

143

2 ELL



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

CIMENTACION EN SUELOS ARCILLOSOS
EXPANSIVOS

HECTOR BOJORQUEZ AGUILAR



México, D. F.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	1
CAPITULO I: INTRODUCCION AL PROBLEMA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS	4
- MINERALES DE LA ARCILLA	5
- CICLO GEOLOGICO	8
CAPITULO II: IDENTIFICACION DE ARCILLAS EXPANSIVAS	19
A) IDENTIFICACION MINERALOGICA	24
1) ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL	24
2) ANALISIS QUIMICO	25
3) DIFRACCION DE RAYOS X	25
4) ADSORCION DE COLORANTES	26
5) ANALISIS EN EL MICROSCOPIO ELECTRONICO	26
B) METODO DE LAS PROPIEDADES INDICES	27
1) CONTRACCION LINEAL	27
2) PRUEBA DE CONTENIDO DE COLOIDES	28
3) LIMITES DE ATTERBERG	29
4) PRUEBA DE EXPANSION LIBRE	29
5) POTENCIAL DE EXPANSION	29
C) METODO DE LAS MEDIDAS INDIRECTAS	32
- METODO DEL P.V.C.	32
- METODO DE SUCCION DE SUELOS	33
D) METODO DEL U.S.B.R.	35
CAPITULO III: PARAMETROS DE EXPANSIBILIDAD DE SUELOS ARCILLOSOS . . .	39

CAPITULO IV: SOLUCIONES PRACTICAS	55
A) CONTROL DE LA COMPACTACION	56
B) SUBSTITUCION DEL SUELO EXPANSIVO	60
C) ESTABILIZACION QUIMICA	61
- ESTABILIZACION CON CAL	62
- RESISTENCIA	63
- PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO	66
- PLASTICIDAD	67
- OTRAS PROPIEDADES	67
- ESTABILIZACION CON CEMENTO	69
- RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE	70
- OTRAS PROPIEDADES	72
- METODOS CONSTRUCTIVOS	73
- ESTABILIZACION CON CLORURO DE SODIO	74
D) PRESATURACION	75
E) CONSERVACION DE LA HUMEDAD	76
F) SOBRECARGA	78
G) ELEMENTOS ESTRUCTURALES	78
- PILAS ACAMPANADAS	78
- PILAS CORTAS	80
- ZAPATAS	80
- LOSAS RIGIDAS	83
H) ESTABILIZACION FISICA	84
- ESTABILIZACION TERMICA POR CALENTAMIENTO	85
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFIA	95

Una arcilla expansiva es un suelo r fino con composición mineralógica - tal, que lo hace susceptible a su- frir apreciables cambios de volumen como consecuencia de cambios en el contenido de agua.

CAPITULO I: INTRODUCCION AL PROBLEMA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.

La corteza terrestre está constituida por rocas, que en su mayoría se encuentran recubiertas por partículas resultantes de la descomposición. El suelo está formado por estas partículas y materia orgánica; las primeras se pueden dividir generalmente en arena, limo y arcilla según su tamaño. Las partículas más finas son las arcillas, cuyo tamaño se halla estrechamente relacionado con las propiedades de sus materiales constituyentes. Y debido a sus propiedades, las arcillas desempeñan un papel único tanto en la actividad humana, como en el proceso geológico.

Se pueden considerar a las arcillas como rocas constituidas por los denominados minerales de las arcillas. Dichos minerales son cristales de silicato tan pequeños que es mejor considerarlos microcristales. Así, por ejemplo, en un trozo de granito se pueden distinguir a simple vista cristales de cuarzo, feldespato y mica.

Hasta que pudieron utilizarse las técnicas de Difracción de Rayos X, Análisis Térmico Diferencial y el Microscopio Electrónico (dichas técnicas se describirán en el siguiente capítulo con más detalle) no se logró separar, identificar y estudiar los minerales de la arcilla.

Gracias a la aplicación de las técnicas antes mencionadas, se puede distinguir hoy en día los minerales de la arcilla y la arcilla propiamente dicha.

Los primeros son los minerales característicos que las componen - mientras que la última es la roca en la que los minerales de la arcilla se mezclan en proporciones variadas, pudiendo intervenir en la mezcla arena, carbonato de calcio y óxidos de hierro de entre otros. Así pues, el término arcilla encierra cuatro acepciones según se haga referencia al tamaño de las partículas, a los minerales, a las rocas o a su uso más corriente y extendido como material plástico.

- MINERALES DE LA ARCILLA:

En un mineral de la arcilla los elementos oxígeno, silicio, aluminio, hierro, magnesio y potasio (que se encuentran en estado iónico, es decir, tienen como mínimo un electrón más o menos - que el átomo no ionizado poseyendo por lo tanto, carga eléctrica) son esferas dispuestas tridimensionalmente y de forma regular. -- Las esferas son los bloques constituyentes de los minerales de la arcilla y la descomposición de los mismos determina el tipo de mineral. Cada tipo de disposición constituye un grupo de minerales de la arcilla, admitiéndose siete grupos en general. Seis de los siete grupos de minerales de la arcilla se componen de silicatos laminares o en capas, y los minerales del séptimo grupo adquirieron forma de bandas.

El grupo del Caolín es el que se encuentra la arcilla blanca, útil (entre otras aplicaciones) para la fabricación de porcelana y para dar la blancura al papel, recibe este nombre de una

colina de China de donde se extrajo arcilla blanca durante años y siglos. La especie principal de este grupo es la Caolinita que -- con micrografías muestra escamas hexagonales bien formadas, cada una de las cuales está formada por capas. La Difracción de Rayos X da un valor de siete Angstrom (un angstrom equivale a una diez millonésima de milímetro) para la distancia entre capas consecutivas. La fórmula química de la caolinita es:

$2SiO_2, Al_2O_3, 2H_2O$ por lo que es exclusivamente silico-alumí
nica.

El grupo de la Illita recibe este nombre del estado de Illinois de Estados Unidos de Norteamérica; el mineral más frecuente es la illita cuya estructura de micas compuestas de escamas y que muestran contornos irregulares. La distancia entre capas consecutivas es de diez angstrom. La fórmula química de la illita es parecida a la de la mica blanca, pero la primera contiene más agua y menos potasio.

El tercer grupo, se llamaba hasta hace poco grupo de la Montmorillonita que proviene de la ciudad de Montmorillon (Francia) pero hoy en día se conoce también con el nombre de Esmectita, denominación que alude su estructura en capas. Sus microcristales - tienen dimensiones pequeñas, forman láminas delgadas y carecen de contornos regulares. Las capas o láminas no están unidas por un - enlace muy fuerte, esto explica que el agua, numerosos elementos y hasta materia orgánica puedan penetrar por los espacios existen

tes entre las capas. Consecuentemente, la distancia entre capas - varía entre diez y diecisiete angstrom, lo cual da a las esmectitas propiedades de absorción y adsorción muy estimadas por la industria (Adsorción es la penetración superficial de un gas o un líquido en un sólido). La especie de esmectita más familiar es - la Montmorillonita.

Viene a continuación, el grupo de la Clorita cuyo nombre deriva del griego Chloros y que significa verde amarillento claro. Este grupo abarca gran variedad de especies, cada una de las cuales se forma a partir de la substitución de un elemento por otro en la estructura cristalina, siendo de catorce angstrom la distancia entre dos estratos consecutivos.

El término Vermiculita, nombre que recibe el quinto grupo, - procede de la tendencia de estos minerales los cuales al ser calentados adquieren el aspecto de gusanos diminutos. En las vermiculitas la distancia entre capas consecutivas es de catorce angstrom, pero el agua existente entre estas puede eliminarse por calentamiento de tal manera que dicha distancia se reduce a diez -- angstrom.

El grupo de minerales de la arcilla denominado interestratificado está constituido por una considerable variedad de formas e intermedias de los cinco grupos recién descritos. El grupo formado por bandas tiene un nombre doble: Sepiolita y Attapulgita; la sepiolita es de origen griego y en algunos sitios es sinónimo de espuma de mar. Las arcillas de este grupo se utilizan para fabricar

car pipas de espuma de mar. El nombre de attapulgita proviene de Attapulgos (estado de Georgia, E.U.); los minerales que forman el grupo contienen relativamente cantidades grandes de magnesio.

- CICLO GEOLOGICO:

Los minerales de la arcilla no se encuentran en las rocas -- que constituyen la parte profunda de la corteza terrestre, pero = sí abundan en su superficie. La razón de este contraste reside en el ciclo que sufren las rocas a través de una serie de procesos = geológicos.

El ciclo se desarrolla en cinco etapas, a saber: Las rocas = profundas de la corteza suben a la superficie por acción volcánica, procesos de plegamiento o fracturación de la propia corteza = terrestre. En la superficie las rocas sufren meteorización y erosión. Los productos resultantes son transportados (sobre todo -- por agua) a grandes distancias, depositándose finalmente en cuencas sedimentarias. Los sedimentos se van enterrando lentamente y transformando en roca a través del proceso denominado Diagénesis. Estas rocas sedimentarias sufren procesos de metamorfismo y granitización que las transforman en última instancia en gneis y granito.

Los minerales de la arcilla aparecen solo en las tres etapas intermedias; en realidad, la génesis principal de los minerales =

de la arcilla se debe al proceso de meteorización responsable de la formación del suelo, que tiene lugar durante la segunda de las cinco etapas.

Si se observa la figura 1.1 se aclararán las ideas anteriormente expuestas.

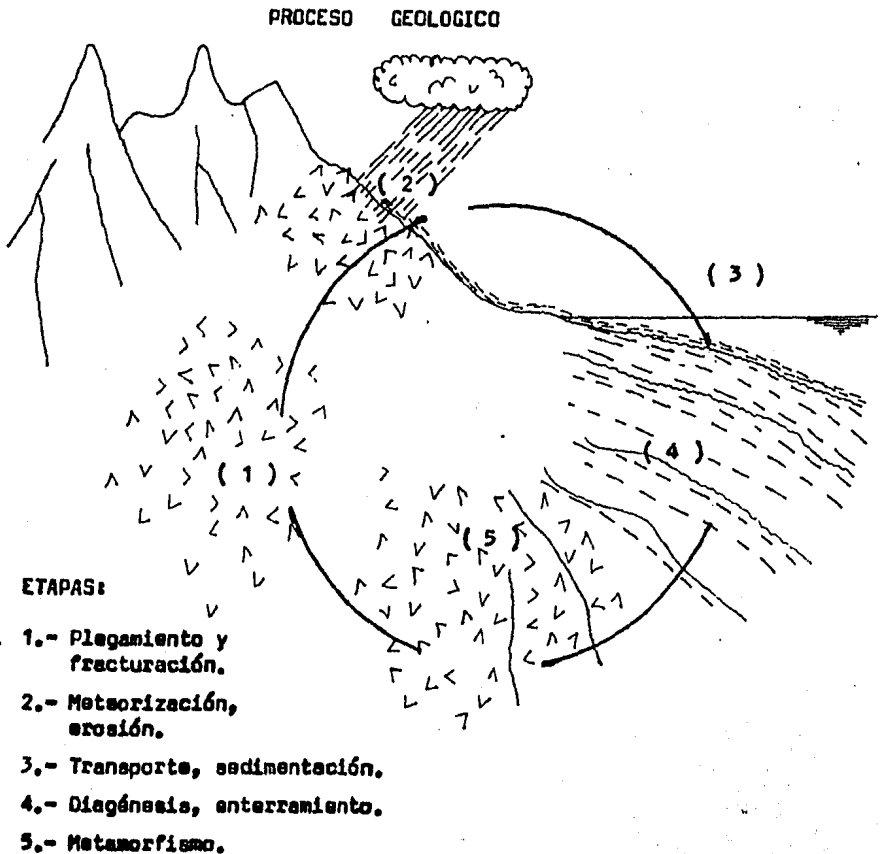


FIGURA 1.1

Los minerales de la arcilla aparecen sólo en las tres etapas intermedias. La meteorización comprende dos procesos principales: fragmentación e hidrólisis. La fragmentación es la desintegración de las rocas y materiales minerales primarios a través de mecanismos alternantes: Humedecimiento y desecación, helada y deshielo; puede producirse también por aristatitución de sales. La hidrólisis supone una reacción lenta de los minerales primarios con el agua, formando nuevos minerales; la actividad de la hidrólisis aumenta con la temperatura y la humedad provocada por la pluviosidad.

La meteorización de las rocas varía según el clima de la zona donde esta se encuentra. En las regiones frías y montañosas la hidrólisis es mínima. El agua tiende a no circular por causa de las heladas y la vegetación escasea o falta. Primordialmente domina el proceso de la fragmentación, la cual determina que los únicos minerales de la arcilla formados estén compuestos de micas primarias desintegradas y ligeramente alteradas, y de cloritas.

En los desiertos la hidrólisis actúa poco ya que la temperatura es elevada y el agua escasea, lo cual hace que la meteorización química sea de poca importancia.

En regiones templadas tanto la fragmentación como la hidrólisis son activas. Los principales minerales meteorizados son las micas primarias y las cloritas, las cuales producen minerales de la arcilla como las illitas y las cloritas.

Si la meteorización continúa, quedan eliminados los iones -- más solubles y se substituyen los minerales originales por estructuras degradadas tales como las vermiculitas y los minerales es-- tratificados.

Como puede observarse en la figura 1.2, se ilustra la distri-- bución de los minerales en el globo terráqueo aproximadamente.

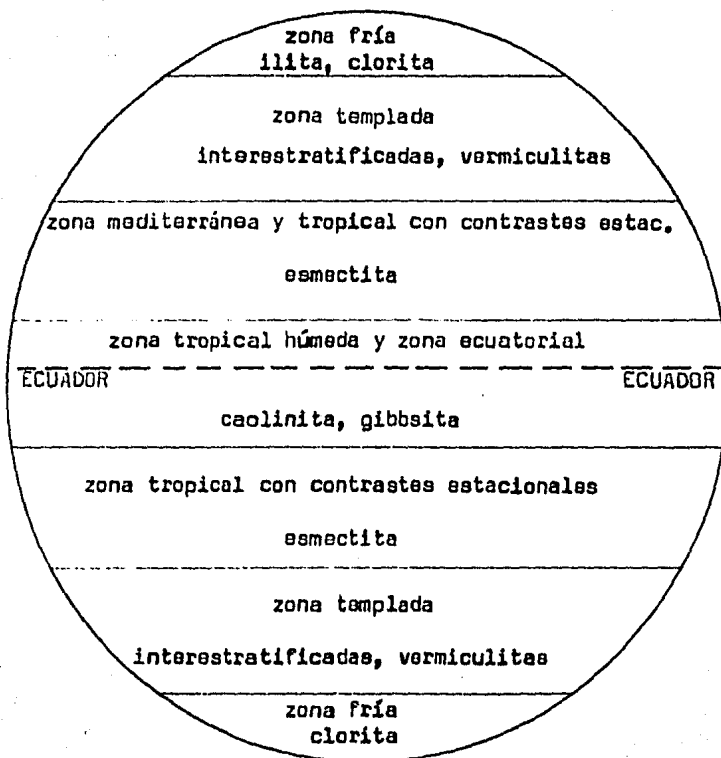


FIGURA 1.2

La hidrólisis actúa en toda su intensidad en regiones tropicales que poseen estaciones húmedas y secas. Los elementos son -- eliminados de los minerales y se combinan de nuevo dando lugar a los minerales de la arcilla: Montmorilonita y Caolinita. La montmorilonita se desarrolla bien en productos meteorizados de rocas como el basalto y en zonas que poseen estaciones largas y secas, o drenaje deficiente de manera que los productos de la meteorización se hagan más ricos en sílice, álcalis y metales alcalinoté-- rreos.

En las regiones ecuatoriales y tropicales húmedas la precipi-- tación anual sobrepasa los dos metros. La hidrólisis predomina de-- bido a la gran cantidad de agua caída y a la elevada temperatura existente. Si la zona está bien drenada el sílice y cationes - - (iones con carga positiva) solubles son eliminados de la roca, dejando los productos meteorizados enriquecidos de aluminio rela-- tivamente con lo que se favorece la formación de caolinita. Pero si el drenaje resulta todavía más eficaz o el proceso prolonga su duración, llega a eliminarse más sílice permaneciendo la alúmina con lo que se forma la gibbsita.

Se puede considerar la génesis de los minerales de la arci-- lla como si se tratara de un gigantesco proceso de subtracción. La lluvia lava y disuelve las rocas arrastrando los elementos en ellas contenidos de acuerdo con su solubilidad: sodio, potasio, - calcio, magnesio, hierro, silicio y aluminio.

Los elementos que permanecen se combinan para dar los minerales de la arcilla. Un lavado moderado produce los minerales interestratificados y las vermiculitas de los países atlánticos. Un lavado más intenso deja aún en su sitio algo de silicio, hierro y magnesio produciendo las esmectitas de los países mediterráneos y de las zonas tropicales semi-húmedas. Un lavado más intenso produce caolinita y en última instancia gibbsita.

Los problemas y pérdidas económicas causados por los suelos de arcillas expansivas y las causas físicas fundamentales del suelo han sido de considerable interés desde bajos costos en la construcción de caminos y la estabilización de suelos que empezaron a ser transformados siendo desde un arte hasta la aplicación de la ciencia. Dichos problemas producen estadísticas interesantes como en la tabla 1.3. En dicha tabla se ha tomado la información de varias regiones de Estados Unidos de Norteamérica.

