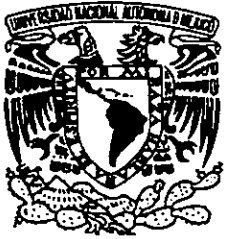


12  
25



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

**CAMPUS ARAGÓN**

**“CONSIDERACIONES GENERALES DE  
SUELOS EXPANSIVOS EN CIMENTACIONES”**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
P R E S E N T A:  
**LUIS GERARDO FLORES ARMENTA**

ASESOR: ING. GABRIEL ALVAREZ BAUTISTA.



MEXICO

1999

275255

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCIÓN

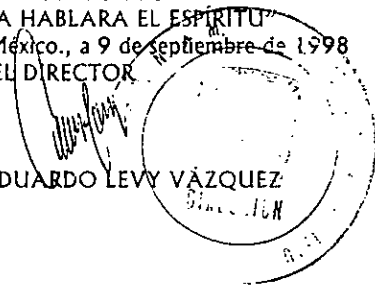
LUIS GERARDO FLORES ARMENTA  
P R E S E N T E .

En contestación a la solicitud de fecha 1o. de septiembre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado, "CONSIDERACIONES GENERALES DE SUELOS EXPANSIVOS EN CIMENTACIONES", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México., a 9 de septiembre de 1998  
EL DIRECTOR

Lic. CARLOS EDUARDO LEVY VÁZQUEZ



c c p Secretaría Académica.  
c c p Jefatura del Area de Ingeniería Civil.  
c c p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/MCA/vr

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios :**

*Gracias te doy por haberme dado la vida y las facultades para realizar mis anhelos.*

**A mis Padres :**

**María Armenta de Flores**

**Jesús Flores Cordero**

*Gracias, por su cariño y formación, los cuales han sido y serán de las mejores cosas que tengo en la vida.*

**A mis hermanos :**

**Martha Patricia Flores Armenta**

**Claudia Mónica Flores Armenta**

**Juan de Dios Flores Armenta**

**Gabriela Flores Armenta**

**Arturo Flores Armenta**

*Gracias, por todo su apoyo y ayuda.*

**A mi tía :**

**Celia Flores Cordero**

*Gracias, por todos tus cuidados y atenciones.*

**A mi esposa :**

**Tatiana**

*Gracias, por todo el amor con el que siempre me has brindado tu apoyo, comprensión y ayuda incondicional. Tu amor es lo más importante que tengo.*

**A mi Amigo :**

**Gary**

*Sinceramente, gracias por todo.*

**A la familia Gutiérrez Medina :**

*Gracias, por toda la ayuda brindada para terminar mi carrera.*

**Gerardo**

# INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
---------------------------	---

## **CAPÍTULO 1**

### **ANTECEDENTES**

1.- <i>Antecedentes</i> .....	1
1.1.- <i>Evolución en el conocimiento de los suelos expansivos</i> .....	4

## **CAPÍTULO 2**

### **EL PROBLEMA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS, EN MÉXICO Y EL MUNDO**

2.- <i>El problema mundial de los suelos expansivos</i> .....	9
2.1.- <i>Zonas de México con suelos expansivos</i> .....	16

## **CAPÍTULO 3**

### **LOS SUELOS EXPANSIVOS, SU FORMACIÓN Y LAS CAUSAS QUE ORIGINAN EL PROBLEMA**

3.- <i>Formación de suelos expansivos</i> .....	20
3.1.- <i>Suelo Expansivo</i> .....	21
3.2.- <i>Ligas atómicas</i> .....	26
3.3.- <i>Caolinita</i> .....	36
3.4.- <i>Montmorilonita</i> .....	39
3.5.- <i>Ilita</i> .....	42
3.6.- <i>Intercambio catiónico</i> .....	44

3.7.- Formación de minerales arcillosos .....	47
3.8.- Formación de minerales montmoriloníticos .....	51
3.9.- Algunas causas que pueden explicar el fenómeno de la expansión .....	53

## **CAPÍTULO 4**

### **CRITERIOS DE IDENTIFICACIÓN Y MÉTODOS EXISTENTES PARA EL RECONOCIMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS**

IV.- Criterios de identificación y clasificación de suelos expansivos .....	68
4.1.- Métodos existentes para el reconocimiento y clasificación de suelos expansivos .....	71
4.2.- Identificación mineralógica .....	73
4.3.- Método de las propiedades índice .....	77
4.4.- Métodos de clasificación .....	83
4.5.- Medidas indirectas .....	89

## **CAPÍTULO 5**

### **CRITERIOS PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN Y ALGUNAS RECOMENDACIONES**

V.- Criterios para evaluar la expansión de los suelos y algunas recomendaciones .....	94
5.1.- Método directo .....	95
5.2.- Método de prueba sugerido para la expansión unidimensional y presión de expansión de suelos arcillosos .....	97

<i>5.3.- Efecto de la expansión en estructuras .....</i>	<i>118</i>
<i>5.4.- Estabilización del suelo .....</i>	<i>128</i>
<i>5.5.- Procedimientos constructivos especiales .....</i>	<i>130</i>

## **CAPÍTULO 6**

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>132</b>
--------------------------	------------

# *INTRODUCCIÓN*



## INTRODUCCIÓN

*En este trabajo analizaremos algunas de las características y sus diferentes clasificaciones de los suelos expansivos, con la finalidad de promover su existencia, ya que es muy escaso el conocimiento sobre este tema.*

*En el pasado cuando se comenzaba a construir con concreto armado no se tomó en cuenta la expansividad del suelo, ya que se desconocía de su existencia, pero cuando comenzaron a observarse problemas de hundimientos diferenciales, totales, agrietamientos etc. surgió la necesidad de investigar las causas de este fenómeno. Inicialmente se creía que estaban mal hechas las construcciones, pero como iban avanzando las investigaciones se comenzaba a descubrir que las causas del problema era el suelo de algunas zonas específicas donde se manifestaba el problema plenamente.*

*La gente creía que los cambios climáticos eran los culpables del fenómeno, pero sin explicarse la causa, los investigadores de suelos descubrieron que el suelo al entrar en contacto con el agua, aumentaba su volumen considerablemente y al faltarle agua disminuía, esto explicaba él*

*porque en tiempo de lluvias aparecían grietas en las construcciones y en tiempo de sequía desaparecían.*

*A causa del crecimiento desmedido y sin planeación que ha tenido la Ciudad de México y otras ciudades de la República Mexicana se han tenido problemas porque se han habitado zonas en las cuales se desconocía la formación y composición del suelo, lo cual ha tenido repercusiones en pérdidas materiales millonarias y lamentablemente también pérdidas humanas, provocadas por fallas en las cimentaciones, las cuales se construyeron sin ningún estudio del suelo sobre el cual se iba a desplantar la cimentación.*

*Ahora en la actualidad se ha avanzado bastante en este tema pero no lo suficiente, ya que se ha tratado de generalizar el problema y sus soluciones pero sin éxito, porque cada caso es uno diferente que necesita un estudio específico para determinar sus características y potencialidad de expansión, porque su formación y composición en cada zona es distinto y por lo tanto es necesario para así dar una solución adecuada a cada problema.*

*Desafortunadamente, debe reconocerse que a pesar de los progresos que se han venido generando, actualmente el conocimiento de los suelos expansivos no ha alcanzado un estado donde soluciones*

*satisfactorias puedan ser aplicadas al problema. Una de las razones primarias de ésta situación es que no obstante que el fenómeno de expansión ha sido plenamente reconocido desde hace algún tiempo, todavía no se ha establecido un método definido para evaluar el potencial de expansión de un suelo, lo cual dificulta que se pueda proporcionar un patrón confiable que permita medir las características del fenómeno. La dificultad en proporcionar este patrón se debe a la presencia de numerosas variables involucradas en la determinación de esas características. Ante esta perspectiva surge la siguiente pregunta ¿ En qué grado el efecto perjudicial a las estructuras, de las arcillas del Valle de México se compara con las de Mexicali, B.C.?, la respuesta puede resultar incierta ya que cuando hablamos de un suelo altamente expansivo en Mexicali, B.C., probablemente no estamos hablando del mismo modelo que se usó para describir los suelos expansivos del Valle de México.*

*Entonces es de esperarse que los progresos teóricos alcanzados en el conocimiento de las características de este tipo de suelos conjuntamente con una tendencia a la uniformización de los procedimientos de pruebas, permitan explicar la influencia de muchos de estos factores a analizar datos confiables que contribuyen a una mayor comprensión de la materia.*

# *CAPÍTULO 1*

## *ANTECEDENTES*

## **ANTECEDENTES**

*En muchas áreas del mundo se han encontrado problemas de ingeniería y fallas de estructuras como consecuencia de la expansión de los suelos arcillosos. Estos problemas están relacionados con terraplenes de carreteras, cimentaciones de construcciones relativamente ligeras, revestimientos de canales y otras estructuras.*

*Generalmente los problemas asociados con suelos expansivos no son muy apreciados fuera de las zonas donde ocurren, sin embargo, el problema de las arcillas expansivas atraen la atención de los especialistas de suelos, debido a que nuevas áreas con este tipo de formación van siendo descubiertas por razón natural del desarrollo de muchos países del mundo. Los daños que el fenómeno causa a las estructuras desplantadas en este tipo de suelos, ocasionan pérdidas materiales cuyo monto representa en algunos casos varios millones de pesos. Como una referencia al respecto es conveniente mencionar que en los Estados Unidos de Norte América, han evaluado el monto de las pérdidas materiales que anualmente ocasiona el fenómeno de expansión de suelos; en este país, probablemente el único que ha realizado una evaluación de tal naturaleza, que ha estimado que los daños a caminos,*

*edificios y otras estructuras cimentadas sobre suelos expansivos, excede a dos mil millones de dólares anualmente.*

*De los resultados obtenidos en este estudio se concluyó que, los daños ocasionados por suelos expansivos, exceden el promedio anual de daños producidos por la acción de inundaciones, huracanes, sismos y tornados.*

*El problema crece en importancia si se toma en cuenta que en muchos países en vías de desarrollo, entre ellos México, están incrementando su infraestructura, lo cual implica que en algunos casos las áreas constructivas habrán de irse extendiendo hasta invadir aquellas zonas que hasta ahora han sido evitadas por la presencia de suelos expansivos. Con esta perspectiva, puede esperarse que en el futuro habrá de requerirse una mayor evolución en el conocimiento del fenómeno de expansión de arcillas, lo cual permitirá obtener mejores soluciones para la cimentación de estructuras en áreas con este tipo de suelos.*

*En este sentido, en los últimos años se han realizado considerables esfuerzos para lograr una mayor comprensión de la naturaleza de los suelos expansivos, tanto en el plano teórico como en el de la ingeniería práctica.*

*Las instituciones académicas han sido las que en su mayoría han logrado los mayores avances en los estudios referidos a la mineralogía de los*

*suelos, estructura y modificación de la estructura, tienden a lograr un mejor comportamiento del suelo. Los investigadores de dichas instituciones también han avanzado en el conocimiento de nuevas teorías tales como las de los esfuerzos efectivos, succión de suelos y presión osmótica, las cuales revelan propiedades de los suelos expansivos.*

*En lo que se refiere a la obra de campo en suelos expansivos, en los últimos años se ha hecho énfasis en el criterio de diseño y en los procedimientos de construcción, teniendo en cuenta la responsabilidad que tienen los ingenieros de suelos de ofrecer soluciones prácticas y económicas a sus clientes, de tal manera que las estructuras estén libres de movimientos de falla en la cimentación.*

## **1.1.-EVOLUCION EN EL CONOCIMIENTO DE LOS SUELOS EXPANSIVOS**

*Hasta antes de 1920, la mayoría de las construcciones ligeras en los Estados Unidos de Norte América, consistían de casas habitación construidas a base de armaduras, lo que permitía que tales estructuras pudieran soportar considerables movimientos sin exhibir agrietamientos perceptibles.*

*De esta manera, el problema de los suelos expansivos no fue reconocido por los ingenieros de suelos sino hasta fines de 1930, año en que se empezó a difundir ampliamente el uso de la mampostería en la construcción de casas-habitación. A partir de entonces algunos propietarios de tales estructuras empezaron a notar agrietamientos en las paredes de sus casas, los cuales fueron atribuidos a malas construcciones y en otros casos a los asentamientos de la cimentación debido al desconocimiento que se tenía en esa época del fenómeno de la expansión de suelos.*

*El United States Bureau of Reclamation (U.S.B.R.) fue la primera organización en reconocer el problema de los suelos expansivos en 1938, al realizar el estudio del problema de la cimentación de un sifón de acero en un proyecto denominado Owyhee, en Oregon. A partir de entonces los ingenieros*



*de suelos empezaron a reconocer que muchas de las fallas de las estructuras tuvieron como origen un problema diferente al de los asentamientos.*

*Pocos años después en los albores de la década 1940-1950, se hizo extensivo el uso del concreto, lo que trajo como consecuencia que las construcciones apoyadas en losas desplantadas directamente sobre el terreno se diversificaran, el resultado de éste proceso fue que el número de estructuras falladas a causa de los suelos expansivos se incrementó en forma notable.*

*Ante esta situación el interés por conocer el problema de la expansión de los suelos se extendió rápidamente de tal forma que hoy en día dicho interés tiene un alcance mundial. Diversos ingenieros de Australia, Canadá, Estados Unidos, Sudáfrica y otros países han contribuido extensamente en el conocimiento y en el desarrollo de diseños adecuados para estructuras desplantadas sobre suelos expansivos. Al respecto, destacan las investigaciones realizadas en la década de los cincuentas y principios de los sesentas en las que se hicieron un buen número de intentos para descubrir la expansión de los suelos arcillosos de acuerdo a la teoría de la química coloidal de la doble capa eléctrica. En este sentido realizaron trabajos: Lambe(1953), Jiménez, Salas y Serratos(1953), Bolt y Miller(1955),*

*Bolt(1956), Mitchell(1960), Blackmore y Miller(1961), Olson y Mitranovas(1962) y Meade(1964). Estos trabajos reunieron en diversos grados buenos resultados, concluyendo que el fenómeno de expansión de arcillas depende del tipo de minerales de arcilla, del tamaño de las partículas sólidas y de las características químicas del agua en el suelo. Sin embargo, Terzaghi (1931-1956) previno contra un exceso de confianza en los modelos físico químicos para explicar la compresibilidad y expansión de los suelos arcillosos excluyendo de esa manera los modelos mecánicos que en forma objetiva pueden ayudar a mostrar las características del problema. Por otra parte y durante el mismo periodo, Ladd (1960) hizo hincapié en otros factores que pueden contribuir a la expansión del suelo, e igualmente en esa época. se dirigió una considerable atención a la importancia que los aspectos mineralógicos de la arcilla tienen en el comportamiento del suelo.*

*En 1954 apareció un manual de la U.S. Salinity Laboratory en el que se resumieron todas las experiencias de ese organismo desde su creación, que fue en 1937 (Richards 1954).*

*El significado de este libro fue largamente inapreciado por los ingenieros de suelos en los Estados Unidos de Norte América por cerca de 20 años, hasta que Sherard (1972) Aplicó conceptos contenidos en el manual al*

*hacer un agudo análisis de las presas construidas con arcillas dispersivas. Sin embargo, es conveniente aclarar que ya para estas fechas investigadores de suelos en otras latitudes habían empezado a relacionar las ideas de la expansión, dispersión y el mantenimiento de la permeabilidad en suelos que contienen minerales de arcillas; tal es el caso de los ingenieros australianos que han hecho buen uso del concepto de la estabilidad de ciertos suelos arcillosos está fuertemente ligada a la cantidad de sodio intercambiable, que contienen las partículas sólidas del suelo y a las concentraciones de sal del agua de los poros. (Aitchinson y Wood 1965, Inglés (1968) e inglés y Aitchinson 1969)*

*Comenzando con la parte final de 1960 y continuando hasta el presente se han realizado extensivos esfuerzos, especialmente por los investigadores de suelos, para desarrollar teorías que expliquen la expansión de las arcillas, particularmente para el caso de arcillas que contienen cationes mixtos, por ejemplo el sodio y el calcio. Estas teorías, así como el conocimiento de la importancia del porcentaje de sodio intercambiable, tiende a lograr nuevos conocimientos sobre la expansión y la estabilización estructural de los suelos arcillosos.*

---

*Estas contribuciones así como los diversos casos reportados en todo el mundo, han sido expuestos en varias reuniones internacionales que para el efecto se han realizado. La primera de ellas se efectuó en el año de 1965 teniendo como sede la Texas A & M University y se llamó International Research and Engineering Conference on Expansive Soils, cuatro años después se efectuó la segunda de estas reuniones en la misma Universidad y la tercera se llevó a cabo en 1973 en Haifa, Israel.*

# *CAPÍTULO 2*

## *EL PROBLEMA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS, EN MÉXICO Y EL MUNDO*

## ***EL PROBLEMA MUNDIAL DE LOS SUELOS EXPANSIVOS***

*Después de casi cincuenta años de haber reconocido el fenómeno de la expansión de los suelos, el número de países que han reportado nuevas áreas con suelos expansivos se ha incrementado notablemente, de tal forma que hoy en día el problema ha adquirido relevancia mundial. Poco más o menos 20 países son los que han reportado la presencia de este tipo de suelos en su territorio y algunos de ellos han hecho hincapié en las vastas extensiones que ocupan. Así mismo los investigadores de suelos de esos países han realizado notables esfuerzos a fin de desarrollar procedimientos que le permitan al ingeniero construir con y sobre suelos expansivos con los mismos riesgos.*

*Un breve resumen del estado de las áreas de los suelos expansivos en el mundo se presentó en el International Panel Review durante la primera conferencia internacional que sobre la materia se efectuó en 1965 en Texas A & M University, en él, los diferentes países participantes expusieron los siguientes resultados :*

*AUSTRALIA .- En este país, la ciudad de Adelaide al sur de Australia, es la que tiene los mayores problemas en relación con la expansión de suelos. En esta ciudad, de varios miles de habitantes, se ha estimado que aún cuando*

*los daños causados por el fenómeno en estudio pueden considerarse moderados, la suma de colapsos asociados con fallas en la cimentación de estructuras es de sustancial importancia.*

*CANADA .- El amplio rango de climas y geología en Canadá produce una gran variedad de problemas de cimentación. En el oeste del país, donde se encuentran situadas las ciudades de Saskatchewan y Alberta, los problemas con arcillas expansivas son extremadamente evidentes. En esta zona donde es muy común en las estructuras utilizar sótanos superficiales desplantados a poca profundidad en relación al nivel del terreno natural, las arcillas expansivas han mostrado su efecto en los desplazamientos laterales que sufren las paredes de estos sótanos así como el levantamiento de los pisos de los mismos, los cuales han llegado a alcanzar valores de hasta 15.5 cm en 18 meses. Los suelos en esta región son generalmente desecados.*

*ESPAÑA .- En España se pueden encontrar muchas formaciones arcillosas de origen sedimentario de alta plasticidad. En la mayor parte del país, el clima es árido y la evaporación es varias veces mayor que la precipitación.*

*El problema de expansión se presenta en diversas regiones, dentro de éstas, existen dos provincias que se pueden considerar típicas, Andalucía y*

*Madrid. En la provincia de Madrid, la mayor parte de los suelos consisten en arcillas montmoriloníticas que tienen límites líquidos de hasta 250 % aunque la generalidad de ellos alcanzan valores de 80 %. En una gran parte de las áreas metropolitanas, las arcillas de alta plasticidad están cubiertas con sedimentos arcillo-arenosos de suficiente espesor que impide que el fenómeno de expansión se manifieste en las estructuras.*

*INDIA .- Los también llamados suelos negros algodonereros cubren una gran área de aproximadamente 51,777,620 hectáreas en la superficie de la India. Este suelo se caracteriza por su extremada dureza cuando está seco y su alto potencial de expansión durante el proceso de humedecimiento.*

*ISRAEL .- El problema de los suelos expansivos existe en casi todo Israel. Este país tiene un invierno lluvioso y un y un verano seco y caluroso. Los suelos son de origen aluvial o suelos transportados, producto del intemperismo de basaltos o piedras calizas. En las áreas con suelos arcillosos, la montmorilonita se presenta en cantidades que van del 40 al 80 % del suelo.*

*SUDAFRICA .- En Sudáfrica, el problema de los suelos expansivos ha llamado la atención de los ingenieros desde 1950. La South African Institution of Civil Engineers publicó el primer simposium sobre arcillas expansivas en*



1957. En este país se han registrado severos problemas de movimientos en cimentaciones en las regiones de Leeuhof, Vereeniging, Pretoria y Transvaal, donde los depósitos fluvio-Lacustres son el origen de los suelos expansivos. Así mismo la Pizarra Ecce que cubre una gran parte de Sudáfrica es responsable de los problemas de movimientos de cimentaciones en Odendaalsrus en la llamada región de los campos dorados de la naranja de los estados libres.

*VENEZUELA* .- El primer informe de arcillas expansivas en Venezuela proviene de cinco vecindades de la ciudad de Coro, donde muchas construcciones han fallado por la presencia de este tipo de suelos. En las primeras investigaciones se encontró cerca de la ciudad mencionada formaciones de pizarra con propiedades expansivas. Algunos de estos suelos tienen presiones de expansión de 14 kg. / cm<sup>2</sup> y ocasionalmente alcanzan valores de 31.1 kg. / cm<sup>2</sup>.

