que con el criterio de Holtz la identificación es incierta, en tanto que con el criterio de Bureau el grado de acierto es aprox de 100 % en los suelos expansivos.

c) Ranganathan y Stayana(1959) introducen el empleo del límite de contracción para determinar la expansión de las arcillas y obtienen la tabla siguiente(ref.4):

LIMITE DE CONTRACCION	EXPANSION
0 a 20	Baja
20 a 30	Media
30 a 60	Alta
Mayor de 60	Muy Alta.

d) Skempton(1958) relaciona la actividad de una arcilla con su grado de expansión y obtiene la siguiente tabla(ref.4):

La Actividad de una arcilla se puede obtener de acuerdo al método Activo.

ACTIVIDAD	GRADO DE EXPANSION.
Menor de 0.75	Inactivas
0.75 a 1.50	Intermedias
Mayor de 1.50	Activas.

e) Sovers(1960) propuso, basándose en las propiedades índices de las arcillas la tabla siguiente(ref.4):

Probabilidad de cambios de volumen al producirse cambios de humedad.	INDICE PLASTICO		LIMITE DE CONTRACCION.
	Regiones Secas.	Regiones Húmedas.	
Pequeño	0 a 15	0 a 30	12 o más
" a moderado	15 a 30	30 a 50	10 a 12
" " severo	30 o más	50 o más	10 o menos.

Por lo que se refiere a los métodos y criterios anteriores que nos ayudan para identificación de arcillas expansivas, estos únicamente sirven para fines de identificación los cuales están muy lejos de resolvernos el problema, pues una cosa es identificar la presencia de arcillas expansivas y otra muy diferente resolvernos adecuadamente el problema que presenta la existencia de estas arcillas en un terreno donde se planea construir una obra civil.

C A P I T U L O      I I I



## PRUEBAS PARA MEDIR LA EXPANSION EN ARCILLAS Y CALCULO DE EXPANSIONES.

Seguindo con mi trabajo, es posible cuantificar la expansión de arcillas en términos de presión de expansión o del porcentaje de expansión vertical total, con este objeto se han desarrollado técnicas que van desde el simple empleo de un consolidómetro a utilizar aparatos más sofisticados como los que representan las condiciones de expansión bajo la succión controlada.

En una prueba típica de expansión las más importantes variables involucradas son las siguientes:

### 1.- Estado de la muestra.-

- a) Para una muestra inalterada esta incluye la condición de la muestra.
- b) " " " alterada " " el método de compactación.

### 2.- Contenido de humedad.- El contenido inicial de humedad es afectado por lo siguiente:

- i) La existencia de evaporación permitida a la muestra cuando se encuentra en el anillo del consolidómetro.
- ii) El tiempo permitido a la muestra para permanecer en el anillo.
- iii) La temperatura y humedad del laboratorio.

### 3.- Tiempo permitido.- Es el tiempo requerido para completar el llenado en el proceso de expansión, puede variar considerablemente y depende de la permeabilidad de la arcilla, del contenido de agua y del grosor de la muestra.

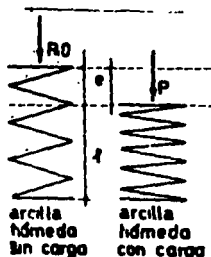
### 4.- Entre otros.

Las pruebas que describire para medir la expansión de arcillas son las siguientes (Carrillo, 1969) :

- a) Prueba de Analogía de Resortes.
- b) " " Salas y Serratoso.

- a) PRUEBA DE ANALOGIA DE RESORTES.- Esta prueba fue propuesta por R.E. Means (1959) la cual considera un mecanismo que podríamos llamar de analogía de resortes bajo la consideración del efecto de capilaridad del agua.

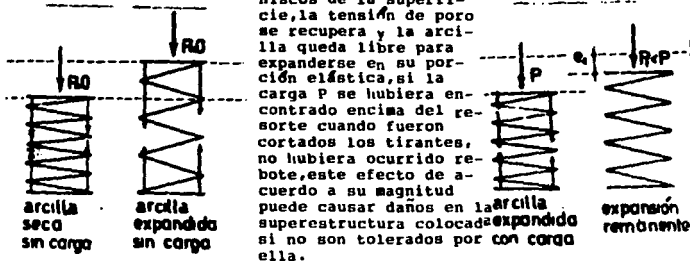
Esta prueba consiste en utilizar un resorte elástico descargado de longitud "uno", que vendría ser la arcilla expansiva húmeda sin carga, luego aplicamos al sistema una carga  $P$ , que produzca una cierta deformación "e" absorbiendo integralmente la carga  $P$ , este estado sería el de la arcilla húmeda cargada, si en estas condiciones aplicamos