TIPO DE CONSTRUCCION	ESTIMACION DEL PROMEDIO ANUAL DE PERDIDAS EN MILLONES DE DOLARES EN +- E.U. POR PRESENCIA DE SUELOS EXPANSIVOS.
Edificios comerciales	360.0
Andadores, calzadas, areas de estacionamiento	110.0
Estructuras bajo tierra	100.0
Aeropuertos	40.0
Caminos y carreteras	1,140.0
Construcciones multifamiliares	80.0
Casas-habitación	300.0

TOTAL	2,255.0

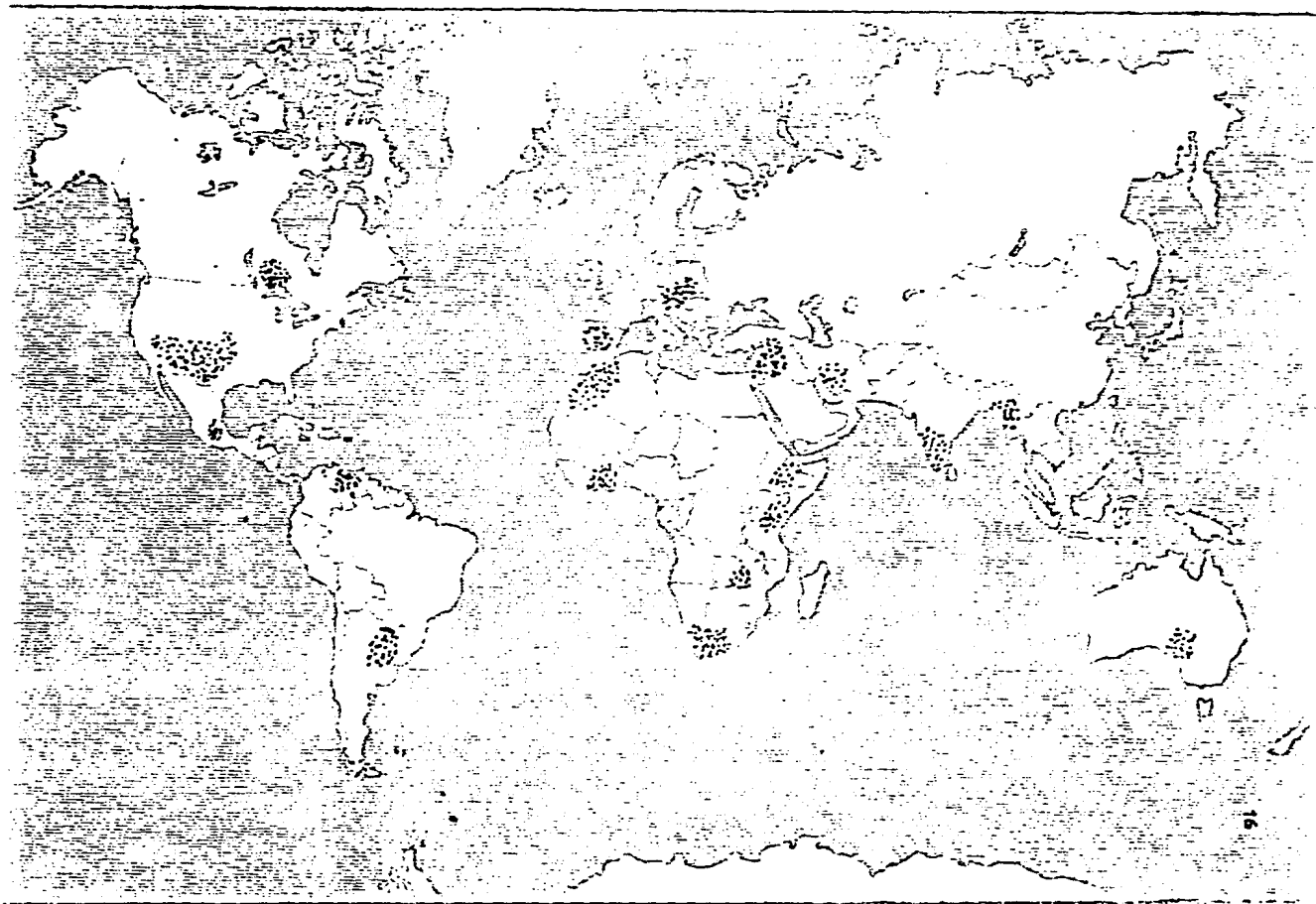
T A B L A 1.3

El problema crece en importancia si se toma en cuenta que en muchos países del tercer mundo están incrementando su infraestructura, teniendo como consecuencia que las áreas constructivas se extiendan a zonas que hasta ahora han sido evitadas por la presencia de suelos expansivos. Respecto a este punto de vista, se prevé a futuro que se requerirán mejores estudios en el conocimiento del fenómeno de la expansión en arcillas, con lo que se podrán obtener óptimas soluciones para la cimentación de las estructuras en este tipo de suelos. Con motivo de aclarar ideas, pueden observarse las tablas 1.4 y 1.5.

PAISES CON AREAS CONOCIDAS DE ARCILLAS EXPANSIVAS.

Argentina	Australia
Burma	Canada
Cuba	España
Etiopía	Gana
India	Israel
Irán	México
Marruecos	Rodesia
Sudáfrica	Turquía
E.U.A.	Venezuela

T A B L A 1.4



REGIONES DE LA REPUBLICA MEXICANA
CON SUELOS EXPANSIVOS.

Ahome, Sin.	Apatzingan, Mich.
Celaya, Gto.	Chihuahua, Chib.
Cd. Obregón, Son.	Cuatla, Mor.
Cuernavaca, Mor.	Culiacán, Sin.
Chilpancingo, Gro.	Durango, Dgo.
El Carrizo, Sin.	El Mante, Tamps.
Hermosillo, Son.	Iguala, Gro.
Irapuato, Gto.	La Piedad, Mich.
León, Gto.	Mexicali, B.C.N.
Morelia, Mich.	Pánuco, Ver.
Pujilic, Chis.	Querétaro, Qro.
Reynosa, Tamps.	Río Bravo, Tamps.
Sahuayo, Mich.	Soto La Marina, Tamps.
Tamúñ, S.L.P.	Villa de Gps., N.L.
Villahermosa, Tab.	Yuriria, Gto.

CAPITULO II: IDENTIFICACION DE ARCILLAS EXPANSIVAS.

Partiendo de los numerosos minerales (principalmente silicatos) que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a un producto final: Arcillas.

La investigación de las propiedades mineralógicas de estos sedimentos comenzó en épocas recientes (1930) y presenta gran importancia en ingeniería ya que el comportamiento mecánico de las arcillas se ve decisivamente influido por su estructura en general y por su constitución mineralógica en particular.

Las arcillas están constituidas principalmente por silicatos de aluminio hidratados, teniendo en su formación en algunos casos, silicatos de magnesio, hierro u otros minerales hidratados.

Estos minerales tienen una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de estas láminas: la sílica y la aluminica. En la primera, su formación es de un átomo de silicio rodeado de cuatro de oxígeno en forma de tetraedro. En la segunda, su formación es de un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno formando octaedros.

De acuerdo con su estructura los minerales de la arcilla se clasifican en tres grandes grupos: A) Caolinitas, B) Montmorilonitas, - - - C) Illitas. Este trabajo se enfocará al estudio del segundo grupo citado.

En la tabla siguientes se dan valores del peso específico relativo de las partículas de un determinado grupo de minerales:

MINERAL	PESO ESPECIF. RELATIVO
Cuarzo	2.65
Feldespato-Na-Ca	2.62 - 2.76
Dolomita	2.85
Biotita	2.80 - 3.20
Pirofilita	2.84
Caolinita	2.61* 2.64 ± 0.02
Ilita	2.84* 2.6 ± 2.86
Atapulgita	2.30
Feldespato-K	2.54 - 2.57
Calcita	2.72
Moscovita	2.70 - 3.10
Clorita	2.60 - 2.90
Serpentina	2.20 - 2.70
Haloisita ($2H_2O$)	2.55
Montmorilonita	2.74* 2.75 - 2.78

*.- Calculado a partir de la estructura cristalina.

T A B L A 2.1

En la siguiente figura se presentan los tamaños de diversas partículas y los campos de aplicación de algunos métodos de apreciación de estos tamaños. A la vista de esta figura puede obtenerse una idea de conjunto sobre los tamaños de las partículas y su determinación.

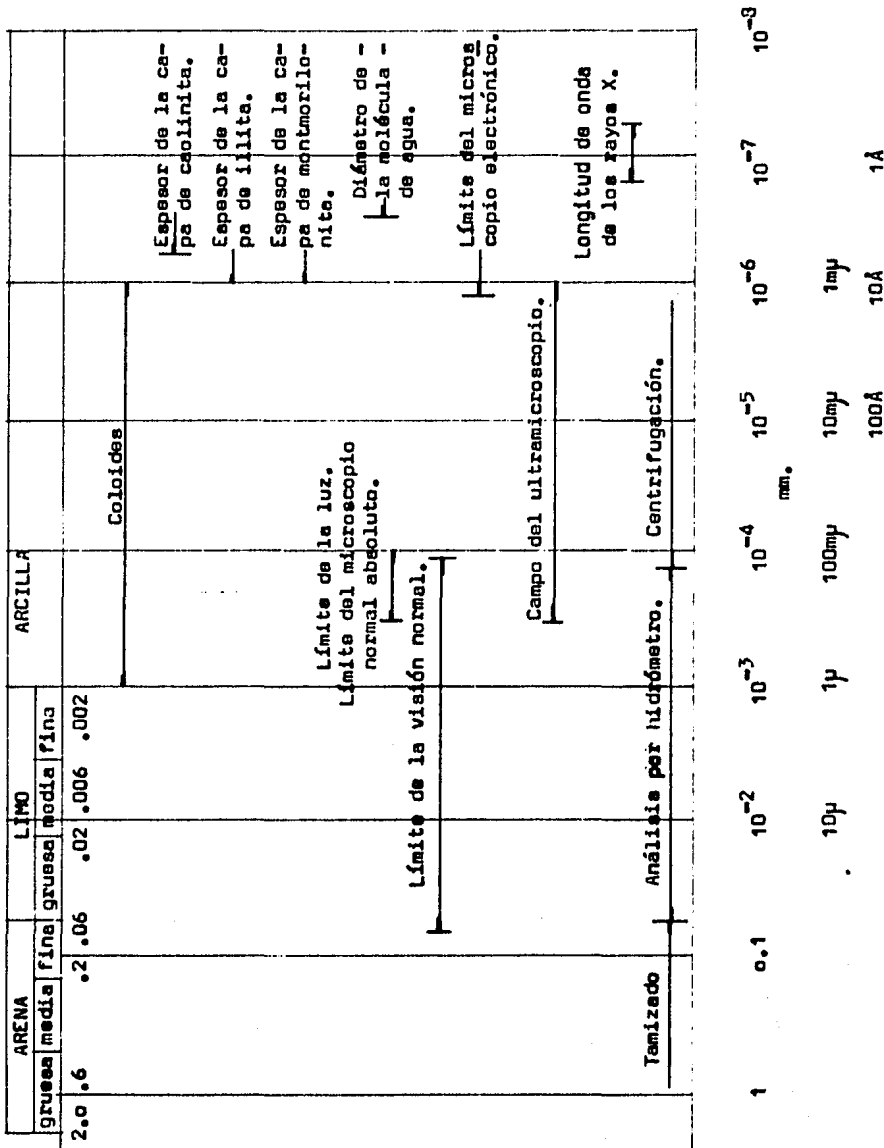


FIGURA 2.2

La tabla que es solamente aproximada e indica órdenes de magnitud ilustra la gran importancia del tamaño de las partículas sobre la cantidad de agua absorbida. Para aclarar el significado de estos resultados considérase que una arcilla ilítica típica en la naturaleza puede tener una humedad del 50%. Según los cálculos, se observa que casi toda esta agua es libre, es decir no está fuertemente adsorbida por el esqueleto mineral y por tanto constituye una fase separada de esta. Sin embargo, en muchas arcillas con elevado contenido de montmorilonita puede ser bastante difícil separar la fase mineral de la acuosa. Lo anteriormente expuesto puede aclararse mejor si se observa la tabla 2.3.

PARTICULA	SUPERFICIE ESPECIFICA (m ² /gr.)	CONTENIDO DE AGUA*(Para una capa de 5 Å.) (%)
Arena de 0.1 mm.	0.03	1.5 x 10 ⁻⁴
Caolinita	10.0	0.5
Ilita	100.0	5.0
Montmorilonita	1,000.0	50.0

*.- El contenido de agua se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Cont. de agua} = (\text{Superf. específ.}) \times (\text{espesor de la capa de agua}) \times (\text{peso específ. del agua})$$

Para la Caolinita,

$$\text{Cont. de agua} = (10 \text{ m}^2/\text{gr}) \times (5 \times 10^{-10} \text{ m}) \times (10^6 \text{ gr/m}^3)$$

$$\text{Contenido de agua} = 5 \times 10^{-3} \text{ ó } 0.5\%$$

Ya que este trabajo se enfocará al estudio de las arcillas montmoriloníticas cabe decir que, estas están formadas por una lámina aluminica entre dos sílicas o silícicas; por lo que la unión de las formaciones es débil, por lo tanto las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura de la arcilla con relativa facilidad. Lo anterior produce un cambio de volumen de los cristales lo que se traduce en una expansión.

Las arcillas montmoriloníticas en contacto con agua tienden a ser inestables (se hace referencia a un cambio de volumen), para lo cual tiene que tomarse en cuenta ciertas variables que influyen en lo anterior y que pueden ser:

- Diferencias del perfil,
- Origen del suelo,
- Localización del nivel de aguas freáticas,
- Tamaño de partículas,
- Grado inicial y profundidad de desecación en el suelo,
- Comportamiento de otras estructuras en la zona,
- Condiciones de drenaje,
- Consistencia física,
- Esfuerzos aplicados,
- Tendencia del suelo dada su expansión volumétrica.

Ahora se describirán los métodos para la identificación de las arcillas expansivas. Los métodos para la identificación de estas son cuatro a saber:

- a) Identificación mineralógica,
- b) Método de las propiedades índices,
- c) Métodos indirectos,
- d) Método del U.S.B.R.

A) IDENTIFICACION MINERALOGICA:

La composición mineralógica de los suelos expansivos tiene una importante relación con el potencial de expansión. Las cargas eléctricas negativas sobre la superficie de los minerales de arcilla, la resistencia de la liga intercapas y la capacidad de intercambio catiónico contribuye al poder de expansión de la arcilla y para esto se conocen cinco procedimientos o métodos que pueden usarse y son:

- 1) Análisis Térmico Diferencial,
- 2) Análisis Químico,
- 3) Difracción de rayos X,
- 4) Adsorción de colorantes,
- 5) Análisis en el Microscopio Electrónico.

Los métodos antes mencionados son usados en combinación para poder hacer una evaluación adecuada. A continuación se describen dichos métodos brevemente:

1) ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL:

Este método está establecido como una técnica para el control de materiales que cambian sus características al ser sometidos al calor; pero se puede decir, que esta técnica no siempre es precisa.

2) ANALISIS QUIMICO:

El análisis químico puede ser valioso complemento en la identificación de arcillas.

En el grupo de la montmorilonita dentro de los minerales de la arcilla, se puede utilizar el Análisis Químico para determinar la naturaleza del isomorfismo y así mostrar el origen y posición de la carga en la redícula.

Según Kelley (ingeniero investigador norteamericano), el carácter isomorfo del grupo de la montmorilonita no se puede demostrar de otra manera. El isomorfismo involucra tres variaciones básicas en la sustitución:

La sustitución de Al por Si en posición tetraédral en la redícula.

La sustitución de Fe por Al en posición octaédral.

La sustitución de Mg por Al en posición octaédral.

3) DIFRACCION DE RAYOS X:

Este método es utilizado para determinar la proporción en la que se encuentran los distintos minerales que constituyen a una arcilla coloidal, consistiendo en hacer una comparación entre las intensidades de las líneas de difracción de los distintos minerales con las intensidades de la línea de la sustancia estándar con las que se compara.

4) ADSORCION DE COLORANTES:

Los colorantes y otro tipos de reactivos que tienen colores que los caracterizan cuando son adsorbidos por una arcilla se han utilizado para la identificación de estas. Cuando una muestra de arcilla ha sido tratada con ácido previamente, el color que toma por la adsorción del colorante depende de la capacidad de intercambio de la base de los diversos minerales de arcilla presente. La presencia de montmorilonita puede ser detectada si los contenidos son mayores de 5% ó 10%, siendo un procedimiento de prueba relativamente simple y rápido para efectuar la coloración.

5) ANALISIS EN EL MICROSCOPIO ELECTRONICO:

El ver en el microscopio electrónico los minerales de arcilla, da una idea directa del material observado dando como resultado distintas características morfológicas. El principal propósito de utilizar este método es el de determinar su composición mineralógica, textura y estructura interna.

