

19  
2 Gen.



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESTABILIZACION DE SUELOS EXPANSIVOS  
CON SALES**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

**FRANCISCO JAVIER BAUTISTA GONZALEZ**



**MEXICO, D. F.**

**1985**



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

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

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

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

**ESTABILIZACION DE SUELOS EXPANSIVOS  
CON SALES**

**I N D I C E**

<b>I.- INTRODUCCION.</b>	<b>8</b>
<b>I.1 Antecedentes.</b>	<b>8</b>
<b>I.2 Objetivo.</b>	<b>11</b>
<b>II.- RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.</b>	<b>12</b>
<b>II.1 Características Mineralógicas de las Arcillas.</b>	<b>12</b>
<b>II.2 Propiedades Índice y Mecánicas de los Suelos Ex -     pansivos.</b>	<b>23</b>
<b>II.3 Métodos de Identificación de los Suelos Expansi-     vos.</b>	<b>45</b>
<b>III.- RESUMEN DE LOS TIPOS DE ESTABILIZACION.</b>	<b>59</b>
<b>III.1 Estabilización Mecánica.</b>	<b>59</b>
<b>III.2 Estabilización Química.</b>	<b>64</b>
<b>III.3 Estabilización por Subdrenaje.</b>	<b>71</b>
<b>III.4 Otros Métodos de Estabilización.</b>	<b>72</b>
<b>IV.- ESTABILIZACION CON SALES.</b>	<b>73</b>
<b>IV.1 Tipos de Sales.</b>	<b>73</b>
<b>IV.2 Estabilización con Cloruro de Sodio.</b>	<b>76</b>
<b>IV.3 Pruebas de Laboratorio.</b>	<b>79</b>
<b>IV.4 Resultados</b>	<b>85</b>
<b>V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>102</b>

## C A P I T U L O I

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

#### I.I.- ANTECEDENTES.

Al hablar de suelos dentro de la ingeniería civil, de inmediato se piensa en la variabilidad y complejidad de éstos, y por ende, en los problemas que pueda ocasionar su utilización.

Si nos situamos dentro de la República Mexicana, encontramos con frecuencia suelos que no cumplen con los requisitos de calidad que en cada caso se requieren y es aquí donde la necesidad de tomar una decisión se presenta, dentro de las tres alternativas conocidas.

- 1.- Aceptar el material tal y como se encuentra, conviviendo con los problemas ocasionados por su mala calidad.
- 2.- Desechar el suelo y sustituirlo por otro que cumpla los requisitos de calidad, resistencia y deformación, con el costo que éste represente.
- 3.- Modificar las características del material, de manera que llene los requisitos impuestos, de una manera segura y económica.

Uno de los procedimientos que están incluidos en la última alternativa mencionada, es la estabilización de suelos, entendiéndose como tal, el mejoramiento de las propiedades mecánicas entre otras: incremento de la resistencia y disminución de la variación volumétrica de un suelo, a fin de que se satisfagan los requisitos de calidad que en cada caso se imponen.

Entre los suelos que representan problemas, están los llamados suelos expansivos, los cuales con bastante regularidad nos los encontramos en el país, principalmente en las Zonas Central y Noroeste. Estos suelos, tienen la característica fundamental, de que cuando hay variaciones en su contenido de agua, sufren grandes cambios de volumen, presentándose también, cambios en su resistencia al esfuerzo cortante.

Algunos de los factores que originan las variaciones en el contenido de agua son:

- 1) Disminución en la humedad del suelo ocasionada por las altas temperaturas de la zona, así como la evapotranspiración de la vegetación.
- 2) La frecuencia e intensidad de las lluvias en la región.
- 3) El espesor del estrato de suelo expansivo.
- 4) La profundidad y variación del nivel freático.
- 5) La heterogeneidad del estrato del suelo expansivo.

Por otra parte, entre los daños más comunes que originan en los suelos, podemos citar los siguientes:

- Levantamientos y agrietamientos de las cimentaciones.
- Fracturas en pisos y paredes.
- Grandes deformaciones y destrucciones de pavimentos.
- Fallas en los revestimientos y/o en losas de canales.
- Empujes importantes en las tuberías de conducción - que ocasionan roturas en estas líneas.
- Fallas en los corazones de cortinas de materiales - graduados por disminución de resistencia al corte.

Pretendiendo resolver el problema que representa trabajar con suelos expansivos, se cuentan en la actualidad con diferentes procedimientos prácticos, de los cuales se abundará posteriormente y que son:

- a) Estabilización Mecánica.
- b) Estabilización por Subdrenaje.
- c) Estabilización Química.

Los procedimientos mencionados no son todos, ya que existen otros métodos tales como la estabilización electrosmótica o la inundación previa del terreno, cuyo empleo es limitado por ser poco prácticos.

Considerando la estabilización química de los suelos expansivos, nos encontramos que son tres las opciones que mejor han sido estudiadas y utilizadas, es decir, empleando cal, cemento portland y asfalto. Los estudios realizados con estos tres materiales han redundado a la fecha, en su aceptación como estabilizantes químicos eficientes a costos relativamente razonables.

Sin embargo no hay que olvidar que no existe un tipo de estabilización o un material estabilizante que sea la panacea en el problema que representan los suelos expansivos, pues la elección de cada uno de ellos, depende de las condiciones y características del suelo a estabilizar y que en la mayoría de las veces, resultan diferentes en cada caso a resolver.

Es por lo anterior, que no nos debemos olvidar de que existen otros tipos de estabilizantes químicos que no han sido muy estudiados, por lo que no se conocen las variaciones que se tienen en la resistencia y en la compresibilidad. Asimismo, si bien es cierto que en algunas ocasiones puede resultar costoso, comparado con el uso de otros materiales, en otras situaciones podría resolverse el problema satisfactoriamente. Entre estos estabilizantes que no han sido muy estudiados se encuentran las sales como el cloruro de sodio, el cloruro de calcio y el silicato de sodio.

En el presente trabajo, se hace primeramente un resumen de las características y propiedades de los suelos expansivos las cuales resulta conveniente mencionar. Posteriormente se abunda sobre los procedimientos de estabilización.

En el Capítulo IV se trata la estabilización con sales, mencionándose el cloruro de sodio, el cloruro de calcio y el silicato de sodio ya que son de las que se tiene mayor información. En este capítulo se incluyen una serie de pruebas de laboratorio empleando cloruro de sodio (sal común) ya que las otras sales tienen un costo muy elevado y resultaría antieconómico usarlas.

Esta investigación es continuación de un estudio de estabilización de arcillas expansivas utilizando diferentes materiales estabilizantes, ya se hizo con cal y ahora se investigará con sal.

## I.2.- OBJETIVO.

Quando se busca tomar una decisión de entre varias alternativas, ésta se acercará más a la óptima, en la medida del conocimiento que se tenga de cada una de las opciones a escoger.