al sistema un par de tirantes de manera de mantener al resorte en esta posición considerando que los tirantes se encuentran en tensión y que el resorte tiene un módulo de elasticidad muchas veces mayor que ellos, de tal manera que la deformación se mantenga y cualquier carga menor de  $P$  no cause deformación adicional en el sistema, bajo esta consideración podemos gradualmente disminuir  $P$  hasta llegar a  $0$  produciendo el secado gradual de la arcilla, al final tendremos un suelo seco sin carga, que fue saturado hasta su límite de contracción.

Ahora bien, si los tirantes son cortados o eliminados, como no hay carga en el resorte

se expande en una cantidad igual a la "e" inicial, esto sucede cuando a la arcilla considerada se le agrega agua de manera que destruya los meniscos de la superficie, la tensión de poro se recupera y la arcilla queda libre para expanderse en su porción elástica, si la carga  $P$  se hubiera encontrado encima del resorte cuando fueron cortados los tirantes, no hubiera ocurrido rebote, este efecto de acuerdo a su magnitud puede causar daños en la superestructura colocada encima.



b) Prueba de Salas y Serratosa(1957).- Esta prueba se basa en que el levantamiento del suelo no se produce de una manera uniforme sino en forma irregular, por lo tanto, cuando la carga es aplicada el levantamiento toma una forma de cúpula, cuya forma y dimensiones se son completamente desconocidas, por lo contrario, si la carga no es flexible sino rígida, esta tiende a producir el apiastamiento de la cúpula.

Por otra parte, si el valor del levantamiento no es muy grande, sino que es muy pequeño como generalmente ocurre, la cúpula se deformará elásticamente hasta desaparecer sin que la carga límite sea alcanzada.

Los autores anteriores proponen la fórmula siguiente para calcular la deformación elástica:

$$\Delta = 2qb/E\pi \left[ \alpha \log_e 1 + (1 + \alpha^2/ac)^{1/2} + \log_e (\alpha + (1 + \alpha^2)^{1/2}) \right]$$

Donde:

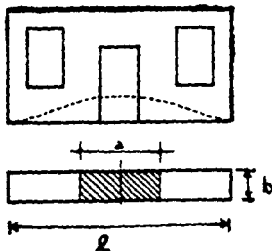
$W$  = Peso total en Kg.

$q = W/b$

$\Delta$  = Deformación elástica.

Y

$b, \alpha$  se obtienen de la siguiente figura:



$$\alpha = a/b$$

## CALCULO DE EXPANSIONES.

Para el cálculo de expansiones describo los métodos siguientes:

- a) Método Mecánico( Carrillo,1969)
- b) " del cambio de volumen( Luna,1990)
- c) " para Estructuras Livianas( Carrillo,1969)

a) Método Mecánico.- En este método indicare un mecanismo de expansión que considera el comportamiento de la arcilla como resultado de cambio en el equilibrio de su componente mecánico.

De la teoría de la doble capa difusa encontraremos que la concentración de cationes en un plano central entre 2 partículas esta dado por:

$$C_d = \frac{G^2}{V^2} B (d + X_0)^2$$

Donde:

$X_0$  = Constante que depende de la densidad superficial de carga, aprox se puede considerar que:

$$X_0 = 4/\sqrt{BG}.$$

$B$  = Constante que depende de la temperatura y que puede tomarse como:

$$B = 10^{15} \text{ cm/m.mole}$$

$C_d$  = Concentración en el plano medio en moles por litro.

$d$  = Distancia entre partículas.

$G$  = Densidad superficial y  $V$  = Valencia de ion.

la ecuación de Van-Hoff para evaluar la presión de expansión es la siguiente:

$$P_s = R T ( C_d - 2C_o )$$

Donde:

$C_o$  = Concentración de cationes en la solución libre y se expresa en moles por litro.

$P_s$  = Presión de expansión y se expresa en  $\text{Kg/cm}^2$ .

$T$  = Temperatura absoluta en  $^{\circ}\text{C}$ .

$R$  = Cte del gas.