Ravina (otro investigador), demostró que las arcillas no expansivas aparecen como placas planas relativamente gruesas mientras que la montmorilonita tiene una presentación con textura ondulada, acanalada, como si fuera un panel de abejas. Es posible evaluar algunas propiedades de los suelos que son expansivos, observando el grado de ondulado y unión entre sus partículas se mediante la exploración en un microscopio electrónico.

B) METODO DE LAS PROPIEDADES INDICES:

Las pruebas de las propiedades índices de los suelos se pueden --
 usar para la evaluación e identificación de la expansión de dichos sue-
 los. Estas pruebas son de fácil ejecución y son:

- 1) Contracción Lineal,
- 2) Prueba de Contenido de Coloides,
- 3) Límites de Atterberg,
- 4) Prueba de Expansión Libre,
- 5) Potencial de Expansión.

1) CONTRACCION LINEAL:

En 1955, Altmeier (investigador) sugirió como guía para la
 determinación del potencial de expansión para diversos valores --
 del límite de contracción y de contracción lineal lo siguiente:

LIMITE DE CONTRACCION (%)	CONTRACCION LINEAL (%)	GRADO DE EXPANSION
menor de 10	mayor de 8	crítico
de 10 a 12	de 5 a 8	marginal
mayor de 12	de 0 a 5	no crítico

T A B L A 2.4

2) PRUEBA DE CONTENIDO DE COLOIDES:

Las características dimensionales de las partículas de una arcilla parecen tener influencia sobre su potencial de expansión en el contenido de coloides. Seed, Woodward y Lundgreen (investigadores norteamericanos) dicen que no hay correlación entre el potencial de expansión y el porcentaje del tamaño de las partículas. Sin embargo, para un tipo de arcilla dada la cantidad de expansión se incrementa con la cantidad de partículas de arcilla presentes en el suelo.

Para cualquier tipo de arcilla dada la relación entre el potencial de expansión y el porcentaje de partículas de arcilla se puede expresar por medio de la siguiente ecuación:

$$S = (K) \times (C)^X$$

donde:

S.- Potencial de expansión, expresado como un porcentaje de la expansión bajo una sobrecarga de 0.0703 kg/cm^2 , de una muestra compactada con su contenido de humedad óptimo a la máxima densidad en la prueba de compactación A.- A.S.H.O. estándar.

K.- Coeficiente que depende del tipo de arcilla.

C.- Porcentaje de partículas menores que 0.002 mm .

X.- Exponente que depende del tipo de arcilla, donde la cantidad de partículas menores que 0.002 mm , determinada por la prueba del hidrómetro, la cantidad y tipo de coloides la cual está reflejada por X y K en dicha ecuación contra la cantidad de expansión.

3) LIMITES DE ATTERBERG:

Se demostró en el año de 1956 (por medio de Gibbs y Holtz) que el índice de plasticidad y el límite líquido son índices para determinar las características de expansión de la mayoría de las arcillas. Se puede aclarar mejor lo antes expuesto si se observa la tabla 2.5.

4) PRUEBA DE EXPANSION LIBRE:

La prueba de expansión libre consiste en colocar un volumen conocido seco en el agua y observar el volumen expandido o hinchado después de que el material se haya asentado sin sobrecarga alguna en el fondo de una probeta graduada. La diferencia entre el volumen final y el volumen inicial es el valor de la expansión libre.

Holtz propuso que los suelos que tienen un valor límite inferior del 100% en expansión libre pueden causar graves daños a estructuras ligeras, en tanto que los suelos que tienen un valor de expansión libre menor que el 50%, raramente tendrán cambios de volumen apreciables aún bajo cargas muy ligeras.

5) POTENCIAL DE EXPANSION:

El potencial de expansión se define como el porcentaje de expansión de una muestra confinada lateralmente la cual se ha saturado bajo una carga de 0.0703 kg/cm^2 , después de haber sido compactada a su máxima densidad y contenido de humedad de acuerdo a

T A B L A 2.5

LIMITES DE ATTERBERG PARA SUELOS ARCILLOSOS.

MINERAL	CATION DE CAMBIO	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE DE PLASTICIDAD (%)	LIMITE DE CONTRACCION (%)
Atapulgita	H	270	150	120	7.6
Caolinita	Fe*	56	35	21	—
	Fe	59	37	22	29.2
	Mg	54	31	23	28.7
	Ca	38	27	11	24.5
	K	49	29	20	—
	Na	53	32	21	26.8
Illita	Fe*	79	46	33	—
	Fe	110	49	61	15.3
	Mg	95	46	49	14.7
	Ca	100	45	55	16.8
	K	120	60	60	17.5
	Na	120	53	67	15.4
Montmorillonita	Fe*	140	73	67	—
	Fe	290	75	215	10.3
	Mg	410	60	350	14.7
	Ca	510	81	429	10.5
	K	660	98	562	9.3
	Na	710	54	656	9.9

*.- Después de cinco ciclos de humedecimiento y secado. Datos de Cornell (en 1951).

la prueba de compactación A.A.S.H.O. Woodward, Lungreen y Seed — establecieron las siguientes relaciones simplificadas:

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

donde:

S.- Potencial de expansión,

K.- 3.6×10^{-5} que es una constante,

IP.- Índice de plasticidad.

La ecuación anterior se aplica sólo a los suelos con contenido de partículas arcillosas entre 8 y 65%. Ya que el límite líquido y la expansión de las arcillas dependen de la cantidad de agua que una arcilla trata de absorber, no es sorprendente que ambos conceptos estén relacionados.

La relación entre el potencial de expansión de las arcillas y el índice de plasticidad se puede establecer como sigue:

POTENCIAL DE EXPANSION INDICE DE PLASTICIDAD

muy alto

mayor a 35

alto

de 20 a 55

medio

de 10 a 35

bajo

de 0 a 15

T A B L A 2.6

C) METODO DE LAS MEDIDAS INDIRECTAS:

Las medidas indirectas de la expansión de los suelos han tenido - diversos enfoques, ya que el método de Laad y Lambe por medio de la medición del P.V.C. (cambio de potencial de volumen) y que es probablemente un método rápido y simple; en tanto que el método de Succión de Suelos se considera como una nueva propuesta para evaluar la expansión y la presión de expansión.

- METODO P.V.C. (Potential Volume Change):

La determinación del Cambio de Potencial de Volumen de un suelo fue desarrollado principalmente por T. William Lambe. Para dicho método se utilizan pruebas remoldeadas; se compacta la muestra primeramente en un anillo fijo del consolidómetro con una - - energía de compactación de $268,775 \text{ kg-m/m}^3$. Luego se aplica una - presión inicial de $14,06 \text{ kg/cm}^2$, y se agrega el agua a la muestra la cual está contenida en el anillo. La lectura del anillo de prueba se efectúa después de transcurridas dos horas. Se efectúa la conversión a presión definiéndose esta como el índice de expansión. De la figura 2.8, el índice de expansión puede convertirse a cambio de potencial de volumen.

T.W. Lambe estableció las siguientes categorías para esta - clasificación del cambio de potencial de volumen, observese la tabla 2.7.

CATEGORIA	CLASIFICACION P.V.C.
muy crítica	mayor de 6.0
crítica	de 4.0 a 6.0
marginal	de 2.0 a 4.0
no crítica	menor de 2.0

T A B L A 2,7

Se hace mención que en esta prueba del PVC no se mide el potencial de expansión, ya que el potencial de expansión puede ser mucho mayor que el valor a obtener por medio del PVC. La prueba de evaluación PVC deberá usarse únicamente como una comparación entre diversos suelos de tipo expansivo.

- METODO DE SUCCION DE SUELOS:

Efectuando un análisis teórico, la succión total consiste en adicionar los conceptos de potencial osmótico, capilar y gravitacional. Sin embargo, dentro de un análisis ingenieril práctico se considera satisfactorio realizar un análisis experimental simulando el potencial capilar real del suelo.

El concepto anterior se puede traducir como el equivalente a la primera presión de poro negativa en el nivel inferior del molde de succión. El potencial capilar de un suelo se identifica con frecuencia en términos de su misma succión.

RELACION ENTRE EL INDICE DE EXPANSION
Y EL CAMBIO DE POTENCIAL DE VOLUMEN.

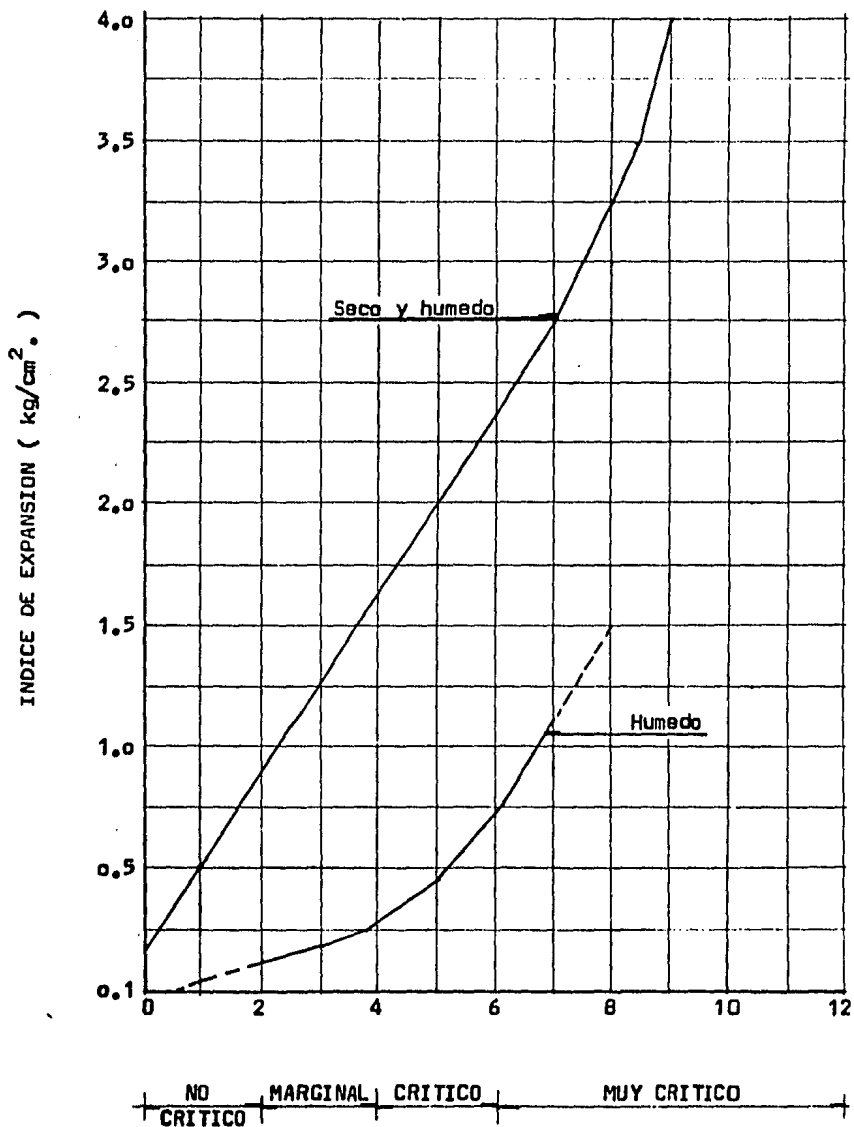


FIGURA 2.8

La succión del suelo se expresa por medio de las siglas "pF" que es el logaritmo del equivalente de la elevación capilar en centímetros de agua. De esta manera un pF de 2 representa 100 centímetros de presión hidrostática (0.1025 kg/cm^2), un pF de 4 - representa 10,000 cms, de presión hidrostática (10.25 kg/cm^2).

La cantidad de agua libre comparada con la cantidad de succión del suelo de muestra debe estar en equilibrio, o sea debe obtenerse un resultado de cero. Cuando se va secando dicha agua, la succión aumenta rápido; y cuando la muestra se seca en un horno, el valor de dicha succión puede alcanzar la cantidad de varias miles de atmósferas.

Obermeier (investigador) dedujo que en una masa de arcilla saturada la descarga de esfuerzos al efectuar una excavación para recolectar muestras puede incrementar la presión de poro negativa en los estratos contiguos. Por lo que el agua puede fluir dentro del suelo que quedó bajo la excavación y causar una expansión. El objetivo de medir la expansión antes descrita, es decir y en pocas palabras la succión es de predecir el movimiento de la humedad en equilibrio.

D) METODO DEL U.S.B.R. (United States Bureau of Reclamation):

Este método fue desarrollado por Gibbs y Holtz (investigadores norteamericanos) basándose en consideraciones simultáneas de las propiedades de los suelos.

Las típicas relaciones de dichas propiedades se muestran en la tabla 2.9). Teniendo en cuenta las gráficas de la figura 2.10, Gibbs y Holtz propusieron la identificación de suelos arcillosos expansivos -- con las siguientes condiciones:

RELACION DE PROPIEDADES DE SUELOS INDICES
Y EL PROBABLE CAMBIO DE VOLUMEN PARA SUELOS ALTAMENTE PLASTICOS.

POTENCIAL DE EXPANSION	EXPANSION EN CONSOLIDOMETRO, BAJO PRESION VERTICAL DE 0.07 kg/cm ² . (%)	INDICE DE PLASTICIDAD (%)	LIMITE DE CONTRACCION (%)	PARTICULAS MENORES QUE UNA MICRA. (%)	EXPANSION LIBRE (%)
Bajo	menor a 10	menor a 20	mayor a 13	menor a 17	menor a 50
Medio	de 10 a 20	de 12 a 34	de 8 a 18	de 12 a 27	de 50 a 100
Alto	de 20 a 30	de 23 a 45	de 6 a 12	de 18 a 37	mayor a 100
Muy Alto	mayor a 30	mayor a 32	menor a 10	mayor a 37	mayor a 100

T A B L A 2.9

RELACION DE CAMBIO DE VOLUMEN A CONTENIDO DE COLOIDES, INDICE DE PLASTICIDAD, -
Y LIMITE DE CONTRACCION (según Gibbs y Holtz).

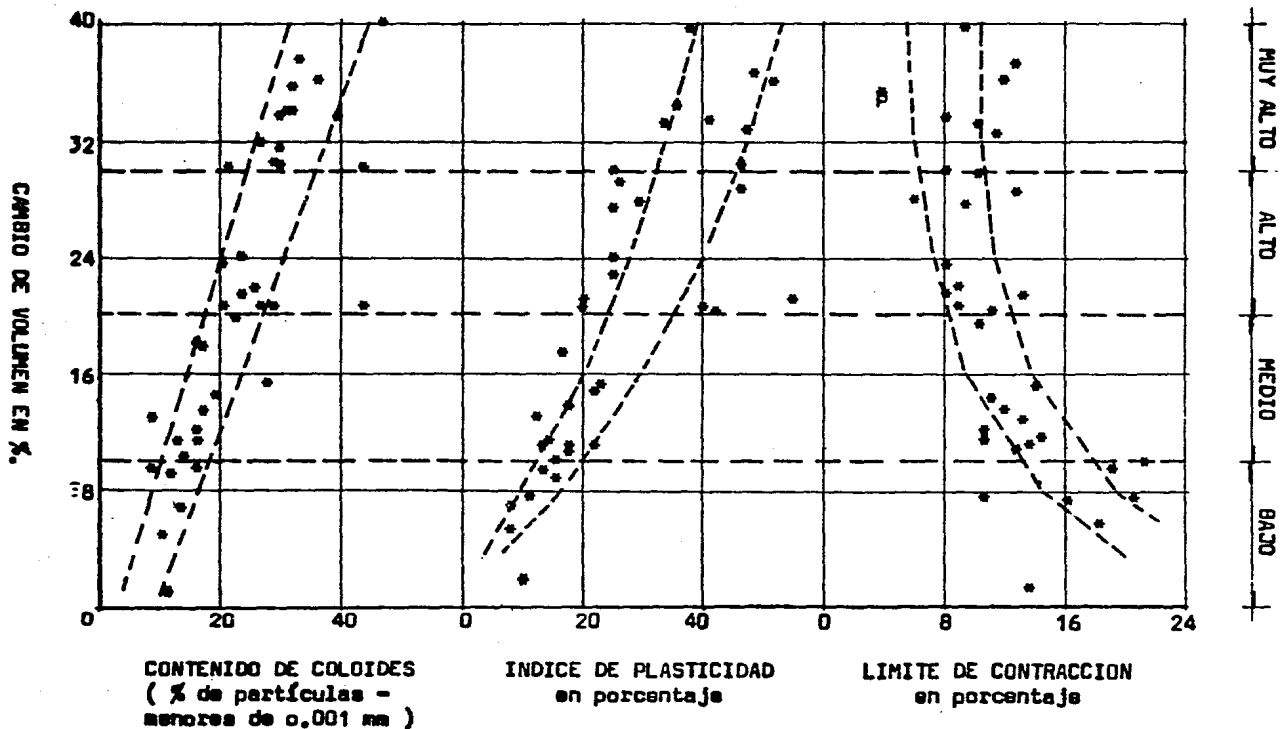


FIGURA 2.10

Para obtener las gráficas de la figura anterior se realizaron experimentos de expansión a pruebas remoldadas e inalteradas en cuarenta y cinco especímenes, por lo que se puede concluir que los resultados no son suficientes para establecer relaciones empíricas verdaderas entre las tres pruebas índices de la figura 2.10 y la expansión media. Sin embargo, deberá tener especial consideración ya que el comportamiento del suelo depende de estas muestras remoldadas e inalteradas.