Considerando que la investigación en el campo del uso de las sales como estabilizantes no se ha experimentado en México, el presente trabajo tiene como objetivo, estudiar los cambios que en un suelo expansivo, produce el cloruro de sodio sobre sus propiedades mecánicas de resistencia y deformación, contribuyendo en alguna medida a elevar su grado de conocimiento, lo que en un determinado momento nos permitiría tener más opciones a escoger cuando se pretenda realizar la estabilización química de algún suelo, lo que contribuirá a la selección de una mejor solución a emplearse en un determinado caso y a un costo no elevado.

Una de las investigaciones recientes que sobre el uso de la cal como material estabilizante de arcillas expansivas se ha realizado, está en la tesis elaborada por José F. Fernández R., - - Sergio R. González O. y Gherman Castellanos R., bajo el nombre de "Estabilización de Suelos Expansivos Utilizando Cal" y de la cual en adelante se hará referencia, dado que siendo aceptado el empleo de la cal como material estabilizador de arcillas expansivas, dicha investigación nos servirá como una base al permitirnos comparar resultados, ya que el estudio que se realizará con sal común, se hará sobre el mismo suelo que se empleó en el trabajo mencionado anteriormente.

## C A P I T U L O   I I

### RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

Un suelo expansivo es un suelo arcilloso que tiene la característica de sufrir cambios volumétricos al variar su contenido de agua, por lo que sus características y propiedades dependen fundamentalmente de su estructura y de su constitución mineralógica, a la vez que como consecuencia de las variaciones de volumen su resistencia al esfuerzo cortante cambia.

A continuación se mencionan las principales características y propiedades de los suelos expansivos, producto de investigaciones y trabajos que se han realizado y que nos servirán de base - en este trabajo de investigación, principiando por dar una breve explicación acerca de las características mineralógicas de las arcillas, dado que a partir de éstas, se puede explicar el fenómeno de expansión.

#### II. I.- CARACTERISTICAS MINERALOGICAS DE LAS ARCILLAS.

La arcilla es un suelo formado básicamente por silicatos--, producto de la descomposición química de las rocas ígneas y metamórficas, dichos silicatos, son fundamentalmente silicatos de aluminio hidratados, pudiéndose presentar en ocasiones silicatos de magnesio, hierro u otros metales también hidratados. Estos minerales, tienen la característica de tener una estructura cristalina bien definida, además de que poseen un tamaño del orden de 2 micras (0.002 mm) o menor. Es por lo anterior que este tipo de partículas, no están sujetas al campo de las fuerzas gravitacionales, sino que debido a que la relación de área a volumen de la partícula es considerable, es al campo de fuerzas electromagnéticas al que están sujetas estas partículas.

A fin de comprender mejor la estructura atómica y el comportamiento de las arcillas, resulta conveniente hacer un resumen de los tipos de nexos que existen entre los átomos que constituyen los cristales arcillosos.

## a) Nexos Primarios.

Estos nexos, llamados también de valencia primaria, son de alta energía y actúan a distancias de 1 a 2 Å (1 Angstrom = Å =  $1 \times 10^{-4}$  micras), entre los átomos de un cristal de arcilla y pueden ser:

## Nexos Iónicos.

Ocurren entre dos átomos que tienen incompleto el número de electrones en su última órbita. A estos átomos que pierden o ganan electrones se les llama iones y poseen carga eléctrica positiva o negativa, según si perdieron o ganaron electrones, en cuyo caso se denominan cationes o aniones, respectivamente.

## Nexos Covalentes.

Se presentan entre dos átomos a los cuales les falta uno o más electrones en sus bandas extremas, en estos casos, los átomos se combinan para compartir un par o más de electrones.

## b) Nexo a través de un núcleo de Hidrógeno.

Se origina cuando un átomo de hidrógeno ( $H^+$ ) es igualmente atraído por otros dos átomos, formando un puente entre ellos. Esta unión hidrógeno, actúa a distancias del orden de 2 a 3 Å, por lo cual, es más débil que los nexos primarios.

## c) Nexos Secundarios.

Llamados también de valencia secundaria, se establecen cuando se unen los átomos de una molécula a los átomos de otra molécula. A estas fuerzas se les conoce también como fuerzas de Van Der Waals y actúan con una intensidad de  $1/100$  de las fuerzas de valencia primaria en distancias mayores a 5 Å.

## d) Unión Catiónica.

Se tiene cuando un catión ( $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $K^+$ , etc.), es atraído a dos moléculas cargadas negativamente, esta unión es similar a la de hidrógeno, solo que es más débil e inestable que ésta.

## e) Unión Coulómbica.

Llamada también electrostática, ocurre entre todas las partículas cargadas eléctricamente. Las estruc

turas de la molécula pueden ser polares, por lo que en esta unión se presentan fuerzas de Van Der Waals dependiendo de la orientación de las partículas.

Los tipos de nexos descritos, son los que existen entre los átomos de los cristales arcillosos, mismos que juegan un papel importante en el comportamiento de las arcillas, como se verá en los párrafos siguientes.

Ya se mencionó que los minerales constitutivos de las arcillas, tienen una estructura cristalina definida; ahora bien, se ha encontrado que existen dos bloques fundamentales en las estructuras de los minerales arcillosos y que son:

### I) Tetraedro de Sílica.

Constituido por cuatro átomos de oxígeno que equidistan de un átomo de silicio. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales donde un átomo de oxígeno sirve de nexo entre cada dos tetraedros, los cuales al repetirse indefinidamente constituyen una redícula laminar cuya composición es  $Si_4 O_6 (OH)_4$ , la cual se representa en forma simbólica con un trapecio (Fig. II.I).

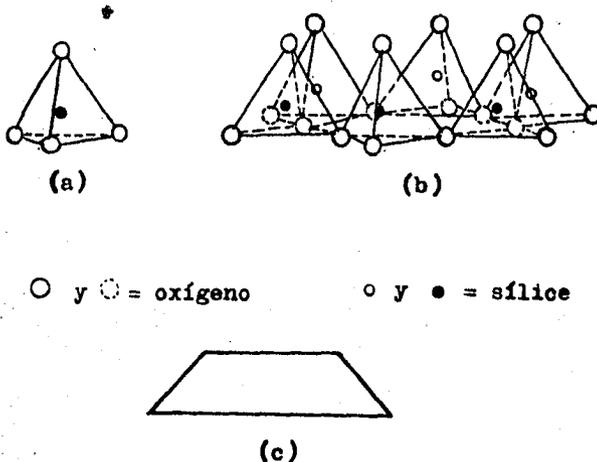


Fig. II.I. (a) Unidad Tetraedro de Sílica; (b) Lámina Sílica (c) Representación Simbólica de la Lámina Sílica.

## 2) Octaedro de Hidróxido de Aluminio.

Formado por seis átomos de oxígeno o hidroxilos equidistantes, en cuyo centro se encuentra un átomo de aluminio. Estos octaedros se combinan para formar una lámina llamada gibsita, cuya fórmula es  $Al_2(OH)_6$  simbolizada por un rectángulo. (Fig. II.2).