Estos son sólo algunos datos que se tienen con relación a unos cuantos países. Sin embargo una mayor información al respecto fue proporcionada por G. W. Donaldson en 1969, en la segunda Conferencia Internacional Sobre Suelos Expansivos, efectuada en Texas A. & M. University quien resumió la

*distribución de los suelos expansivos al rededor del mundo. La figura 1 muestra esta distribución.*

*Concretamente hasta esa fecha 18 países habían reportado regiones con este tipo de suelos, ellos son :*

<i>ARGENTINA</i>	<i>IRAN</i>
<i>AUSTRALIA</i>	<i>MEXICO</i>
<i>BURMA</i>	<i>MARRUECOS</i>
<i>CANADA</i>	<i>RODESIA</i>
<i>CUBA</i>	<i>SUD-AFRICA</i>
<i>ETIOPIA</i>	<i>ESPAÑA</i>
<i>GANA</i>	<i>TURQUIA</i>
<i>INDIA</i>	<i>U. S. A.</i>
<i>ISRAEL</i>	<i>VENEZUELA</i>

*MAPA DE LAS ARCILLAS EN EL MUNDO*

*FIGURA 1*

*Potencialmente los suelos expansivos se pueden encontrar en casi cualquier parte del mundo. Sin embargo como puede observarse en la figura 1, Los suelos expansivos están confinados a las regiones semiáridas de las zonas con climas y temperaturas tropicales.*

*Particularmente se encuentran en abundancia donde la evaporación media anual excede la precipitación, como ya lo había expuesto Keller en 1957.*

*De esto resulta la teoría de que en las zonas semiáridas, la escasez de filtraciones ha ayudado a la formación de la montmorilonita.*

## **2.1.-ZONAS DE MEXICO CON SUELOS EXPANSIVOS**

*En la República Mexicana el problema de las arcillas expansivas ha empezado a ser abordado cada vez con más frecuencia, pues aunque hasta la fecha las zonas detectadas con este tipo de suelos pueden considerarse de dimensiones medias, al futuro los sitios donde se efectúan obras de ingeniería habrán de incrementarse con rapidez. Incluso se piensa que en México este incremento será aún más rápido que en otros sitios del mundo, ya que se supone que por ejemplo, el programa de construcción de Unidades Habitacionales en los centros de población, seguirá con el mismo o mayor ritmo de desarrollo que en el actual y por lo tanto invadirá las zonas de las ciudades que hasta ahora han quedado sin edificar, debido precisamente a los problemas que presentan, entre otros, el de la presencia de los suelos expansivos. El número de áreas con este tipo de suelos que se han encontrado en nuestro país cubre prácticamente todo el territorio nacional, según los datos obtenidos de estudios realizados por el departamento de Geotécnica, de la Dirección General de servicios Técnicos de la SAHOP y del informe presentado por el IMSS en la IV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos en 1972.*

Con base en esta información, se obtuvieron los datos de precipitación media anual y evaporación potencial media de aquellos lugares de la República Mexicana en los que es reconocida la presencia de suelos expansivos.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla :

LUGAR	PRECIPITACION MEDIA ANUAL MM	EVAPORACION POTENCIAL MEDIA MM	TEMP. PROMEDIO ANUAL	MAX. TEMP. PROMEDIO ANUAL	MIN. TEMP. PROMEDIO ANUAL	OSCILACION DE LAS TEMPERATURAS
APATZINGAN MICH	714	2200	35.9		20.7	15.2
CELAYA GTO	600	2000	27.7		11.3	16.4
CHIHUAHUA CHIH.	314	2300	26.1		11	15.1
CD OBREGON SON	329	2600	31.3		15.6	15.7
CUAUTLA MOR.	1007	1800	33		15.1	17.9
CUERNAVACA MOR	1285	1784	26.7		14.8	11.9
CULIACAN SIN	671	2154	30		18.3	14.7
CHILPANCINGO GRO	1000	1800	28		14	14
DURANGO DGO.	440	2264	24.5		10.7	13.8
EL CARRIZO SIN.	700	2200	31		14	17
EL MANTE TAMPS	750	2000	32		18.5	14
HERMOSILLO SON.	246	2200-2600	32.3		16.6	15.7
IGUALA GRO	1030	2315	33.3		17.9	15.4
IRAPUATO GTO.	704	2200	29.1		12.9	16.2
LA PIEDAD MICH.	904	2150	28.9		10.8	17.1
LEON GTO	636	2946	27.4		12	15.4
MEXICALI B.C.	68	2200	31.6		13.8	17.8
MORELIA MICH	772	1950	23.7		13.2	10.5
PANUCO VER.	1010	1600	29.5		19.1	10.4
PUGILTIC CHIS.	1000	1600	28		14	14
QUERETARO QRO	555	2000	26.7		10.8	15.9
REYNOSA TAMPS	450	2200	32		18	14
RIO BRAVO TAMPS.	500	2100	32		18	14
SOYO LA MARINA	736	1800-2200	32.5		16.2	16.3
TAMUÍN S.L.P.	1100	1600	32		18	14
VILLA DE GUAYMAS N.L.	602	2000	30		14	16
VILLA HERMOSA	2219	1576	33.7		21.8	11.9
YURIRIA GTO	674	2000	26.9		12	14.9
SAHUAYO MICH	800	1900	28		12	16

*Según puede observarse, a excepción de Villa Hermosa en todos los casos la precipitación media anual es menor a la evaporación potencial media, con lo cual la teoría de Keller se corrobora.*

*Así mismo otro hecho que circunstancialmente se encontró al estar buscando los datos anteriores es que la oscilación de las temperaturas extremas en los mismos sitios es del orden de  $15^{\circ}\text{C} \pm 1$ .*

*Una conclusión inmediata que puede derivarse de lo anterior es que, el factor climatológico resulta ser un importante elemento que nos permita detectar zonas potenciales de suelos expansivos, si se conocen los datos de evaporación potencial media y precipitación media anual. En principio esto permite pensar que haciendo uso de estos datos puede hacerse una zonificación primaria de la República Mexicana que permita conocer las probables áreas del país en las que se encuentren arcillas expansivas. Los organismos gubernamentales con programas de inversión para obras de infraestructura, así como las instituciones académicas de cada lugar pueden coadyuvar en la realización de esta tarea, en tanto que los organismos privados, en muchas ocasiones ejecutores de las obras pueden corroborar en el trabajo de campo la información proporcionada por los datos climatológicos. Sería deseable también que los organismos encargados de*

*elaborar cartas geográficas incluyeran estos datos en las mismas. Se sabe que las instituciones como la Secretaría de la Defensa Nacional, Obras Públicas y Dirección de estudios del Territorio Nacional entre otras, emiten cartas geográficas para diversos usos, sin embargo, esta última, ha venido elaborando aquellas que contienen una información más completa, sería deseable que en las mismas estos datos aparecieran.*



# *CAPÍTULO 3*

## *LOS SUELOS EXPANSIVOS, SU FORMACIÓN Y LAS CAUSAS QUE ORIGINAN EL PROBLEMA*

## **FORMACION DE LOS SUELOS EXPANSIVOS**

*Es común que dentro de los problemas que tiene que resolver el ingeniero de suelos, se encuentre el de los asentamientos; sin embargo, con frecuencia se enfrenta con problemas de movimientos ascendientes (levantamiento de estructuras) como consecuencia de la expansión del terreno donde se desplanta la obra, este tipo de problemas son muy generales y de importancia económica en aquellos países que tienen regiones áridas ya que, en tales zonas, los suelos se secan y contraen con el clima incrementando su volumen al existir nuevamente humedad. En términos generales el agua necesaria puede proceder de la lluvia, drenaje o por efecto de capilaridad cuando una capa impermeable se coloca sobre la superficie del terreno evitando así la evaporación,*

*Evidentemente, cuanto más ligera sea una estructura tanto más se levantará, un suelo si es que no se toman las medidas adecuadas para que no ocurra, de esta manera los problemas de expansión suelen estar asociados con estructuras ligeras como pequeños edificios, (especialmente almacenes), vertedores de presas, pavimentos de carreteras, etc.*

*Al respecto será conveniente establecer qué es un suelo expansivo, como se forma este tipo de suelos y cuáles son las causas, hasta ahora investigadas que dan lugar a la expansión.*

### **3.1.- SUELO EXPANSIVO**

*El término suelo expansivo está asociado a los suelos de partículas finas (más de la mitad del material pasa la malla nº 200) cuya característica fundamental es que en su mayor parte tienen un comportamiento determinado por reacciones químicas, más que por reacciones físicas. En este sentido, se puede decir que un material con tales características se refiere a un suelo arcilloso lo cual ha dado lugar a que en el campo de toda la ingeniería se hable en términos concretos de arcillas expansivas.*

*La palabra arcilla tiene diferentes connotaciones en diversos campos, pero en el contexto de la ingeniería, generalmente se entiende como un material compuesto de partículas minerales pequeñas las cuales en asociación con ciertas cantidades de agua exhiben propiedades plásticas. Con estos elementos, se puede definir una arcilla expansiva en términos generales, de la manera siguiente :*

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

Una revisión de la literatura que se ha escrito al respecto hasta antes de 1920 revela muy diferentes conceptos de la composición fundamental de los materiales arcillosos. Los análisis químicos han mostrado que tales materiales están compuestos en general de silicio, aluminio y agua. Diversos compuestos ofrecen variadas ideas acerca de cómo estos constituyentes químicos se encuentran organizados en los materiales arcillosos. Una idea fue que los constituyentes se presentaban en mezclas amorfas sin ninguna composición definida o estructura.

Otra fue, que la caolinita era el constituyente esencial de todos los materiales arcillosos y que cualquier elemento fuera de la composición de la caolinita se presentaba como impureza. Otra sugerencia fue, que el tamaño de las partículas sólidas era el principal factor y que de hecho, los materiales arcillosos podrían estar compuestos casi de cualquier tipo de material si estos eran bastante finos, aproximadamente una micra se considero el limite superior, y otra idea fue que los minerales como la zeolita (silicato natural

*que se encuentra en ciertas rocas volcánicas) eran los constituyentes esenciales de las arcillas.*

*Por muchos años algunos estudiosos de los materiales arcillosos sugirieron que tales materiales estaban compuestos de partículas extremadamente pequeñas de un número limitado de minerales cristalinos. Por ejemplo, Le Chatelier (1887) y Lowennstein (1909) llegaron a esta conclusión hace muchos años. Esto es, el concepto de mineral de arcilla no es nuevo, por lo contrario, ha sido bien establecido y generalmente aceptado en años recientes.*

*En 1923 Hadding en Suecia y Rinne en 1925 en Alemania, trabajando completamente independientes, publicaron los primeros análisis de difracción de rayos X de materiales arcillosos. Estos investigadores encontraron materiales cristalinos en las fracciones más finas de una serie de arcillas y también encontraron que todas las muestras estudiadas aparentaban estar compuestas de partículas sólidas de un mismo pequeño grupo de minerales.*

*Cerca de 1924 Ross y varios colegas (1926, 1928, 1931, 1934, 1945) comenzaron un estudio de la composición mineralógica de las arcillas que dio lugar a una serie de monumentales documentos sobre la materia.*

*Ellos mostraron que los componentes de los materiales arcillosos eran esencialmente cristalinos y que había un número limitado de tales componentes cristalinos, a los cuales se les dio el nombre de materiales de arcilla. Apartir de entonces un basto número de investigadores de diversos países han obtenido resultados que verifican esta conclusión (Grim 1963).*

*En este contexto, se puede afirmar que los materiales arcillosos están compuestos esencialmente de partículas cristalinas extremadamente pequeñas de uno o más miembros de un pequeño grupo de minerales que son conocidos comúnmente como los minerales de arcilla.*

*Estos minerales de arcilla son silicatos de aluminio hidratados, aunque en algunos minerales, el magnesio o el fierro sustituyen totalmente o en parte al aluminio.*

*También los alcalies o suelos alcalinos se presentan como constituyentes esenciales en algunos de ellos. En adición a los minerales de arcilla algunos minerales arcillosos contienen diversas cantidades de los llamados minerales no arcillosos tales como el cuarzo, la calcita, los feldespatos y la pirita. También muchos materiales arcillosos contienen material orgánico y sales solubles en agua.*

*De acuerdo a estos conceptos, los minerales de arcilla cristalinos son los constituyentes básicos de casi todas las arcillas y, por lo tanto, los componentes que mayormente determinan sus propiedades.*

*Algunos materiales arcillosos contienen minerales que no son cristalinos sobre la base del análisis de difracción de Rayos X, como por ejemplo los minerales alófanos \* esto es conveniente mencionarlo en virtud de que hay algunos casos (Grim 1948) en que éste tipo de mineral es el mayor componente de un material arcilloso. Sin embargo tales casos son raros y en general los materiales arcillosos se componen totalmente o predominantemente de componentes cristalinos.*

*\* ( Por definición los materiales de arcilla alófanos son silicatos de aluminio de color azul-verdoso que son amorfos a la difracción de los Rayos X). Esto no significa que tales materiales carezcan por completo de una organización estructural, lo que pasa es que el arreglo de las unidades tetraedrales y octaedrales con respecto a las demás no es lo suficientemente regular para permitir la difracción.*

*Conviene entonces, hablar sobre la estructura cristalina de los principales minerales arcillosos antes de estudiar la química superficial de los minerales y las consecuentes interacciones de las partículas arcillosas*

*bajo diversas circunstancias. En este sentido la naturaleza de las ligas o eslabones, que mantienen unidos a los átomos de un mineral de arcilla, es la base sobre la cual descansa cualquier discusión acerca del comportamiento de las partículas de arcilla; y por lo tanto de un conjunto de partículas.*

### **3.2.- LIGAS ATOMICAS**

*Existen dos grupos principales de ligas atómicas, en el primero de ellos se encuentran las llamadas ligas primarias o ligas de alta energía las cuales mantienen a los átomos unidos; y el segundo lo forman las ligas secundarias o ligas débiles, las cuales eslabonan moléculas.*

#### **LIGAS PRIMARIAS**

*Iónica (Hetero y Homopolar) .- Aquellos elementos que son capaces de combinarse químicamente y no tienen un número completo de electrones en sus órbitas exteriores. Un átomo se une con otro átomo por adición de electrones a su órbita exterior o por pérdidas de ellos, para llegar a una configuración estable. Generalmente los procesos de combinación involucran la pérdida o adquisición del más diverso número de electrones. Entonces, si un átomo tal como el sodio tiene sólo un electrón en su órbita exterior, sin un posible complemento de ocho en esa órbita, está en posibilidad de combinarse*



con cloro, que tiene siete electrones en la órbita exterior y de esta forma el átomo de sodio pierde un electrón en lugar de adquirir siete.

Sin embargo, la pérdida de un electrón no deja al átomo de sodio en un estado eléctricamente neutral, por la pérdida ha alcanzado un estado de carga positiva unitaria. Por otra parte, el átomo de cloro ha ganado una carga eléctrica negativa unitaria por la obtención del electrón. Los átomos que han ganado o perdido electrones en esta forma son llamados iones, y las fuerzas que los enlazan con llamadas ligas iónicas. El átomo de sodio se convierte en un ión positivo o catión, el átomo de cloro en un ión negativo o anión, y la combinación resulta en una molécula. Generalmente el proceso se presenta por la siguiente notación :

$$Na + Cl = Na^+ Cl^-$$

Los átomos pueden dar o recibir varios electrones, y al ión resultante se le da la notación :  $Na^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Si^{4+}$  ó  $Cl^-$ ,  $O^{2-}$ , etc. Debido al intercambio de electrones, los átomos individuales en un cristal no son eléctricamente neutros.

### COVALENTES

Si a dos átomos les falta uno o más electrones en sus órbitas exteriores, ellos pueden combinarse compartiendo uno o más pares de electrones. Una liga tal es llamada covalente y se puede ejemplificar por unas ligas que

*mantiene juntos átomos de oxígeno en una molécula de oxígeno. En un sistema arbitrario de medida tanto las ligas iónicas como las covalentes son eslabonamientos fuertes.*

### **HIDROGENO E HIDROXILO**

*La combinación de un átomo de oxígeno con un átomo de hidrógeno da como resultado un ión de hidróxilo el cual puede unirse con un ión de oxígeno por medio de una liga débil entre el catión de hidrógeno y el ión de oxígeno.*

### **LIGAS SECUNDARIAS**

#### **FUERZAS LONDON-VAN DER WAALS**

*Como un resultado de los movimientos de los electrones en sus órbitas al rededor de los átomos, cualquier molécula tiene asociada un campo eléctrico capaz de interactuar con el campo eléctrico de las moléculas vecinas, que da lugar a una fuerza de atracción entre las moléculas llamadas London-Van Der Waals.*

*Por lo tanto, la fuerza de atracción London-Van Der Waals entre las superficies de dos partículas de minerales arcillosos paralelos separados por agua dependerá esencialmente de la estructura cristalina de los minerales y de la distancia que los separa.*

*Se debe hacer notar aquí que como la fuerza varía como una potencia de la distancia de separación, la fuerza entre dos placas de minerales arcillosos no paralelos no es sólo una función de la distancia promedio entre ellas, sino también depende de la orientación de las mismas de unas con respecto con otras.*

### **LIGAS ELECTRICAS**

*En algunas moléculas eléctricamente neutras (por ejemplo, moléculas de agua) los centros de polaridad positiva y negativa no coinciden, consecuentemente, las moléculas pueden comportarse como pequeños imanes permanentes o dipolos, por consiguiente cualquier polo puede ser atraído por una molécula cargada o por superficies formadas por iones de signo opuesto. Aunque una partícula de arcilla puede en conjunto ser eléctricamente neutra, los iones de una polaridad (generalmente negativa) pueden ocupar las posiciones superficiales en la estructura cristalina. Si se observa de cerca esta situación, puede verse que esta polaridad superficial forma una película que cubre las cargas positivas internas y las moléculas polares ó iones positivos pueden ser atraídos a la superficie y quedar retenidos en la misma.*

*Los minerales arcillosos de acuerdo al arreglo de sus cristales se encuentran divididos en tres grupos, que son los siguientes: caolinita.*

*montmorilonita e illita. Se ha encontrado que minerales pertenecientes a un mismo grupo tienen propiedades ingenieriles similares. Por esta razón, desde el punto de vista de la ingeniería es conveniente examinar la estructura cristalina de los minerales arcillosos, como una introducción al comportamiento básico de las arcillas. Como los minerales se descubrieron y nombraron antes de que se tuviera una clasificación, se han empleado diferentes nombres para identificar a algunos minerales que después se encontró que eran los mismos. La tabla I muestra los minerales en cada uno de los grupos (según Grim); el grupo se nombra de acuerdo al mineral predominante en él, aunque se han sugerido otras nomenclaturas.*

*Aunque las estructuras moleculares son complicadas, investigaciones mineralógicas de diversos minerales arcillosos han demostrado que ellos están contruidos esencialmente de dos estructuras reticulares básicas.*

*El tetraedro de silicio Si O<sub>2</sub> y el octaedro de hidróxido de aluminio Al (OH)<sub>3</sub>. Un tetraedro de silicio consiste en un átomo central de silicio rodeado por cuatro átomos de oxígeno dispuestos en los vértices de triángulos equiláteros como se muestra en la figura 2. Un número de tales tetraedros puede combinarse para formar la lámina indicada en la figura 3. Se puede ver que existe un plano base de átomos de oxígeno en un arreglo hexagonal cuyas*

*ligas se satisfacen, ya que cada oxígeno lo comparten los tetraedros adyacentes. En esta formación hay un plano central de átomos de silicio sobre el cual resaltan átomos simples de oxígeno que están libres para combinarse para los cationes externos ya que sus valencias están incompletas. Ha sido propuesto un arreglo alternativo en el cual los oxígenos no satisfechos ocurren alternativamente arriba y abajo, permitiendo uniones a cada lado de la lamina principal de átomos de oxígeno.*

*En esta distribución, los átomos de silicio ocurren en dos niveles. Ha sido postulado que esta estructura cristalina, permite una interpretación mas satisfactoria de ciertas propiedades de la montmorilonita.*



**TABLA I**  
**MINERALES DE ARCILLA**

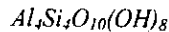
**I GRUPO CAOLIN**

1.- Caolinita  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$

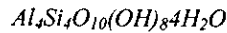
2.- Dickita  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$

3.- Nacrita  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$

4.- Haloisita, conocido también como Metahaloisita, o Haloisita ( $2H_2O$ ) no plástica



5.- Endelita, conocido también como Haloisita, Haloisita Hidratada, o Haloisita ( $4H_2O$ ) no plástica :



*Nota : La Haloisita ( $4H_2O$ ) pierde agua entre el sitio y el laboratorio a temperaturas moderadas, para formar la Metahaloisita ( $2H_2O$ ) con diferentes propiedades ingenieriles.*

6.- Alofano - Mezcla amorfa de silicio y aluminio.

7.- Anauxita.

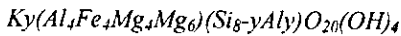
## II. GRUPO MONTMORILONITA (OMITIDAS LAS MOLECULAS DE AGUA INTERCAPAS).