La figura siguiente es una representación gráfica de los datos contenidos en la tabla 2.9 y zonifica a los suelos expansivos en un plano Índice de Plasticidad-Porcentaje de partículas menores que una micra.

CLASIFICACION DE SUELOS EXPANSIVOS SEGUN U.S.B.R.

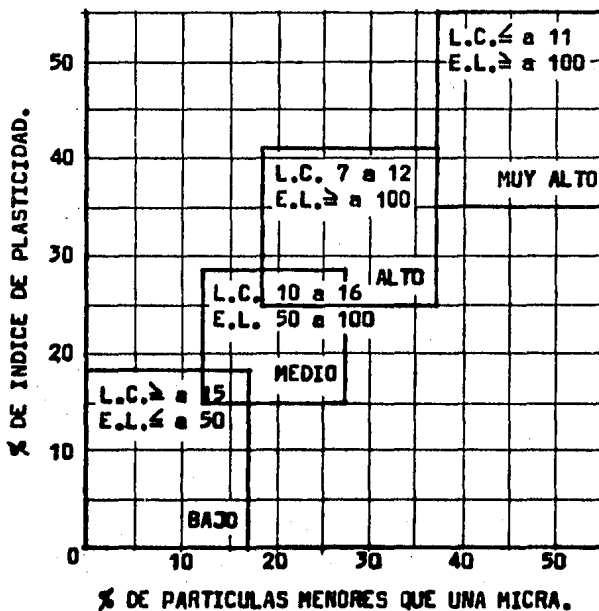


FIGURA 2.11

CAPITULO III: PARAMETROS DE EXPANSIBILIDAD DE SUELOS ARCILLOSOS.

Los criterios de estimación e identificación de suelos expansivos a través de ensayos índices deben su importancia a la sencillez y economía de los propios ensayos y a que sólo se requieren muestras alteradas complementadas en algunos criterios con la determinación del peso volumétrico del lugar.

En estudios de evaluación preliminares o complementarios, son un arma eficaz para detectar la presencia de suelos arcillosos expansivos, máxime que los ensayos se pueden obtener en el propio lugar ya sea en laboratorios móviles o locales.

Obviamente de estos criterios se obtiene información cualitativa que debe complementarse con los resultados de ensayos específicos. Así un suelo clasificado como expansivo puede presentar deformaciones despreciables para las presiones de trabajo, dado que su grado de saturación fue alto.

También debe tenerse en cuenta que al construirse vías terrestres es necesario utilizar en muchos casos suelos arcillosos o con alto contenido de arcilla. Pero con frecuencia este tipo de suelos pueden presentar el fenómeno de la expansión o suelos denominados activos. Es común la presencia de estos suelos en el cuerpo de las terracerías.

En regiones áridas estos suelos expansivos tienen bajo contenido

de agua, y es frecuente que pierdan agua por efecto de la acción de la luz solar durante la compactación, consecuentemente al pasar el tiempo dicha agua se verá incrementada bajo las superficies cubiertas por los pavimentos o por humedecimiento bajo las precipitaciones pluviales.

Estos cambios en los suelos activos producen efectos nocivos, sobre todo en la estabilidad volumétrica y en las características de resistencia al esfuerzo cortante.

A continuación se describen los principales efectos que un suelo expansivo puede sufrir en un pavimento flexible:

- 1) Disminución de la resistencia al esfuerzo cortante y de la capacidad de carga.
- 2) Expansión por humedecimiento.
- 3) Desarrollo de presiones por expansión en suelos confinados en que se restringe la expansión.
- 4) Contracción por secado.

Los daños típicos de los hechos anteriores que sufre el pavimento del tipo flexible son de uno o más de las siguientes cuatro clasificaciones:

- 1) Agrietamiento generalizado (piel de cocodrilo) en la carpeta con tendencia a la desintegración.
- 2) Agrietamiento longitudinal.
- 3) Deformaciones significativas localizadas en torno a las alcantarillas acompañadas generalmente de agrietamientos.

- 4) Descensos o ascensos de la superficie de rodamiento en una longitud importante traducidas en irregularidades y desigualdades aunque no produzcan otros daños visibles o agrietamientos.

De los años anteriores, el cuarto es el más frecuente seguramente ya que la experiencia así lo demuestra. Cualquier intento por tener presente los suelos expansivos en el comportamiento de un pavimento flexible debe suponerse un cierto grado de estimación de los cambios de contenido de agua que ocurrirán en la vida útil del pavimento.

También será útil establecer criterios de clasificación de suelos finos, ya sea en el laboratorio o mejor aún en el campo que en forma sencilla se puede detectar la presencia de un suelo expansivo.

Skempton (investigador) propuso un criterio de clasificación en base a las actividades de la arcilla, según se observa en la tabla 3.1

— SEGUN SU TENDENCIA A LA EXPANSION,
CLASIFICACION DE LOS SUELOS FINOS.

CATEGORIA DEL SUELO	ACTIVIDAD
Suelo normal	de 0.75 a 1.50
Suelo activo	mayor que 1.50
Suelo inactivo	menor que 0.75

T A B L A 3.1

De acuerdo a lo anteriormente clasificado las ilitas son normales, las caolinitas inactivas, las bentonitas y montmorilonitas son activas.

El Bureau of Reclamation intentó clasificar las arcillas tal y como se explicó en el capítulo anterior, dependiendo de su potencial de expansión. En este caso se complementará dicho concepto si se toma en cuenta que para definir el llamado Grado de Expansión que es el porcentaje de expansión de una muestra de suelo secada al aire y colocada -- después en el consolidómetro, anegada en agua y bajo una presión vertical de 0.0703 kg/cm².

Pero el potencial de expansión también se define por otras características de las que las más importantes son el límite de contracción y el índice de plasticidad, porcentaje de partículas menores que una micra y la expansión libre. Obsérvese la tabla 2.9.

El último concepto se define por medio de la ecuación:

$$E.L. = (V - V_0) \times 100 / V_0$$

donde: E.L. = expansión libre del suelo en porcentaje.

V = volumen de la muestra después de la expansión en --
centímetros cúbicos.

V₀ = volumen de la muestra antes de la expansión, igual
a 10 centímetros cúbicos.

Realizando una prueba que consiste en formar una muestra de 10 --
cm³, de suelo secado al aire, formado con la parte del material que pa

se la malla # 40 y en introducirla en una prueba graduada de 100 cm^3 , llena de agua, midiendo el nuevo volumen de la muestra cuando llega al fondo de la probeta. Un suelo con potencial de expansión alto puede tener una expansión libre de más del 100%.

McDowell define para un sistema de clasificación un porcentaje de cambio volumétrico en la muestra del suelo sujeta a absorción capilar y a una presión de cámara de 0.0703 kg/cm^2 , en un aparato triaxial - usado en el Departamento de Pavimentos de Texas. El tiempo que se recomienda dejar a los especímenes sujetos a la absorción capilar depende de la plasticidad de la arcilla y es un número igual de días al índice plástico cuando este sea mayor a 15.

Se encontró que el cambio volumétrico para unas condiciones iniciales dadas del suelo puede correlacionarse en cierta medida con el índice de plasticidad, lo que proporciona un criterio para clasificar la arcilla según la figura 3.2.

Seed y sus colaboradores definen el potencial de expansión como - el porcentaje de expansión vertical de una muestra compactada con su contenido de agua óptimo y su peso volumétrico máximo (prueba A.A.S.- H.O. estándar) cuando se coloca en un consolidómetro y se anega en agua bajo una presión vertical de 0.0703 kg/cm^2 (1 lb/pul^2). Dicho potencial de expansión lo expresan por medio de una ecuación matemática y que se muestra más adelante.

SEGUN MCDOWELL, CORRELACION ENTRE
EL INDICE DE PLASTICIDAD Y LA EXPANSION VOLUMETRICA.

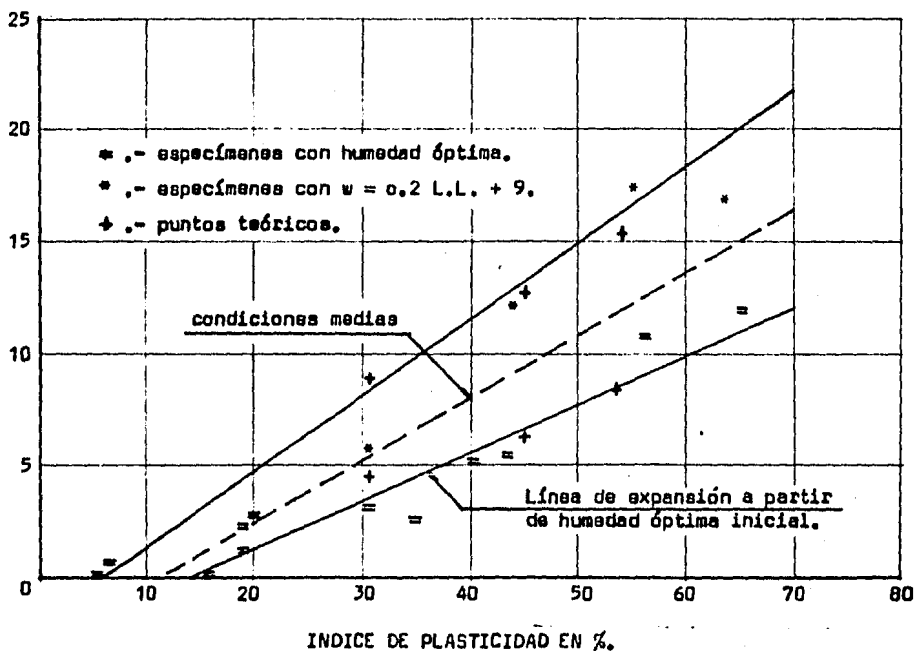


FIGURA 3,2

La expresión de Seed y sus colaboradores es así:

$$P.E. = (K) \times (C)^X$$

donde: P.E. = potencial de expansión.

C = porcentaje de partículas menores a dos micras.

x = número que depende del tipo de arcilla.

K = factor que depende de los tipos de minerales de la arcilla.

Para las pruebas reportadas por Seed y sus colaboradores $x = 3.44$ y para las mismas condiciones se encontró:

$K = 3.6 \times 10^{-5} \times A^{2.44}$ donde 'A' es la actividad de la arcilla en el sentido de Skempton. Puesto que 'A' se relaciona con el índice de plasticidad puede aclararse mejor esta idea si se observa la tabla 3.3

SEGUN SEED Y SUS COLABORADORES, CORRELACION ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y POTENCIAL DE EXPANSION.

INDICE DE PLASTICIDAD (%)	POTENCIAL DE EXPANSION (%)
10	de 0.4 a 1.50
20	de 2.2 a 3.80
30	de 5.7 a 12.20
40	de 11.8 a 25.00
50	de 20.1 a 42.60

T A B L A 3.3

Con fines de clasificación Seed propone los valores del potencial de expansión en la tabla a continuación:

CLASIFICACION DE LOS SUELOS SEGUN SU POTENCIAL DE EXPANSION

POTENCIAL DE EXPANSION (%)	CARACTERISTICAS DE EXPANSION DE LOS SUELOS.
de 0.0 a 1.5	Baja
de 1.5 a 5.0	Media
de 5.0 a 25.0	Alta
mayor a 25.0	Muy Alta

T A B L A 3.4

La figura 3.5 muestra el resultado de las experiencias de Seed y sus colaboradores que indican como varía la presión de expansión que se desarrolla en el suelo con el paso del tiempo. El tiempo que transcurre en el laboratorio antes de que deje de generarse presión de expansión y se llegue a la condición de equilibrio, depende de la naturaleza de los minerales siendo esta presión mayor en las arcillas montmoriloníticas y menor presión en las arcillas caoliníticas.

La principal desventaja de los trabajo de Seed es que se hicieron con suelos artificiales, preparados en el laboratorio, con lo que se introducen dudas al respecto en cuanto a la veracidad de los resultados. No sin excluir el trabajo de investigación el cual puede mostrar alguna de tantas maneras de como realizar estos trabajos.

EFFECTO DEL TIEMPO TRANSCURRIDO EN LA PRESION DE EXPANSION.

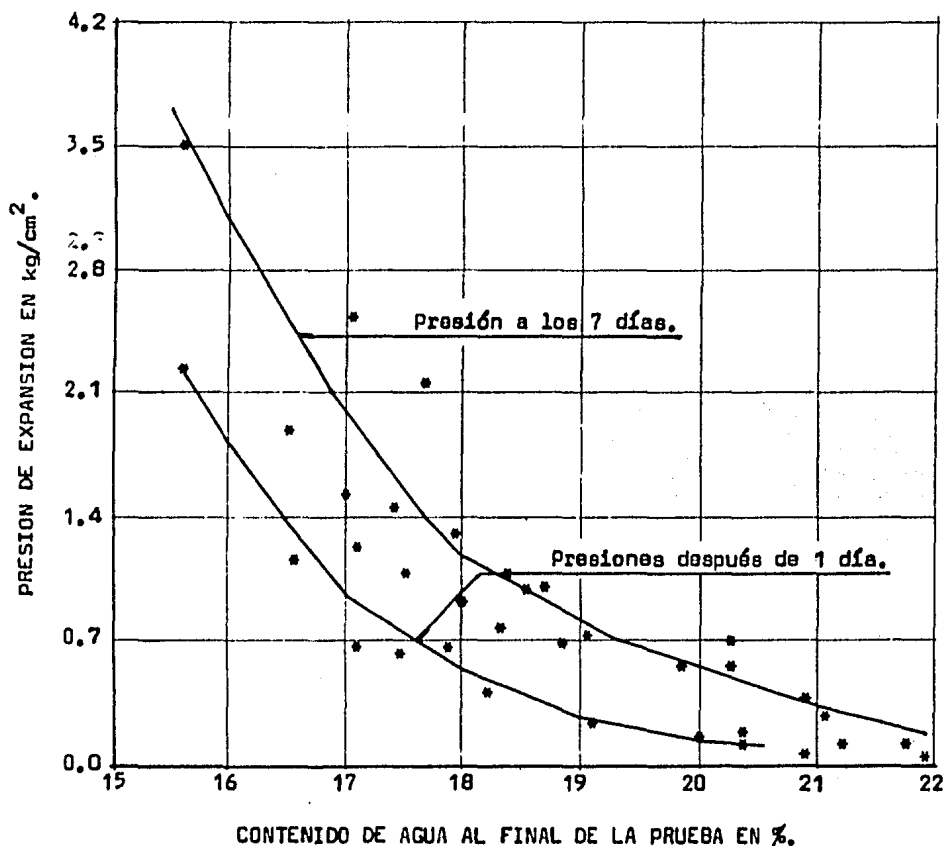


FIGURA 3.5

El principal problema al proyectar o construir pavimentos sobre suelos expansivos es el evitar cambios en el contenido de agua, para reducir mínimamente los agrietamientos y las distorsiones.

Se afirma que ningún método es exitoso en esta misión, si bien el empleo del apropiado en el caso particular de que se trate puede reducir significativamente los daños.

Los métodos prácticos para evitar los daños que produce la expansión de un suelo susceptible en un pavimento se agrupan en tres grupos principalmente:

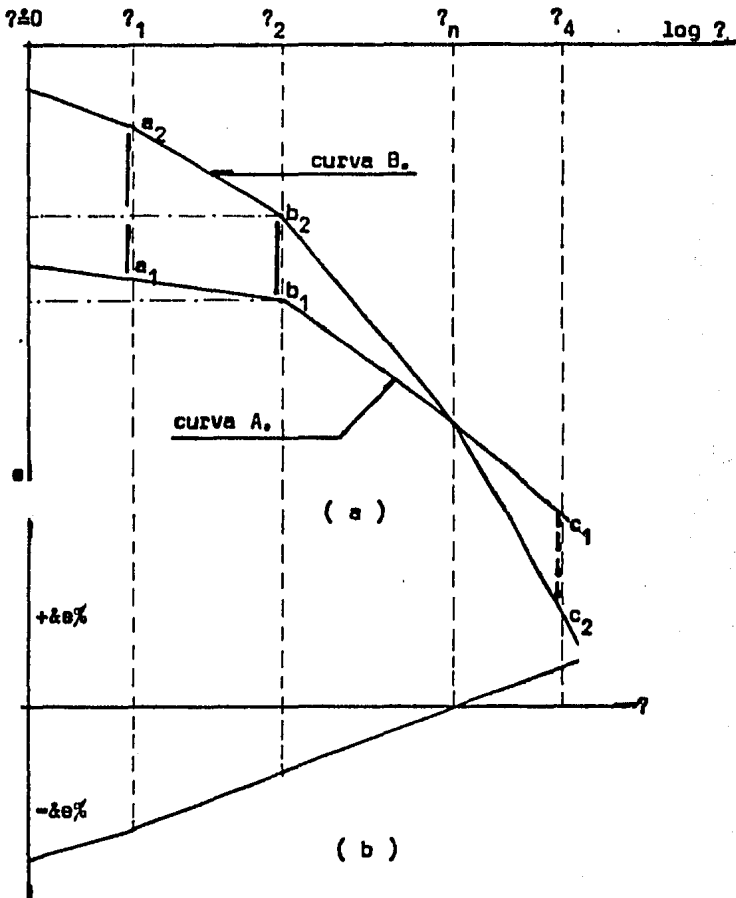
- a) Control o reducción de los cambios en el contenido de agua en suelos susceptibles ya sea por subdrenaje, drenaje, utilización de cubiertas impermeables u otros métodos afines.
- b) Reemplazo o mejora por mezcla de un suelo inerte de todo o parte del espesor activo o de la capa de pavimento que muestra o sea susceptible de actividad.
- c) Neutralización de la presión de expansión previamente valuada por colocación de sobrecarga suficiente en el terreno o la capa de pavimento de que se trate; la sobrecarga impuesta es generalmente peso de tierra.