La ecuación anterior se puede escribir de la manera siguiente después de realizar algunas substituciones:

$$P_s = 25 ( C_d - 2C_o ) .$$

b) METODO DEL CAMBIO DE VOLUMEN.- Este procedimiento, esta basado en la siguiente ecuación para el cálculo de la expansión.

$$(\Delta V/V) = - Y_h \log_{10} (h_p/h_i) - Y_h \log_{10} (\sigma_p/\sigma_i)$$

Donde:

$\Delta V/V$ = Porcentaje del cambio de volumen(expansión)

$\sigma_i$  = Constante de corrección por sobre carga en  $gr/cm^2$ .

$\sigma_p$  = Presión media a la profundidad z en  $gr/cm^2$ .

$Y_h$  = Coeficiente de cambio de volumen.

$h_p$  = Succión final en cm.

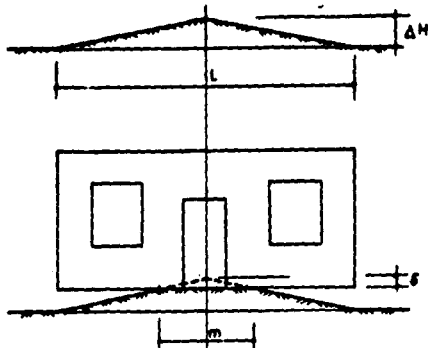
$h_i$  = " inicial en cm.

Todas las variables que intervienen en la ecuación anterior son de rápida determinación; por lo que se refiere al concepto de succión inicial y final, esta se puede obtener a través de la técnica del papel filtro y es la siguiente:

El objetivo de la prueba es conseguir que el papel filtro adquiera la energía libre del suelo después de permanecer un tiempo en contacto con él; esto se logra a través de una muestra inalterada cilíndrica de aprox 5.5 cm de diámetro por 6 cm de altura, a la que se le colocan encima 2 papeles filtro y enseguida es colocada dentro de una botella, la que a su vez se coloca después en un depósito apartado-lo mas recomendable es una hielera durante 7 días; se supone que trascurrido ese tiempo el suelo y el papel en contacto con él forman un solo sistema suelo-papel con la misma capacidad de succión, en ese momento se determina la humedad del papel y se acude a una gráfica humedad vs succión para el tipo de papel utilizado; el segundo papel localizado encima del primero es un testigo de que la prueba ha sido realizada correctamente, ya que deberá estar menos húmedo que el primero.

c) Método para Estructuras Livianas.- Este procedimiento se utiliza para el diseño de cimentaciones para estructuras livianas sobre arcillas expansivas, en las cuales la carga unitaria transmitida por estas estructuras ( $W$ ) es menor que la presión de contacto ( $P_c$ ) producida por la expansión, esto genera un aplastamiento incompleto de la cúpula, producción de un levantamiento de la estructura; que si es pequeño y menor que ciertos límites, no causará daños apreciables en ella.

Para ver lo anterior consultar la siguiente figura:



Donde:

$W$ = Carga total por unidad de longitud del cimiento sobre el suelo (Peso del cimiento + muro + techos + pisos suspendidos).

$K_e$ = Coeficiente de reacción del terreno después de la expansión ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ).

$L$ = Longitud del estructura.

De la figura anterior se tiene que:

$$K_e = W/m\delta \quad \text{--- 1} \quad \text{y} \quad m = L\delta / \Delta H \quad \text{--- 2}$$

El Levantamiento es posible calcularlo por la expresión siguiente:

$$\Delta = \Delta H - \zeta \quad \text{--- 3}$$

de 2 en 1 se obtiene:

$$Re = \frac{\nu}{\frac{L \zeta}{\Delta H} \cdot \zeta} = \frac{\nu}{L \zeta^2 / \Delta H} = \nu \Delta H / L \zeta^2$$

Despejando  $\zeta$  tenemos  $\zeta = (\nu \cdot \Delta H / Ke \cdot L)^{1/2}$  ---- 4

Substituyendo 4 en 3 se tiene finalmente:

$$\Delta = \Delta H - (\nu \cdot \Delta H / Ke \cdot L)^{1/2}$$

El valor obtenido de la ecuación anterior ( $\Delta$ ) sera el de la expansión.



C A P I T U L O    I V .