1.- Montmorilonita	$\begin{array}{c} Na_{0.33} \\ \uparrow \\ (Al_{1.67}Mg_{0.33})Si_4O_{10}(OH)_2 \end{array}$
2.- Beidelita	$\begin{array}{c} Na_{0.33} \\ \uparrow \\ Al_{2.17}(Al_{0.83}Si_{3.17})O_{10}(OH)_2 \end{array}$
3.- Beidelita	$\begin{array}{c} Na_{0.33} \\ \uparrow \\ Al_{2.22}(Al_1Si_3)O_{10}(OH)_2 \end{array}$
4.- Nontronita	$\begin{array}{c} Na_{0.33} \\ \uparrow \\ Fe_2(Al_{0.33}Si_{3.67})O_{10}(OH)_2 \end{array}$
5.- Nontronita	$\begin{array}{c} Na_{0.33} \\ \uparrow \\ Fe_{2.17}(Al_{0.83}Si_{3.17})O_{10}(OH)_2 \end{array}$
6.- Nontronita (Aluminio)	$\begin{array}{c} Na_{0.33} \\ \uparrow \\ Al_{2.22}(Al_1Si_3)O_{10}(OH)_2 \end{array}$
7.- Hectoria	$\begin{array}{c} Na_{0.33} \\ \uparrow \\ (Mg_{2.67}Li_{0.33})Si_4O_{10}(FeOH)_2 \end{array}$
8.- Saponita	$\begin{array}{c} Na_{0.33} \\ \uparrow \\ Mg_3(Al_{0.33}Si_{3.67})O_{10}(OH)_2 \end{array}$



9.- Saponita (Aluminio)	$(Mg_{2.67}Al_{0.33})(Al_{0.67}Si_{3.33})O_{10}(OH)_2$
	$\begin{matrix} Na_{0.33} \\ \uparrow \end{matrix}$
10.- Sauconita	$(Si_{3.47}Al_{0.53})(Al_{0.22}Fe_{0.17}Mg_{0.18}Zn_{2.4})O_{10}(OH)_2$
	$\begin{matrix} Na_{0.33} \\ \uparrow \end{matrix}$
11.- Talquita	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
12.- Piropilita	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$

**III GRUPO ILITA (La cantidad de K presente varia)**



**IV MINERALES DIVERSOS**

- |                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| 1.-Atapulgita            | $Mg_5Si_8O_{20}(OH)_2 \cdot 8H_2O$ |
| 2.-Sepiolita (Magnesita) | $H_4Mg_2Si_3O_{10}$                |
| 3.-Sericita              |                                    |
| 4.-Vermiculita           |                                    |
| 5.-Glaucionita           |                                    |
| 6.-Clorita               |                                    |
| 7.-Diaspora              |                                    |



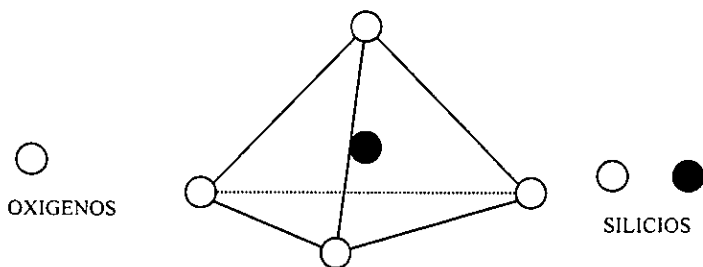


Figura 2 - Esquema que muestra un tetrahedro de silice.

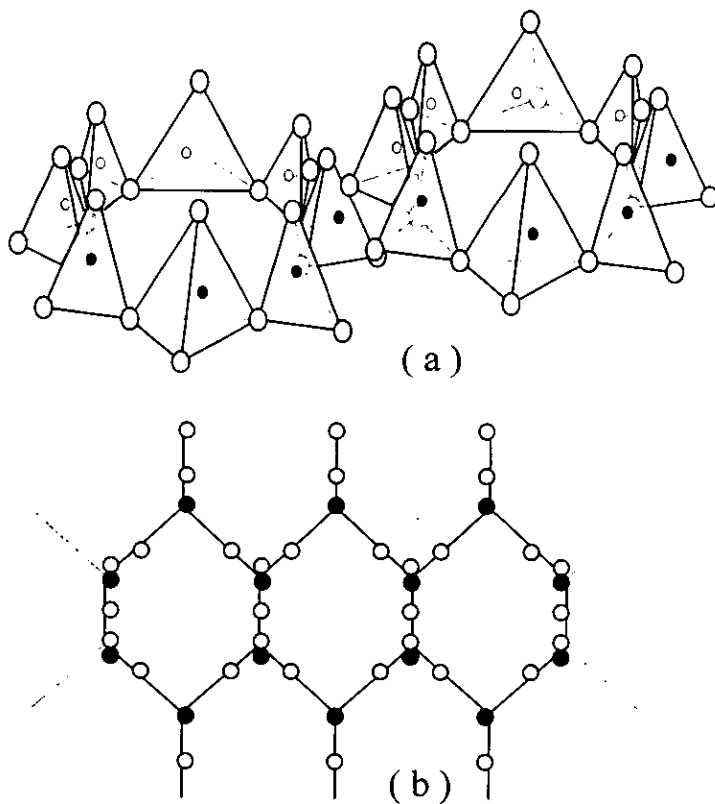


Fig 3 - Esquema de cadenas dobles de tetraedros de silice a) en perspectiva  
b) proyectadas sobre el plano de la base de los tetraedros.

*Los otros elementos estructurales, aluminios hidratados toman la forma de un cristal octahedral fig. 4, en el cual el átomo de aluminio ocupa el centro de la estructura, abajo y arriba de la cual los iones de oxígeno e hidróxidos se distribuyen.*

*En forma laminar el hidróxido de aluminio, que también se conoce como gibsita, aparece como se ilustra en la fig. 5.*

### **3.3.- CAOLINITA**

*Debido a las fuerzas de las valencias no satisfechas en los átomos de oxígeno superiores de las placas de sílice y del espaciamiento entre ellos, es posible para una placa de gibsita y una de sílice adherirse para producir una capa eléctricamente neutral (fig. 6), la cual forma una placa única del mineral de arcilla llamado caolín. Placas sucesivas de la red cristalina pueden ser apiladas una sobre la superficie de la otra, hasta formar partículas de caolín, siendo las fuerzas que mantienen los estratos juntos del tipo de las ligas de hidrógeno entre  $O^{2-}$  y los aniones de  $(OH)^{-}$ . Arreglos de apilamiento diferentes dan lugar a diferentes minerales de arcilla con la misma fórmula de caolín, viene bajo la clasificación de caolinitas. La Tabla I enlista los materiales de caolinita y sus fórmulas.*

Existe un mineral de arcilla en el grupo de la caolinita con algunas importantes propiedades, este mineral es la haloisita. Este mineral no obstante que tiene la misma fórmula que la caolinita, el arreglo de los átomos es algo diferente, de aquí que la estructura básica de la caolinita se distorsiona ligeramente para permitir la entrada de moléculas de agua adicionales dentro de la estructura. El mineral puede sin embargo ocurrir en partículas en forma de tubo, con el tetraedro de sílice localizado en la periferia.

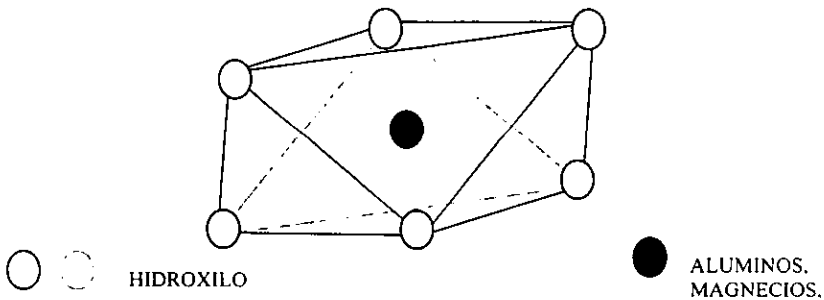
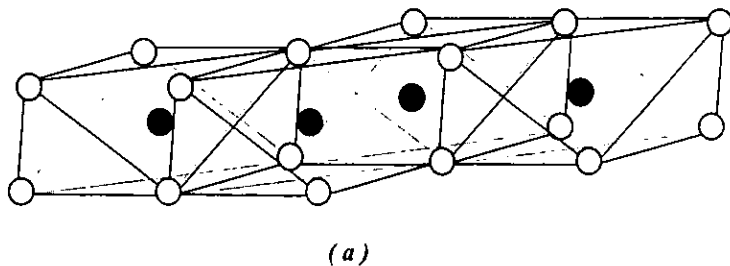


Fig. 4 - Diagrama esquemático que muestra una unidad octaedral



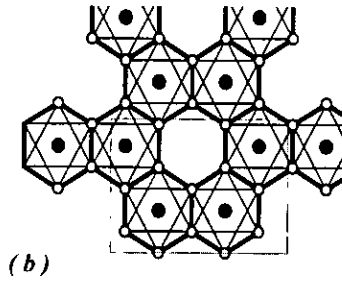


Fig. 5 - Estructura laminar de las unidades octaedrales a) en perspectiva b) proyectadas sobre un plano x - y

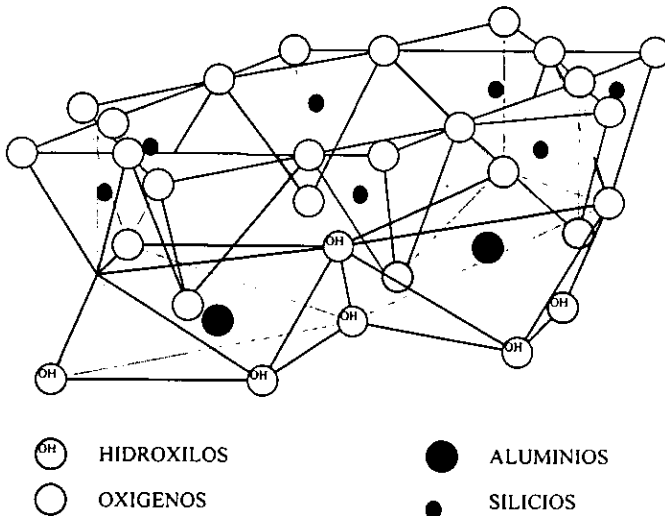


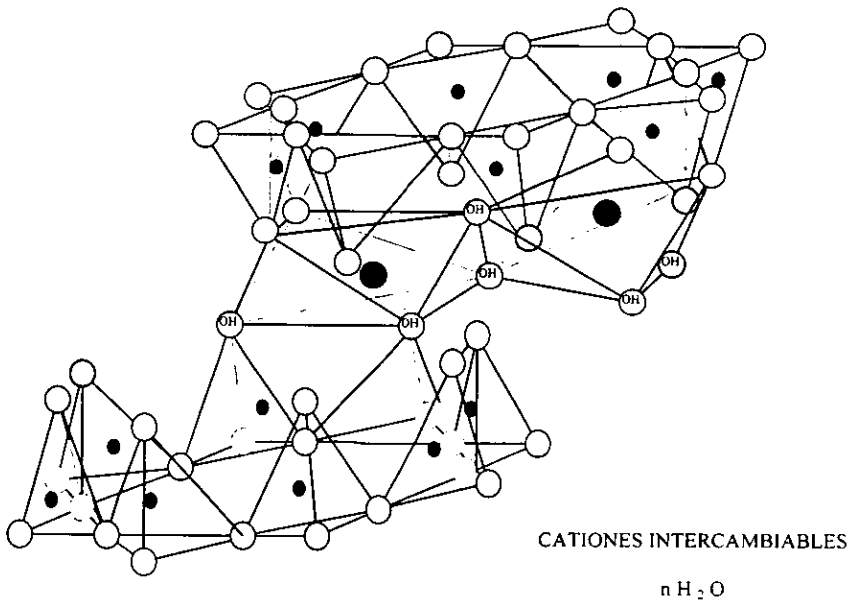
Fig. 6 - Diagrama esquemático de la estructura de una placa de caolinita según Griner (1932)

*Es posible remover algunas de las moléculas de agua en exceso en la haloisita que ocurre naturalmente, calentando el mineral a temperaturas de aproximadamente 60° C, sin embargo, si se requiere remover toda el agua en la estructura, se necesitaran temperaturas mayores, del orden de 400° C. La distorsión estructural remanente después de que el agua es expulsada hacia afuera hace que el mineral no se revierta a la caolinita, sino a un mineral llamado metahaloisita. Las propiedades de los dos tipos de haloisita y el material en etapas intermedias de hidratación difieren considerablemente y deberá tener cuidado en la interpretación de las propiedades de los suelos haloisíticos de las pruebas de laboratorio, ya que los cambios en la composición del suelo pueden tener lugar en el traslado de las muestras del campo al laboratorio.*

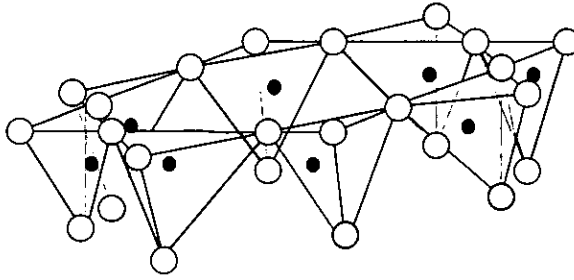
### **3.4.- MONTMORILONITA**

*Si los elementos estructurales, sílice y gibsita se arreglan como en la (fig. 7), las tres capas formadas de elementos primarios es un mineral de arcilla conocido como montmorilonita. Láminas sucesivas de tales elementos primarios se pueden apilar uno sobre otro en diferentes sentidos, dando lugar a los diversos minerales polimórficos de la montmorilonita. En este caso, las ligas entre los elementos laminares son aquellos entre  $O^{2-}$  y los iones de  $O^{2-}$*

las cuales son ligas débiles comparadas con aquellas entre capas de caolinita ( $O^2-$  y  $OH$ ). Consecuentemente, las moléculas de agua pueden entrar entre las láminas de montmorilonita y de hecho sucede que se acomodan bien dentro de la estructura. De esta manera la montmorilonita exhibe características fuertemente expansivas, ya que hasta seis capas moleculares de agua pueden establecerse entre las láminas. Para drenar esta agua se requieren temperaturas que van de los 200 a los 300° C.



**Fig 7**



- |   |            |   |                                     |
|---|------------|---|-------------------------------------|
|  | HIDROXILOS |  | ALUMINIOS, HIERRO, MAGNESIO         |
|  | OXIGENOS   |  | SILICIOS (Ocasionalmente, aluminio) |

*Fig 7 - Diagrama esquemático de la estructura de la montmorilonita de acuerdo a Hofmann Endell, y Wilm (1933), Marshall (1935); Hendriks (1912)*

*Debido a la pobreza de las ligas entre capas de oxígenos adyacentes, las láminas de montmorilonita se rompen en partículas extremadamente pequeñas de aproximadamente 0.05 micrones de diámetro y una relación de diámetro a espesor de hasta 400 : 1. Como en la caolinita, en adición a las cargas negativas sobre la superficie de las láminas habrá cargas positivas y negativas en la periferia de las roturas. El número de tales cargas estará directamente vinculados con el tamaño de las partículas de arcilla, de aquí que la relación de las moléculas al rededor de la periferia de las roturas a el número total de una partícula, se incrementa cuando disminuye el tamaño de la partícula.*



### 3.5.- ILITA

Otro grupo de minerales de importancia son la ilitas, cuya estructura consta de los mismos elementos estructurales que la montmorilonita (fig. 8) con la salvedad de que los iones de potasio ocupan posiciones entre los planos basales de los  $O^{2-}$  adyacentes.

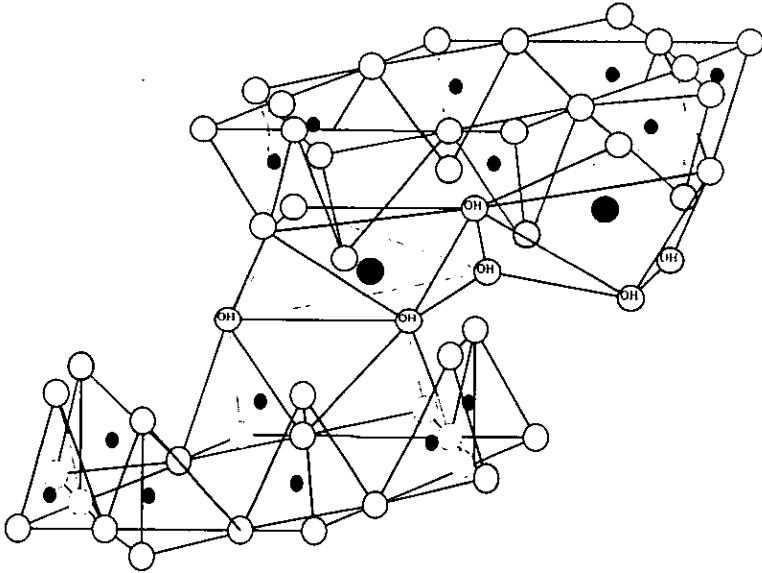
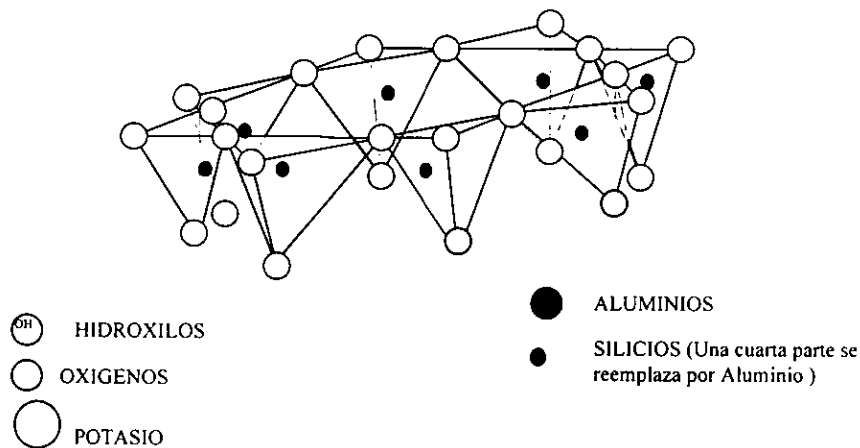


Fig. 8





*Fig. 8 - Diagrama esquemático de la estructura de la illita, según Jakson y West, (1930).*

*Los iones de potasio ligan las dos láminas a la vez, más fuertemente como lo hace con la montmorilonita, con el resultado de que la retícula es mucho más susceptible al agrietamiento. Sin embargo la illita no se expande tanto en presencia del agua como lo hace la montmorilonita, pero se expande más que la caolinita. Las partículas típicas, tienen un diámetro de aproximadamente 0.5 micrones y relaciones diámetro a espesor de aproximadamente 50 : 1. Los minerales de arcilla del grupo de las illitas están referidas a una fórmula común en la tabla I.*

### 3.6.- INTERCAMBIO CATIONICO

*En la mayoría de las estructuras de los minerales de arcilla, los iones de aluminio pueden ser reemplazados parcial o totalmente por otros cationes, hasta formas isomorfas del mineral. Uno de los pocos minerales de arcilla en los cuales esto no ocurre frecuentemente es el caolín, posiblemente debido a las ligas entre las láminas de silicio y gibsita.*

*Sin embargo en la montmorilonita los reemplazos parcialmente isomorficos de aluminio por otros cationes es común y en los materiales de montmorilonita 1/6 de las posiciones disponibles de los iones de  $Al^{3+}$  son ocupados por cationes de  $Mg^{2+}$ .*

*Esto crea una deficiencia de carga positiva en la estructura básica de la montmorilonita, y el balance eléctrico se mantiene sólo por la adsorción de un catión externo. En la tabla I se observa este catión externo que es el sodio, el cual se escribe arriba del ión de magnesio que reemplaza. La habilidad de una arcilla para absorber iones sobre su superficie o en los bordes, es llamada su base o capacidad de intercambio cationico (anión) la cual es función de la estructura mineral de la arcilla y del tamaño de las partículas. El término intercambio base se emplea frecuentemente, sin embargo, en realidad los iones de hidrógeno y aún los iones orgánicos pueden estar*

*involucrados en el intercambio. El proceso referido a los suelos es aquel en el que un catión absorbido sobre la superficie del mineral de arcilla, se intercambia por un catión de la solución de poro, la cual en el contexto presente generalmente es agua. Sin embargo, el término intercambio catiónico es usualmente aplicado a los suelos, obviamente la solución está sometida a cambios concomitantes en las concentraciones de los cationes apropiados.*

*La capacidad de intercambio base de un mineral de arcilla está relacionada con la diferencia causada por sustituciones dentro de la estructura del mineral, y también con el número de ligas rotas al rededor de las paredes de las partículas y por lo tanto con el tamaño de las placas de arcilla. El ión adicional absorbido puede ser sodio como se muestra en la tabla I ó  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  u otros cationes. La presencia de otros iones no cambia la fórmula básica, pero ellos juegan un papel significativo en la alteración de la propiedades ingenieriles de los minerales de arcilla, de aquí que ellos afecten la forma en como las diversas láminas básicas están conectadas unas con otras y ocupen espacios sobre la superficie de las partículas, lo cual hace indisponibles a otros cationes o pueden interferir con el desarrollo de capas de agua en la superficie. Además de la adsorción de*

*iones orgánicos, los minerales de arcillas son también capaces de tomar iones orgánicos sobre la superficie de la estructura. Esta tiene significado cuando por ejemplo, la montmorilonita se usa en alguna situación donde el medio de suspensión puede no ser agua.*

*De todo lo anterior, puede establecerse que las arcillas están compuestas de mezclas minerales, que se presentan en capas o apilados irregularmente o también regularmente. Este apilamiento de diferentes minerales da lugar a minerales de arcillas polimorfos.*

*Las arcillas se encuentran asociadas naturalmente con agua y las propiedades de cualquier mineral de arcilla o mezcla de minerales, esta profundamente influenciada por la cantidad de agua presente.*

*Es sabido que un valor alto de la relación superficie específica, indica que una gran proporción del número total de átomos que integran una partícula forman la superficie de la misma; así mismo de la estructura cristalina de las arcillas se ha demostrado que las partículas consisten, en general, de placas delgadas cuyos diámetros pueden ser tan grandes como varios cientos de veces el espesor de ellas. Los átomos de la superficie son predominantemente oxígenos negativos o iones de hidroxilos, mientras los iones metálicos (Al, Si) ocupan posiciones dentro de las láminas de gibsita o*

*silicio. Entonces aún cuando las partículas en conjunto, cuando los efectos de borde se ignoran, pueden ser eléctricamente neutras, su superficie se puede considerar que está fuertemente cargada negativamente y las cargas adyacentes positivas (o cationes ) pueden ser atraídas o adsorbidas por la superficie de las partículas.*