Las propiedades de compresibilidad de las arcillas expansivas son de importancia práctica en la Mecánica de Suelos. Los materiales que caen dentro de esta categoría pueden ser encontrados principalmente en depósitos de suelo residual no saturados de material fino que contienen minerales de arcilla del tipo Montmorillonita o Illita, las cuales son sensibles a cambios de humedad; pero se ha demostrado en capítulos anteriores que la montmorillonita es aún más susceptible.

La adsorción de agua ocurre en los minerales de arcilla activa -- cuando se descomprimen al contacto con el agua, y como resultado se expanden; caso contrario es cuando están secas y se contraen fuertemente.

Si una cimentación sufre movimiento en este tipo de material ex-- pectivo y aunado a esto los cambios en el medio ambiente incrementan la humedad en el subsuelo, el estrato conteniendo este tipo de mate-- rial sufre fuertes desplazamientos verticales dañando la construcción que este soportando.

Para estimar la magnitud de las propiedades expansivas de estos - materiales en un estado confinado, tal y como pueden ser encontradas - en la naturaleza, pueden ser llevadas a cabo pruebas de compresibili-- dad en el consolidómetro; dichos resultados de las pruebas mencionadas anteriormente se muestran en la figura 3.6.



Curva A.- Material con contenido de agua natural.
 Curva B.- Material saturado antes de empezar la prueba.
 Simbología: σ = letra griega sigma.
 Δe = letra griega delta significando incremento se
 guida de la relación de vacíos 'e'.

FIGURA 3.6

La curva A muestra una prueba de compresibilidad efectuada en un espécimen de esta prueba con material intacto y a su humedad natural, y la curva B muestra la compresibilidad del mismo material cuando es saturado por acción capilar antes de efectuar la prueba.

Por medio de estas dos curvas, la expansión del material bajo un cierto estado de esfuerzos naturales puede ser determinado. La máxima expansión tomada en el lugar cuando el material es saturado bajo condiciones de sobrecarga o con un pequeño esfuerzo inicial.

Si un espécimen de la prueba es cargado con el esfuerzo ' γ_2 ' con su humedad natural en la curva A, después se permite la saturación del material por capilaridad, el material sufre una expansión pasándose de la relación de vacíos e_1 a e_2 . El cambio forzado por la saturación debido al esfuerzo γ_2 está dado por la expresión:

$$\Delta e_g = (e_2 - e_1) / (1 + e_1)$$

Nótese que en esta expresión se obtendrá un esfuerzo neutral γ_n por lo que el material no sufrirá expansión o contracción por la saturación.

Los valores de Δe_g pueden ser graficados contra esfuerzos efectivos verticales en donde el suelo fue saturado. Sin embargo, los materiales no saturados de origen residual llegan a ser más compresibles por saturación. Por lo tanto, la compresibilidad máxima de estos suelos puede ser estimada por medio de pruebas de compresibilidad en el consolidómetro o con muestras previamente saturadas. Para aprovechar la humedad natural, las características de expansión pueden asumir valores intermedios entre los límites de la curva A y la curva B tal y como se muestra en la figura 3.6 (b).

El método más conveniente y satisfactorio para determinar la ex-

expansión de una arcilla y su presión de expansión es el llamado Método Directo. Las medidas directas de suelos expansivos se pueden realizar con el uso del consolidómetro unidimensional de tipo convencional. El consolidómetro puede ser del tipo plataforma, tipo escala o de otro tipo. La carga se puede aplicar con el aire como en el caso del consolidómetro Conbel o por peso directo como en el consolidómetro Cantiliver.

La muestra de suelo se coloca entre dos placas porosas y se confina en un anillo metálico. El diámetro del anillo varía de 5.08 cms, a 10.12 cms, (2 a 4 pulgadas) dependiendo del tipo de dispositivo que se emplee en el muestreo. Los espesores de la muestra varían de 1.27 cms, a 2.54 cms, (1/2 a 1 pulgada). La muestra del suelo puede ser inundada desde la base hasta la parte superior. La expansión vertical medida, se reporta como un porcentaje del espesor inicial de la muestra y es la que se conoce como el porcentaje de expansión.

Un procedimiento como el anterior, permite una evaluación fácil y precisa del potencial de expansión de una arcilla bajo diversas condiciones. Después de que el suelo ha alcanzado su máximo incremento de volumen se vuelve a cargar de nuevo la muestra y se determina la presión de expansión. De esta manera la presión de expansión se puede evaluar fácilmente sin recurrir a aparatos que mantengan el volumen del suelo constante.

En la ejecución de una prueba de expansión las variables más importantes son:

- a) **Tiempo requerido.**- El tiempo requerido para completar el tiempo de expansión puede variar considerablemente y depende de la permeabilidad de la arcilla, del contenido de agua de la muestra, del peso volumétrico seco máximo y del espesor de la muestra. Para una muestra inalterada que tiene un espesor de 2.54 cm. pueden requerirse varios días para completarse la expansión máxima.
- b) **Presión de sobrecarga.**- Incrementando la carga aplicada se reducirá la magnitud de la presión. La presión de sobrecarga que la mayoría de los laboratorios utilizan varían el rango desde 0.0703 a 0.703 kg/cm².
- c) **Contenido de humedad.**- A más bajo contenido inicial de humedad se tendrán mayores expansiones. El contenido inicial de humedad se ve afectado por: El tiempo que se deja la muestra en el anillo antes de humedecerlo, el grado de evaporación que se permite mientras la muestra está en el anillo y la temperatura y humedad en el laboratorio.
- d) **Estado de la muestra.**- Para una muestra inalterada se incluye la condición de dicha muestra, el método de muestreo y la historia de esfuerzos de la

muestra. Para muestras remoldeadas se incluye el método de compactación, el tiempo de curado antes y después de la compactación y el peso volumétrico máximo.

CAPITULO IV: SOLUCIONES PRACTICAS.

Las soluciones para los problemas de cimentación en arcillas expansivas se puede dividir en dos grupos en general: En el primer grupo, se encuentran las soluciones que permiten el comportamiento natural del suelo, pero sin que este afecte a la estructura. Y en el segundo grupo, están aquellas soluciones cuya tendencia es la de nulificar o disminuir los efectos expansivos, o sea, se trata de estabilizarlos.

Son varios los métodos de solución al problema de la expansión de suelos de acuerdo a la clasificación anteriormente descrita. Siendo de un alto grado de dificultad el problema que se presenta en estructuras que transmiten pocas cargas al suelo y sobretodo si este suelo está sujeto al incremento de humedad al paso del tiempo. Sin embargo, dichos procedimientos deben considerar principalmente los aspectos económicos y prácticos de las obras, entre los cuales se mencionan los siguientes:

- a) Control de la compactación,
- b) Substitución del suelo expansivo,
- c) Estabilización química,
- d) Inundación previa del terreno o presaturación,
- e) Conservación de la humedad,
- f) Sobrecarga,
- g) Elementos estructurales,
- h) Estabilización física.

A) CONTROL DE LA COMPACTACION:

Este es uno de los métodos más prácticos y económicos para disminuir expansiones, ya que, por medio de investigaciones se ha encontrado que cuando los suelos arcillosos se compactan a pesos volumétricos bajos y contenidos de agua elevados, la expansión disminuye. Los métodos de compactación dinámicos que provocan deformaciones al corte reducen la expansión notablemente.

Los factores determinados por investigadores para influenciar las características de expansión de suelos cohesivos compactados incluye - el tipo y cantidad de mineral de arcilla, condiciones de compactación (contenido de humedad, densidad seca, grado de saturación y tipo de compactación), propiedades químicas del fluido poroso, presión de confinamiento aplicado durante la expansión, tiempo permitido para la expansión, presión repulsiva osmótica, compresión del aire en los huecos mientras el agua satura la masa del suelo, historia de esfuerzos del material y ciclos alternados de humedecimiento y secado.

Das propiedades de los suelos expansivos pueden considerarse en el procedimiento de compactación y son: porcentaje de expansión y presión de expansión.

El porcentaje de expansión es la cantidad de alza vertical expresada como un porcentaje del espesor inicial de una muestra de suelo humedecida y bajo una carga nominal de 0.0703 kg/cm^2 . (1 lb/pul^2). Esta prueba está determinada en la prueba de presión confinada (compre-

ción). Para un suelo expansivo compactado, la relación de humedad inicial es de densidad referida al porcentaje de expansión se observa mejor en la figura 4.1.

EFFECTO DE LA DENSIDAD Y HUMEDAD INICIAL
EN LAS PROPIEDADES DE EXPANSION
DE UN SUELO ARCILLOSO EXPANSIVO COMPACTADO
CUANDO ES HUMEDECIDO.

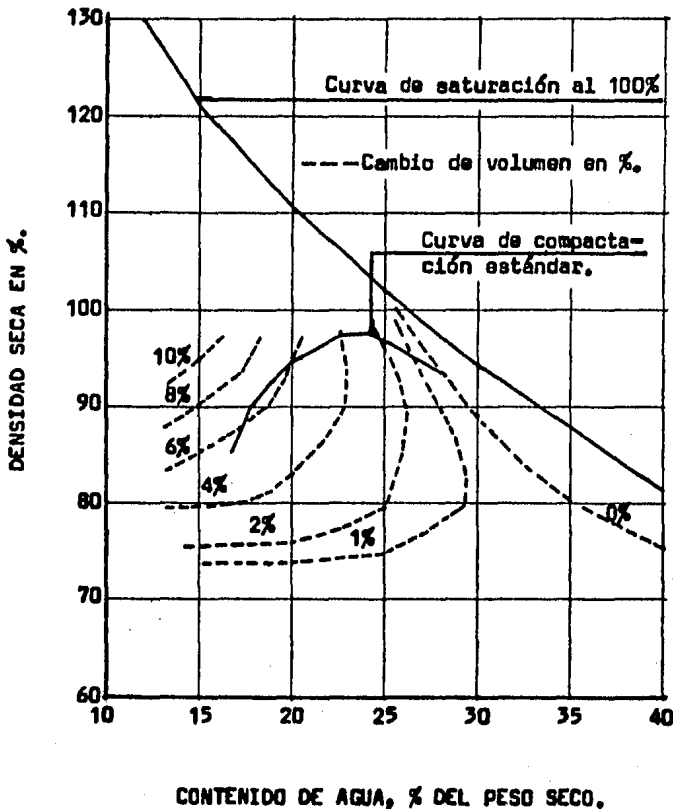


FIGURA 4.1

La figura anterior muestra que este suelo, cuando fue compactado al contenido de humedad óptimo con un esfuerzo de compactación estándar, se expandirá cerca del 3%. Esta expansión se reduce de 3 a 0% en humedad óptima y se incrementa de 3 a 6% en peso seco.

Cuando un suelo arcilloso tiene contacto con el agua, dicho material se expande hasta que sus fuerzas internas están en equilibrio con las fuerzas externas. Si el suelo está confinado, la presión de expansión se desarrolla.

PRESION DE EXPANSION CAUSADA POR LA ARCILLA DE PORTERVILLE HUMEDECIDA Y COMPACTADA A VARIAS CONDICIONES DE DESPLAZAMIENTO.

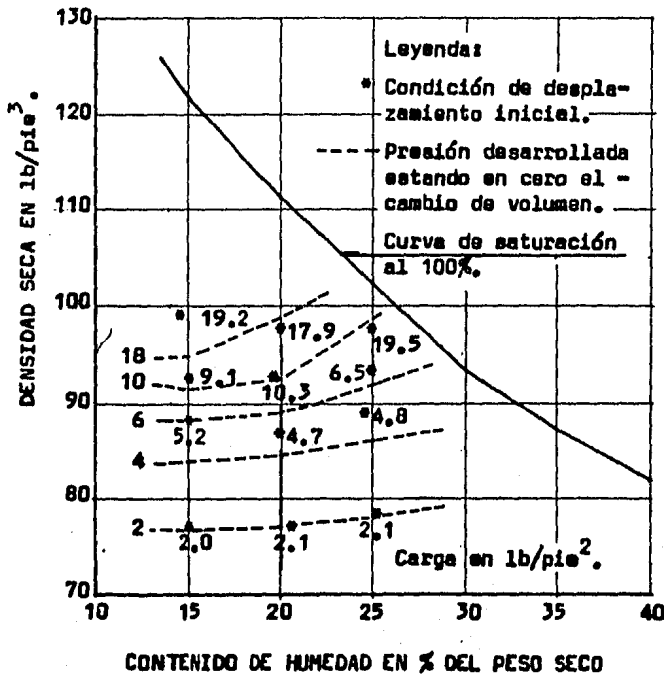


FIGURA 4.2

De la figura 4.2 Gibbs y Holtz informaron sobre una prueba de presión de expansión efectuada a las arcillas de Porterville del canal Delta-Mendota en California (E.U.), y puede observarse también que la presión necesaria para detener el volumen de expansión de la arcilla compactada estando en posición inicial el aparato de compresión confinada. Las líneas discontinuas están referidas a las condiciones del lugar para valores similares a la presión de expansión. Además, la figura indica un decremento en la densidad efectiva y una reducción de la presión de expansión la cual incrementa el contenido de humedad para esta arcilla compactada.

Cuando la magnitud de cargas restringidas es menor que la presión de expansión sucede un hinchamiento del suelo compactado. Por lo tanto, la curva de carga en expansión se obtiene de un suelo compactado dado por diferentes especímenes preparados con el mismo contenido de humedad y la misma densidad seca, posteriormente se sometieron a un aparato de compresión confinada, luego se permite el acceso de agua a cada espécimen bajo diferentes cargas. Barber (1956) recabó los resultados en la tabla 4.3.

Los problemas con arcillas expansivas pueden ocurrir durante la construcción de rellenos para edificaciones, para leas de canal, etc. donde las cargas aplicadas al suelo son pequeñas. En estos casos, el ascenso del nivel freático, grietas, securrimiento o eliminación de la superficie de evaporación puede incrementar el grado de saturación del suelo compactado, el cual se comporta con tendencia a la expansión.

Si la presión de expansión desarrollada es más grande que la presión debida a las cargas aplicadas, ocurrirá un levantamiento, el cual puede causar daños estructurales. Cuando este tipo de suelo debe ser usado, el tratamiento recomendado es compactar la arcilla tan húmeda como su consistencia compresible lo requiera.

EL EFECTO DE EXPANSION EN LA PRESION DE EXPANSION
DE UNA ARCILLA COMPACTADA.

PRESION DESARROLLADA (lb/pu12.)	DESPLAZAMIENTO PERMITIDO (%)
200.0	0.0
151.0	0.6
119.0	1.2
105.0	1.8
75.0	2.4

T A B L A 4.3

B) SUBSTITUCION DEL SUELO EXPANSIVO:

Este procedimiento se recomienda cuando el espesor del suelo expansivo es pequeño, consistiendo en la substitución del material por materiales inertes (arena, grava, tezontle, tepojal, granzón, basalto triturado, tepetate, etc.), es decir por materiales susceptibles a no sufrir cambios volumétricos importantes al variar la humedad.

Puede sobreexcavarse la sección y rellenar el espacio generado -- con material granular para impedir la expansión por el peso del relleno.

El tratamiento es especialmente eficiente si el relleno se coloca después de que se haya producido por lo menos parcialmente la expansión esperada; en este caso habrá que cuidar el asentamiento que pudiera presentarse en el material expandido bajo cargas relativamente importantes.

C) ESTABILIZACION QUIMICA:

Se ha utilizado en algunos países con regular éxito la estabilización química de los suelos arcillosos expansivos empleando compuestos químicos como cal, limo, cemento, asfalto, etc.

Así, la estabilización de un suelo ocasionada por la acción de un limo produce como efectos disminuir densidad, límite líquido, índice de plasticidad y por consiguiente la expansión.

El cemento y el óxido de calcio son de los productos que más se emplean para reducir la actividad expansiva de las arcillas. La estabilidad a base de estos dos materiales se genera con los minerales de la arcilla (con los silicatos aluminicos). La principal función que tienen estos productos es disminuir el límite líquido y el índice de plasticidad; y aumentar el límite de contracción y la resistencia al esfuerzo cortante.

- ESTABILIZACION CON CAL :

La estabilización de suelos con cal parece ser la más antigua forma de mejoramiento de suelos; hay evidencias de que la Vía Apia, acceso a la antigua Roma, se construyó utilizando esta técnica. Existen dos aspectos que diferencian la estabilización con cal y con cemento; en primer lugar, la aplicación de la cal se extiende más hacia los materiales arcillosos que el cemento; en segundo término, esta el uso cada día más extendido que se hace de la estabilización con cal como un pretratamiento. Los resultados por este método se logran adicionando cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)_2) a los suelos expansivos reduciéndose inmediatamente la plasticidad y expansibilidad de los mismos.