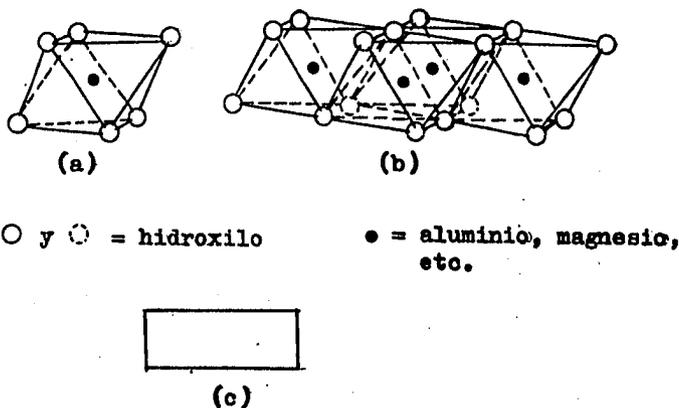


Fig. II.2. (a) Unidad Octaedro de Hidróxido de Aluminio; (b) Gibsita; (c) Representación Simbólica de la Gibsita.

En base a lo anterior, de acuerdo a su estructura reticular, los minerales de arcilla se pueden agrupar en tres grupos dominantes.

- Grupo de las Caolinitas.
- Grupo de las Montmorilonitas.
- Grupo de las Illitas.

### Grupo de las Caolinitas.

Dado que la última órbita de los átomos de oxígeno superiores en la lámina sílica está incompleta, es posible que esta lámina se una a una gibsita. Esta unión, se realiza mediante la sustitución de dos hidroxilos por dos oxígenos, con lo cual se -

establece un nexo primario del tipo iónico, formándose de esta manera una lámina eléctricamente neutra, obteniéndose así, el mineral conocido como caolín. En la figura II.3., se muestra la representación esquemática y simbólica del mineral caolín.

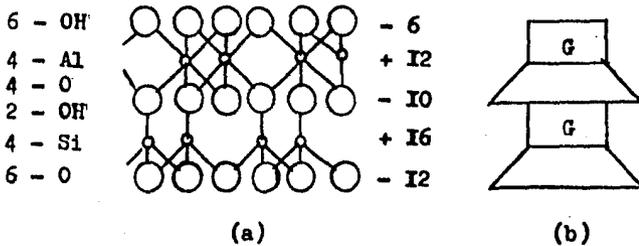


Fig. II.3., (a) Representación Esquemática del Mineral Caolín; (b) Representación Simbólica del Mineral Caolín.

Dependiendo de las diferentes estructuras de láminas, se tienen también diferentes minerales con la misma composición caolín, entre los que se cuentan los cristales de arcilla conocidas como caolinitas, los cuales están unidos por nexos del tipo hidrógeno, desarrollados entre los iones oxígeno ( $O^{-2}$ ) y los iones hidroxilo ( $OH^{-1}$ ). (Figura II.3).

En lo que respecta a las características ingenieriles de la caolinita, se debe mencionar de que debido a que el mineral caolín es producto de un nexo primario del tipo iónico, la unión entre la lámina sílica y la gibsitita es muy fuerte, por lo que los cristales de caolinita son bastante estables, lo que hace que el agua no pueda penetrar entre las láminas de caolín para separarlas.

#### Grupo de las Montmorilonitas.

Las montmorilonitas son minerales compuestos de dos láminas sílicas y una octaédrica central. La unión de estas tres láminas, se muestra en forma esquemática y simbólica en la figura II.4, siendo ésta semejante a la que se produce en las ilitas,

es decir, mediante la sustitución de hidroxilos por oxígeno.

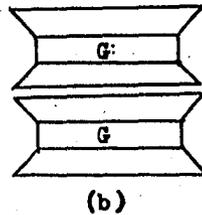
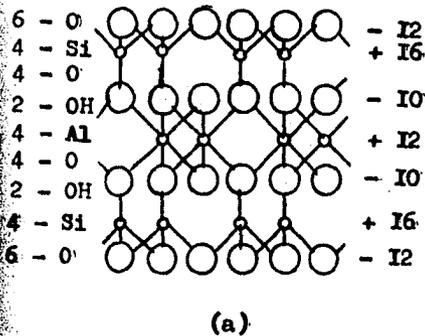


Fig. II. 4 (a) Representación Esquemática de las Montmorilonitas; (b) Representación Simbólica de la Montmorilonita.

De la figura anterior, puede verse que hay equilibrio eléctrico en la montmorilonita, más sin embargo, generalmente en ésta, se presenta una sustitución isomorfa, misma que consiste en la sustitución de un átomo por otro. Así, puede darse el caso, de que un ión de aluminio ( $Al^{+3}$ ), sea sustituido por un ión de fierro ( $Fe^{+2}$ ) o de magnesio ( $Mg^{+2}$ ), con lo cual se tendrá una carga residual negativa y al igual que la illita, podrá atraer los cationes contenidos en el agua, tales como el sodio ( $Na^{+1}$ ), calcio ( $Ca^{+2}$ ), potasio ( $K^{+1}$ ), entre otros, sin embargo, estos cationes no quedan fijos en las láminas, pudiéndose intercambiar fácilmente, lo que significa que estas arcillas podrán atraer otros iones hasta que se logre su equilibrio.

La principal característica de las montmorilonitas, es la facilidad con que penetra el agua entre las láminas, ocasionando su separación, lo que a nivel macrofísico se traduce en una expansión, dado que en la montmorilonita la unión catiónica que en ella existe dependiente del tipo de catión es débil.

### Grupo de las Ilitas.

Las ilitas, poseen una estructuración semejante a la montmorilonita, figura II.5., con la diferencia de que siempre se presenta una sustitución adicional a la isomorfa, presente en las montmorilonitas. Aquella, consiste en la sustitución de átomos de sílice ( $\text{Si}^{+4}$ ), por átomos de aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ), lo que origina una carga residual negativa, misma que será equilibrada con los cationes de potasio ( $\text{K}^{+1}$ ), disueltos en el agua.

Sustitución isomorfa adicional en  
la lámina sílica

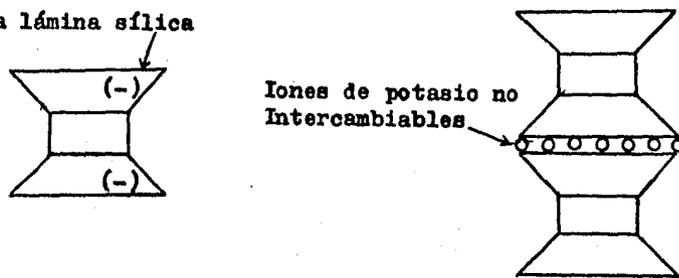


Fig. II.5. Representación Simbólica de la Iilita.

Los nexos a través de cationes no intercambiables de potasio ( $\text{K}^{+1}$ ), son más débiles que los nexos mediante un hidrógeno - que se presentan en las caolinitas, pero a la vez son más fuertes que las uniones por medio de cationes intercambiables, presentes en las montmorilonitas. Esto se debe, en parte, a que los cationes ( $\text{K}^{+1}$ ), se fijan en las superficies de la lámina sílica, encontrándose así, más cerca del catión intercambiado que en el caso de la montmorilonita, en donde el catión intercambiado queda en la lámina central.