## MÉTODOS DE CIMENTACION EN ARCILLAS EXPANSIVAS.

Para terminar con mi trabajo en este penúltimo capítulo mencionaré algunos métodos para cimentar sobre arcillas expansivas ya que el cimentar adecuadamente sobre este tipo de material significa controlar los efectos de movimientos diferenciales por expansión sobre la superestructura, los que se presentan cuando el suelo se ve afectado por variaciones en su grado de saturación.

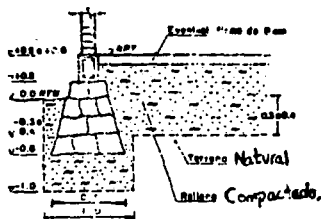
Por otra parte hay que considerar que en los depósitos de arcillas expansivas, la costra superficial es la más susceptible de sufrir cambios volumétricos importantes por las correspondientes variaciones en su grado de saturación, las que a su vez se deben a la evaporación y a la presencia de agua de lluvia o de riego.

Lo anterior hace pensar que las estructuras de tipo ligero (casas habitación, bodegas, etc) serían las más afectadas al cimentarlas sobre este tipo de suelos, tanto porque sus cimientos son superficiales como por la baja presión aplicada, las que no logran en algunas ocasiones equilibrar la presión de expansión.

Los casos favorables se pueden presentar con las estructuras pesadas, que además de aplicar fuertes presiones al suelo, sus cimientos generalmente alcanzan profundidades más abajo de la costra superficial y se apoyan sobre estratos protegidos de los cambios de humedad o en depósitos de suelos que ya no son expansivos.

En virtud de lo anterior, parece ser necesario dar mayor atención a las estructuras ligeras; máxime que las áreas urbanas del noroeste se enfrentan con este tipo de problema.

Para estructuras ligeras en Ciudad Obregón (ref. 10), en el estado de Sonora, donde se han presentado lotes con arcillas expansivas, para la construcción de estructuras con presión media no mayor de  $1 \text{ a } 1.5 \text{ ton/m}^2$ , las cimentaciones se han resuelto con zapatas continuas bajo los muros de carga apoyadas entre 1 y 1.5 m de profundidad (ver la figura siguiente).



Cimentación y pisos de casas en Ciudad Obregón, Son.

Las soluciones de cimentación para el problema de arcillas expansivas, podemos dividir las en 2 grupos (Restrepo, 1983):

- 1.- En el primer grupo se encuentran aquellas soluciones cuya tendencia es la de equilibrar la presión de expansión.
- 2.- En el segundo grupo se encuentran las soluciones que permiten el comportamiento natural del suelo, pero sin que se afecte la estructura.

Los métodos de solución para cimentar en el primer grupo son:

- A.- Estabilizándolos.
- B.- Substitución del material expansivo.

A.- METODO ESTABILIZADOR.

Este método consiste en que las estructuras podrán cimentarse una vez que las arcillas expansivas hayan sido estabilizadas, es decir, después de haber cambiado sus propiedades, mezclándolos en porciones adecuadas con productos tales como la cal, el cemento u otros elementos, puede ser notablemente efectiva si se logra que se mezcle íntimamente en el suelo; el espesor de la capa de suelo por estabilizar dependerá de sus características expansivas y deberá determinarse mediante pruebas de laboratorio.

En algunos lugares, la inyección a presión de lechado de cal en arcillas fisuradas parece crear en la arcilla fragmentos de una película estabilizadora que impide a la humedad entrar en los fragmentos y producir la expansión.

PROCEDIMIENTOS PARA ESTABILIZAR ARCILLAS EXPANSIVAS (ref. 3).

Los procedimientos para estabilizar arcillas expansivas deben considerar principalmente los aspectos económico y prácticos de la obra, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- 1.- Inundación previa del terreno de cimentación.- Mediante esta técnica se permite la expansión de las arcillas antes de construir la estructura, el problema principal estriba en que se puede requerir muchos meses o años para aumentar la humedad de suelo a menos que estos exhiban fisuras y grietas que ayuden a la infiltración.

- 2.- Conservación de la humedad.- los procedimientos más comunes para mantener la humedad de los suelos dentro de un rango determinado, consiste esencialmente en la instalación de barreras impermeables con sistemas de drenaje adecuados.
- 3.- Control de la compactación.- Este es uno de los procedimientos más económico y práctico para disminuir la expansión, se ha encontrado que cuando los suelos se compactan a pesos volumétricos bajos y contenidos de agua altos, la expansión disminuye.
- 4.- Sobrecarga.- Este sistema consiste básicamente en sobrecargar el terreno aprovechando la capacidad de carga del subsuelo de tal manera que se equilibre la presión de expansión.