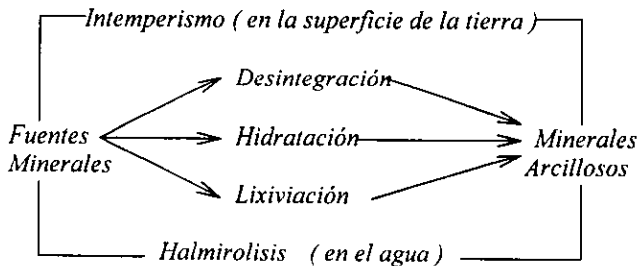
*Las sustituciones isomórficas pueden tener lugar en algunos minerales de arcilla donde la sustitución de átomos con una valencia más baja que aquella que reemplazan dan lugar a láminas de mineral en los cuales se localizan deficiencias de carga positiva. Los iones positivos o cationes son sin embargo, atraídos a estos sitios y son adsorbidos sobre la superficie de las partículas: de aquí que estos iones pueden ser reemplazados por otros bajo ciertas circunstancias, estos iones son llamados cationes intercambiables.*

*En las moléculas de agua, los centros de carga positiva y negativa no coinciden, de aquí que la moléculas se comporten como dipolos.*

### **3.7.- FORMACION DE MINERALES ARCILLOSOS**

*Después de haber analizado los minerales arcillosos en cuanto a su estructura cristalina, química superficial e interacciones entre partículas sólidas de los mismos conviene hablar sobre la teoría de la formación de estos minerales.*

*En general puede afirmarse que todos los minerales arcillosos se forman por la alteración de fuentes minerales preexistentes, siendo el mineral arcilloso así formado un resultado de relaciones complejas entre la fuente mineral y el tipo de proceso de alteración involucrada. Algunos de los factores principales que intervienen en los procesos de alteración se muestran en el siguiente esquema :*



*Como puede observarse, existen dos procesos de alteración que a su vez involucran otros más. Así la alteración que tiene lugar en la superficie de la tierra se la llama intemperismo, en tanto que la que ocurre en el fondo del mar o en general en cualquier cuerpo de agua se le llama Halmirolisis. Ahora bien, no importando donde ocurra la alteración, se incluyen procesos de desintegración, oxidación, hidratación y lixiviación.*

*En general, la desintegración representa un aumento en el área superficial de las fuentes minerales. Esto puede ocurrir por diversos*

*mecanismos por ejemplo ciclos de congelamiento y deshielo, secado, humedecimiento y abrasión, como los que se encuentran en la base de un glaciar o causados por el transporte de partículas en arroyos.*

*La desintegración es fundamental para controlar las relaciones de otros procesos de alteración simplemente porque facilita el efecto del agua que es el agente por medio del cual se producen todos los cambios químicos.*

*En este sentido Thersaghi afirmaba que sin el elemento agua, la Mecánica de Suelos no tendría uso (Woodwards-Clyde and Associates, 1967, p. 19). El mismo concepto es válido en lo que se refiere a la alteración y a la mayoría de los procesos geológicos.*

*La hidratación involucra las reacciones entre los elementos o compuestos y el agua, que permiten a los elementos formar nuevas combinaciones; eventualmente nuevos minerales.*

*La lixiviación es el proceso por el cual, los elementos hidratados y disueltos quedan eliminados del sistema y por lo tanto no están en disposición para nuevas reacciones en el mismo.*

*Ahora bien, algunas de las condiciones importantes que dan lugar a los procesos de alteración son las siguientes :*

*Oxidación - Reducción*

*Acidez - Alcalinidad*

*Temperatura*

*La Oxidación - Reducción, se refiere a la tendencia del elemento en el sistema para que esté en estados de alta valencia o de baja valencia dependiendo fundamentalmente de la disponibilidad de los oxígenos.*

*Por ejemplo, la corriente de agua de un arroyo contiene abundante oxígeno, y los elementos expuestos en el mismo tenderán a estar en un estado de alta valencia. En un depósito de agua estancada donde la abundante materia orgánica consume oxígeno libre, la mayoría de los elementos tienden a estar en un estado de baja valencia.*

*La Acidez - Alcalinidad se refiere a la concentración de iones de hidrógeno en la solución; donde la concentración es alta (como en el vinagre), la solución es ácida y donde es baja (como en el amoníaco casero) la solución es alcalina. La solubilidad de muchos compuestos se controla directamente a través de condiciones de acidez - alcalinidad.*

*La temperatura controla de manera importante la mayoría de las relaciones de reacción. En la mayoría de los casos los sistemas con los cuales tenemos que ver aquí están relacionados con las temperaturas ambientales.*





### **3.8.- FORMACION DE MINERALES MONTMORILONITICOS**

*Aunque todas las arcillas sufren cambios de volumen en respuesta a las modificaciones en el medio ambiente producidos por las actividades de la ingeniería, la montmorilonita es un mineral de arcilla que presenta las características de expansión más severas, de aquí que los suelos arcillosos con este mineral como componente principal, sea uno de los de mayor interés para su estudio en el campo de la ingeniería.*

*Las condiciones para la formación de la Montmorilonita se resumen en la fig9*

*Aunque todos los procesos de alteración que se mencionan son aplicables a la formación de la montmorilonita, la lixiviación es quizá el proceso más crítico ya que en general produce la remoción de iones durante el período de alteración y como la montmorilonita necesita cationes de magnesio, calcio, sodio y fierro para su formación, si estos elementos se remueven, el material montmorilonítico no se puede formar.*

*Así las condiciones en las cuales la montmorilonita puede ocurrir, requiere que la lixiviación sea restringida para que estos iones puedan acumularse en el sistema, esto trae como consecuencia un efecto secundario que facilita la formación de la montmorilonita debido a que se produce alcalinidad local. A su vez esta alcalinidad es importante porque controla en*

*gran medida la solubilidad de los compuestos de silicio. En alcalinidades moderadas el silicio es relativamente más soluble que el aluminio y el resultado principal de la alteración de la mayoría de las fuentes minerales a montmorilonita es un decremento en la cantidad de silicio.*

*Los principales minerales para la formación de la montmorilonita son los minerales ferro-magnesianos, feldspatos cálcicos, vidrios volcánicos y cualquier silicato de aluminio con cationes apropiados particularmente los muy poco cristalinos.*

*Con este contexto puede afirmarse que la formación de los minerales montmoriloníticos se ve favorecida por un medio ambiente alcalino, por la presencia de iones de magnesio y por la escasez de filtraciones.*

***Condiciones para la formación de la montmorilonita***

<i>Desintegración</i>	<i>- Extrema</i>
<i>Hidratación</i>	<i>- Fuerte</i>
<i>Lixiviación</i>	<i>Restringida (Mg,Ca,Fe retenido)</i>
<i>Oxidación-Reducción</i>	<i>Variable</i>
<i>Acidez-Alcalinidad</i>	<i>Alcalino</i>

*Minerales de Origen : Amplio rango de minerales silicatos de Aluminio, incluyendo otros minerales de arcilla. Silicatos en disposición de reaccionar tales como vidrios volcánicos que son particularmente favorables.*

**Fig. 9**



*Tales condiciones se presentan en regiones semiáridas en donde se tienen bajas precipitaciones o lluvias moderadas de temporada, particularmente donde la evaporación excede la precipitación ( Keller, 1957 ). Bajo estas condiciones se dispone de suficiente agua para que la alteración tenga lugar pero los cationes acumulados que dan lugar al mineral en estudio no se remueven por la presencia de la misma.*

*Resumiendo lo anterior puede decirse que la montmorilonita se origina de las rocas, principalmente por la alteración de cenizas volcánicas cristalinas depositadas ya sea en océanos o en el fondo de los lagos, aunque también los procesos de formación de suelos antes mencionados, pueden crear este mineral bajo condiciones climáticas específicas en la superficie de la tierra.*

### **3.9.- ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN EXPLICAR EL FENOMENO DE LA EXPANSION**

*Aún cuando de los datos de que se disponen se puede deducir que en las ilitas y las caolinitas pueden ocurrir presiones de expansión y expansiones significativas cuando este tipo de minerales están finamente subdivididos, por ejemplo en partículas cuyas dimensiones sea varios cientos de veces menor que un micrón; la mayoría de los problemas de suelos expansivos se*

*encuentran en materiales que contienen montmorilonita. Debido a esto han sido mas estudiadas las montmorilonitas en relación a la expansión de otros minerales y nuevos descubrimientos han sido proporcionados recientemente sobre las relaciones entre la estructura de la montmorilonita y la expansión y sobre las influencias de la solución intercapas sobre la expansión.*

*Se han realizado significativos avances en el conocimiento de los aspectos mineralógicos de las arcillas expansivas, especialmente la importancia de la dimensión-b en la montmorilonita y la influencia de los hidróxidos intercapas.*

*Como ya se ha expresado en párrafos anteriores este mineral se compone de dos poliedros básicos, el tetraedro de silicio y el octaedro de aluminio. Estos poliedros se unen compartiendo iones de oxígeno para formar una capa de forma plana de un espesor aproximado de  $10\text{\AA}$  dentro de la cual una lámina de octaedros de aluminio quedan aprisionados entre dos láminas de tetraedros de silicio, (fig. 7). Sin embargo una lámina tetraedral no aprisionada es más grande que una lámina octaedral no aprisionada. En consecuencia la interconexión necesita un ajuste en sus dimensiones relativas.*

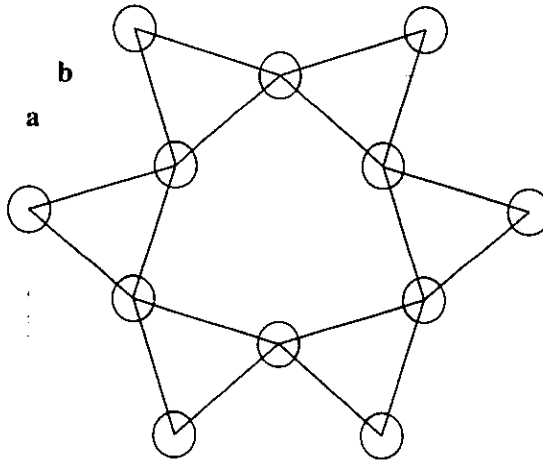
*Este ajuste se realiza por medio de la rotación alternada, positiva y negativa de los tetraedros de silicio, que componen la superficie de la capa.*

*tienen la simetría ditrigonal mostrada en la fig. 9. También en ella se puede observar la dimensión-b de la celda unitaria. La celda unitaria es la estructura más pequeña que se puede repetir en el espacio para formar el cristal.*

*Durante o después de la formación de la capa de la montmorilonita hay una sustitución de iones de aluminio por iones de silicio en algunos de los tetraedros y una sustitución de iones de magnesio o de fierro por iones de aluminio en algunos de los octaedros. Como los iones aluminio tienen una carga más pequeña que los iones de silicio y como los iones de magnesio tienen una carga positiva más pequeña que los iones de aluminio, estas sustituciones producen una carga neta negativa en la capa originalmente neutra. Esta carga se balancea por la adsorción de cationes intercambiables entre las superficies de las capas adyacentes. Diversas capas superpuestas con cationes intermedios intercambiables constituyen el cristal de la sustitución isomorfa es decir la sustitución ionica dentro de las capas del cristal tiene otro efecto. Como los iones presentes inicialmente tienen un tamaño diferente de aquellos que los sustituyen, esta sustitución produce un cambio en las dimensiones de los poliedros involucrados y por lo tanto tiende a cambiar las dimensiones relativas de las láminas tetraedrales y octaedrales.*

Para que permanezcan interconectadas se necesita un ajuste adicional. Este ajuste se realiza, como en el caso anterior, por la rotación alternada, positiva y negativa, de los tetraedros de silicio en las láminas tetraedrales.

Radoslovich y Norrish han determinado relaciones empíricas para  $b_{tetra}$ , que es la dimensión- $b$  de la lámina tetraedral no aprisionada, y para  $b_{obs}$ , que es la dimensión- $b$  del mineral de la montmorilonita seca.



**Fig. 10** - Simetría ditrigonal que tienen los oxígenos basales de los tetraedros de silicio que componen la superficie de la capa de montmorilonita.  
(O - iones de oxígeno.)

Estas son :

$$b_{tetra} = (9.051 + 0.254 Al_{IV}^{3+}) A^{\circ} \quad (1)$$

$$b_{obs} = (8.944 + 0 Mg_{IV}^{2+} \cdot 0.096 + 0.096 Fe_{IV}^{3+} + 0.037 Al_{IV}^{3+}) - 0.012 A^{\circ} \quad (2)$$



*Donde  $Mg_{VI}^{2+}$  y  $Fe_{VI}^{3+}$  son los números de los iones de magnesio y fierro respectivamente, que sustituyen a los iones de aluminio en arreglos octaedrales y  $Al_{II}^{3+}$  es el número de iones de aluminio que sustituyen a los iones de silicio en arreglos tetraedrales por celda unitaria.*

*La ecuación (1) da los valores que son comparables a los calculados a partir de una ecuación similar reportada por Bailey. El ángulo  $\alpha$ , a través del cual los tetraedros de silicio deben rotar para interconectar las láminas tetraedrales y octaedrales se calcula con la siguiente ecuación :*

$$\text{Cos } \alpha = b_{\text{obs}} / b_{\text{tetra}} \quad (3)$$

*Ecuación que ha sido discutida por Brindley y Mac Ewan, Radoslovich y Norrish y Bailey. Por lo tanto la composición de la montmorilonita afecta no sólo su capacidad de intercambio sino también la dimensiones de su celda unitaria y la configuración de sus oxigenos de la superficie. Al respecto ha sido reconocido desde hace varios años que la carga reticular tiene un profundo efecto sobre la expansión como se ilustra en los resultados expuestos por Brindley y Mac Ewan en 1953 (tabla II), en los que se puede observar que la expansión es mayor para deficiencias de cargas cercanas a la unidad por celda unitaria.*

**TABLA II**
**INFLUENCIA DE LA CARGA RETICULAR SOBRE LA EXPANSION**

(BRINDLEY Y MAC EWAN, 1953)

MINERAL	CARGA NEGATIVA POR CELDA UNITARIA	TENDENCIA A LA EXPANSION
Margarita	4	Ninguna
Muscovita	2	Sólo con un enérgico tratamiento químico en todos los casos
Biotita		
Paragonita		
Mica hidratada e ilita	1.2	
Vermiculita	1.4-0.9	Expansivo
Montmorilonita	1.0-0.6	Muy expansivo
Beidelita		
Montronita		
Hectoria		
Piroropilita	0	Ninguna

La presión de expansión observada de la montmorilonita es la diferencia entre las fuerzas de atracción y repulsión que operan entre las capas por unidad de área. Estas fuerzas han sido revisadas por Low. Para las



*distancias pequeñas entre las capas predominan dos fuerzas de atracción, estas son las fuerzas electrostáticas que ocurren entre las superficies cargadas negativamente y los iones intercambiables que intervienen y las fuerzas London Van Der Waals. La magnitud de las primeras depende de la densidad de carga de la superficie que resulta de la sustitución isomorfa, por lo tanto depende de la composición del mineral. La magnitud de la última es casi independiente de la composición. Esta dada por :*

$$Fa = A / D^3$$

*donde Fa es la fuerza en dinas / cm<sup>2</sup>, D es la distancia entre las capas y A es una constante que tiene un valor cercano a 10<sup>-2</sup> Erg. Para distancias mayores entre la capas sólo actúa la fuerza de atracción London-Van Der Waals. Cuando la distancia entre las capas excede alrededor de 100Å la ecuación Van Der Waals es :*

$$Fa = B / D^4$$

*donde B es una constante que tiene un valor cercano a los 10<sup>-19</sup> Erg-cm.*

*La fuerza repulsiva ha sido considerada generalmente que es osmótica en la naturaleza. Se supone que cuando la montmorilonita se pone en contacto con el agua, el agua entra entre las capas inicialmente porque su energía se reduce por la hidratación de los cationes y de las capas*

*superficiales. Entonces se forma una solución altamente concentrada de cationes intercambiables. Los cationes intercambiables sufren un movimiento termal como lo hacen los cationes en cualquier solución electrolítica. Aún así su libertad se restringe por el campo eléctrico de las superficies cargadas negativamente. Esta restricción eléctrica es tan efectiva como una membrana semipermeable para prevenir su escape de la zona entre las capas. En consecuencia, la solución entre las capas tiene una concentración más alta de electrolitos disueltos que la solución externa y la entrada subsecuente de agua es por ósmosis. Por lo tanto la presión repulsiva resultante se supone que es una presión osmótica.*

*Algunos aspectos de la acción intercapas que parecen pertinentes para un conocimiento de los suelos expansivos son los siguientes :*

*1.- La estabilidad intercapas requiere el mantenimiento de una carga positiva .*

*2.- Las condiciones óptimas para la formación del fenómeno intercapas parecen ser :*

- a) Un reemplazo de iones de Al*
- b) PH ácido moderado ( 5 ).*
- c) Bajo contenido de materia orgánica.*



*d) Ciclos frecuentes de humedecimiento y secado.*

3.- *En tanto el hidróxido de Al es el principal material intercapas en suelos ácidos, el hidróxido de Fe intercapas también puede presentarse.*

4.- *La información sobre la formación intercapas en suelos alcalinos es limitada, sin embargo,  $Mg(OH)_2$  es probablemente el principal componente.*

5.- *En suelos, el grado de la acción intercapas es generalmente pequeña (10-20%), pero esto es suficiente para establecer el espacio basal de la montmorilonita y la Vermiculita en 14 Å°.*

6.- *La capacidad de intercambio catiónico, puede reducirse grandemente por la formación de intercapas.*

7.- *La remoción de material intercapas puede incrementar la expansión.*

*Otros aspectos importantes que han sido estudiados para explicar el fenómeno de la expansión es la llamada expansión osmótica.*

*Osmosis es el paso de un solvente a través de una membrana semi-permeable de una solución de menor concentración a una de mayor concentración y la presión osmótica es la presión que se debe aplicar a la solución para evitar el flujo del solvente que se trata de diluir la solución.*

*Esta solución puede ser evaluada por la ecuación de Van't Hoff como sigue :*

$$P_o = RT (C_1 - C_2)$$

*Donde :*

*P<sub>o</sub> = Presión osmótica*

*R = Constante del gas (constante de Boltzmann)*

*T = Temperatura absoluta*

*C<sub>1</sub> = Concentración de cualquier especie iónica (en iones/cm<sup>3</sup>)*

*C<sub>2</sub> = Concentración iónica de las especies iónicas de la solución externa.*

*Es bien reconocido que la presión osmótica puede tener lugar en el sistema suelo-agua.*

*Suponiendo que el sistema de la doble capa existe en las retículas de los minerales, la concentración de iones que tiene lugar por la fuerza de atracción, impide que los iones se escapen de la doble capa. Sin embargo, el agua puede penetrar y diluir la concentración y consecuentemente se obtiene el efecto de una membrana semi-permeable.*

*La mayoría de los experimentos y análisis teóricos de la expansión osmótica, se han realizado una especie de cationes aislados, por ejemplo arcillas sódicas homoiónicas o una arcilla cálcica homoiónica.*

*En los últimos años se hicieron importantes investigaciones que sugirieron que la presión osmótica tiene lugar en el sistema agua-suelo y es responsable del mecanismo de expansión. G.H. Bolt a principios de 1956 concluyó que la expansión tanto de arcillas montmoriloníticas como ilíticas, es causada por el exceso de presión osmótica en la capa de los iones adsorbidos.*

*Bolt enunció que la presión osmótica del sistema puede alcanzar un valor comprendido entre 53.8 y 107 kg / cm<sup>2</sup>. De aquí que no es sorprendente que la presión de expansión de las arcillas, algunas veces alcanzan valores mayores de 26.75 kg / cm<sup>2</sup> (25Ton/pie<sup>2</sup>).*

*Basado en la teoría de la presión osmótica es la única presión interna que actúa entre las partículas, si el suelo está sujeto a presiones externas, la distancia entre las partículas disminuirá y el agua será expulsada. Como resultado, la concentración de iones entre las partículas aumenta y la presión osmótica actuante en ese momento también aumenta. Finalmente se alcanza un equilibrio cuando la presión osmótica iguala a la presión externa.*

*El proceso inverso involucra el decremento de la presión externa y la succión de líquido por presión osmótica entre las partículas para diluir la*

*concentración de iones. La distancia entre las partículas se incrementaría, resultando un incremento de volumen y una reducción de la presión osmótica.*

*Este proceso continúa hasta que se establece un nuevo equilibrio. La adsorción del agua es la más importante causa de la expansión.*

*En este capítulo se han abordado algunas de las teorías desarrolladas para el conocimiento general de los aspectos mineralógicos y físico químicos de la expansión de arcillas. Sin embargo, los factores físico-químicos y mineralógicos solo pueden ser adecuados para explicar la expansión de algunos sistemas especiales arcilla-agua-electrolito, ya que en la mayoría de los suelos expansivos que ocurren naturalmente, deben tomarse en consideración los factores mecánicos.*

*Por factores mecánicos se entienden aspectos tales como formas de partículas, ordenamientos (textura), historia de esfuerzos y las condiciones bajo las cuales la expansión se desarrolla.*

*Recientemente se sugirió que el tamaño de las partículas puede ser el factor más significativo que influencia en el comportamiento de la expansión. Para un tipo de mineral dado, esto es probablemente cierto como se demostró ampliamente por datos confiables. Sin embargo, en un sentido más fundamental, la composición mineralógica, incluyendo detalles de*

*cristalinidad, los hidrógenos intercapas y la semejanza, deben ser considerados aún más importantes. Esto es así porque la mineralogía controla el tamaño de las partículas, forma de partículas, estructura superficial, densidad de carga etc., y son estos factores los que determinan hasta donde la expansión puede desarrollarse como un resultado de los mecanismos físico-químicos y mecánicos.*

*Hace poco más de 47 años que Terzaghi (1931) presentó convincentes evidencias de que los factores mecánicos se deberían considerar si se quería entender propiamente la expansión de los suelos. Este documento poco conocido demuestra la notable visión que Terzaghi tenía del comportamiento de los suelos, se argumentó que la causa fundamental de la expansión es la deficiencia de las presiones del agua en el suelo a las cuales él se refirió como la presión capilar.*