Debido a lo anterior, las ilitas no se expanden tanto como las montmorilonitas, pues en las primeras se dificulta el paso - del agua a través de las láminas.

Como ya se explicó en los párrafos anteriores, las partículas que constituyen un suelo arcilloso, poseen una carga residual negativa cuya intensidad depende de la estructura y tipo de mineral. Con esta carga negativa se crea un campo eléctrico, con el cual la partícula está en posibilidad de atraer los iones positivos de agua ( $H^+$ ), así como otros cationes disueltos en ella tales como  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Al^{+++}$ ,  $Fe^{+++}$ , entre otros. Esta atracción eléctrica del cristal arcilloso disminuye rápidamente con la distancia, de modo que la concentración de cationes alrededor del cristal disminuye también. En la figura II.6 se muestra en forma esquemática la distribución de cationes cerca de la superficie del cristal, así como la variación de la concentración de cationes y del potencial eléctrico con la distancia.

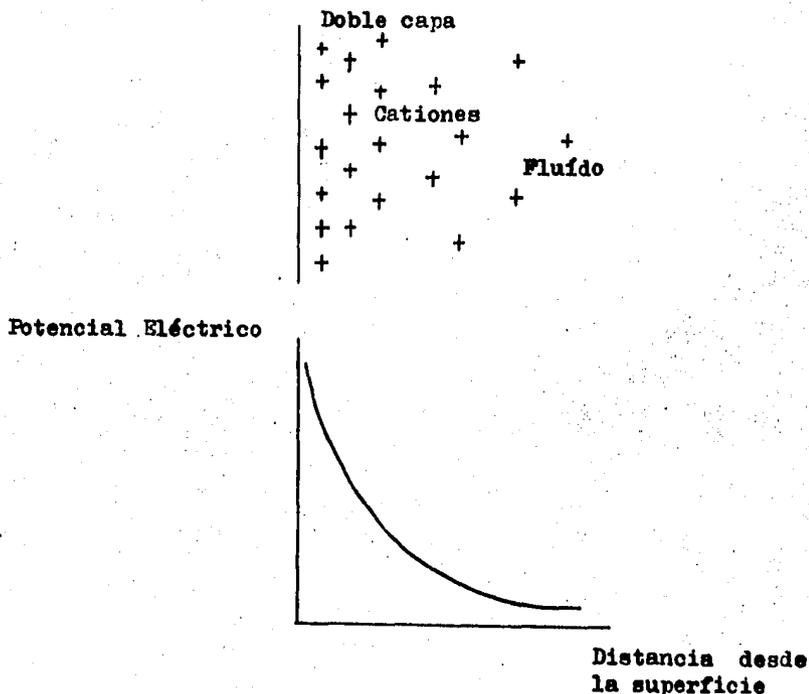


Fig. II.6. Representación esquemática de la distribución de cationes y la variación del potencial eléctrico.

La magnitud del potencial eléctrico se puede expresar mediante la ecuación II.I:

$$Z = \frac{4 Q d}{AK} \text{ ----- (ec. II.I).}$$

donde: Z = Potencial Eléctrico.  
 Q = Carga Eléctrica.  
 d = Espesor de la doble capa.  
 A = Area Superficial.  
 K = Constante Dieléctrica.

Al conjunto de cationes muy cercanos fuertemente unidos al cristal mediante el campo eléctrico, así como el grupo de cationes ya ligeramente más desligados del campo eléctrico por su mayor lejanía a la superficie de la partícula, suelen considerarse como dos estratos, de manera que al sistema en conjunto se le llama sistema de la doble capa, cuyo espesor varía inversamente con la raíz cuadrada de la concentración de cationes en la solución - e inversamente proporcional a la valencia de dichos cationes.

Al variar el espesor de la doble capa, el potencial eléctrico disminuye también, al aumentar la concentración y al aumentar la valencia como se muestra en las figuras II.7 y II.8.

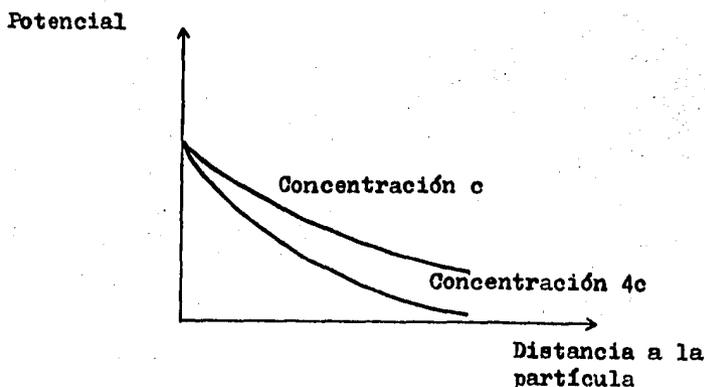


Fig. II.7. Variación del potencial eléctrico con la concentración de cationes.

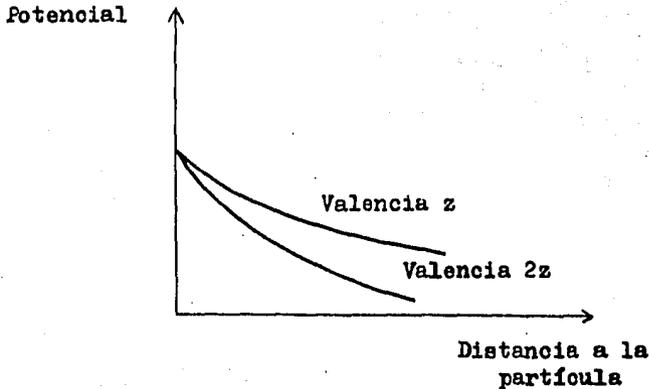


Fig. II.8. Variación del potencial eléctrico con la valencia.

Es importante señalar que el agua que rodea a la partícula - tiene características muy peculiares, por estar sujetas a fuerzas de atracción eléctrica, denominándose capa de agua adsorbida. De acuerdo al reporte de Winterkorn y Bayer, la magnitud de las presiones de adsorción en la capa de agua que rodea el cristal de arcilla es del orden de las 20 000 Kg/cm<sup>2</sup>. Por otra parte, Bridgman encontró que una presión de 10 000 Kg/cm<sup>2</sup>, la congelación del agua ocurre a +30 C, lo cual quiere decir, que considerando las - temperaturas a las cuales se encuentra una masa de suelo, así como la magnitud de las presiones de adsorción debidas a las fuerzas de atracción, la película de agua adsorbida que se encuentra inmediatamente cercana a la partícula, posee propiedades similares al hielo sólido, por lo que a ésta se le acostumbra llamar capa sólida, a continuación, las moléculas de agua que se encuentran más alejadas del cristal, están sujetas a fuerzas de atracción menores, por lo que éstas ya no presentan características de un sólido, sino de un fluido viscoso por lo que a esta capa de agua adsorbida se le denomina capa viscosa. Finalmente, existen - otras moléculas de agua que por estar todavía más alejadas del - cristal no están sujetas a fuerzas electromagnéticas, conservando su estado líquido.