#### B.- METODO DE SUBSTITUCION DE MATERIAL.

Para evitar daños que puedan ocasionar las arcillas expansivas, la práctica usual consiste en substituir parcial o totalmente el estrato de arcilla por material inerte, este procedimiento se recomienda cuando el espesor del estrato de arcilla es pequeño; consiste básicamente en la substitución del material expansivo por materiales inertes, es decir, no susceptibles a sufrir cambios volumétricos importantes al variar la humedad.

En la ciudad de Celaya (Mondragón, 1978), en el estado de Guanajuato, en la ampliación de la escuela "Francisco Villa", en la que el espesor de arcilla varió de 2 a 5 m, el estudio realizado indicó la necesidad de substituir un espesor de 0.50 a 0.70 m de la arcilla expansiva por material inerte a fin de evitar los movimientos diferenciales.

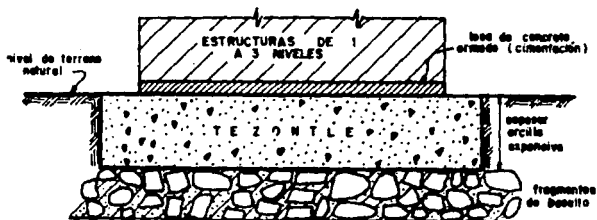
En esta misma Ciudad, en el predio donde se construyó la unidad habitacional "Los Girasoles", el espesor del estrato de arcilla por substituir fue de 0.60 m (según estudios) encontrándose en seguida toba de consistencia muy firme; para el caso de la construcción de casas habitación de 1 y 2 niveles, se removió todo el espesor del estrato de arcilla expansiva.

Para la construcción de pisos y firmes en esta misma Ciudad el problema se ha resuelto mediante la substitución parcial o total del estrato de arcilla; en los casos en que no se realizó la substitución se han observado agrietamientos y levantamiento de los pisos y banquetas, lo cual indica que la substitución deberá realizarse invariablemente.

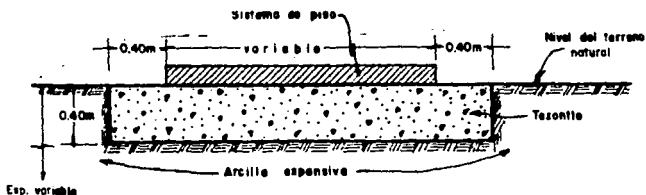
En la Ciudad de Cuernavaca, en el estado de Morelos (Bello, 1978) el tipo de cimentación frecuentemente usado en donde aparecen arcillas expansivas es losas de cimentación y/o se ha substituido parcial o totalmente dicho material por uno inerte (Tezontle que abunda en la región); también se ha colocado entre la losa y la arcilla una capa de tezontle de 0.40 m de espesor, este último proceso se ha empleado en las obras complementarias como andadores, banquetas y sistemas de pisos.

En el caso de estructuras ligeras y obras complementarias, cuando estas han quedado desplantadas sobre los materiales substitutos de arcillas expansivas presentan un buen comportamiento.

Sobre lo anterior ver las siguientes figuras:



UNA DE LAS SOLUCIONES EMPLEADAS EN CIMENTACIONES DONDE EXISTEN SUELOS EXPANSIVOS



SOLUCION A OBRAS COMPLEMENTARIAS EN SUELOS EXPANSIVOS

Por lo que se refiere al segundo grupo las estructuras se pueden cimentar de las siguientes maneras( Zárate,1974):

1.- AISLAMIENTO DEL AREA CONSTRUIDA

2.- PILAS CORTAS

3.- CIMENTACION RIGIDA.

1.- METODO DE AISLAMIENTO DEL AREA CONSTRUIDA.

Este método posible de solución consiste en aislar la cimentación de aportaciones superficiales de agua mediante pantallas impermeables.

Con respecto a la cimentación de casas habitación ligeras sobre arcillas expansivas, la idea de usar pantallas impermeables perimetrales a la construcción cuando se cimentan superficialmente sobre este tipo de material, es la de evitar variaciones en su grado de saturación por evaporación o aportaciones de agua superficial en el interior del área construida; así se evitarían en cierto grado los movimientos ascendentes y descendentes que pudieran afectar la construcción.