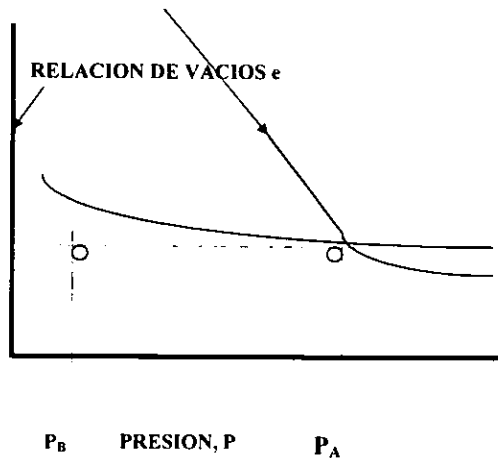
*De acuerdo a este punto de vista, las relaciones físico-químicas que tienen lugar dentro de los sistemas, influyen en la expansión sólo en cuanto a que ellas cambien las propiedades elásticas en el sistema, alterando la adhesión en los puntos de contacto, o la rigidez de las ligas moleculares o generando una tensión adicional en la fase líquida mediante un efecto de presión osmótica.*



*Todo sistema de dos fases capaz de expandirse contiene una fase sólida que está bajo una presión igual a la tensión en la fase líquida. La presencia de esta presión es la condición esencial para la expansión.*

*Como otro argumento de que las aportaciones mecánicas a la presión de expansión no se pueden pasar por alto. Terzaghi (1931) señaló que dos muestras de la misma arcilla pueden estar en la misma concentración y una de ellas ejercer una gran presión de expansión y la otra casi ninguna.*

*Esta se ilustra en la figura 11, donde  $e_A = e_B$  pero  $p_A \gg p_B$ . Es pertinente concluir que la más importante razón para las diferencias entre  $p_A$  y  $p_B$  es el diferente ordenamiento de las partículas para las dos condiciones.*



**Fig. 11-** Condición de dos muestras que para la misma relación de vacíos tienen diferentes presiones de expansión





*Sin embargo, también puede haber algunas diferencias en las fuerzas fisico-químicas de interacciones resultantes de estos diferentes arreglos.*

*Terzaghi (1931) concluyó su artículo diciendo en parte :*

*“ La energía de un sistema de dos fases de una concentración dada, está compuesta de dos partes, la energía mecánica y la energía fisico-química. La primera representa el equivalente de la compresión mecánica previa de la fase sólida y puede ser comparada con la energía almacenada en un resorte comprimido.*

# *CAPÍTULO 4*

## *CRITERIOS DE IDENTIFICACIÓN Y MÉTODOS EXISTENTES PARA EL RECONOCIMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS*

## **CRITERIOS DE IDENTIFICACION Y CLASIFICACION DE LOS SUELOS EXPANSIVOS**

*Actualmente es reconocido que la identificación de un suelo potencialmente expansivo, no presenta serios problemas para los ingenieros que están relacionados con la Mecánica de Suelos, la ingeniería de cimentaciones o en general con trabajos que impliquen el manejo de los suelos o rocas como lo es el de la Ingeniería de las Vías Terrestres o la construcción de presas de tierra. Sin embargo, esto no ocurre cuando se trata de clasificar el potencial de expansión de un suelo arcilloso, es decir, cuando se pretende definir numéricamente los diversos grados para los cuales el suelo puede exhibir tendencia a cambiar de volumen.*

*Actualmente, se tienen diversos métodos para ensayar y clasificar suelos potencialmente expansivos y aún cuando hay considerables coincidencias y algunos acuerdos entre estos métodos, se tienen inconsistencias que dan lugar a errores, cuando esto sucede, puede caerse en el caso de tener que tratar el suelo a costos elevados, o en otras circunstancias pueden ocurrir fallas y reparaciones subsecuentes o también tener el caso de un sobrediseño inadecuado.*

*Actualmente según L. M. Krazyński, las soluciones satisfactorias a este problema tendrán que incluir procedimientos empíricos, ya que los tratamientos teóricos parece que conducen a diseños muy costosos que no han podido ser justificados del todo por la experiencia de campo (esta idea también es compartida por investigadores tales como L. Bjerrum, S. Fjeld y A Skempton y D. Mc Donald, investigadores que llegaron a una conclusión similar en estudios realizados independientemente por cada uno de ellos sobre deformaciones causadas por asentamientos diferenciales).*

*Uno de los elementos indispensables de un procedimiento empírico sistemático es el control adecuado de las variables que afectan el fenómeno que se observa. Ahora bien, la influencia de tales variables se puede entender, si los resultados o experiencias de los investigadores son aplicadas sucesivamente en diferentes circunstancias entre sí. En cualquier situación real, que incluya casos de suelos potencialmente expansivos, las variables son muy numerosas por ejemplo :*

*1.- Clima*

*2.- Diferencia en el perfil del suelo (es decir, espesor y profundidad del estrato del suelo potencialmente expansivo*

*3.- Localización del nivel de aguas freáticas*

- 4.- *Grado inicial y profundidad de desecación en el suelo.*
- 5.- *Condiciones de drenaje y otros factores que afecten las fuentes de agua y medios de migración de agua (ejemplo importante : vegetación).*
- 6.- *Esfuerzo aplicado, inicial y final.*
- 7.- *El potencial del suelo, dado por expansión volumétrica.*

*Las variables 1, 2 y 5 son difíciles de codificar y clasificar, en tanto que las otras se pueden manejar con más éxito. Como un paso inicial pero muy necesario, los profesionales de la ingeniería que se encuentran dentro del área de la Mecánica de Suelos y que tienen que enfrentarse cotidianamente a este tipo de problemas, deberían de adoptar un método uniforme de prueba y clasificación para los suelos potencialmente expansivos, mejorando de esta manera las posibilidades de sistematizar el conjunto creciente de experiencias en suelos expansivos en varias partes del mundo. Entre otras importantes razones que también se pueden argumentar para una estandarización de los métodos de prueba y clasificación, está la de mejorar el intercambio de información entre los investigadores, organismos privados y gubernamentales, aspecto que por sí mismo podría compensar ampliamente algún esfuerzo tendiente a lograr la uniformización deseada.*

#### **4.1.- METODOS EXISTENTES PARA EL RECONOCIMIENTO CLASIFICACION DE SUELOS EXPANSIVOS**

*Existen tres métodos diferentes para clasificar suelos potencialmente expansivos :*

*Identificación mineralógica*

*Métodos indirectos*

*Métodos directos*

*El primero de ellos, el de identificación mineralógica, con el cual se predice el potencial de expansión mediante la identificación de los minerales constituyentes de una arcilla, puede usarse en la evaluación del material pero no es suficiente por sí, cuando se trata de suelos naturales.*

*Los diversos métodos de identificación mineralógica son importantes en una investigación de laboratorio en las que se busquen las propiedades básicas de las arcillas, pero son imprácticos y poco económicos para la ingeniería práctica.*

*Los métodos indirectos, o aquellos que emplean una medida de una propiedad inherente del suelo (tales como las propiedades índice, el método PVC, actividad de la arcilla, etc.) como una indicación del potencial de*

*expansión; son valiosas herramientas en la evaluación de las propiedades de expansión.*

*La succión del suelo puede resultar de mucha utilidad cuando tenga una aplicación más general y se tengan mejores técnicas de pruebas. Es conveniente aclarar que ninguno de los métodos indirectos debería usarse independientemente, así mismo se pueden incluir conclusiones erróneas si no se tiene el beneficio de las pruebas directas.*

*El tercer método, el de la medición directa del cambio de volumen unidimensional, ha sido utilizado ampliamente por diversos investigadores y actualmente están disponibles una gran cantidad de datos de este tipo en la literatura publicada. Típicamente, la prueba de expansión con carga consiste en la preparación de una muestra (inalterada o remoldeada) a la que se le confina lateralmente en un anillo metálico o de teflón, se le aplica una sobre carga vertical (o series consecutivas de diferentes cargas verticales), permitiendo el libre acceso de agua (frecuentemente, pero incorrectamente llamada "saturación") y midiendo la expansión vertical. Esta medida se reporta como un porcentaje de la altura inicial de la muestra y se la da el nombre de "Porcentaje de Expansión".*

*La prueba tiene la ventaja importante de medir directamente la propiedad del suelo deseada; es decir, la expansión volumétrica de absorción del agua, siendo razonablemente rápida y simple de ejecutar, y no requiriendo un exótico y costoso equipo de laboratorio.*

*Es conveniente llamar la atención en que las pruebas se ejecutarán sobre un buen número de muestras en vez de unas cuantas, para evitar conclusiones erróneas.*

*Este método de medición directa ofrece los resultados más útiles para la ingeniería práctica.*

#### **4.2.- IDENTIFICACION MINERALOGICA**

*La composición mineralógica de los suelos expansivos tiene una importante relación con el potencial de expansión como se explicó anteriormente. Las cargas eléctricas negativas sobre la superficie de los minerales de arcilla, la resistencia de la liga intercapas y la capacidad de intercambio cationico, todo contribuye al potencial de expansión de la arcilla. De aquí que los mineralogistas sostengan que el potencial de expansión de cualquier arcilla puede evaluarse por identificación de los minerales constitutivos de la misma.*



*Las cinco técnicas que pueden usarse son las siguientes :*

- 1 .- Difracción de Rayos X*
- 2 .- Análisis Térmico Diferencial*
- 3 .- Adsorción de Colorantes*
- 4 .- Análisis Químico*
- 5 .- Análisis en el Microscopio Electrónico.*

*Los diversos métodos enlistados anteriormente generalmente se usan en combinación.*

*Usando combinaciones de los métodos, los diferentes tipos de minerales de arcilla presentes en suelos pueden ser evaluados cuantitativamente. Desafortunadamente, no obstante que se ha realizado muchas investigaciones en los diversos campos del estudio mineralógico, los resultados de las pruebas requieren la interpretación de expertos y los aparatos especializados requeridos son costosos y no son económicamente accesibles para la mayoría de los laboratorios de prueba de suelos, una breve descripción de las diversas técnicas es la siguiente :*

#### *Método de Difracción de Rayos X.*

*Este método, usado para determinar la proporción de los diversos minerales presentes en una arcilla coloidal, consiste esencialmente en*

*comparar las relaciones de las intensidades de las líneas de difracción de los diferentes minerales, con las intensidades de línea de la sustancia estándar. G. W. Brindley explicó que el uso de espectrómetros autorreguladores en lugar de técnicas fotográficas, incrementa considerablemente la precisión y la conveniencia del método de Rayos X. Brindley también cree que, el método de Rayos X para determinaciones cuantitativas, debería aplicarse con considerable reserva y que en los casos favorables la posibilidad de identificar especies con el análisis de Rayos X, debe tomarse con optimismo limitado.*

#### *Análisis Térmico Diferencial*

*El análisis térmico diferencial cuando se usa en conjunción con difracción de Rayos X y análisis químico permite la identificación de materiales difíciles de identificar de otra forma. Esta bien establecido como una técnica para el control de materiales que cambian sus características al ser sometidos al calor. El uso de la técnica de análisis térmico diferencial para identificar un suelo expansivo no siempre es preciso.*

#### *Adsorción de colorantes*

*Los colorantes y otros reactivos que exhiben colores característicos cuando son absorbidos por una arcilla se han utilizado para identificar a*

estas. Cuando una muestra de arcilla ha sido tratada previamente con ácido, 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 las cantidades son mayores de 5 ó 10 %.

El procedimiento de prueba relativamente simple y rápido de tomar la coloración, comparado con el de difracción de Rayos X y el análisis térmico diferencial justifica ampliamente la aplicación del método del color.

#### Análisis Químico

El análisis químico puede ser un valioso complemento de otros métodos tales como el análisis de Rayos X en la identificación de arcillas.

En el grupo de la montmorilonita de los minerales de arcilla, se puede utilizar el análisis químico para determinar la naturaleza del isomorfismo y mostrar el origen y la posición de la carga en la red.

De acuerdo con Kelley el carácter isomorfo del grupo de la montmorilonita no se puede demostrar por otro camino. El isomorfismo involucra tres variaciones básicas en la sustitución : La sustitución de Al por Si en posición tetraedral en la red, la sustitución de Fe por Al en la coordinación octaedral y la sustitución de Mg por Al en la posición octaedral.

### Análisis en el microscopio electrónico

*El examen microscópico de los minerales de arcilla ofrece una observación directa del material. Dos muestras de arcilla pueden dar el mismo patrón bajo el método de difracción de Rayos X y tener la misma curva en el análisis térmico diferencial, pero bajo el examen en el microscopio electrónico se descubrirán distintas características morfológicas.*

*El principal propósito del examen microscópico es determinar su composición mineralógica, textura y su estructura interna.*

*Ravina hizo estudios extensivos de la composición mineralógica de las arcillas expansivas con el uso del microscopio electrónico. Demostró que las arcillas no expansivas aparecen como placas planas relativamente gruesas mientras que la montmorilonita tiene una textura ondulada, acanalada, como si fuera un panal de abejas. Es posible evaluar algunas propiedades de los suelos expansivos observando el grado de ondulado y unión entre partículas mediante la exploración en un microscopio electrónico.*

### **4.3.- METODO DE LAS PROPIEDADES INDICES**

*Las pruebas de las propiedades índices de los suelos, se pueden usar para la evaluación del potencial de expansión de los suelos expansivos. Estas pruebas son de fácil ejecución y deberían incluirse como pruebas de rutina en*

*la investigación de aquellos sitios de construcción que se encuentran dentro de áreas de suelos expansivos.*

*Tales pruebas pueden incluir :*

*Límites de Atterberg*

*Contracción Lineal*

*Prueba de Expansión Libre*

*Prueba de contenido de coloides*

#### *Límites de Atterberg*

*Holtz y Gibbs demostraron en 1956 que el índice de plasticidad y el límite líquido son índices para determinar las características de expansión de la mayoría de las arcillas. Seed, Woodward, y Lundgren demostraron que el índice de plasticidad, sólo se puede usar como una indicación preliminar de las características de la expansión de la mayoría de las arcillas.*

#### *Potencial de Expansión*

*El potencial de expansión se define como el porcentaje de expansión de una muestra confinada lateralmente la cual se ha saturado bajo una sobrecarga de 0.0703 Kg. / cm<sup>2</sup>(1 lb/pulg<sup>2</sup>) después de haber sido compactada a su máxima densidad y contenido de humedad óptima de acuerdo a la prueba*

de compactación AASHO. De esto, Seed, Woodward y Lundgren establecieron las siguientes relaciones simplificadas :

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

En la cual :

$S$  = Potencial de expansión

$K = 3.6 * 10^{-5}$  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 % y el valor calculado es probablemente exacto para aproximadamente el 33 % del potencial de expansión determinado en el laboratorio.

Puesto 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 Expansión	Indices de Plasticidad
Bajo	0-15
Medio	10-35
Alto	20-55
Muy Alto	35 ó más

*Aunque puede ser cierto que suelos altamente expansivos manifestarán propiedades índices altas, lo inverso no es cierto.*

### Contracción Lineal

*El potencial de expansión se supone que esta relacionado con la propiedad contraria de la contracción lineal, medida con una prueba muy simple. En teoría resulta que las características de la contracción de la arcilla deberían de ser un índice confiable y consistente para el potencial de expansión.*

*En 1955 Altmeyer sugirió como una guía para la determinación del potencial de expansión para diversos valores de límites de contracción y contracción lineal lo siguiente :*

<b>Límite de contracción %</b>	<b>Contracción Lineal</b>	<b>Grado de Expansión</b>
<i>Menores de 10</i>	<i>Mayores de 8</i>	<i>Crítico</i>
<i>10 - 12</i>	<i>5 - 8</i>	<i>Marginal</i>
<i>Mayores de 12</i>	<i>0 - 5</i>	<i>No crítico</i>

*Sin embargo investigaciones recientes no lograron mostrar conclusiones evidentes de la correlación entre el potencial de expansión y el límite contracción.*

### Expansión Libre

*Las pruebas de expansión libre consisten en colocar un volumen conocido de suelo seco en el agua y observar el volumen expandido, 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 inicial, expresada como un porcentaje del volumen inicial es el valor de la expansión libre. La prueba de expansión libre es muy burda y fue utilizada cuando no se disponía de métodos de prueba más refinados.*

*Los experimentos dirigidos por Holtz, indicaron que una buena parte de la bentonita comercial de alta expansión, tendrá valores de expansión libre del orden de 1200 a 2000 %. Holtz sugirió que los suelos que tienen un valor de expansión libre tan bajo como el 100 % pueden causar considerables daños a estructuras ligeras, en tanto los suelos que tienen un valor de expansión libre menor de 50 % raramente exhibirán cambios de volumen apreciables aún bajo cargas muy ligeras.*

### Contenido de coloides

*Las características de las dimensiones de las partículas de una arcilla parecen tener influencia sobre su potencial de expansión, particularmente el contenido de coloides. Seed, Woodward y Lundgren, opinaron que no hay*



*correlación entre el potencial de expansión y el porcentaje del tamaño de las partículas. Sin embargo, para un tipo de arcilla dado, la cantidad de expansión se incrementará con la cantidad de partículas de arcilla presentes en el suelo como se muestra en la figura 12*

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

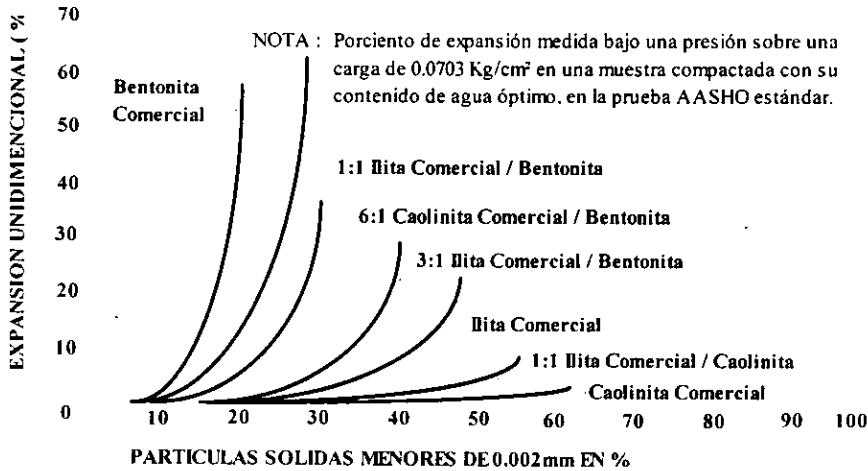
$$S = KC^X$$

*Donde : S = Potencial de Expansión, expresado como un porcentaje de la expansión bajo una sobrecarga de 0.0703 Kg. / cm<sup>2</sup> (1 lb/pulg<sup>2</sup>), de una muestra compactada con su contenido de humedad óptimo a la máxima densidad en la prueba de compactación AASHO estándar.*

*C = Porcentaje de partículas menores de 0.002 mm*

*X = Exponente que depende del tipo de arcilla.*

*K = Coeficiente que depende del tipo de arcilla.*



*Figura N° 12 Relación entre el porcentaje de expansión y el porcentaje de partículas sólidas menores de 0.002 mm según Seed, Wood Ward y Lundgren.*

*Donde la cantidad de partículas menores de 0.002 mm determinada por la prueba del hidrómetro, la cantidad o tipo de coloides, la cual esta reflejada por X y K en la anterior ecuación, controla la cantidad de expansión. El contenido de coloides así como los límites de Atterberg se deberían incluir en la rutina del laboratorio cuando se investiga sobre suelos expansivos.*

#### **4.4.- METODOS DE CLASIFICACION**

*Cuando se utilizan pruebas de laboratorio rutinarias tales como límites de Atterberg, contenido de coloides, límites de contracción, y otros, el*

*potencial de expansión se puede evaluar sin recurrir a las medidas directas.*

*Algunos de estos métodos son los siguientes :*

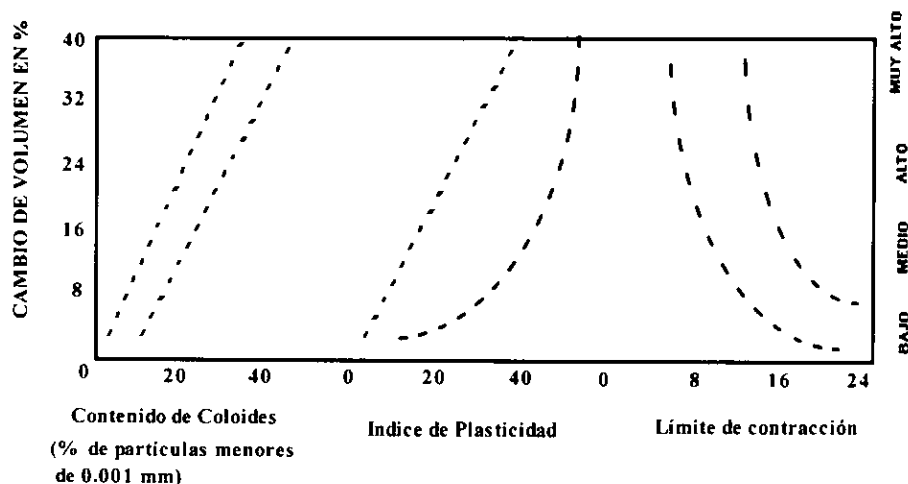
*Método USBR*

*Desarrollado por Holtz y Gibbs se basa en la consideración simultánea de varias propiedades de los suelos. Las Relaciones típicas de estas propiedades con el potencial de expansión se muestra en la figura N° 14.*

*Basados en las curvas presentadas en la figura N° 13 Holtz propuso la identificación de las arcillas expansivas bajo los siguientes criterios.*

<b>DATOS DE PRUEBAS FISICAS</b>				
<i>Contenido de coloides, porcentaje de partículas menores de 0.001 mm</i>	<i>Indice de Plasticidad</i>	<i>Límite de contracción</i>	<i>Expansión probable, cambio de volumen por ciento total</i>	<i>Grado de Expansión</i>
<i>&gt; 28</i>	<i>&gt; 35</i>	<i>&lt; 11</i>	<i>&gt; 30</i>	<i>Muy Alto</i>
<i>20-13</i>	<i>25-41</i>	<i>7-12</i>	<i>20-30</i>	<i>Alto</i>
<i>13-23</i>	<i>15-28</i>	<i>10-16</i>	<i>10-30</i>	<i>Medio</i>
<i>&gt;15</i>	<i>&lt;18</i>	<i>&gt;15</i>	<i>&lt;10</i>	<i>Bajo</i>

*Basado en la sobrecarga vertical de 0.0703 Kg. / cm<sup>2</sup> ( 1 lb / pulg<sup>2</sup> ). Según Holtz y Gibbs.*



**Fig. 13** Relación de cambio de volumen a contenido de coloides, índice de plasticidad, y límite de contracción (según Holtz y Gibbs)

Se debe señalar que la fig. 13, se basó en las pruebas de expansión realizadas a 45 muestras inalteradas y remoldeadas, y por lo tanto los datos acumulados no son suficientes para obtener relaciones empíricas precisas entre la expansión media y las tres pruebas índices. Especial consideración debería darse a la diferenciación del comportamiento del suelo entre muestras inalteradas y remoldeadas.