Considerando todo lo anterior, el proceso de expansión de un suelo arcilloso se puede explicar como un aumento en el espesor - de la doble capa que separa las partículas, aunque una pequeña -

parte de esta expansión, es debida a la restitución elástica de las mismas. En el caso de las arcillas montmoriloníticas, la expansión se ve incrementada aún más, debido al hinchamiento propio de los minerales de montmorilonita.

## II.2.- PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.

En el capítulo anterior, se concluyó que los suelos que tienen la propiedad de sufrir cambios volumétricos, son las arcillas que contienen minerales de illita y montmorillonita.

Conociendo lo anterior, veremos ahora las propiedades índice y mecánicas de estos suelos, sin olvidar que los valores de estas propiedades son variables para cada suelo en especial pero que sin embargo nos permitirán tener una idea general del comportamiento que se puede esperar de este tipo de suelos.

### II.2.I.- LIMITES DE ATERBERG.

Una característica importante de los suelos arcillosos es su plasticidad, misma que se expresa cuantitativamente por medio de los límites líquido y plástico, así como a través del índice plástico.

#### a) Límite Plástico.

De los valores que se observan en las tablas II.I y II.2, para diferentes suelos, se ve que el valor del límite plástico decrece en el siguiente orden: montmorillonita, illita y caolinita, a la vez que no existe un valor característico para cada mineral arcilloso, ya que se hace evidente que el valor del límite plástico depende en gran medida de la composición del catión intercambiable, de la presencia de minerales no arcillosos así como de las variaciones de estructura y composición de cada mineral arcilloso. Así por ejemplo y para el caso de las montmorillonitas, la presencia de cationes intercambiables de Litio y Sodio pueden hacer que arcillas de este tipo presenten valores altos de límite plástico en comparación con las montmorillonitas con cationes intercambiables como calcio y potasio.

En el caso de las illitas y caolinitas, la diferencia entre los cationes intercambiables no presenta una variación significativa en el valor del límite plástico. Esto es de esperarse, ya que a diferencia de las montmorillonitas, aquellas poseen una capacidad de intercambio catiónico más bajo.

Por otra parte, con los datos de la tabla II.2, se demuestra que la presencia de pequeñas cantidades de montmorillonita en la caolinita o en la illita, incrementa el límite plástico al mismo tiempo que hace aumentar el límite líquido y el índice plástico.

ARCILLA	Ca			K			Na			Li		
	LP	LL	Ac	LP	LL	Ac	LP	LL	Ac	LP	LL	Ac
	MONTMORILONITA (1)	65	166	1.26	57	161	1.30	93	344	3.14	80	638
(2)	65	155	1.20	57	125	0.91	89	443	4.72	59	565	6.75
(3)	63	177	1.34	60	297	2.79	97	700	7.09	60	600	6.35
(4)	79	123	0.44	76	108	0.32	86	280	1.12	82	292	2.10
ILITA (1)	40	90	0.50	43	81	0.38	34	61	0.27	41	68	0.27
(2)	36	69	0.33	40	72	0.32	34	59	0.25	38	63	0.25
(3)	42	100	0.58	41	72	0.31	41	75	0.34	40	89	0.49
CAOLINITA (1)	36	73	0.37	38	69	0.31	26	52	0.26	33	67	0.34
(2)	26	34	0.08	28	35	0.07	28	29	0.01	28	37	0.09

Montmorilonita: (1) Pontotoc, Miss.; (2) Cheto, Ariz.; (3) Belle Fourche, S. - Dak.; (4) Olmsted, Ill. (con 25% de illita).

Illita: (1) Pithian, Ill.; (2) Jackson Country, Ohio; (3) Grundy Country, Ill. (con 5% de montmorilonita).

Caolinita: (1) Anna, Ill.; (2) Dry Branch, Ga.

LP: Límite plástico; LL: Límite líquido; Ac: Actividad.

Tabla II.I (White, 1955).

ARCILLA		NATURAL		$H_2FO_4$		$H_2SO_4$		$Na_6(PO_3)_6$	
		LP	LL	LP	LL	LP	LL	LP	LL
MONTMORILONITA	(1)	97	700	54	340	50	250	48	395
	(2)	72	124	63	119	77	142		
	(3)	82	118						
ILITA	(4)	25	36	23	35	26	36	21	31
	(5)	24	29						
CAOLINITA	(6)	30	35						
	(7)	37	58	35	68	32	68		
ILITA 10% MONT.	(8)	26	58	27	52	28	61	25	48
ILITA 5% MONT.	(9)	36	61	34	61	35	62		
CAOLINITA 10% MONT.	(10)	33	65	31	65	31	74	39	67

(1) Belle Fourche, S. Dak.; (2) Cheto, Ariz.; (3) Aberdeen, Miss.; (4) La Salle County, Ill.; (5) Pithian, Ill.; (6) Dry Branch, Ga.; (7) Anna, Ill.; (8) - Greene County, Ill.; (9) Grundy County, Ill.; (10) Dry Branch, Ga.

Tabla II.2 (Grim, 1950).

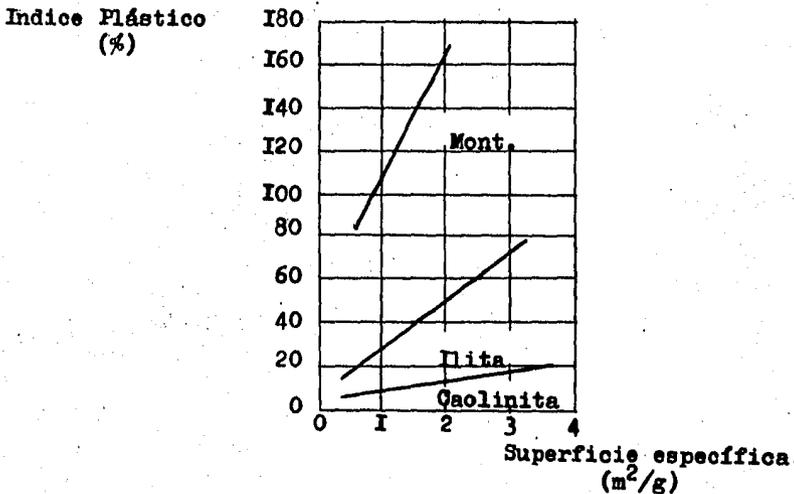


Fig. II.9. Variación del índice plástico con la superficie específica de minerales arcillosos.

### b) Límite Líquido.

Al igual que en el caso del límite plástico, no existe un valor característico del límite líquido, para un mineral arcilloso determinado, a la vez que éste decrece en el mismo orden, es decir: montmorilonita, illita y caolinita. Asimismo en la tabla II.1, se observa que el rango del límite líquido para un grupo en particular de minerales arcillosos es más grande que el rango del límite plástico.