A través del tiempo se obtiene una cementación y endurecimiento de la mezcla, siendo ésta cualidad buena porque se uniformizan las expansiones de capas profundas.

La cal tiene poco efecto en suelos sin arcilla o muy orgánicos. Tiene su mayor efecto en gravas arcillosas y su utilización más frecuente es en arcillas plásticas.

Así, el efecto de la cal en arcillas es más rápido en las montmoriloníticas que en las caoliníticas. A continuación se explican las propiedades más significativas del suelo-cal y los factores que en ella influyen:

- RESISTENCIA.- En la primera gráfica (fig. 4.4) se muestra como varía la resistencia a la compresión simple de varios suelos con cal, siendo que la resistencia aumenta con contenidos de cal del orden del 8% en peso, más allá de este límite es frecuente que la resistencia permanezca insensible al aumento de la proporción de cal, excepto en materiales arcillosos en los que la resistencia puede seguir aumentando con contenidos de cal del 10% o mayores.

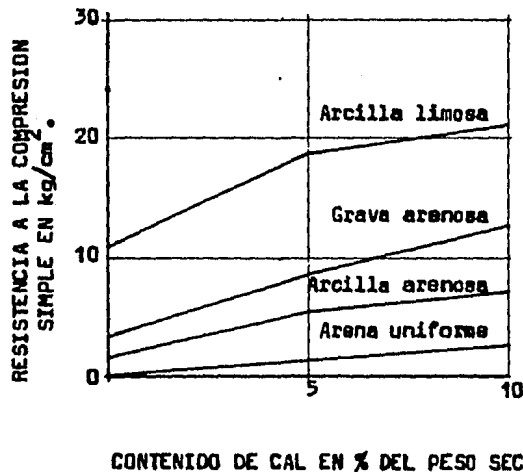


FIGURA 4.4

En la segunda gráfica (fig. 4.5) se muestra el efecto que tiene la edad del suelo-cal sobre la resistencia a la compresión simple.

EFFECTO DE LA EDAD DE UNA MEZCLA DE 5% DE CAL,
EN PESO, CON DIVERSOS TIPOS DE SUELOS.

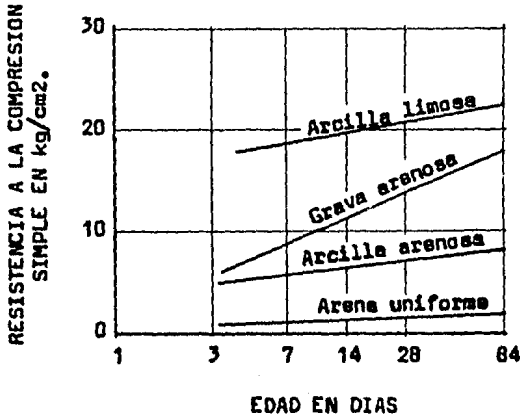


FIGURA 4.5

La figura 4.6 muestra el cambio en la resistencia de mezclas de suelo-cal y suelo-cemento en los primeros meses después de efectuada la estabilización, estando referida la resistencia a pruebas de veleta hechas en laboratorio. Aparece como patrón en la figura, la resistencia del suelo arcilloso inestabilizado; y se observa que el efecto de la cal es más consistente desde los primeros momentos, pero una vez comenzada la hidratación del cemento, este produce efectos mayores.

Normalmente la cal se usa en proporciones de 3 a 8% en peso del suelo seco y se agrega en dos formas: la primera consiste en mezclar la capa superior del suelo con la cal

hasta profundidades de 100 a 200 cms, si el tratamiento es con grandes volúmenes es conveniente utilizar equipo especial; la segunda forma es inyectar una solución cal-agua a través de barrenos, dicho método puede emplearse como mejoramiento posterior a una construcción dañada o como tratamiento previo. La penetración de la solución cal-agua puede ser reducida si los suelos son altamente expansivos o plásticos, pues se ha encontrado por medio de investigaciones en laboratorio que la penetración por año es de 4 a 8 centímetros.

CAMBIO DE LA RESISTENCIA DE UNA ARCILLA ESTABILIZADA DURANTE LAS PRIMERAS HORAS DESPUES DE LA ESTABILIZACION.

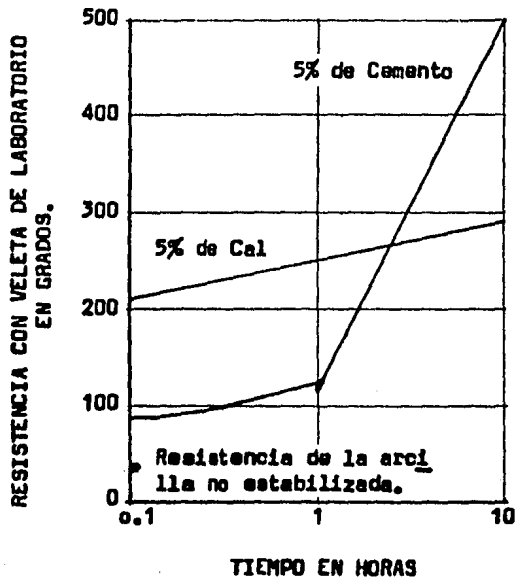


FIGURA 4.6

- PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.- La metodología de construcción es similar a la del suelo-cemento, (dicho procedimiento se describirá más adelante) y un buen criterio para preparar mezclas para estudio en el laboratorio es dar al suelo 1% de cal por cada 10% de fracción fina que contenga.

La tabla 4.7 da los contenidos de cal usuales para diferentes suelos; pero esta información deberá manejarse como norma de criterio, sin permitir que excluya en ningún caso - las determinaciones del laboratorio correspondientes.

CONTENIDOS USUALES DE CAL HIDRATADA
EN DIFERENTES SUELOS

(Porcentajes en peso del suelo seco)

TIPO DE SUELO	PRE-TRATAMIENTOS (%)	ESTABILIZACIONES DEFINITIVAS (%)
Suelos orgánicos	No recomendada	No recomendada
Arcilla plástica	1 a 3	3 a 8
Arcilla arenosa	No recomendada	5
Gravas arcillosas bien graduadas	1 a 3	3
Arcilla muy plástica	1 a 3	3 a 8
Arcilla limosa	1 a 3	2 a 4
Arenas**	No recomendada	No recomendada
Roca triturada*	2 a 4	No recomendada

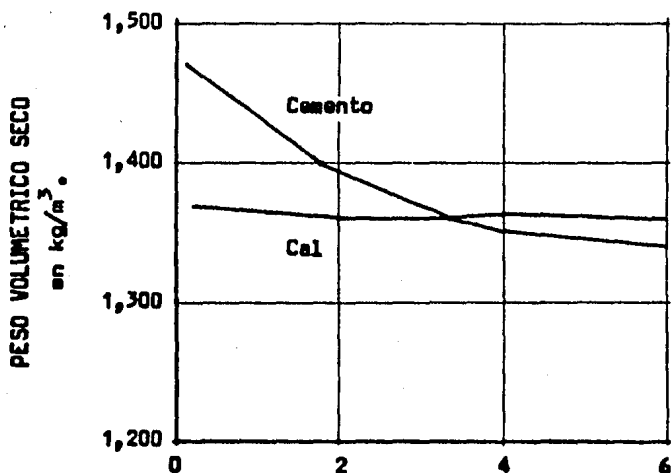
*.- Sólo recomendable si tiene finos plásticos.

**.- Conviene la cal con vistas a estabilización con ag fulto, pues mejora la adherencia. En los loes conviene usar cal viva.

- PLASTICIDAD.- La cal disminuye enormemente el índice de plasticidad en arcillas montmoriloníticas y bentoníticas, teniendo poca influencia en el índice plástico de suelos con plasticidad media y puede aumentar el índice de plasticidad de los suelos finos menos plásticos.

- OTRAS PROPIEDADES.- La figura 4.8 muestra el efecto del tiempo que se deja transcurrir y el peso seco específico entre la elaboración de mezclas estabilizadas y el momento de la compactación.

EFFECTO DEL TIEMPO, TRANSCURRIDO ENTRE LA ELABORACION DE MEZCLAS DE UNA ARCILLA ACTIVA CON 10% DE CAL Y DE CEMENTO (EN PESO) Y SU COMPACTACION, SOBRE EL PESO ESPECIFICO.



TIEMPO ENTRE LA ELABORACION Y LA COMPACTACION EN HORAS.

FIGURA 4.8

La compresión está hecha entre mezclas de suelo-cal y -suelo-cemento, ambas con el 10% del componente químico. Se observa que el efecto del tiempo transcurrido tiene menos la portancia para la cal, a causa de las primeras reacciones — químicas. De la información obtenida de dicha gráfica se deduce la siguiente regla de campo: Así como las mezclas con cemento han de compactarse inmediatamente después de formadas, las mezclas con cal pueden manejarse de forma menos expedita, lo que produce un proceso constructivo más cómodo y flexible; sin embargo conforme pasa el tiempo, las mezclas con cal requieren más agua para su compactación.

Los pasos constructivos para la estabilización de capas de pavimento a base de cal son los siguientes:

- a) Escarificación del material existente,
- b) Pulverización del suelo,
- c) Regado de la cal,
- d) Mezclado del suelo y la cal,
- e) Incorporación de agua, en caso necesario para dar humedad óptima,
- f) Compactación y conformación,
- g) Curado mínimo de 5 días,
- h) Colocación de superficie protectora.

- ESTABILIZACION CON CEMENTO:

La estabilización con cemento parece ser que data de 1917, cuando Amies patentó un primer procedimiento con variable de cemento tipo Portland en mezclas de suelo-cemento. Las reacciones químicas que ocurren en el suelo-cemento todavía no se comprenden perfectamente hoy en día; pero tal parece que el hidrato de calcio que se forma por contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio, más ávidos de agua y que la toman de la que se encuentra entre las laminillas de la arcilla, el resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y la plasticidad del suelo arcilloso, así como el aumento de la durabilidad y resistencia.

Las arcillas montmoriloníticas son las más reactivas ante el cemento, seguidas de las illitas y las caolinitas.

En cualquier caso, los ensayos tienden a determinar tres aspectos en la mezcla suelo-cemento:

- a) La cantidad de cemento necesaria para dar al suelo las características deseadas.
- b) La cantidad de agua que se deberá agregar.
- c) El peso volumétrico a que deberá compactarse la mezcla, según requerimientos de la capa que vaya a usarse.

La tabla 4.9 proporciona algunos porcentajes primarios para las dosificaciones de los especímenes en las primeras pruebas a

efectuar en el laboratorio.

PORCENTAJE DE CEMENTO A PROBAR INICIALMENTE
EN LOS DIFERENTES TIPOS DE SUELOS.

SUELO	PORCENTAJE DE CEMENTO, EN PESO, USUALMENTE REQUERIDO POR LA CAPA DETERMINADA.	PORCENTAJE DE CEMENTO, EN PESO, A USAR INICIALMENTE EN PRUEBAS DE COMPACTACION.	PORCENTAJE DE CEMENTO, EN PESO, A USAR INICIALMENTE EN DURABILIDAD.
GW, GP, GM- y SW	3 a 8	5 a 6	3 a 7
SC, GC	5 a 9	7	5 a 9
SP, SM	7 a 11	9	7 a 11
ML	7 a 12	10	8 a 12
CL, OL, MH	8 a 13	10	8 a 12
CH	9 a 15	12	10 a 14
DH	10 a 16	13	11 a 15

T A B L A 4.9

En los siguientes conceptos se mencionarán algunas propiedades mecánicas del suelo-cemento analizando características de interés plástico, también se mencionará algún método de diseño de espesores de capas de suelo-cemento:

- RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE.- La figura 4.10 muestra la variación de la resistencia de mezclas de diferentes suelos-cemento.

VARIACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE,
DE ESPECIMENES ESTABILIZADOS CON CEMENTO
EN DIVERSOS SUELOS TÍPICOS.

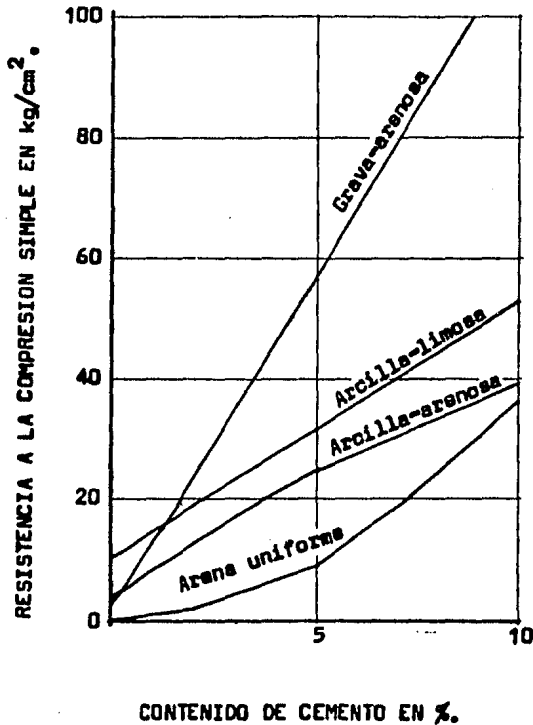


FIGURA 4.10

Por lo que se aprecia en la gráfica, la resistencia aumenta casi linealmente con el contenido de cemento, pero las pendientes de los lugares geométricos varía de suelo en suelo.

- OTRAS PROPIEDADES.- La figura 4.11 muestra el efecto de la temperatura en el curado, combinado con el tiempo de curado, en la resistencia a la compresión libre de los especímenes de suelo-cemento; de acuerdo a la experiencia, la resistencia es mayor cuanto mayor sea la temperatura con que se cura.

Frecuentemente esto se traduce a que se obtienen mejores resistencias con facilidad cuando las capas de suelo-cemento se curan en épocas de calor.

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE CURADO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.

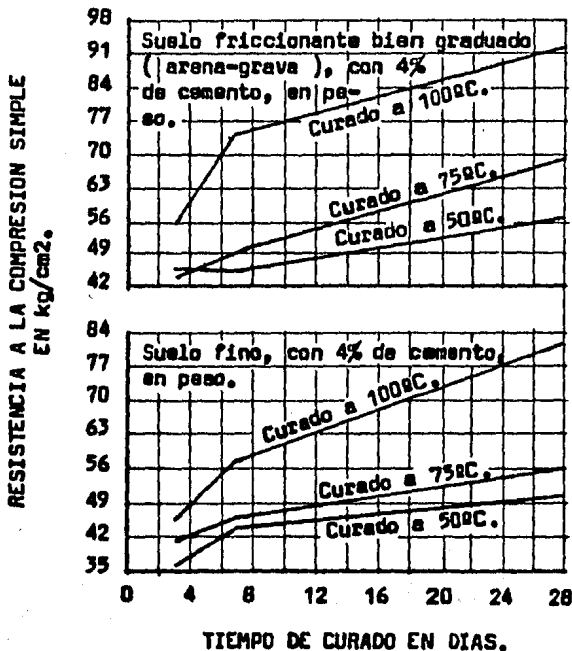


FIGURA 4.11

- METODOS CONSTRUCTIVOS.- Las fases a seguir para una -
capa de suelo-cemento constan de:

- a) Escarificación, pulverización y pre-humedecimiento -
del suelo si fuera necesario.
- b) Dosificación y aspersión del cemento.
- c) Aplicación del H₂O.
- d) Mezclado de los materiales.
- e) Compactación y acabado.
- f) Curado.

CONTENIDOS TIPICOS DE CEMENTO PARA VARIOS TIPOS DE SUELOS
EN LA TECNOLOGIA DE PAVIMENTOS.

TIPO DE SUELO	% DE CEMENTO, EN PESO
Material triturado de roca	0,5 a 2*
Arenas bien graduadas	2 a 4
Arcilla arenosa	4 a 6
Arcilla	8 a 12
Suelos orgánicos	10 a 15****
Gravas areno-arcillosas bien graduadas	2 a 4
Arenas uniformes	4 a 6**
Arcilla limosa	6 a 8
Arcilla muy activa	12 a 15***

NOTAS:

****.- Puede ayudar significativamente un pre-tratamiento

- ento con cal o con 2% de cloruro de calcio.
- *** .- El mezclado puede ser muy difícil y un pre-tratamiento con cal, suele presentar una gran ayuda.
 - ** .- La compactación puede volverse muy difícil y hay riesgo de segregación del cemento.
 - * .- El cemento se usa sobre todo para dar trabajabilidad, reducir la sensibilidad del suelo al contenido de agua de compactación y para evitar deformaciones de la capa tendida bajo el tránsito del - - equipo de construcción.

T A B L A 4.12

- ESTABILIZACION CON CLORURO DE SODIO:

Este componente se ha usado como estabilizador no muy durable y efectivo en todos los suelos, aunque menormente en suelos orgánicos. Su efecto estriba en producir reacciones coloidales y en alterar las características del agua contenida en el suelo.