Chen realizó en los últimos 15 años varios miles de pruebas de potencial de expansión y propiedades índices. De los resultados de prueba de 321 muestras inalteradas se pudo adoptar una curva de regresión como se

muestra en la fig. 14. La relación entre el potencial de expansión y el índice de plasticidad se puede expresar como sigue :

En donde :  $S = Be^{A(IP)}$   $A = 0.0838$   $B = 0.2558$

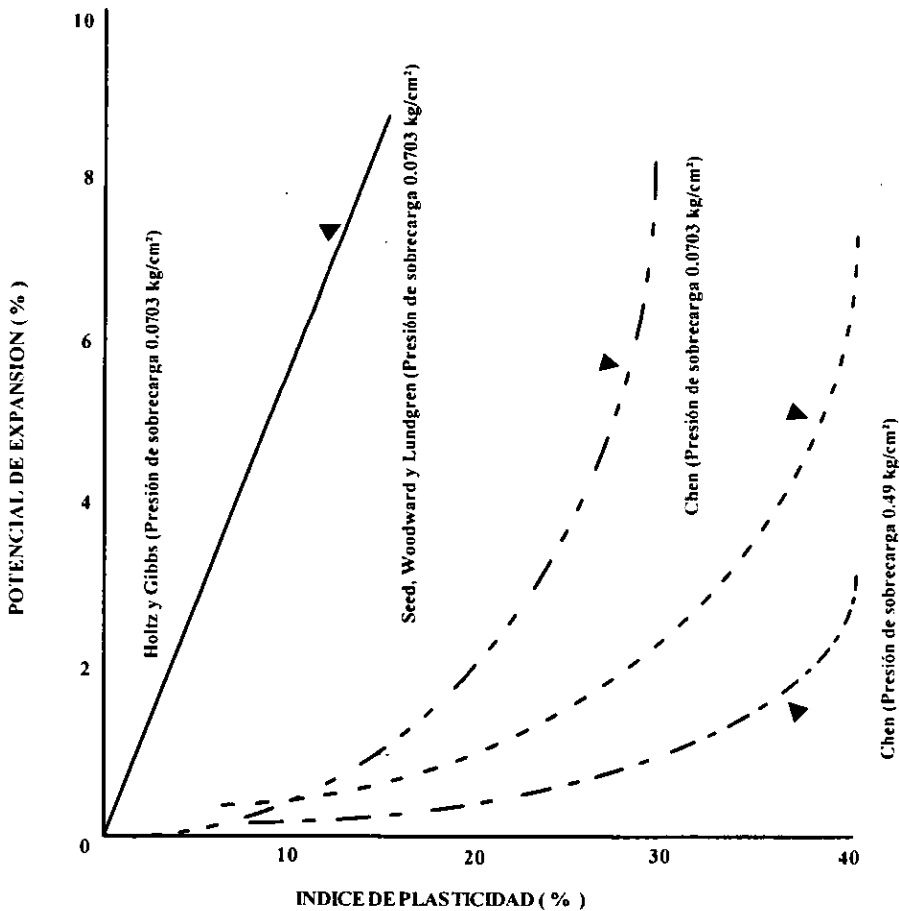


Fig. 14 Relación entre el cambio de volumen y el índice de plasticidad según Holtz, Seed y Chen.

*De la figura 14 se ve que cuando el índice de plasticidad se incrementa, el incremento del potencial de expansión es mucho menor que el predicho por Holtz y Gibbs o por Seed Woodward y Lundgren. Todas las pruebas están realizadas con una presión de sobrecarga de 0.0703 Kg./cm<sup>2</sup>, con contenido de humedad entre 15 y 20 % y densidad seca entre 1600 Kg/cm<sup>3</sup> y 1765 Kg/m<sup>3</sup>.*

### **Actividad de la arcilla**

*La actividad de la arcilla es un método propuesto por Seed, Woodward y Lundgren, este método se basó en muestras remoldeadas, para ello se prepararon suelos artificiales, compuestos de 23 muestras de bentonita, ilita, caolinita y arena fina. La expansión se determinó como un porcentaje de la expansión de una muestra saturada al 100 %, previamente compactada a su máxima densidad y contenido de humedad óptimo, con la prueba de compactación AASHO estándar bajo una sobrecarga de 0.0703 Kg./cm<sup>2</sup>. La actividad para las muestras preparadas artificialmente se definió como :*

$$\text{Actividad} = IP / C-10$$

*Donde : C es el porcentaje de partículas de arcilla menores de 0.002 mm.*

El método de la actividad de la arcilla parece ser un adelanto con respecto al método de USBR en el que el límite de contracción no intervino en la evaluación del potencial de expansión. También se hizo un intento para diferenciar entre muestras inalteradas y remoldeadas.

La carta de clasificación propuesta se muestra en la fig. 15.

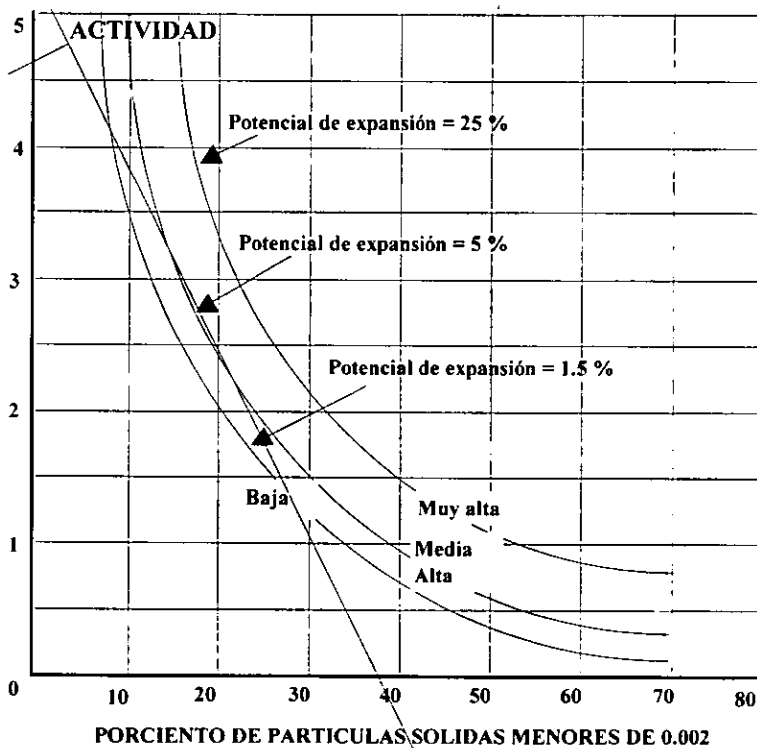


Fig. 15 Carta de clasificación para el potencial de expansión según Woodward, Lundgren y Seed y

#### **4.5.- MEDIDAS INDIRECTAS**

*Las medidas indirectas del potencial de expansión de suelos han tenido diversos enfoques . El método de Ladd y Lambe por una medición del PVC es probablemente el método más simple y rápido, en tanto que el método de succión del suelo se considera como una nueva propuesta para evaluar el potencial de expansión y la presión de expansión.*

##### **Método P V C.**

*La determinación del cambio potencial de volumen ( PVC ) de un suelo, fue desarrollado por T.W. Lambe bajo los auspicios de la Administración de la Vivienda Federal ( Federal Housing Administration ). Se especificaron muestras remoldeadas, primero se compactó la muestra en un anillo fijo del consolidómetro con una energía de compactación de  $268,775 \text{ Kg}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ . luego se aplicó una presión inicial de  $14.06 \text{ Kg}/\text{cm}^2$  y se agregó el agua a la muestra, la cual está parcialmente restringida de la expansión vertical por un anillo de prueba, la lectura del anillo de prueba se toma transcurridas dos horas, esta lectura se convierte a presión y se define como el índice de expansión.*



*Lambe estableció las siguientes categorías, de la clasificación P V C :*

<b>CLASIFICACION P V C</b>	<b>CATEGORIA</b>
<i>Menores de 2</i>	<i>No crítica</i>
<i>2-4</i>	<i>Marginal</i>
<i>4-6</i>	<i>Crítica</i>
<i>Mayores de 6</i>	<i>Muy crítica</i>

*El método de evaluación P V C ha sido muy utilizado por la Administración de la Vivienda Federal ( Federal Housing Administration ). Así como por el Departamento de Carreteras del Estado de Colorado ( Colorado State Higway Department ). Debe hacerse notar que la prueba de evaluación P V C en si misma no mide el potencial de expansión. El potencial de expansión real puede ser mucho mayor que el valor indicado por el P V C. La prueba de evaluación P V C deberá usarse sólo como una comparación entre diversos suelos expansivos.*

De la figura 16 el índice de expansión puede convertirse a cambio potencial de volumen

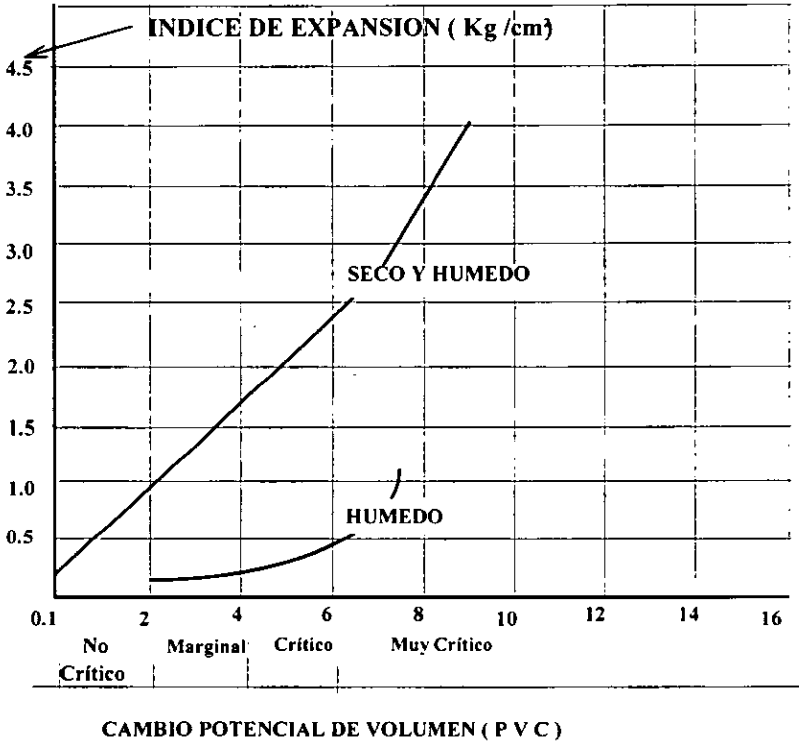


Fig. 16 Relación entre el índice de expansión y el cambio de potencial de volumen  
FHA Soil PVC Meter

Ladd y Lambe propusieron un sistema de clasificación en 1961 mediante el cual los suelos se clasifican con respecto al PVC debido tanto a la expansión como a la contracción. El método no ha recibido mucha atención.

### Succión de Suelos

*El análisis teórico, la succión total se puede considerar que consiste del potencial osmótico, del potencial gravitacional y del potencial capilar. Sin embargo en la ingeniería práctica se considera satisfactorio realizar el análisis de laboratorio simulando el potencial capilar en el suelo. El potencial capilar se puede considerar como el equivalente a la presión de poro negativa en el nivel inferior del molde de succión. El potencial capilar de un suelo sin saturar se identifica frecuentemente en términos de la succión del mismo.*

*La succión del suelo se expresa con un término designado como  $pF$ , que es el logaritmo del equivalente de la elevación capilar en centímetros de agua. De esta manera un  $pF$  de 2 representa 100 cm de presión hidrostática, 0.1025 Kg./cm<sup>2</sup>, un  $pF$  de 4 representa 10,000 cm de presión hidrostática 10.25 Kg./cm<sup>2</sup>, etc.*

*La cantidad de succión del suelo de una muestra en equilibrio con agua libre es cero. Cuando se va secando, la cantidad de succión del suelo aumenta rápidamente. Cuando se seca la muestra en el horno, el valor puede ser de varios miles de atmósferas.*

*Obermeier, enunció que en una masa de arcilla saturada, la descarga de esfuerzos durante la excavación puede dar como resultado un significativo*

*incremento en la presión de poro negativa en las capas subsiguientes. Por lo tanto, el agua puede fluir dentro del suelo que quedó bajo el área de excavación y causar expansión. Más tarde, Obermeier, opinó que los esfuerzos de tensión y cortante puede haber tenido una contribución importante en el levantamiento de suelos arcillosos. El potencial expansivo a largo plazo que resulta de quitar esfuerzos durante la excavación de suelos arcillosos, se podrá predecir algún día con el uso de una prueba de succión.*

*El objetivo de medir la succión del suelo es predecir el movimiento de la humedad de equilibrio más que medir directamente el potencial de expansión*

# *CAPÍTULO 5*

## *CRITERIOS PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN Y ALGUNAS RECOMENDACIONES*

## **CRITERIOS PARA EVALUAR LA EXPANSION DE SUELOS**

*Los métodos de Identificación Mineralógica e indirectos reseñados anteriormente, para identificar suelos expansivos, permiten determinar las características de la expansión de este tipo de suelos, midiendo su susceptibilidad a cambiar de volumen. Sin embargo, esta evaluación es de tipo cualitativo, lo cual no permite conocer la presión que podrá ejercer el suelo al expandirse sobre una estructura desplantada en el, y en consecuencia prevenir los posibles daños.*

*Para tener un valor numérico que cuantifique esta presión, se hace uso del método directo, el cual es el procedimiento más satisfactorio y conveniente para determinar el potencial de expansión y la presión de expansión de una arcilla expansiva. Haciendo uso de este método se puede obtener un parámetro cuantitativo que evalúa la tendencia de un suelo hacia la expansión; este parámetro es la presión de expansión.*

*La presión de expansión se define como la presión requerida para mantener el volumen de una muestra constante. La presión de expansión se considera como la propiedad física básica de un suelo y deberá usarse para*

reportar un parámetro cuantitativo de la tendencia de un suelo hacia la expansión.

### **5.1.-METODO DIRECTO**

*El método más satisfactorio y conveniente para determinar el potencial de expansión y la presión de expansión de una arcilla expansiva, es el método de las medidas directas. Las medidas directas en los suelos expansivos, se pueden realizar con el uso del consolidómetro unidimensional del tipo convencional. El consolidómetro puede ser tipo plataforma, tipo escala, o de otros tipos. La carga se puede aplicar con aire como en el caso del consolidómetro Conbel o por peso directo como en el caso del consolidómetro de 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 cm a 10.16 cm dependiendo del tipo de dispositivo que se utilice en el muestreo. Los espesores de la muestra varían de 1.27 cm a 2.54 cm. 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 lo que se conoce como 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 constante el volumen del suelo.*

*Ahora bien en la ejecución de una prueba de expansión las más importantes variables que se involucran son las siguientes :*

*1 .- El estado de la muestra.- para una muestra inalterada se incluye la condición de la 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.*

*2 .- Contenido de Humedad : A más bajo contenido inicial de humedad se tendrán mayores expansiones. El contenido inicial de humedad es afectado por :*

- a) El tiempo que se deja la muestra en el anillo antes de humedecerla.*
- b) El grado de evaporación que se permite mientras la muestra está en el anillo.*
- c) La temperatura y humedad del laboratorio.*



3 .- *Presión de sobrecarga .- Incrementando la carga aplicada se reducirá la magnitud de expansión. La presión de sobrecarga que la mayoría de los laboratorios utilizan, varía en el rango de 0.0703 Kg./cm<sup>2</sup> a 0.703 Kg./cm<sup>2</sup>.*

4 .- *Tiempo requerido .- El tiempo requerido para completar totalmente el proceso 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 completar la expansión total.*

## **5.2.- METODO DE PRUEBA SUGERIDO PARA LA EXPANSION UNIDIMENSIONAL Y LA PRESION DE EXPANSION DE SUELOS ARCILLOSOS**

### **1.- Alcance**

1.1 *Este método explica como realizar pruebas de expansión sobre muestras inalteradas o muestras de suelos arcillosos compactados que no tienen partículas de tamaños mayores a 0.48 cm , que pasa por la malla N° 4 estándar A.S.T.M. la prueba se realiza para determinar :*

1) *La magnitud del cambio de volumen bajo condiciones de carga o sin carga.*

2) *La proporción del cambio de volumen.*

3) *La permeabilidad axial de los suelos confinados lateralmente bajo carga axial o sin carga durante la expansión.*

*La saturación (sin drenaje) tiene lugar axialmente. La penetración del agua se efectúa axialmente para determinar el efecto de saturación y permeabilidad. Los especímenes preparados para esta prueba, pueden también usarse para la contracción vertical volumétrica en la medida en que el contenido de agua disminuye.*

*El cambio total de volumen para suelos expansivos, se determina a partir de la expansión más los valores de contracción para los diferentes rangos del contenido de agua.*

*1.2.- Los datos de las pruebas de expansión se pueden usar, para estimar el alcance y la proporción del levantamiento del terreno bajo estructuras o en estructuras de tierra, y las pruebas de contracción se pueden usar, para estimar los cambios de volumen que ocurrirán en los suelos sujetos a secado, siempre que, las condiciones naturales y condiciones de operación se dupliquen.*

## 2.- Significado

2.1.- *Las características de expansión de una masa de suelo están influenciadas por varios factores. Algunos de estos son el tamaño y la forma de las partículas del suelo, el contenido de humedad, la densidad, cargas aplicadas, historia de cargas, propiedades mineralógicas y químicas. Debido a la dificultad para evaluar estos factores individuales, las propiedades del cambio de volumen no se pueden predecir con ningún grado de confianza si no se realizan pruebas de laboratorio.*

2.2.- *Las pruebas de laboratorio que se describen aquí tienen por objeto el estudio de suelos que no tienen partículas mayores que el tamaño de la malla estándar N° 4 (3/16 pulg). Si la prueba se efectúa sobre la fracción que pasa por la malla N° 4 en suelos que contienen material granular (de tamaños mayores que la malla N° 4) algunos ajustes se requieren en cualquier análisis. las partículas granulares reducen el cambio de volumen porque reemplazan la fracción más activa del suelo.*

## 3.- Aparatos

3.1.- *Consolidómetro.- Los consolidómetros convencionales de laboratorio, se utilizan para la prueba de expansión. La mayoría de los consolidómetros usados son de los tipos de anillo fijo y anillo flotante,*

*cualquiera de los dos es adecuado. Ambos tipos están disponibles comercialmente. En el de anillo fijo, todos los movimientos del espécimen relativos al recipiente, son ascendentes durante la expansión. En el anillo flotante el movimiento de la muestra de suelo es hacia arriba y hacia abajo, alejándose del centro durante la expansión. El material del recipiente en el consolidómetro de anillo fijo y en el consolidómetro de anillo flotante, consiste de anillos de bronce o plástico y otras partes componentes.*

*Las dimensiones de los anillos más comúnmente usados varían entre 10.8 cm (4 ¼ pulg.) de diámetro por 3.18 cm (1 ¼ pulg.) de altura y 6.35 cm (2.5 pulg.) de diámetro por 1.91 cm (¾ pulg.) de altura, aunque también se usan otras dimensiones. Sin embargo, el diámetro no debería de ser mayor de 5.08 cm (2 pulg.) y el espesor no mayor de 3/10 del diámetro, excepto que el espesor no debe de ser menor de 1.91 cm (¾ pulg.) para especímenes de diámetro pequeño. Menores alturas, introduce errores causados por la magnitud de la superficie, en tanto que espesores grandes causan excesiva fricción lateral. Para pruebas de expansión se prefieren los anillos de consolidación de mayor diámetro, ya que ellos limitan la acción del suelo en menor grado. En una prueba en la que se utiliza un aparato de anillo flotante, la fricción entre el espécimen de suelo y el recipiente es más pequeña que en*

*el aparato de anillo fijo. Por otra parte, el aparato de anillo fijo es más adecuado para propósitos de saturación y cuando se requieren datos de permeabilidad, se requieren piedras porosas arriba y abajo del espécimen, que permitan la aplicación del agua. El aparato debe permitir movimientos verticales de la piedra porosa superior en el consolidómetro de anillo fijo, o movimientos verticales de las piedras porosas superior e inferior en consolidómetros de anillo flotante para que la expansión tenga lugar. Se requiere un micrómetro adaptado a la altura del recipiente con una exactitud de 0.0254 mm (0.001 pulg.); de esta manera el micrómetro para especímenes de 3.18 cm (1 ¼ pulg) estará a una altura de 3.18 cm (1 ¼ pulg). Graduar el diámetro del anillo a 0.0254 mm (0.001 pulg.).*

*3.2 Dispositivo de Carga .- Se requiere un dispositivo adecuado para la aplicación de las cargas verticales al espécimen. El dispositivo de carga puede ser una báscula de plataforma de 454 Kg. (1000 lb) a 1361 Kg. (3000 lb) de capacidad, montada sobre un pedestal y equipado con un gato, fijo bajo el marco. El gato opera un balancín el cual se proyecta a través de la báscula y sobre el recipiente apoyado en la plataforma. El balancín puede bajar o subir operando el gato y de esta forma se aplica o se retira la carga al espécimen del suelo. La presión que se desee aplicar, se señala en el brazo de*

la balanza, y el resultado que se obtiene es efectivo cuando esta última está equilibrada.