En la misma tabla II.1, se pueden apreciar los altísimos valores del límite líquido que pueden presentarse cuando el catión intercambiable es el Litio o el Sodio. Es importante señalar que el límite líquido de estos suelos es difícil de determinar, no existiendo de hecho un valor definido debido a su alto grado de Tixotropía y es por ello que estos valores solo son útiles para darnos una idea en cuanto a magnitud.

De igual manera que en el límite plástico, la presencia de montmorilonita en un suelo, influye de manera importante en el valor del límite líquido. Los datos de las tablas II.1 y II.2., nos son útiles para darnos cuenta de la importancia que puede tener la existencia de pequeñas cantidades de montmorilonita en un suelo, ya que como se aprecia, la existencia de estos minerales provoca aumentos considerables en los valores de los límites líquido y plástico, haciendo al mismo tiempo que el tipo de catión intercambiable se convierta en un factor de control.

### c) Índice Plástico.

Con relación al índice plástico y como una consecuencia de los valores tan altos que pueden llegar a presentarse en el límite líquido de los minerales arcillosos, principalmente en las montmorilonitas, el valor del índice plástico toma valores hasta de 600 para algunas montmorilonitas sódicas hasta de 1 para algunas caolinitas sódicas. Las illitas tienen valores de límite plástico intermedios entre las montmorilonitas y las caolinitas.

Obviamente, los valores del índice plástico para los diferentes minerales arcillosos dependerán de igual manera de la naturaleza del catión intercambiable. Por otra parte, la posible existencia de montmorilonita en un suelo hará que también el índice plástico sufra incrementos.

Como se puede comprobar con los datos presentados arriba, - las propiedades de plasticidad de una arcilla, dependen de va - rios factores ya mencionados, sin embargo existen otros efectos que pueden hacer variar las características de plasticidad, como lo son el tamaño de la partícula y el secado.

d) Efecto del Tamaño de Partícula.

En la tabla II.3, presentada por White en 1949, se puede apreciar que los valores límite se incrementan cuando de - crece el tamaño de partícula de los minerales arcillosos, obser - vándose que se incrementa en mayor grado el límite líquido que - el límite plástico. Por lo tanto, entre los factores que deter - minan los valores límite de una arcilla están la finura de sus - partículas en estado natural y el grado al cual las partículas - y agregados son remoldeados durante la determinación de los valo - res.

Con frecuencia la distribución del tamaño de partícula de - una arcilla, se relaciona con el grado de cristalización alcanza - do por los componentes de los minerales arcillosos, ya que mien - tras las partículas sean más pequeñas están menos ordenadas. Si se comparan los valores límite para dos caolinitas o dos ilitas con el mismo catión intercambiable pero con diferente distribu - ción de tamaño de partículas, los valores límite más altos se - obtienen en las partículas más pequeñas. Por otro lado, los mi - nerales de arcilla mal ordenadas se disgregan más fácilmente, lo que hace que las diferencias en los límites sea mayor.

Es importante también señalar, que una disminución en el ta - maño de partícula, podría estar acompañado por un incremento de la superficie total y por lo consiguiente podría esperarse un in - cremento en el índice plástico. En la figura II.9, se muestran los resultados obtenidos por Platen y Winkler, donde se observa la manera en que se incrementa el índice de plasticidad al aumen - tar la superficie específica de las partículas.

e) Efecto de Secado.

Algunos investigadores como Lambe y Martín, por e - jemplo, han presentado datos demostrando que como consecuencia - del secado, se presenta una reducción en los valores límite de - un suelo.

El secado de los suelos, está acompañado de una contracción la cual tiende a llevar a las partículas a juntarse, haciendo -

que las fuerzas atractivas hagan que el agua no pueda penetrar - entre ellas. Se sabe, que en el caso de las montmorilonitas, la remoción del agua entre las partículas causa un colapso de la estructura, es decir, destruye las propiedades coloidales, así como la capacidad de adsorción del mineral.

TABLA II.3.

Valores de los límites de Aterberg en relación al tamaño de partícula. (White, 1949).

Mineral arcilloso y tamaño de partícula	LP	LL	IP
<b>Illita, Grundy County, III.</b>			
I micra.....	39.6	83	43.4
0.5 micra.....	52.3	103.7	51.4
<b>Illita, La Salle County, Illinois.</b>			
I micra.....	46.2	85.6	39.4
0.5 micra.....	53	111.2	58.2
<b>Caolinita, Anna, Illinois.</b>			
I micra.....	37.1	64.2	27.1
0.5 micra.....	39.3	71.6	32.3
<b>Montmorilonita, Pontotoc, Mississippi.</b>			
I micra.....	81.4	117.5	36.1
0.5 micra.....	109.5	177.6	66.1

Se puede concluir, por tanto, que los valores más altos de los valores límite, se presentan en las arcillas montmoriloníticas y decrecen para aquellas constituidas por minerales de illita y caolinita, en este orden, asimismo, se debe tener en cuenta al determinar los límites, que el tamaño de partícula, así como el secado, influyen en forma importante.

Finalmente, podemos decir, que las arcillas expansivas, como la montmorilonita y la illita en menor grado, tienen la característica de tener valores límite altos en comparación con las arcillas caolínificas.

## II.2.2. ACTIVIDAD.

La actividad de un suelo, según Skempton, es la relación entre el índice plástico y la cantidad de la fracción arcillosa, - definida como el porciento del peso seco de tamaño menor de 2 mi cras. El valor de la actividad, ha resultado muy usado, como in dicador del índice de plasticidad de la fracción arcillosa de un suelo.

En la tabla II.I, se indican los valores de actividad, de - dependiendo del catión intercambiable y del mineral constitutivo - de la arcilla, de donde se observa que el valor de la actividad varía de 0.5 a 7 para las montmorilonitas, de 0.23 a 0.58 para - las illitas y de 0.01 a 0.41 para las caolinitas.

El mismo Skempton clasificó los suelos dependiendo de actividad como sigue:

Grupo 1	Inactividad con actividad menor que 0.5.
Grupo 2	Inactividad con actividad de 0.5 a 0.75.
Grupo 3	Normal con actividad de 0.75 a 1.25.
Grupo 4	Activa con actividad de 1.25 a 2.0.
Grupo 5	Activa con actividad mayor que 2.0.

Por consiguiente, en base a los grupos de actividad propue tas por Skempton, las caolinitas y las illitas se ubicarían en - los grupos inactivos, mientras que las montmorilonitas, depen -- diendo de la naturaleza del catión intercambiable podrían ubicar se en cualquier grupo, aunque preponderadamente deben considerar se en los grupos activos.

En general, es de esperarse que las arcillas activas tengan una relativa alta capacidad de retención de agua, una fuerte consolidación, bajo carga, una elevada capacidad de intercambio catiónico y por consiguiente una variación de sus propiedades en función del tipo de catión intercambiable. Además de lo anterior, estas arcillas son altamente tixotrópicas, poseen una baja permeabilidad y una baja resistencia al corte.