Por supuesto que el hecho anterior significa la creación de contenidos de agua diferenciales entre el suelo confinado y el suelo circundante con los consiguientes movimientos diferenciales que no afectarían a la construcción, si se considera que su influencia llegaría precisamente a los límites dados por las pantallas impermeables, sin embargo habrá que considerar el efecto de tales movimientos sobre las instalaciones de servicios urbanos conectados al inmueble, así como las vías de acceso al mismo.

2.- PILAS CORTAS.

Este procedimiento de solución consiste en profundizar la cimentación hasta donde las variaciones del grado de saturación sean mínimas y por lo tanto se presenten los mínimos movimientos, se realiza a través de pilas para evitar los efectos de expansión; es posible siempre y cuando el tipo e importancia de la estructura lo justifique.

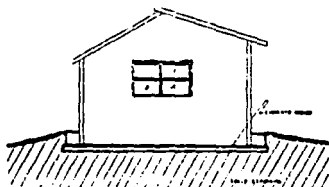
Se hace notar que esta solución no incrementará el costo de la construcción, ya que la actual dala se empleara como trabe de soporte de muros y

de rigidez del sistema.

En el caso de que en el nivel de apoyo las presiones por expansión todavía sean importantes, la concentración de esfuerzos que este tipo de cimientos producen tenderían a nulificar tales presiones.

### 3.- METODO DE CIMENTACION RIGIDA.

Como otro método de solución, se puede hablar de una cimentación lo suficientemente rígida a través de una losa, la que permite un comportamiento monolítico de la estructura (ver figura siguiente):



Cimentación rígida sobre suelos expansivos para eliminar movimientos diferenciales.

La losa de cimentación debe poseer gran resistencia y rigidez.

Hasta aquí las soluciones de cimentaciones sobre arcillas expansivas, adicionalmente habrá que considerar para cada solución en particular el problema de las instalaciones de servicios urbanos conectados al inmueble, es conveniente además evaluar los aspectos económicos que cada caso en particular implique y para ello es necesario un estudio completo de todos los factores que intervienen en la estabilidad de las estructuras cimentadas sobre estos suelos.

El diseño de las estructuras cimentadas en arcillas expansivas debe tomar en cuenta las condiciones climatológicas de la región, las características de los suelos y fundamentalmente el aspecto económico, así como posición de árboles, jardines, caminos y el comportamiento que han exhibido otras estructuras en la zona donde se planea construir, el diseño adecuado de las cimentaciones en este tipo de suelos puede lograrse mediante una investigación adecuada de las características del subsuelo y analizando los costos relativos a las alternativas además de evaluar en términos generales los riesgos involucrados.

Los problemas de cimentaciones en arcillas de este tipo que se presentan son importantes, ya que generalmente elevan el costo de las viviendas que se construyen sobre ellas, lo que proporciona soluciones diferentes para un mismo objetivo, por lo que se puede entrever que no existe un criterio unificado para resolver los inconvenientes que presenta una arcilla expansiva en cuanto a dar soluciones más uniformes.



C A P I T U L O V.

## CONCLUSIONES.

Para terminar con mi trabajo en este último capítulo llego a las siguientes conclusiones:

- 1.- Para la identificación de arcillas expansivas existen métodos mineralógicos como Absorción de color, Análisis Químico, etc, además de procedimientos indirectos como son Contenido de coloides, Contracción lineal, etc, también hay métodos directos como la medida directa, etc, entre varios más.
- 2.- Para el cálculo de expansiones existen varios métodos como el métrico, el de cambio de volumen, etc.
- 3.- Los métodos para cimentar sobre arcillas expansivas pueden ser como:  
El de sustitución de material, el de pilas cortas, el de cimentación rígida, etc.
- 4.- Los daños más comunes que manifiestan las estructuras apoyadas en arcillas expansivas incluyen levantamientos, agrietamiento de las cimentaciones, rotura de pisos, pavimentos, canales y líneas de conducción; estos daños son causados por una variedad de factores, entre los cuales se pueden mencionar:
  - a) Disminución de la humedad del suelo ocasionada por las altas temperaturas de la zona, así como la traspiración de la vegetación.
  - b) El tipo de mineral arcilloso.
  - c) La frecuencia e intensidad de lluvias de la región.
  - d) La profundidad y variación del nivel freático.
  - e) El espesor del estrato de arcilla.
  - f) El contenido de agua cerca del límite plástico.
  - g) Fuentes de agua que exciten el potencial expansivo de las arcillas.
  - h) El grado de compactación.
- 5.- Los problemas relativos a arcillas expansivas se han presentado en casi todo el mundo, es frecuente detectar este tipo de suelos en la

zona Noroeste y central de la República Mexicana, manifestándose ocasionalmente en algunas otras regiones; en todo el país este tipo de arcillas abarca aproximadamente el 15 % del total del territorio nacional.