3.2.1.- Otro dispositivo adecuado de carga, utiliza pesos y un sistema de palancas para la manipulación de varias pruebas simultáneamente. Un pistón hidráulico o aparato de carga del tipo fuelle, son también muy satisfactorios si ellos tienen una capacidad adecuada, exactitud y sensibilidad para el trabajo que se esté ejecutando.

Aparatos tales como el que se describe en el método A.S.T.M. D 2435 Test For One-Dimensional Consolidation Properties of Soils, es útil y puede ser usado.

3.3.- Dispositivo para labrar especímenes inalterados.- Este aparato consiste de una hoja de corte del mismo diámetro que el del anillo del consolidómetro, una mesita de corte con barras guías y cuchillas para labrar la muestra. se puede usar un hilo metálico o un taladro si se requiere obtener un corte uniforme del espécimen en el recipiente.

3.4.- Dispositivos para la preparación de especímenes remoldeados.- Los especímenes de suelo compactado se prepararán en el anillo del consolidómetro. Además del anillo, el aparato consiste de un collar de aproximadamente 10.16 cm (4 pulg.) de altura y del

*mismo diámetro que el anillo. Un pistón de compactación de 2.5 Kg. (5.5 lb) y altura de celda de 30.5 cm (12 pulg.) del mismo tipo requerido en el método A de la A.S.T.M: Método D 698\*.*

#### 4.- Procedimiento de la prueba de expansión

*4.1.- Preparación de las muestras inalteradas.- las pruebas se ejecutan sobre muestras cúbicas labradas a mano o sobre muestras que permitan el corte de aproximadamente 1.27 cm (1/2 pulg.) de material de los lados de la misma. Alternativamente se obtiene una muestra cilíndrica que tenga un diámetro igual al diámetro del anillo del consolidómetro, y se coloca dentro del recipiente. Este proceso es satisfactorio, siempre que el muestreo haya sido hecho sin que ninguna de las paredes haya sido alterada y procurando que el espécimen ajuste exactamente en el recipiente. Coloque la muestra cúbica o cilíndrica de suelo inalterado sobre la plataforma de corte, fije la hoja de corte al anillo del consolidómetro y elimine el exceso de material con un cuchillo, dejando muy poco material para que la hoja devaste cuando se presione suavemente hacia abajo. Otros procedimientos adecuados para adaptar las muestras son : sierras de arco, tornos de labrado o dispositivos de extrusión que se pueden emplear de acuerdo con el uso de otros aparatos y muestras. En el labrado de las muestras se debe tener cuidado para minimizar*

*las alteraciones del espécimen de suelo y asegurar un ajuste exacto del mismo anillo del consolidómetro. Cuando se ha preparado suficiente espécimen, de tal manera que sobresalga a través del anillo del consolidómetro, se enrasa a nivel de la superficie del anillo con una regla cortante. Se coloca una placa de vidrio sobre la parte plana recortada del espécimen y se voltea el recipiente. Se retira la hoja cortante, se recorta el espécimen nivelándolo con la superficie del anillo del consolidómetro y se cubre con una segunda placa de vidrio para controlar la evaporación hasta colocarlo en el dispositivo de carga.*

*4.2.- Preparación de especímenes Alterados.- Se usa aproximadamente 908 gr. de suelo representativo (2 lb) que ha sido adecuadamente humedecido al grado deseado y libre de protuberancias y del cual se han eliminado aquellas partículas o agregados retenidos por la malla N° 4 (3/16 pulg.) se compacta el espécimen a la densidad volumétrica requerida, después de agregar la cantidad de agua necesaria como sigue : Se coloca la extensión (el collarín) sobre la superficie del anillo del consolidómetro y se asegura la parte de abajo del anillo del consolidómetro a una placa metálica. Se pesa la cantidad exacta de la muestra preparada hasta dar la densidad humedad deseada cuando se compacta hasta un espesor de 6.35 mm (1/4 pulg.) mayor*



que el espesor del anillo del consolidómetro. Se compacta el espécimen con el pisón de compactación hasta el espesor deseado. Se quita el collarín y se enrasa el exceso del material que sobresale con una regla cortante, se retira el espécimen y el anillo de la base metálica y se cubren las superficies con placas de vidrio hasta que el espécimen se coloque en el aparato de carga. Si después de pesado y medido el espécimen y calculada la densidad húmeda, como se describe más adelante, ésta, no está dentro de  $16.02 \text{ Kg/m}^3$  ( $1.0 \text{ lb/pie}^3$ ) que se necesita, repita la preparación de los especímenes remoldeados hasta obtener la aproximación requerida.

4.3.- Calibración del micrómetro para medir desplazamientos.- Antes de colocar el espécimen de suelo en el anillo del consolidómetro se coloca un anillo calibrador en el recipiente de la muestra, con la misma disposición de las piedras porosas y placas de carga, que se usarán cuando se pruebe el espécimen.

Coloque el conjunto de piezas en la máquina de carga en la posición que ocupará durante la prueba. Después de que estos dispositivos han sido ensamblados con el anillo calibrador en su lugar, se aplica una carga equivalente a una presión de  $0.025 \text{ Kg./cm}^2$  ( $.035 \text{ lb/pulg.}^2$ ) sobre el espécimen del suelo. La lectura del micrómetro en este momento será la

*altura exacta del anillo calibrador. Marque las partes del aparato para que se puedan hacer coincidir en la misma posición para la prueba.*

*4.4.- Altura inicial y peso del espécimen de suelo.- Antes de que el espécimen se inserte en el recipiente, se limpia y se pesan el anillo del consolidómetro y las placas de vidrio a  $\pm 0.01$  gr. Después de terminada la colocación y el labrado de la muestra, se pesan el espécimen de suelo, el anillo del consolidómetro y las placas de vidrio  $\pm 0.01$  gr. Se determina el peso del espécimen de suelo. Se acoplan las piezas al recipiente del espécimen y se coloca el conjunto en el dispositivo de carga. Si el espécimen no está saturado al inicio de la prueba, se coloca una cubierta de hule sobre las piedras porosas y las placas de carga para prevenir la evaporación. Se aplica una pequeña carga base de  $0.025 \text{ Kg./cm}^2$  ( $.035 \text{ lb/pulg}^2$ ) al espécimen. Comparando la lectura del micrómetro en este momento con la lectura obtenida con el anillo calibrador en su lugar, determine la altura exacta del espécimen. Esta información se usa para calcular el volumen inicial del espécimen, la densidad inicial, la relación de vacíos, contenido de humedad y grado de saturación. El verdadero contenido de agua del espécimen se determinará cuando se obtenga el peso seco total al final de la prueba.*

4.5.- *Datos de Saturación y Permeabilidad.*- Para saturar la muestra se fija el tubo de alimentación, se llena con agua y se humedece la muestra. Se tiene cuidado de remover cualquier burbuja de aire que pudiera estar atrapada en el sistema, humedeciendo lentamente la piedra porosa inferior y drenando la piedra a través de la llave de desagüe inferior. Después de que el espécimen se ha humedecido se llena la cazuela del consolidómetro con agua.

Luego de que la saturación ha sido completada se pueden tomar lecturas de la permeabilidad en cualquier momento durante la prueba. llenando el tubo de alimentación a una lectura inicial y permitiendo que el agua se filtre a través del espécimen. Se evalúa la cantidad de agua que fluye a través de la muestra en un tiempo dado mediante la caída de presión hidrostática (diferencia de niveles).

#### 4.6.- *Prueba de Expansión.*

4.6.1.- *Comentarios generales.*- Las características de expansión de un suelo de tipo expansivo varían con la historia de cargas, así que es necesario realizar una prueba por separado o varios especímenes para cada una de las condiciones de carga, para las cuales se requieran datos de expansión exactos. Sin embargo, un procedimiento es probar sólo dos especímenes: 1) Cargando y expandiendo y 2) Expandiendo y cargando. De estos datos, se

puede hacer una estimación de la expansión para cualquier condición de carga como se muestra en la curva C de la figura 17.

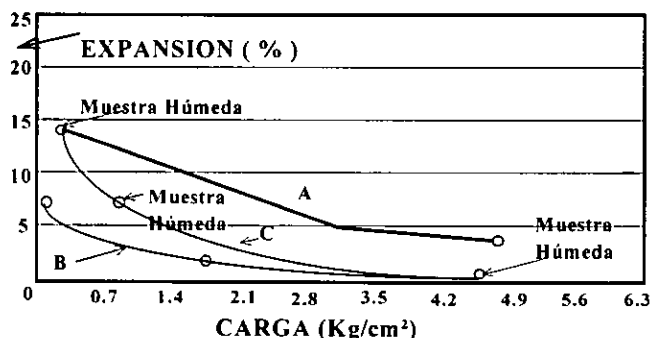


FIGURA 17 CURVAS DE CARGA - EXPANSION

En esta figura el espécimen N° 1 fue cargado y expandido por la saturación del agua, y el espécimen N° 2 (Curva B) fue expandido por saturación con agua y luego cargado (Curva A).

4.6.2.- Prueba de expansión, cargando el espécimen y luego dejándolo expandir.- Para medir la expansión característica cuando el espécimen de suelo está saturado bajo carga total y luego se permite la expansión, se aplica la carga base de 0.025 Kg./cm² (0.35 lb/pulg.) al espécimen N° 1, y se fijan lecturas iniciales en el micrómetro. Luego se satura el espécimen de suelo como se describe en el inciso 4.5 (la carga hidrostática del permeámetro debería ser lo suficientemente baja de tal manera que el espécimen no se

levante). Cuando el espécimen empieza a expandirse se incrementa la carga que se requiere para mantener el espécimen a su altura original. Luego se reduce la carga a  $1/2$ ,  $1/4$  y  $1/8$  de la máxima carga y finalmente a la carga base de  $0.025 \text{ Kg./cm}^2$  ( $0.35 \text{ lb/pulg.}$ ), y se miden las alturas para cada una de las cargas. Use un mayor número de cargas si se requieren más detalles en la curva de prueba. Mantenga todas las cargas durante 24 horas o más tiempo si es necesario hasta obtener valores constantes de altura. Remueva el espécimen del anillo del consolidómetro y péselo inmediatamente, vuélvase a pesar después de secarlo a  $105^\circ \text{ C}$ . A partir del contenido de agua, peso volumétrico seco y gravedad específica del espécimen, se calcula el volumen de aire y suponiendo que es el mismo que el volumen de aire que sigue a la determinación de la permeabilidad, calcule el contenido de agua y el grado de saturación.

4.6.3.-Prueba de Expansión, dejando expandir el espécimen y luego cargándolo.- Para medir las características de expansión cuando se permite que el suelo se expanda antes de cargarlo, se aplica la carga base  $0.025 \text{ Kg./cm}^2$  ( $0.35 \text{ lb/pulg.}$ ) al espécimen N° 2.

Se fija una lectura inicial en el micrómetro, después, se satura el espécimen como se describe en el punto 4.5. Se permite que el espécimen se

*expanda bajo la carga base por 48 horas o hasta que la expansión se complete. Se carga el espécimen sucesivamente a 1/8, 1/4, 1/2 y 1 vez la máxima carga encontrada en 4.6.2 hasta determinar las características de reconsolidación del suelo. Úsese un mayor número de cargas si se requiere una curva más detallada de la prueba. Se sigue el procedimiento especificado en 4.5.2 para aplicar las cargas y efectuar las demás mediciones y determinaciones.*

*4.6.4.- Prueba de expansión para condiciones especiales de carga.- Cuando se requieren realizar pruebas de expansión por separado para otras condiciones de carga se aplica la carga base de 0.025 Kg./cm<sup>2</sup> (0.35 lb/pulg<sup>2</sup>) al espécimen y se mide la altura inicial. Entonces se carga al espécimen a la carga deseada, se satura el espécimen como se describe en 4.5 y se permite que el espécimen se expanda bajo la carga aplicada por 48 horas o hasta que se complete la expansión. Se mide la altura del espécimen expandido, se reduce la carga hasta la carga base. Se permite que la altura llegue a ser constante y se mide; luego se remueve el espécimen del anillo del consolidómetro y se efectúan las determinaciones especificadas en 4.6.2*

## *5.- Prueba de contracción .- Procedimiento*

### *5.1.-Preparación del espécimen.*

*Cuando se necesita evaluar la contracción por secado se prepara un espécimen adicional. Este espécimen se extrae de la misma muestra de suelo inalterado de la que se extrajo el espécimen para la prueba de expansión, o del material remoldeado con las mismas condiciones de densidad volumétrica y contenido de agua que el espécimen usado para la prueba de expansión. Coloque el espécimen en el anillo del consolidómetro y mida el volumen inicial y altura como se describe en 4.4. Determine el contenido de agua del espécimen del suelo pesando porciones no usadas de la muestra original de la cual el espécimen es una parte, secando el material en un horno a 105° C y volviéndole a pesar.*

### *5.2.- Determinación de la contracción volumétrica y lineal.-*

*Para medir la contracción volumétrica, se deja que el espécimen en el anillo se seque al aire completamente o cuando menos al contenido de agua correspondiente al límite de contracción (Método A.S.T.M. D 427 Test for Shrinkage Factors of Soils). Después de que el espécimen ha sido secado al aire, se saca del anillo del consolidómetro, y se obtiene su volumen por el método del desplazamiento del mercurio.*

5.2.1.- *Para evaluar el desplazamiento de mercurio, se coloca una copa de vidrio con la superficie del fondo liso en una cápsula de evaporación. Se llena la copa con mercurio hasta el derrame y luego se quita el exceso de mercurio enrasándolo con una placa especial de vidrio, con tres puntas para sujetar por el borde al espécimen dentro del mercurio. Se vierte el exceso de mercurio dentro del recipiente original y se vuelve a colocar la copa de vidrio en la cápsula de evaporación. Luego se sumerge el espécimen de suelo secado al aire en la copa de vidrio llena con mercurio, utilizando la placa especial de vidrio sobre la copa de vidrio hasta duplicar la condición inicial. Se transfiere el mercurio desplazado a una probeta graduada y se mide el volumen. Si el espécimen contraído se rompe en partes separadas, se mide el volumen de cada una de las partes, y se suman los volúmenes individuales para obtener el total. (El envolver el espécimen con papel y sujetarlo con ligas resulta efectivo para mantener intacto al mismo durante su manejo)*

5.2.2.- *Si se desea conocer la altura del espécimen secado al aire, coloque el espécimen y el anillo del consolidómetro en la máquina de carga.*

*Aplique la carga base de 0.025 Kg./cm<sup>2</sup> (.035 lb/pulg<sup>2</sup>), y luego lea el micrómetro.*



## 6.- Cálculos

### 6.1 Datos de la Prueba de Expansión.

La relación de vacíos se calcula como sigue :

$$e = \text{Volumen de vacíos} / \text{Volumen de sólidos} = h-h_0 / h_0 = (h / h_0) - 1$$

Donde :

$e$  = Relación de vacíos

$h$  = Altura del espécimen

$h_0$  = Altura del material sólido para un volumen de vacíos cero

Se calcula la expansión como un porcentaje de la altura original, como sigue :

$$\Delta (\%) = (h_2 - h_1 / h_1) \times 100$$

Donde :

$\Delta$  = Expansión como un porcentaje del volumen inicial

$h_1$  = Altura inicial del espécimen

$h_2$  = Altura del espécimen bajo una condición específica de carga.

6.2.- Datos de la prueba de permeabilidad.- El valor de la permeabilidad se calcula por medio de la siguiente fórmula básica para el permeámetro de carga variable.

$$K = (A_p \times L_s / A_s \times 12) \times (1 / t) \times \ln H_i / H_f$$

Donde :

$K$  = Valor de permeabilidad, m / año

$A_p$  = Area del tubo de alimentación que suministra la carga hidrostática en  $cm^2$

$A_s$  = Area del espécimen en  $cm^2$

$L_s$  = Longitud del espécimen en  $cm^2$

$H_i$  = Carga hidrostática inicial corregida por capilaridad

$H_f$  = Carga final corregida por capilaridad

$t$  = Tiempo transcurrido en años

6.3.- Datos de la prueba de contracción.- Se calcula el volumen de la contracción como un porcentaje del volumen inicial como sigue :

$$\Delta_s = (V_i - V_d / V_i) \times 100$$

Donde :

$\Delta_s$  = Volumen de contracción como un porcentaje del volumen inicial

$V_i$  = Volumen inicial del espécimen (altura del espécimen por área del anillo del consolidómetro)

$V_d$  = Volumen del espécimen secado al aire obtenido con el método del desplazamiento del mercurio.

La contracción en altura se calcula como sigue :

$$\Delta_{hs} = (h_i - h_d / h_i) \times 100$$

Donde :

$\Delta_{hs}$  = Altura de contracción como un porcentaje de la altura inicial.

$h_i$  = Altura inicial del espécimen

$h_d$  = Altura del espécimen secado al aire

6.3.1.- Para calcular el porcentaje total del cambio de volumen, de la condición de secado al aire a la saturación, se suma el porcentaje de contracción en volumen en la condición de secado al aire  $\Delta_s$  al porcentaje de expansión en volumen en la condición de saturación  $\Delta_e$ , como se describe en 6.1. Este valor se utiliza como un indicador de expansión total, pero está basado en las condiciones iniciales de densidad y contenido de agua. Como los datos del volumen de expansión se determinan para diversas condiciones de carga, el cambio de volumen total puede también determinarse para diversas condiciones de carga.

6.3.2.- Para calcular el porcentaje total de cambio en altura, de las condiciones de saturado a secado al aire, sume el porcentaje de contracción

en altura  $\Delta h_s$  al porcentaje de expansión  $\Delta$  cuando el espécimen está saturado bajo condiciones específicas de carga.

### 7.- Representación gráfica de los datos de prueba.

#### 7.1.- Prueba de Expansión.

Los datos de prueba se pueden representar gráficamente como se muestra en la figura N° 17

### 8.- Informes

#### 8.1.- Pruebas de Expansión.

En el informe se concluye la información siguiente sobre los especímenes de suelos ensayados.

8.1.1.- Identificación de la muestra (número de sondeo, profundidad y localización).

8.1.2.- Descripción del suelo ensayado y granulometría del total de muestra ensayada

8.1.3.- Tipo de la muestra ensayada (remoldeada o inalterada: si es inalterada describa el tamaño y la forma, así como si es una muestra extraída con perforadora, labrada a mano u otro).

8.1.4.- *Condiciones de humedad inicial y densidad, así como grado de saturación (si la muestra es alterada, establecer la comparación con la densidad máxima y el contenido de agua óptimo).*

8.1.5.- *Tipo de consolidómetro (anillo fijo o flotante, tamaño del espécimen) y tipo del equipo de carga.*

8.1.6.- *Una gráfica de carga contra cambio de volumen como la de la figura N° 17. Si se desea, se puede graficar la relación de vacíos contra logaritmo de presiones.*

8.1.7.- *Si se desea, una gráfica de logaritmo del tiempo contra deformación.*

8.1.8.- *Datos de carga y tiempo contra cambio de volumen en otras formas si se solicita específicamente.*

8.1.9.- *Datos del contenido de agua final, densidad volumétrica seca y grado de saturación.*

8.1.10.- *Datos de permeabilidad y algunos otros datos solicitados específicamente.*

## 8.2.- *Prueba de contracción*

*Para el informe sobre contracción, se incluyen datos sobre el decremento en volumen de la condición inicial a la de secado al aire y, si se*

desea, otras informaciones tales como el cambio total en volumen y el cambio total en altura. Reporte las condiciones de carga bajo las cuales se midió el cambio de volumen. Se incluye también 8.1.1 así como 8.1.5 y 8.1.9.