Por lo anterior, es de esperarse, que las arcillas que al ingeniero le representarán problemas en las diferentes obras a diseñar o construir, serán las arcillas activas, es decir, aquellas cuyo mineral constitutivo es la montmorilonita.

### II.2.3. RESISTENCIA A LA COMPRESION AXIAL NO CONFINADA.

La resistencia a la compresión axial no confinada o compresión simple de las arcillas, dependen de la composición mineralógica, de la forma de las partículas, así como del arreglo de dichas partículas con respecto a las demás.

Los suelos cohesivos se han llegado a clasificar en base a la fuerza de compresión requerida para producir la falla en una muestra no confinada. La clasificación es la siguiente.

Consistencia	Resistencia a la compresión simple, $q_u$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Muy blanda	< 0.25
Blanda	0.25 - 0.50
Media	0.50 - 1.0
Firme	1.0 - 2.0
Muy firme	2.0 - 4.0
Dura	> 4.0

Por otro lado, en la tabla II.4, se muestra que la introducción de minerales arcillosos en arena, incrementa considerablemente, la resistencia a la compresión simple. Este incremento resulta mayor, añadiendo montmorilonita que agregando caolinita como puede observarse.

TABLA II.4.

Resistencia a la compresión de mezclas de arcilla y arena. (Mielenz y King).

Mezcla, % en peso			Contenido de agua en %	Resistencia a la compresión en T/m <sup>2</sup>
Montmori- lonita	Caoli nita	Arena		
100			17.1	39.0
25		75	14.4	29.5
25	25	50	13.9	60.3
	25	75	13.6	6.4
	100		14.2	70.5

Es importante señalar que en la misma tabla, se ve que en el caso de la montmorilonita y de la caolinita en estado puro, - ésta última presenta una resistencia a la compresión mayor que a aquella, por lo que es de pensarse que las arcillas más resistentes en estado puro, sean las caolinitas y las menos resistentes, sean las montmorilonitas.

#### II.2.4.- SENSITIVIDAD.

La sensibilidad de una arcilla, fué definida por Terzaghi, como la relación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante en compresión simple en un estado inalterado y la resistencia del material remoldeado. Una clasificación de la sensibilidad de arcillas es la siguiente:

### Clasificación de la Sensitividad de Arcillas (Skempton)

	Sensitividad
Arcillas no sensitivas	$\leq$ 1
Arcillas poco sensitivas	1 - 2
Arcillas medianamente sensitivas	2 - 4
Arcillas sensitivas	4 - 8
Arcillas extrasensitivas	$>$ 8
Arcillas ultrasensitivas	$>$ 16

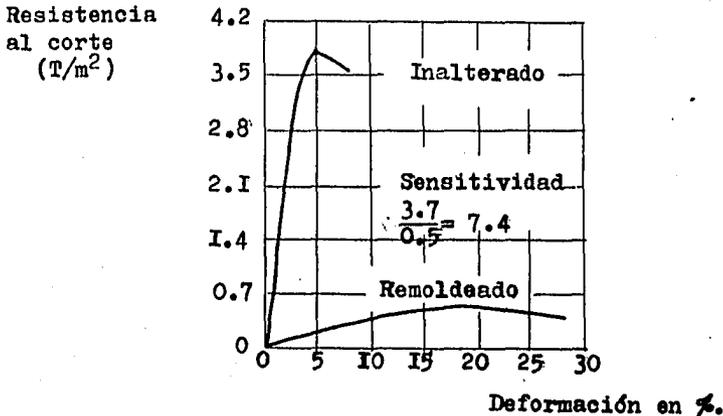


Fig. II.10. Curvas esfuerzo - Deformación para arcillas sensitivas. (Skempton y Northey).

La figura II.10, muestra las curvas esfuerzo - deformación, para una arcilla sensitiva, en la cual se aprecia el cálculo de su sensitividad.

Las arcillas sensitivas generalmente tienen altos contenidos de humedad, así como altos índices líquidos, en las cuales - un cambio en el contenido de humedad puede causar un incremento en la sensitividad, algunas veces con consecuencias desastrosas, como puede ser el caso de las arcillas montmoriloníticas.

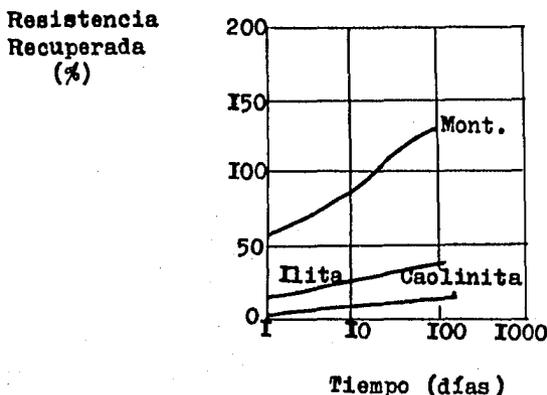


Fig. II.II. Recuperación de la resistencia con el tiempo - (Skempton y Northey).

Algunas arcillas con sensibilidad mayor a 4.0, muestran una recuperación de la resistencia al corte cuando el remoldeo de la muestra se realiza sin pérdida de humedad debido a la tixotropía. Esta cantidad de resistencia recuperada varía de un suelo a otro, con el contenido de humedad. Skempton y Northey demostraron que la recuperación de la resistencia es considerable en las arcillas con montmorillonita, moderada para las illitas y prácticamente nula en el caso de las arcillas caoliníticas, Fig. -- II.II, es decir, los suelos formados por montmorillonita, con una alta actividad son muy tixotrópicos y poseen sensibilidades mayores al valor 4.0.

#### II.2.5.- RESISTENCIA AL CORTE.

Winterkorn y Moorman encontraron que la resistencia al esfuerzo cortante en arcillas es aproximadamente una función logarítmica del contenido de humedad en la parte más baja del rango de humedad. Sin embargo, se ha visto que a contenidos altos de humedad, resulta ser más importante el tipo de mineral arcilloso, así como el tipo de catión intercambiable.

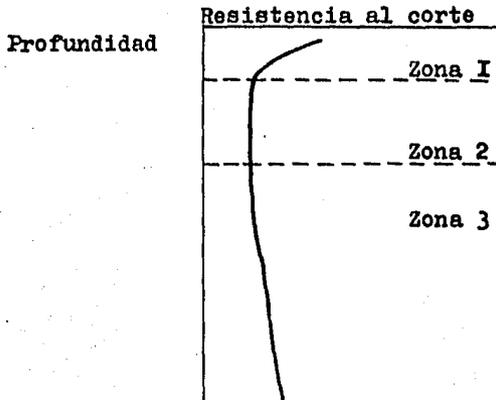


Fig. II.12. Variación de la resistencia al corte con la profundidad en arcillas normalmente consolidadas. (Skempton y Northey).