Actúa como floculante y por lo tanto ayuda a la compactación. Disminuye la permeabilidad de las arcillas siendo esto muy útil para tratar a las arcillas expansivas. La principal desventaja de este tratamiento es que la sal es muy soluble y por lo tanto, fácilmente lavada.

D) INUNDACION PREVIA DEL TERRENO O PRESATURACION:

Mediante esta técnica se permite la expansión de los suelos desea dos antes de construir la estructura, con lo que si se logra mantener una humedad constante antes y después de la construcción, se evitarán expansiones en el suelo y daños en la estructura,

El problema principal estriba en que pueden requerirse muchos meses, y aún años, para aumentar la humedad del suelo, a menos que el suelo exhiba fisuras o grietas que ayuden a la filtración. Se recomienda inundar el área por lapsos de 2 a 4 meses para saturar espesores de 100 a 300 centímetros.

Una medida de control al respecto es la verificación del perfil - del contenido del agua durante el tratamiento. Cuando los suelos son - expansivos, la saturación entre 75 y 95 cms, al 85% es buena; pero si existe mucha expansión es insuficiente la saturación de 110 cms.

El procedimiento anteriormente descrito se facilitará si se colocan drenes verticales antes de proceder a la inundación del terreno; - ya que la permeabilidad horizontal puede ser más importante que la ver tical y si existen estratos horizontales por donde se infiltra el agua avanzando la saturación hacia los estratos expansivos. También se usan agentes para agilizar la penetración del agua tales como las enzimas y los detergentes.

RESPUESTA DE ALGUNOS MINERALES TIPICOS
A LOS DIFERENTES METODOS DE ESTABILIZACION.

MINERAL O COMPONENTE DEL SUELO TIPICO	ESTABILIZACION RECOMENDABLE	FINALIDAD
Clorita	Cemento	Aún no hay experiencia concluyente sobre los efectos de esta estabilización.
Ilita	Cemento	Para incrementar resistencia a corto plazo.
Alófanos	Cal o mezclas de cal y yeso.	Para incrementar la resistencia.
Arenas	Mezcla con materiales no plásticos.	Para estabilidad mecánica.
Montmorilonita	Cal	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a corto plazo.
Caolín	Arena	Para estabilidad mecánica.
Limos	No responden a los métodos de estabilización en uso.	
Materia orgánica	Estabilización mecánica.	Los demás métodos no son efectivos.

T A B L A 4.13

E) CONSERVACION DE LA HUMEDAD:

Para mantener la humedad de los suelos arcillosos expansivos se ha recurrido a la instalación de estructuras impermeables con un siste

ma de drenaje adecuado. Las estructuras impermeables pueden ser horizontales o verticales empleándose alrededor del perímetro de las construcciones a proteger. Dichas estructuras pueden consistir en banquetas, andadores, áreas pavimentadas o pantallas impermeables.

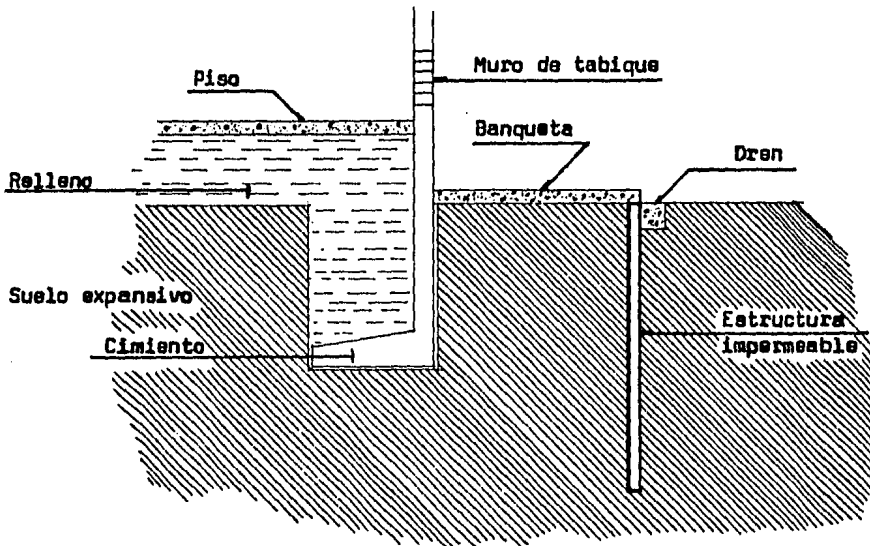


FIGURA 4.14

En algunos países se han empleado membranas asfálticas colocándose sobre el material in expansivo con características de sub-base.

Es importante alejar e impedir la penetración de las aguas superficiales de las construcciones, ya que esto incrementaría la humedad en el estrato.

F) SOBRECARGA:

Consiste básicamente en precargar el terreno aprovechando la capacidad de carga del subsuelo al máximo de tal manera que se contrarresta la presión debida a la expansión, pero por lo general se combina con otros procedimientos.

Además, si el suelo se consolida bajo un esfuerzo efectivo mayor que el que aplicará la estructura, la magnitud de la consolidación secundaria que se producirá bajo la carga de la estructura puede reducirse notablemente. También hay que tener muy en cuenta que si la sobrecarga es excesiva se pueden presentar hundimientos o falla por resistencia al corte.

G) ELEMENTOS ESTRUCTURALES:

- PILAS ACAMPANADAS.- Dichos elementos consisten en un tramo uniforme de sección y una transición inclinada en el fondo (ensanchamiento). El objetivo de este elemento es incrementar la capacidad de tensión de dicha pila al ensanchar su sección transversal en su extremo.

Este tipo de pila tiene la ventaja sobre la pila uniforme de sección de resistir el empuje ascendente ejercido por el suelo expansivo independientemente de la pérdida de resistencia a la fricción entre terreno y pila, motivada por el ascenso del nivel freático en caso de que este alcance el mismo nivel que el fondo de la pila.

EDIFICIO CIMENTADO EN UN TERRENO EXPANSIVO.

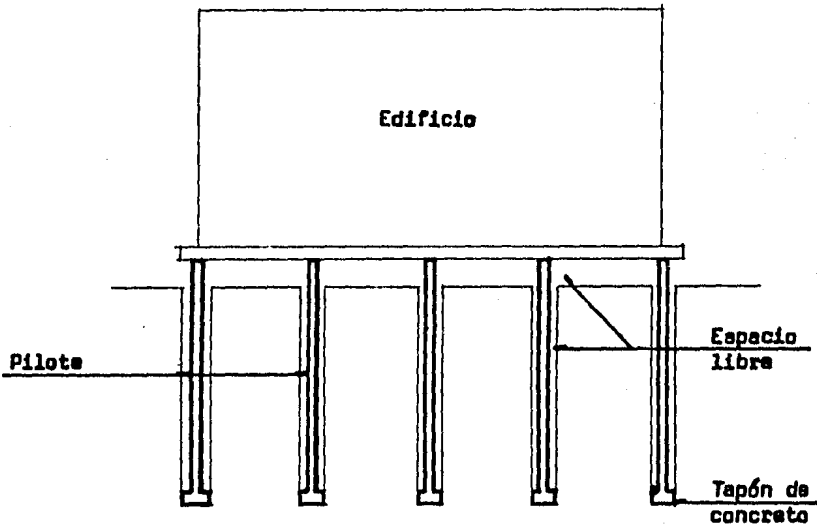


FIGURA 4.15

La figura anterior muestra una estructura ligera construida en Coro, Venezuela, en donde el terreno es muy expansivo debido a la presencia de Montmorilonita. Por ejemplo, las losas de acceso a un hotel local situado sobre la superficie del terreno, al sufrir un levantamiento importante, se agrietaron severamente y quedaron muy irregulares.

En el edificio de la figura se utilizó un sistema que evita los daños por hinchamiento del terreno, pero que resulta más caro que una simple placa superficial. En primer lugar, se perforaron

agujeros en el suelo en los que se colocaban revestimientos de --
acero para formar pilotes y tacones de concreto.

Bajo el edificio queda un hueco que sirve para reducir el --
hinchamiento del suelo (debido a que se permite la evaporación)
y a la vez, deja un espacio para que tal hinchamiento se produzca
sin perturbación para el edificio.

- PILAS CORTAS.- En estructuras ligeras, las cimentaciones
superficiales no son completamente satisfactorias, por lo que se
propone una alternativa a base de pilas cortas ya sean cilíndri--
cas o acampanadas, apoyadas en estratos de arcillas duras o are--
nas compactas.

Se hace notar que este tipo de solución no incrementará el --
costo de la construcción en sí debido a que la actual dala de ci-
mentación se empleará como trabe de soporte de muros y rigidez --
del sistema. Pero en cuanto a procedimiento constructivo se refi-
re de las pilas cortas este sí se incrementará.

- ZAPATAS.- En suelos expansivos, las cimentaciones a base --
de zapatas aisladas o continuas son adecuadas en estructuras que
transmiten suficiente presión al suelo como para que no haya ex--
pansiones del mismo.

Las zapatas corridas deben ser lo menos angosta posible para
que se afirme en forma concentrada al suelo la carga por metro li-
neal.

CIMENTACION DE ESTRUCTURAS LIGERAS CON PILAS CORTAS.

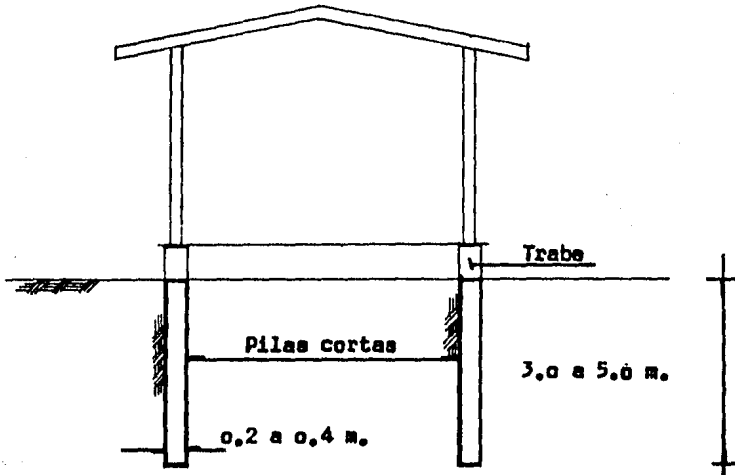


FIGURA 4.16

El empleo de zapatas aisladas se basa en dos ideas a saber:

- 1) La medida de movimientos ascendentes que puede sufrir la zapata y su columna respectiva.
- 2) El movimiento diferencial que puede ocurrir entre zapata continua adyacente, zapata aislada, losa sobre el terreno y otros miembros estructurales o arquitectónicos de la construcción.

Si en el manto superficial es muy alto el potencial expansivo, es preferible cimentar las zapatas debajo de ese manto y emplear pisos elevados o separados del marco estructural (observar figura 4.18).

CIMENTACION DE PISOS Y CASAS.

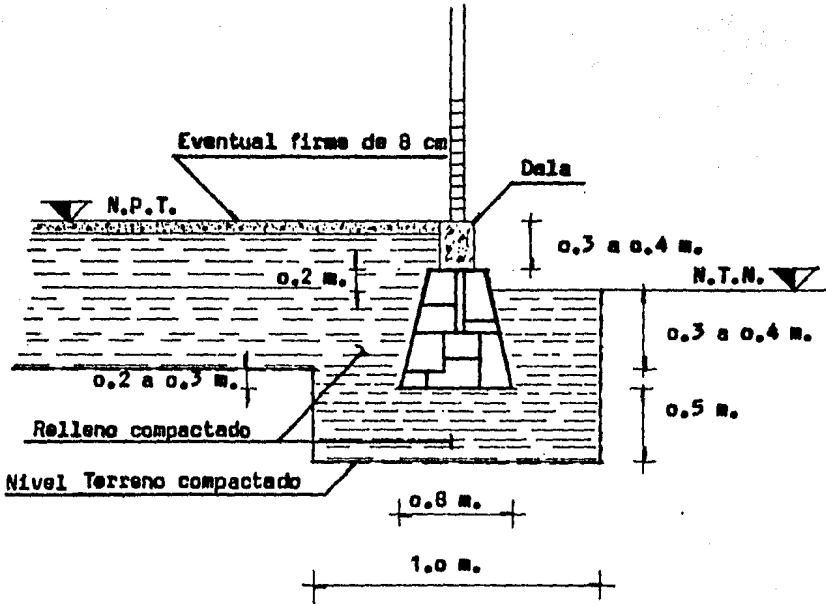


FIGURA 4.17

CIMIENTO PROFUNDIZADO POR DEBAJO DE LA COSTRA SUPERFICIAL.

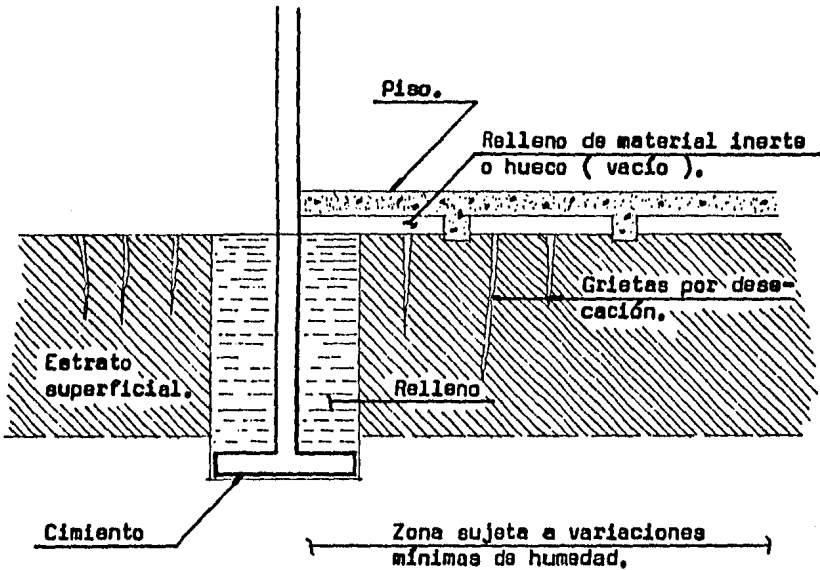


FIGURA 4.18

- LOSAS RIGIDAS.- Como otra alternativa, se puede hablar de una cimentación lo suficientemente rígida que permita un comportamiento monolítico de la estructura.

Además, este método resulta ser muy económico. Y para cumplir con los requisitos mínimos de temperatura se complementa el armado con el refuerzo mínimo de acero.

CIMENTACION RIGIDA SOBRE SUELOS EXPANSIVOS
PARA ELIMINAR MOVIMIENTOS DIFERENCIALES.

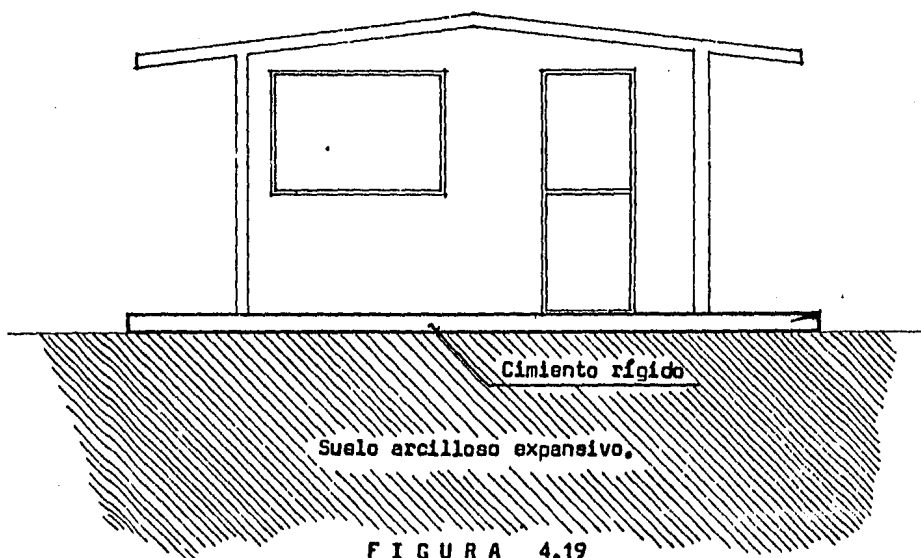


FIGURA 4.19

H) ESTABILIZACION FISICA:

Muchas de las técnicas de estabilización física más frecuentes -- son las técnicas de estabilización térmica, sea por enfriamiento o por calentamiento. Analizando la última técnica descrita y para los fines que persigue este trabajo se deduce:

- ESTABILIZACION TERMICA POR CALENTAMIENTO.- Dicho método se funda en la observación de como el calor convierte cualquier arcilla en un ladrillo resistente, este efecto se logra con temperaturas del orden de los 850° C, lo que representa una magnitud bastante elevada para estabilizaciones en gran escala.

En la práctica resulta suficiente llegar a la temperatura en la que la rehidratación de la arcilla se torne imposible y esto ocurre con valores comprendidos entre los 210° C, y los 420° C. - La fig. 4.20 ilustra los cambios en el contenido de agua y en la plasticidad después de la rehidratación, en función de la temperatura. La variación del índice de plasticidad se expresa para una montmorillonita y un caolín.

VALORIZACION DEL CONTENIDO DE AGUA Y DEL INDICE DE PLASTICIDAD DESPUES DE LA REHIDRATACION, EN FUNCION DE LA TEMPERATURA PARA LOS SUELOS QUE SE CITAN.