### **5.3.-EFECTO DE LA EXPANSION EN LAS ESTRUCTURAS.**

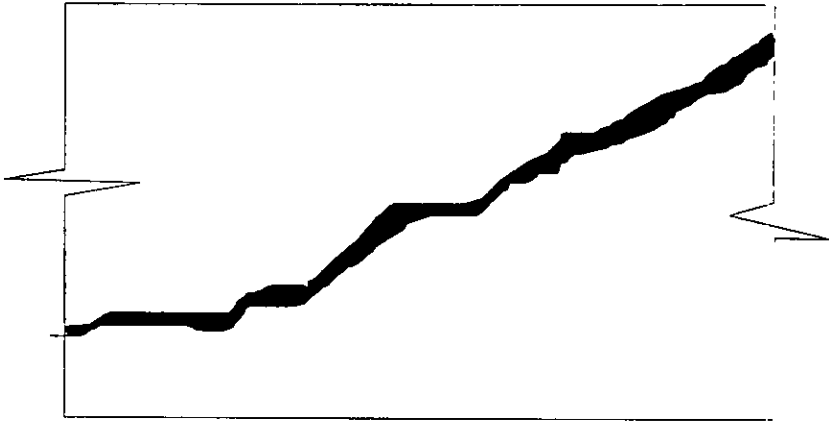
*Investigar la causa del movimiento de la cimentación de una estructura y prescribir remedios adecuados, requiere una cuidadosa investigación de campo, pruebas de laboratorio y muchos años de experiencia. En algunos aspectos, esto es similar al tratamiento de un paciente. Un examen físico, la historia clínica del paciente y análisis de laboratorio serán necesarios para diagnosticar la causa de la enfermedad. La prescripción y el tratamiento serán relativamente simples una vez que la causa de la enfermedad ha sido determinada. Como en el caso de un doctor, el no examinar y no efectuar pruebas, pueden reemplazarse por la experiencia y esta sólo puede obtenerse por ensayo y error.*

*El primer paso en la investigación de una construcción es obtener una información completa en lo que respecta a la misma. Desafortunadamente, con frecuencia tal información no se tiene, por lo que es necesario descubrir mucho de ella explorando el suelo.*

*El primer signo del movimiento de una estructura cimentada sobre suelos expansivos, es el agrietamiento de las losas del piso. Esto generalmente es seguido por un mal funcionamiento de puertas y ventanas que no se pueden abrir o cerrar y los agrietamientos en las paredes en el exterior y en el interior de las mismas y aún en el techo.*

*Los movimientos de las cimentaciones se manifiestan como grietas. Las grietas causadas por suelos expansivos tienen el mismo patrón que el de las grietas por asentamientos, aún cuando las grietas por expansión son generalmente abiertas en la parte inferior y angostas en la parte superior (ver figura 18).*

*Los mismos tipos de grietas se pueden desarrollar cuando ocurren asentamientos en las estructuras.*



**Fig. N° 18** Grietas típicas que se desarrollan en muros de sótano inmediatamente bajo los huecos de las ventanas, Notese que la grieta es ancha en la parte superior y estrecha en la parte inferior. (Según Chen-1975)

*Sin embargo, en la mayoría de los casos en que se tienen severos asentamientos, las grietas diagonales se asocian generalmente con una serie de grietas horizontales.*

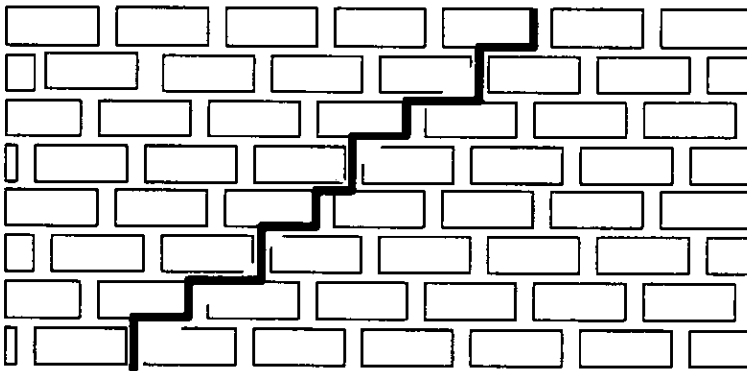
*Ahora bien, no siempre resulta cierto que el movimiento de la cimentación de una parte específica de una estructura, sea la causa de que aparezcan algunas grietas en la vecindad inmediata a ese movimiento. La distribución estructural de una construcción, especialmente la de una casa, es compleja. El movimiento de una porción de la construcción, puede ocasionar que aparezcan grietas en el extremo opuesto de la misma. Siempre es prudente explicar la causa del movimiento en un sentido en general y tratar*



*de estudiar el movimiento como una unidad. El siguiente análisis de las grietas puede servir como una guía :*

*1.- Las grietas diagonales bajo las ventanas exteriores o sobre las puertas exteriores generalmente indican movimientos en las zapatas o pilas.*

*2.- Si tales grietas aparecen sólo en las hiladas de tabiques exteriores (ver fig. 19) pero no en los muros interiores que se encuentren secos, estas pueden ser causadas por el levantamiento de las losas del patio exterior.*



**FIG. 19 GRIETAS TÍPICAS QUE SE DESARROLLAN EN MUROS DE TABIQUE**

*3.- Las grietas que aparecen sobre el contorno de las puertas interiores y de los closets podrían ser causadas por la contracción de la madera y no necesariamente por el movimiento de la cimentación.*

4.- *La separación de los marcos de las ventanas, de las paredes de tabique, indican generalmente movimientos diferenciales. Tales movimientos se asemejan a los movimientos laterales. En realidad casi todo este tipo de separaciones son producidas por movimientos diferenciales*

*Los propietarios algunas veces reportan que las grietas en sus construcciones están sujetas a cambios, ya que a veces se cierran y luego se vuelven a abrir, e intentan correlacionar los movimientos a los cambios climatológicos de las estaciones.*

*Esto da lugar a la teoría de que el subsuelo ha sufrido ciclos de secado y humedecimiento. En la mayoría de los casos, la apertura y cerrado de las grietas son causadas por el cambio de ubicación de la concentración de esfuerzos. Cuando aparece una nueva grieta, la distribución de esfuerzos se altera y esto hace que provisionalmente se cierre una grieta antigua. Observaciones cuidadosas indicarán que, el número total de grietas que aparecen en una construcción, se incrementa constantemente y pocas veces decrece.*

*En la construcción de vías terrestres en muchos sitios es preciso utilizar suelos arcillosos o con muy importante contenido de arcilla. Muy frecuentemente estos suelos exhiben marcadas características de*

*expansividad y es común que se presenten en el cuerpo de las terracerías y en la capa subrasante. En regiones áridas este tipo de suelos se encuentran con contenidos de agua muy bajos y es típico que pierdan por acción solar, parte del agua que se le incorpora durante el proceso de compactación, con la consecuencia de que al pasar más tiempo puedan volver a aumentar su contenido de agua, por la natural tendencia a acumularse esta bajo las superficies cubiertas por los pavimentos o por efecto natural humedecimiento que acompaña a las estaciones lluviosas; en tales zonas áridas existirá siempre una mayor tendencia a los cambios en el contenido de agua por efecto climático. Estos cambios producen en los suelos expansivos efectos nocivos, sobre todo en lo referente a la estabilidad volumétrica y a las características de resistencia al esfuerzo cortante.*

*Los siguientes son los efectos principales que un suelo expansivo puede sufrir en un pavimento flexible :*

- a) Contracción por secado*
- b) Expansión por humedecimiento*
- c) Desarrollo de presiones de expansión en los suelos confinados en que se restringe la expansión*

*d) Disminución de la resistencia al esfuerzo cortante y de la capacidad de carga como consecuencia de la expansión*

*Es común que varios de estos efectos se presenten simultáneamente. Los daños típicos de los hechos anteriores en un pavimento flexible, son generalmente de uno o más de los siguientes cuatro tipos :*

*a) Elevaciones o descensos de la superficie de rodamiento en una longitud importante, que se traducen en desigualdades e irregularidades, aunque no produzcan agrietamientos u otros daños visibles.*

*b) Deformaciones significativas localizadas, por ejemplo en torno a alcantarillas, generalmente acompañadas de agrietamientos.*

*c) Agrietamiento generalizado (piel de cocodrilo) en la carpeta, con tendencia a la desintegración.*

*De los daños anteriores, seguramente el primero es el más frecuente; puede ser medido con rugosímetros y en algunos países empieza a haber especificaciones en cuanto a valores máximos tolerables. El agrietamiento longitudinal acompaña usualmente al ascenso o descenso de la carpeta.*

*Otro aspecto de importancia que es tema de este estudio, son las losas construidas sobre suelos expansivos, ya que la construcción de las mismas es un aspecto muy difícil de controlar. Este problema abarca losas de pisos,*

*banquetas, rampas y losas que cubren áreas exteriores como pueden ser estacionamientos, patios, canchas deportivas etc.*

*Generalmente las losas de piso no soportan cualquier carga viva apreciable, y la carga muerta que generalmente se ejerce sobre ellas es pequeña. Consecuentemente, el movimiento de la losa es de esperarse cuando el contenido de agua bajo la misma se incrementa.*

*El movimiento de las losas no solo representa serios agrietamientos, sino que en la mayoría de los casos, también afecta directamente la estabilidad de la estructura.*

*Las losas construidas sobre suelos expansivos, son losas de concreto colocadas directamente sobre el terreno, con pequeñas consideraciones dadas a sus requerimientos estructurales. Estas losas pueden ser construidas con refuerzo o sin refuerzo.*

*Las losas sin refuerzo se construyen generalmente en casas habitación o donde se esperen cargas ligeras sobre las mismas. Los límites de la longitud de una losa sin refuerzo están basados en el control de las grietas de contracción. Normalmente, las grietas de contracción son controladas diseñando juntas de construcción.*

*Cuando se diseña una losa y se tiene como primer factor de diseño el control por temperatura, se dice que la losa está normalmente reforzada. La Portland Cement Association recomienda el uso de una losa de aproximadamente 10.5 cm de espesor reforzada con una malla 6 x 6 - 10/10 o varillas del N° 3, espaciadas cada 61 cm centro a centro, para losas sobre áreas consuelos expansivos moderados.*

*Para áreas con suelos altamente expansivos, la misma Asociación recomienda el uso de una malla 6x6 - 6/6 o varillas del N° 3, espaciadas cada 46 cm. centro a centro.*

*Escoger entre una losa sin refuerzo y una normalmente reforzada depende de las condiciones del subsuelo, así como las condiciones de carga. El refuerzo en una losa reducirá la apertura de grietas por temperatura pero no las causadas por el hinchamiento de los suelos bajo la losa.*

*La construcción de losas que se colocan sobre áreas con suelos expansivos siempre dará lugar a agrietamientos y problemas de levantamientos, a menos que la plantilla del suelo se trate o se reemplace. En edificaciones comerciales tales como almacenes o cualquier área de depósito, donde la carga de las losas de piso puede alcanzar los 1.5 Kg. / cm<sup>2</sup> o más, se requerirá un diseño especial no sólo desde el punto de vista de los suelos*

*expansivos, sino también, para mantener la integridad estructural de la construcción. Agrietamientos menores en este tipo de losas son difíciles si no imposible de prevenir.*

### **MOVIMIENTO DE LOSAS**

*En áreas con suelos expansivos, el movimiento de las losas desplantadas sobre el terreno, está invariablemente asociado con el incremento del contenido de agua del suelo. La procedencia del agua puede asociarse con las siguientes causas :*

*1.- Elevación del nivel de aguas freáticas.*

*2.- Roturas de las líneas de servicio, las tuberías de agua y los conductos de desagüe*

*que pasen a través de suelos expansivos, están sujetos a esfuerzos. Los movimientos diferenciales pueden romperlos y causar filtraciones. Tales filtraciones pueden continuar por un largo periodo de tiempo sin que sean detectadas.*

*3.- Una fuente de humedad más común se deriva de la irrigación, el riego de los jardines, el agua de lluvia que escurre por la azotea y baja por los tubos de desagüe, etc., son consecuencia del humedecimiento del suelo.*

*El efecto que ocasiona el incremento del contenido de agua de los suelos bajo las losas se manifiesta también por agrietamientos o levantamientos de las losas. Ahora bien, los agrietamientos de las losas de piso causados por la expansión de los suelos tiene lugar generalmente a lo largo de los apoyos de las paredes; en cambio los agrietamientos por contracción cuando no existen las juntas que se recomiendan para estos casos, aparecen espaciados a intervalos aproximadamente iguales.*

#### **5.4.-ESTABILIZACION DEL SUELO**

*a) Remoción del suelo expansivo : Cuando el estrato del suelo expansivo es superficial y su espesor es reducido hasta 1.2 m. conviene generalmente remover el suelo bajo el área por construir, el espacio así creado puede dejarse vacío o rellenarse con un material inerte compactado, las conexiones de drenaje y abastecimiento de agua, deben contar con tramos flexibles para soportar los movimientos diferenciales del área circundante respecto del área estabilizada.*

*b) Inundación previa de la zona de construcción : La inundación previa de la zona ha sido preferida en ocasiones para reducir la magnitud de los movimientos diferenciales por deformación volumétrica del subsuelo, se acelera de esta forma la evolución de la zona central de la cimentación hacia*



*el estado de máximo humedecimiento. Lo anterior no es suficiente para evitar movimientos diferenciales a menos que la periferia de la cimentación quede protegida contra cambios de contenido de agua. En la práctica este método resulta problemático debido a que el periodo de inundación tarda más de un mes, provocando además un reblandecimiento del suelo que dificulta las operaciones de construcción. Un procedimiento alternativo que puede tener beneficios intermedios es excavar a una profundidad de 10 cm. mayor a la del desplante elegido, colocando de inmediato una capa de gravilla arcillosa al 90 % de un P.V.S.M. y saturarla manteniéndola en esas condiciones de una a dos semanas y posteriormente colocar una capa de tepetate de apoyo de la losa de cimentación.*

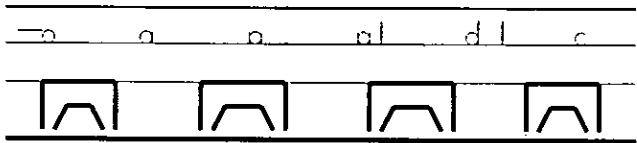
*c) Tratamiento químico del suelo : La cal reduce generalmente el índice de plasticidad de los suelos altamente plásticos y en consecuencia su expansividad. Esta se emplea generalmente en su forma hidratada y se mezcla con el suelo en una proporción de 4 a 8% del peso del suelo tratado. esta solución resulta poco económica para tratamiento de materiales insitu, pero es atractiva para la estabilización del rellenos compactados. La adición de la cal y la compactación deberá ser lo más corto posible, la compactación debe hacerse con un contenido de agua*

mayor al óptimo y con un peso volumétrico moderado del orden del 90 % del P.V.S.M.

D) Mezcla de materiales granulares : Para lograr una mezcla estable la porción de material granular deberá ser mayor del 60 %.

### 5.5.- PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS ESPECIALES

a) Concentración de cargas : Al aplicar cargas altas al subsuelo de cimentación se reducen las variaciones volumétricas del mismo. Diferentes diseños tratan de aprovechar este hecho reduciendo el área de contacto suelo-cimentación.



El espacio dejado entre la losa del piso y el suelo permite la libre expansión del mismo.

b) Desplante profundo: Los suelos que se encuentran a una cierta profundidad bajo la superficie presentan generalmente cambios volumétricos, menores que el material superficial, puesto que se encuentran sujetos a las cargas verticales debidos a los estratos superiores y están parcialmente

*protegidos contra los cambios climáticos. Al cimentar la estructura mediante zapatas desplantadas a profundidades donde la expansividad resulta moderada con una porción de contacto que la minimiza, o con pilotes a profundidades mayores cuando el espesor de los materiales de alta expansividad es importante.*

*c) Estructura rígida: Dando una rigidez suficiente a la estructura, es posible lograr que la construcción en su conjunto se mueva sin sufrir daños apreciables al presentarse los cambios volumétricos del subsuelo. Muros y losas reforzadas han sido empleados con gran éxito para este fin.*

*d) Estructura flexible: Una estructura muy flexible puede soportar movimientos diferenciales importantes (1 a 5 cm.) sin daños apreciables. Para lograr la flexibilidad requerida es posible recurrir a construcciones articuladas, con juntas constructivas dispuestas de tal forma que los movimientos de cierre y abertura no rebase 1.5 cm. Los elementos constitutivos de la subestructura de cimentación deben diseñarse para soportar redistribuciones considerables de la presión de contacto estructura-suelo, por lo tanto deben ser relativamente rígidos.*

*e) Sustitución de la capa de suelo de mayor expansividad por un terraplén construido con un material inerte.*

# *CAPÍTULO 6*

## *CONCLUSIONES*

## CONCLUSIONES

*En este trabajo se han expuesto algunos de los recientes avances en el conocimiento de los mecanismos asociados con la expansión y la estabilidad de los suelos expansivos. Algunas conclusiones que surgen al respecto son las siguientes :*

*1.- El tipo y la cantidad de minerales arcillosos son los factores más importantes que influyen en la expansión y la presión de expansión, ya que ellos determinan el tamaño de las partículas, la forma de las partículas, las cargas de la superficie y las ligas intercapas.*

*2.- La expansión de la montmorilonita sódica parece estar relacionada directamente con la dimensión  $b$  de la red cristalina mineral. A mayor diferencia entre  $9.0^\circ$  y la dimensión  $b$ , mayor es el potencial de expansión. Existen evidencias de que la expansión continúa hasta que la interacción superficie-agua ha ocasionado que la dimensión  $b$  se incremente hasta  $9.0A^\circ$ .*

*3.- Aún cantidades muy pequeñas de hidróxidos intercapas pueden restringir grandemente la expansión de minerales arcillosos expansivos, no obstante que estos hidróxidos intercapas puedan tener una influencia insignificante sobre el área superficial y la cantidad de intercambio.*

*La presencia de los hidróxidos intercapas es común en suelos arcillosos que ocurren naturalmente.*

*4.- Los hidróxidos de fierro, aluminio y capas de silicio pueden restringir las expansiones del conjunto de capas minerales arcillosas. Bajo condiciones de altas presiones de expansión, estas capas pueden romperse permitiendo que los agregados se separen.*

*5.- Las repulsiones de la doble capa pueden explicar razonablemente el comportamiento de la expansión de la montmorilonita sódica y posiblemente también de la montmorilonita cálcica.*

*6.- La expansión osmótica es importante para las ilitas y caolinitas sólo en el caso de las partículas muy finas; por ejemplo, menores que varias décimas de una esfera equivalente de diámetro de un micrón.*

*7.- Los factores mecánicos no pueden ser pasados por alto como causa de la expansión. La expansión y presión de expansión son generados por tensión en la fase líquida en la cual puede tener sus orígenes en los efectos físico-químicos y mecánicos.*

*8.- Las contribuciones mecánicas a la expansión surgen principalmente en respuesta a la energía almacenada en la forma de partículas distorsionadas.*

*Estas contribuciones pueden igualar o exceder aquellas debidas a los efectos físico químicos en sistemas compuestos predominantemente de partículas laminares.*

*Finalmente, es de esperarse que un conocimiento profundo de consideraciones del tipo aquí expuestas pueda permitir a largo plazo una mejor identificación de los suelos expansivos, mejores métodos para predecir la cantidad de expansión y presión de expansión y métodos adecuados para minimizar los efectos perjudiciales de los suelos expansivos en el campo.*

*\*En suelos expansivos se tendrán fundamentalmente dos aspectos, determinar la potencialidad expansiva mediante la identificación y ensaye de los suelos y definir la alternativa de cimentación que evite o minimice los movimientos diferenciales factibles.*

*La expansividad de un suelo dependerá de sus propiedades, de las condiciones ambientales del lugar y de las condiciones de carga a que se verá sujeto y de la variación y profundidad del NAF.*

*Las condiciones climáticas de la zona donde se tienen suelos susceptibles de ser expansivos se tornarán críticas en un periodo de sequía prolongado en el que el suelo pierde gran cantidad de agua.*

*La cantidad y tipo de un suelo arcilloso determinaran el potencial expansivo de un suelo. Las arcillas montmoriloníticas son las más susceptibles a la expansión con un límite líquido mayor del 100%.*

*\*El límite líquido y el índice de plasticidad dan una estimación satisfactoria del tipo del mineral y de los materiales, los montmoriloníticos  $IP = 50$  a  $100\%$  y  $LL = 100$  a  $700\%$ , los caoliniticos  $IP = 26$  a  $38\%$  y  $LL = 30$  a  $75\%$  (caolinitas, expansividad moderada).*

*\*Los suelos montmoriloníticos con un contenido natural de agua cercano al límite plástico, son susceptibles de ser expansivos al saturarse o incrementar su contenido de agua.*

*\*A mayor peso volumétrico natural - mayor expansión en suelos arcillosos.*

*\* Si la presión de expansividad es mayor que la presión de carga aplicada al suelo, se expandirá y pudiendo provocar movimientos verticales diferenciales si las condiciones de movimiento de agua no son las mismas en todos los elementos de cimentación.*

*\* Cimentación construida después de un periodo de lluvia.*

*Se considera entonces que las condiciones prevalecientes bajo la cimentación son las de máximo humedecimiento en el centro y las de máxima*



*deseccación en la periferia. Conviene observar que estos componentes son también representativos de las que se presentan a largo plazo durante los periodos de sequía, independientemente del periodo en que se haya realizado la construcción. En efecto las condiciones bajo el centro de la cimentación tienden con el tiempo hacia las condiciones de máximo humedecimiento.*

*\*Para la obtención de muestras inalteradas en suelos potencialmente expansivos deberá emplearse un procedimiento que no altere el contenido natural de agua del suelo.*

*\*La evaluación de los movimientos diferenciales para una alternativa de cimentación convencional se efectúa evaluando las condiciones de máxima desecación y de máximo humedecimiento para las condiciones de trabajo de la cimentación. La estimación de los asentamientos diferenciales máximos puede llevarse acabo considerando los casos extremos siguientes :*

*a) Cimentación construida al final de un periodo de sequía, se considera que las condiciones prevalecientes bajo el centro de la construcción son las de máxima desecación y que las condiciones en la periferia de la misma se acercan a los de máximo humedecimiento durante el periodo de lluvias.*

*b) Cimentación construida después de un periodo de lluvia.*

*Se considera entonces que las condiciones prevaletientes bajo la cimentación son las de máximo humedecimiento en el centro y las de máxima desecación en la periferia. Conviene observar que estos componentes son también representativos de las que se presentan a largo plazo durante los periodos de sequía, independientemente del periodo en que se haya realizado la construcción. En efecto las condiciones bajo el centro de la cimentación tienden con el tiempo hacia las condiciones de máximo humedecimiento.*

*\*Las soluciones convenientes en diseñar la cimentación y la estructura para que no sufra daños importantes al presentarse los movimientos diferenciales de la cimentación, aplicando presiones que no rebasen la capacidad de carga del suelo y que minimicen su capacidad expansiva y rigidizando la estructura, estabilizando el suelo.*

*Identificación por medio de pruebas índice: Diversos autores han realizado notables esfuerzos para determinar la naturaleza, estructura y propiedades índice de los suelos expansivos o colapsibles.*

*Es común que la susceptibilidad de algunos suelos a aumentar o disminuir de volumen por el sólo incremento de su grado de saturación, depende de los siguientes factores:*

- \* *Cantidad y tipo mineralógico de la arcilla contenida.*
- \* *Estructura del suelo.*
- \* *Relación de vacíos natural.*
- \* *Contenido de agua inicial y su posterior incremento.*
- \* *Naturaleza y concentración tanto de los iones absorbidos como de los existentes en el agua intersticial.*
- \* *Estado inicial de esfuerzos y sus cambios posteriores.*