- 6.- Los materiales que resultan ser expansivos pueden ser fundamentalmente depósitos de materiales finos que contienen arcillas minerales de la montmorillonita, la cual es sensible a cambios en la humedad.

## RECOMENDACIONES.

- 1.- Los árboles deben de mantenerse alejados de las viviendas a distancias mayores de 1 a 1.5 veces su altura, debido a que la desecación local del suelo causado por la transpiración del árbol deja una zona local más deseca que las regiones colindantes y por tanto con un potencial expansivo mayor, presentándose expansiones diferenciales de consideración tal que se traducen en asentamientos.
- 2.- Se debe evitar infiltraciones de agua bajo del área ocupada por las viviendas, teniendo cuidado en la colocación de instalaciones subterráneas, hidráulicas y sanitarias, debidamente selladas y seguras; una eliminación completa de la lluvia recolectada de los techos de la construcción y canalización correcta de aguas superficiales a través de un buen drenaje.
- 3.- Se tendrán banquetas impermeables de 2 m de ancho alrededor de la construcción para que evite la infiltración o evaporación de la humedad en la zona más cercana a la cimentación.  
Para las zonas verdes estas se harán sobre una base impermeable y muros que contengan la tierra vegetal.
- 4.- Se pondrá en antecedentes a los dueños o residentes del lugar para que no hagan modificaciones posteriores al diseño, como instalaciones de albercas, y para que no planten vegetación en lugares indebidos.
- 5.- La excavación del terreno deberá permanecer abierta el menor tiempo posible a fin de evitar cambios en las propiedades de las arcillas.

## R E F E R E N C I A S .

- 1.- Bello,AV,"Tipos de Cimentación;IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,SMNS,Tomo I,Hérida,1978.
- 2.- Carrillo,GA,"Pruebas para medir las expansiones en Arcillas",Arcillas Expansivas en el Norte de Perú,Tesis UNAH,México,1969.
- 3.- Chen,FH,"Procedimientos para estabilizar Suelos Expansivos",Foundation on Expansive Soils,Tomo I,México,1960.
- 4.- Chen,FH,"Identificación de Suelos Expansivos",Foundation on Expansive,Tomo I,México,1960.
- 5.- Luna,RJ,"Cálculo de Deformaciones en Suelos Parcialmente Saturados",VII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,SMNS,San Luis Potosí,1990.
- 6.- Hondragón,NO,"Práctica de la Ingeniería de Cimentaciones;IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,SMNS,Tomo I,Hérida,1978.
- 7.- Orozco,SR,"Mecanismos Causantes de cambios Volumétricos",IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,SMNS,Tomo II,Hérida,1978.
- 8.- Restrepo,JA,"Diferentes Soluciones a los problemas de Expansión y Características Generales de las mismas",Construcción de Cimentaciones sobre Suelos Expansivos para una unidad habitacional en Mexicali,B.C.N,Tesis UNAH,México,1983.
- 9.- Rodríguez,JH,"Identificación de los Suelos Expansivos",VII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,SMNS,Tomo II,Guadalajara,1974.
- 10.- SMNS,"Comportamiento de Estructuras Cimentadas en Suelos Expansivos",VII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,Tomo II,Guadalajara,1974.
- 11.- SMNS,"Identificación de Suelos Expansivos",VII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,Pag 109,Tomo II,Guadalajara,1974.
- 12.- SMNS,"Características de los Suelos Expansivos",VII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,Tomo II,Guadalajara,1974.
- 13.- Zárate,CO,"Cimentaciones en Arcillas Expansivas",VII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos,Tomo II,Guadalajara,1974.
- 14.- Zeevaert,L,"Collapsible Soils",Foundation Engineering For Difficult Subsoil,México D.F.,1983.
- 15.- Zepeda,GJ,"Seminario de Cimentaciones sobre Suelos Expansivos",VII Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos,SMNS,Tomo I, San Luis Potosí,1990.