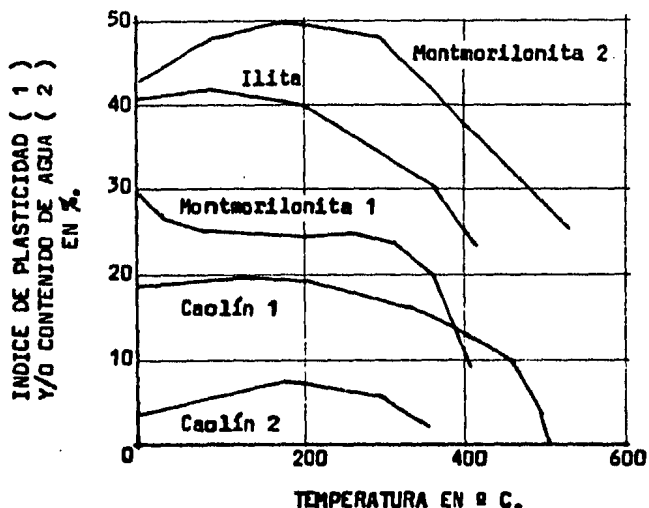


FIGURA 4.20

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Los problemas relacionados con suelos arcillosos expansivos se puede decir que se han presentado en casi todo el mundo y el costo de los daños ocasionados por estos llega a ser del mismo índice que los daños ocasionados por otros fenómenos meteorológicos tales como sismos, huracanes, inundaciones, etc.

Existen parámetros de importancia que intervienen en el estado de expansión de los suelos arcillosos y son: contenido de agua cercano al límite plástico, contenido mineralógico de Montmorillonita, excitación del potencial expansivo debido a fuentes de agua cercanas, etc.

El conocimiento de la climatología basada en información de los procesos cíclicos de humedecimiento y secado de los suelos es de considerable ayuda, y si esto es soportado por pruebas de laboratorio como lo son: contenido de finos, potencial de expansión, límite de contracción, expansión libre y límites de consistencia, la determinación es mucho mejor.

En la práctica y al presentarse arcillas expansivas deberán hacerse pruebas de laboratorio; una de ellas es la prueba de consolidación estándar. Al obtener especímenes, estos deberán ser representativos, e inalterados cuando se trabaje con suelos naturales y cuando se quiera medir expansiones en estructuras con muestras compactadas.

Quando se someten las muestras a prueba es importante seguir la secuencia de humedecimiento y secado, pues deberá representarse fielmente el prototipo a que tendrá lugar. Por ejemplo: si el suelo a cimentar tiene un contenido de humedad alto de modo que se expanda la arcilla antes de actúe la carga de la estructura, entonces deberá saturarse por completo los especímenes antes de cargarse; por el contrario si ocurre el humedecimiento del suelo de cimentación después de que una estructura sea cargada, los especímenes entonces deben cargarse antes de humedecerse.

La figura 5.1 muestra lo anteriormente expuesto acerca del cambio de volumen-carga de una misma arcilla.

EFFECTO DE LA SECUENCIA DE HUMEDECIMIENTO-CARGA EN UNA ARCILLA EXPANSIVA.

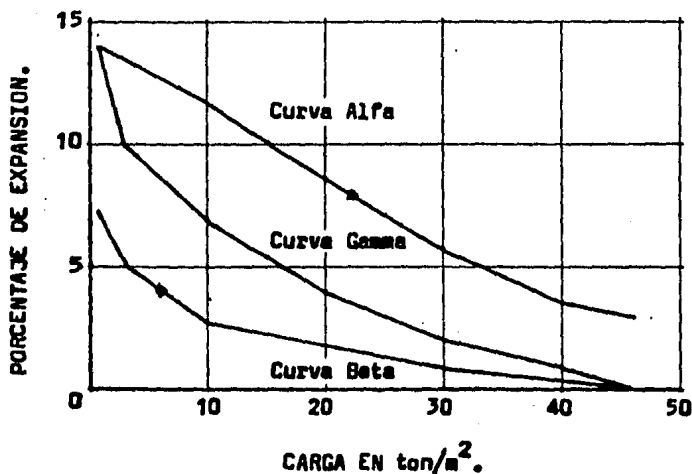


FIGURA 5.1

La curva Alfa muestra la acción del humedecimiento del suelo para cargarlo después en incrementos a partir de 0.7 ton/m^2 , obteniéndose reducciones de volumen al aumento de carga aplicada en cada incremento.

La curva Beta se obtiene cargando la muestra primeramente a cierta carga inicial para contrarrestar su expansión libre, de modo que cuando esta absorba agua no lo haga bajo dicha carga; posteriormente - al efectuar decrementos de carga, el suelo comienza a absorber agua lo grandando la expansión.

La curva Gamma muestra expansiones de especímenes cargados primeramente a cierta presión intermedia y después se permite la absorción de agua hasta obtener el equilibrio; esta curva permite conocer la expansión de la arcilla en estudio sujeta a diferentes cargas permitiendo la absorción de agua. Obsérvese que mientras mayor sea la carga, la expansión es menor. La curva Gamma contiene el primer punto de la curva Alfa, indicando la expansión de la arcilla saturada y sujeta a la carga de 0.7 ton/m^2 , (condición común para ambas curvas); también la curva Gamma contiene el primer punto de la curva Beta, pues en dicho punto el suelo arcilloso se expande debido a la presión de expansión y en ambos casos.

Por otro lado, entre los procedimientos de estabilización de suelos expansivos más utilizados están: conservación de la humedad, estabilización química, sustitución del suelo expansivo, inundación previa del terreno, control de la compactación, sobrecarga, por mencionar tan

sólo algunos. Dichos procedimientos de estabilización dependen de varios parámetros, como son: características del suelo, historia de esfuerzos, clima, ciclos de humedad y secado, etc.

Puede obtenerse un diseño adecuado de las cimentaciones sobre suelos expansivos investigando las características del subsuelo y efectuando un análisis de costos relacionado a las diferentes alternativas de diseño, y evaluando en términos generales los riesgos involucrados en la toma de decisiones.

Un caso frecuente en la práctica donde existe la problemática de los suelos arcillosos expansivos es el de las construcciones en mantos superficiales de arcilla y que estas han estado bajo el efecto de la evaporación. Pero los daños más comunes en dichas construcciones suelen ser de características inconfundibles; para lo cual, el primer paso en la investigación de la cimentación de una estructura es obtener información tal como: tipo de subsuelo, cimentación empleada, revisión del análisis estructural, etc.

Un signo bastante característico que presenta cualquier construcción cimentada en arcillas expansivas es el agrietamiento de las losas de piso, en seguida las puertas y ventanas presentan un mal funcionamiento y además se hacen visibles grietas ya sea de interior o exteriormente de los muros y con frecuencia estas grietas llegan a alcanzar el techo.

Cuando existe movimiento alguno de la estructura, esta presentará

grietas a manera de manifestar el movimiento ocurrido. En el caso de las grietas ocasionadas por suelos expansivos, el patrón que siguen es similar a las grietas ocasionadas por asentamientos, pero con la diferencia de que las grietas causadas por expansión son abiertas en la parte superior y angostas en la parte inferior (en las grietas por asentamiento se presenta el caso contrario).

Sin embargo, en los casos de asentamientos graves, las grietas diagonales aparecen asociadas a grietas horizontales. A continuación se presenta una breve descripción resultante de la observación de los efectos de las grietas en suelos expansivos:

- 1) Las grietas diagonales bajo las ventanas o encima de las puertas exteriores indican movimiento en las pilas o en las zapatas.
- 2) Si tales grietas solo aparecen en hiladas de tabique de muros exteriores pero no en muros interiores aacos, entonces estas pueden ser causadas por el levantamiento de las losas del patio exterior.
- 3) Las grietas que aparecen sobre el contorno de puertas interiores y closets podrían ser causadas por contracción del recubrimiento o de la madera y no necesariamente por el movimiento de la cimentación.
- 4) La separación de los marcos de las ventanas con los muros indica movimientos diferenciales; las cuales se asemejan a las de los movimientos laterales.

Algunas veces los propietarios de construcciones reportan que las grietas ya presentes sufren cambios; o sea, estas se abren o se cierran. Por lo que intentan correlacionar los movimientos de la estructura con los cambios climatológicos debido al establecimiento de ciclos de secado y humedad. En realidad lo que ocurre con la apertura y cierre de las grietas es que existe una desubicación de la concentración de esfuerzos transmitidos por el suelo hacia la estructura.

Cuando aparece una nueva grieta, la distribución de esfuerzos se altera y esto hace que provisionalmente se cierre una grieta antigua. La experiencia demuestra que el número de grietas aumenta en una construcción en problemas, y que rara vez el número de estas decrece.

En áreas con suelos expansivos el movimiento de losas desplazadas en el terreno, se asocia con el incremento del contenido de agua del suelo. La presencia de esta agua puede ser motivada por lo siguiente:

- a) Aumento del nivel de aguas freáticas.
- b) Rompimiento de las líneas de servicio que contengan agua debido a que se encontraban sometidas a esfuerzos.
- c) Escurrimiento superficial provocado por riego o precipitación pluvial y consecuentemente infiltración al subsuelo.

El aumento en el contenido de humedad del suelo en estudio y que se encuentre debajo de losas producirá un levantamiento de estas o su agrietamiento. Pero cabe aclarar que los agrietamientos de losas debi-

do al efecto de expansión se presentan a lo largo de los apoyos de los muros. En cambio, si existen contracciones y no hay juntas constructivas (las cuales son muy recomendables) entonces aparecen grietas espaciadas a intervalos más o menos iguales.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se pueden agregar las siguientes conclusiones a los métodos de presaturación y compactación -- respectivamente: Para el caso de la inundación previa del terreno se puede tratar al suelo con un método elemental consistente en remoldear el suelo hasta cierta profundidad y volverlo a colocar en estado de -- compactación a una humedad mayor a la que originalmente se obtuvo y -- con menor peso volumétrico que el que tenía inicialmente también, y de esta manera el suelo resulta ser menos expansivo.

El procedimiento anterior requiere un cuidadoso estudio de las -- propiedades mecánicas del suelo obtenido, para verificar que la estructura no sufra asentamientos o incluso que el mismo suelo pierda capacidad de carga antes de que empiece a operar la expansión.

Pero a pesar de que el empleo de la presaturación es cada vez más frecuente, la experiencia tiene sus dudas al respecto debido a que no han sido estudiados a fondo el fenómeno de la filtración del agua en el subsuelo, profundidad de penetración, magnitud de las expansiones en suelos parcialmente saturados y el tiempo de saturación. Es por esto, que se tiene que efectuar un estudio previo para decidir si el método es conveniente desde sus aspectos económicos y funcionales.

Y con respecto al método de control de la compactación, los métodos de compactación dinámicos que provocan deformaciones al corte, reducen considerablemente la expansibilidad. La comparación entre el costo de los trabajos ordinarios de compactación, respecto al costo de los mismos pero a bajas densidades no se ha realizado debido a la poca información disponible, ya que los costos dependen de varios factores como pueden ser: volumen total del estrato, distancia de acarrees, etcétera.

En estructuras afectadas por la presencia de arcillas expansivas se han empleado con óptimos resultados un sistema de dentellones perimetrales y banquetas, los cuales convenientemente sellados y junteados se pueden reducir e incluso evitar los efectos dañinos adicionales.

PROTECCION DE ESTRUCTURAS AFECTADAS POR SUELOS EXPANSIVOS. ARCILLOSOS.

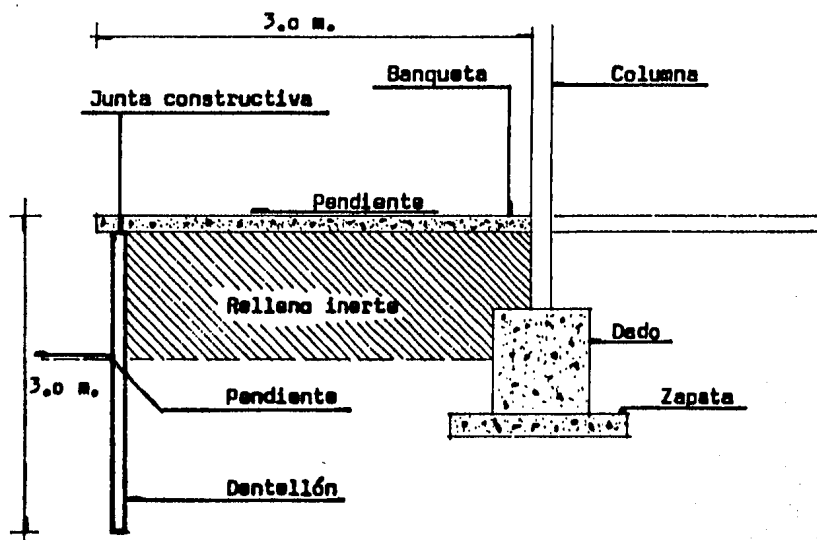


FIGURA 5.2

En base a lo anterior y dado el bajo costo de este sistema con un mínimo mantenimiento una vez instalado, esta solución es recomendable y ventajosa con respecto a los sistemas de recimentación o protección mediante subdrenajes.

Otra solución recomendable podría ser la que presenta la figura - siguiente en la que se aísla a la cimentación de los efectos de aportaciones superficiales de agua, ya sea de lluvia o de riego mediante el empleo de pantallas impermeables que confinen el área construida. Siendo este método muy económico debido a la sencillez de construcción de los elementos que lo componen.

AISLAMIENTO DEL AREA CONSTRUIDA
 MEDIANTE DENTELLONES.

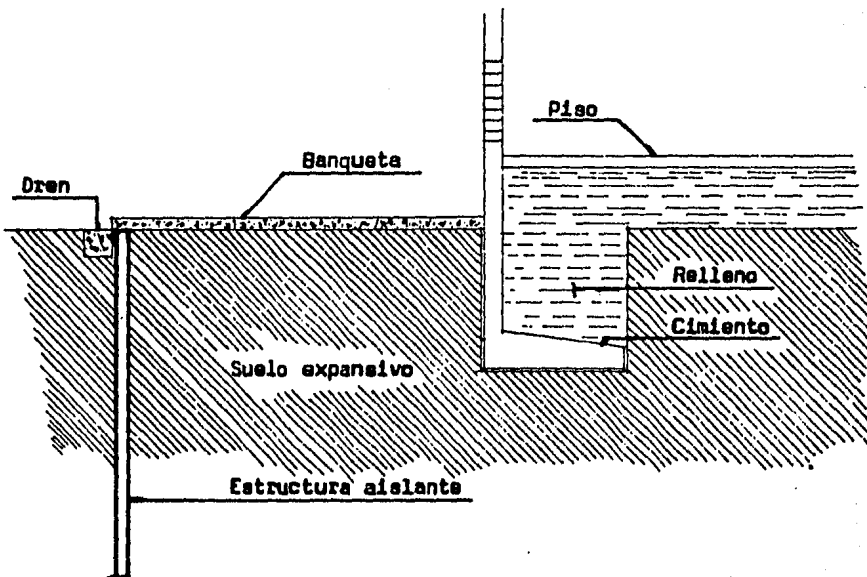


FIGURA 5.3

BIBLIOGRAFIA

- Alfonso Rico Rodríguez, Hermilo del Castillo
"La Ingeniería de Suelos en las Vías terrestres"
Volumen 1; Editorial Limusa
Ciudad de México, 1974
Primera Edición
Capítulo 1.

- Alfonso Rico Rodríguez, Hermilo del Castillo
"La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres"
Volumen 2; Editorial Limusa
Ciudad de México, 1977
Primera Edición
Capítulo 16.

- Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez
"Fundamentos de la Mecánica de Suelos"
Editorial Limusa
Ciudad de México, 1978, Tercera Edición
Cap. 1, Cap. 2, Cap. 6, Cap. 12, Cap. 14.

- Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez
"Teoría y Aplicación de la Mecánica de Suelos"
Editorial Limusa
Ciudad de México, 1980
Segunda Edición
Cap. 3, Cap. 6, Cap. 7, Cap. 8, Cap. 9, Cap. 12.

- Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez
"Flujo de Agua en Suelos"
Editorial Limusa
Ciudad de México, 1980
Primera Edición
Apéndice 4.

- Hans P. Winterkorn, Hsai-Yang Fang
"Foundation Engineering Handbook"
Ed. Van Nostrand Reinhold Company
New York, 1975
Cap. 2, Cap. 7.

- "Ingeniería"

Ciudad de México, 1981; número 4

'Procedimientos Diversos para Estabilizar Suelos Expansivos'

Página 56

Ing. Hugo S. Haas.

- "Investigación y Ciencia"

Barcelona, Junio de 1979

'La Arcilla'

Página 46

Georges Millot.

- "Séptima Reunión Nacional de Mecánica de Suelos"

Ciudad de México, 1979

'Identificación de Suelos Expansivos'

Página 71

Ing. Juan M. Rodríguez.

- T. William Lambe, Robert V. Whitman

"Mecánica de Suelos"

Editorial Limusa-Wiley, S.A.

Ciudad de México, 1972

Primera Edición

Cap. 1, Cap. 3, Cap. 4.