Por otra parte en la figura II.12, se observa como la resistencia al corte varía con la profundidad y consecuentemente con el incremento de las presiones efectivas. En dicha figura se puede apreciar como en la parte superficial (zona I), la resistencia al corte tiende a disminuir hasta un cierto valor, dado que es la zona sujeta a secado; al aumentar la profundidad puede existir una zona (zona 2), en la cual la resistencia permanezca constante aunque la presión efectiva se incremente para luego incrementarse con la profundidad (zona 3). Skempton y Bjerrum demostraron que la resistencia al corte se incrementa más rápidamente con la profundidad, para las arcillas con valores altos del índice de plasticidad, es decir, principalmente con la montmorilonita.

En la tabla II.5, aparecen valores de resistencia al corte de algunos suelos inalterados con diferentes composiciones, en donde se observa que no hay una relación entre la composición mineral y la resistencia al corte, sin embargo esta resistencia en una condición inalterada puede ser considerablemente mayor que una vez remoldeado el suelo con el mismo contenido de humedad.

TABLA II.5.

Propiedades de algunos suelos (Skempton y Northey).

Arcilla	Composición mineral de la fracción arcillosa, en orden de abundancia	Fracción arcillosa 2 micras-%	Actividad	Resistencia al corte en estado <u>inalterado</u> en ton/m <sup>2</sup>	Sensitividad
Detroit	Mica, illita, calcita, cuarzo, montmorillonita.	36	0.36	1.8	2.5
Horten	Mica, cuarzo, illita, montmorillonita.	40	0.42	4.2	17
Beauharnois	Mica, illita, calcita, cuarzo, montmorillonita.	79	0.52	1.9	14
Gosport	Illita, haloisita	55	0.88	2.9	2.2
Shellhaven	Illita, caolinita	41	1.33	3.7	7.6
Cd. de México	Montmorillonita	90	4.5	4.7	5.3

## II.2.6.- PERMEABILIDAD.

Sin duda alguna, una de las propiedades importantes es la permeabilidad. Hablando de suelos arcillosos, los factores que influyen en la permeabilidad de éstos son: la composición mineralógica, distribución de tamaño de partícula, textura, tipo de ión intercambiable, características del fluido, el grado de saturación y la relación de vacíos.

TABLA II.6.

Permeabilidad de arcillas y mezclas de arena y arcilla. (Endell)

Arcilla y proporción	Permeabilidad en cm/min a 65 Kg/cm <sup>2</sup>
Arena cuarzosa	$1 \times 10^{-3}$
Arena cuarzosa : Mica	
9 : 1	$4.6 \times 10^{-4}$
7 : 3	$4.2 \times 10^{-4}$
1 : 1	$5.8 \times 10^{-4}$
0 : 1	$4.9 \times 10^{-4}$
Arena cuarzosa : Caolín	
9 : 1	$9.5 \times 10^{-5}$
7 : 3	$8.9 \times 10^{-6}$
1 : 1	$2.5 \times 10^{-6}$
0 : 1	$3.0 \times 10^{-6}$
Arena cuarzosa : Montmorilonita Cálcica.	
9 : 1	$4.3 \times 10^{-5}$
7 : 3	$2.1 \times 10^{-6}$
1 : 1	$5.5 \times 10^{-7}$
0 : 1	$2.0 \times 10^{-7}$
Arena cuarzosa : Montmorilonita Sódica.	
9 : 1	$1.6 \times 10^{-7}$
7 : 3	$3.0 \times 10^{-8}$
1 : 1	$> 10^{-8}$
0 : 1	$> 10^{-8}$

De la tabla II.6, puede verse que existe una relación entre el tipo de mineral y los valores de la permeabilidad. De dicha tabla se concluye, que la presencia de montmorilonita hace que un suelo alcance valores muy bajos de permeabilidad.

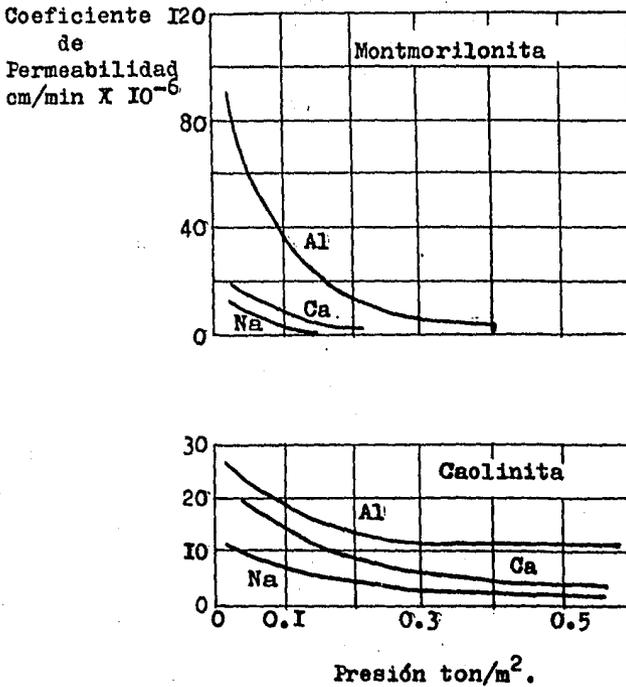


Fig. II.13. Efecto del catión intercambiable en la permeabilidad de la caolinita y montmorilonita bajo carga. (Samuels)

En la figura II.I3, se puede comprobar que el valor de la permeabilidad en arcillas, depende del tipo de catión intercambiable, dado que, tanto para la caolinita como para la montmorilonita la permeabilidad es menor cuando el catión intercambiable es de sodio que cuando es de aluminio.

Considerando que las arcillas expansivas están constituidas básicamente por montmorilonita, podemos decir que estas arcillas tienen una muy baja permeabilidad.

### II.2.7.- COMPRESIBILIDAD Y CONSOLIDACION.

Las figuras II.I4 a II.I7, muestran algunos resultados obtenidos por Samuels, quien con muestras con contenidos de agua iguales al límite líquido y con incrementos de carga desde 0 hasta 0.9 ton/m<sup>2</sup> dejando actuar cada incremento de carga hasta que tenga lugar la consolidación primaria y la consolidación secundaria se presente con una velocidad razonable.

Relación de vacíos.

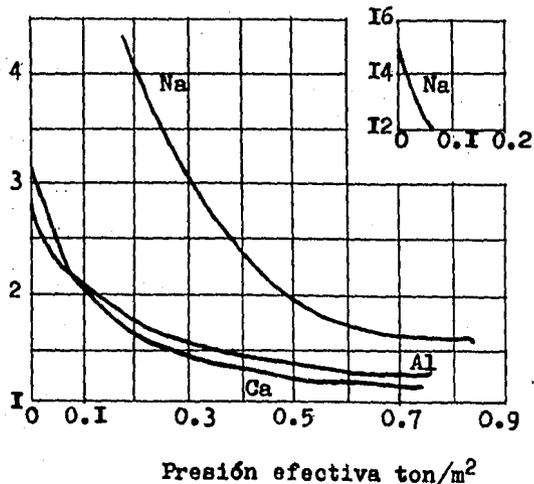


Fig. II.I4. Curvas de presión efectiva - Relación de vacíos para montmorilonitas (Samuels).

De la figura II.I4, se observa que para la montmorilonita - sódica, existe una gran reducción de volumen con la aplicación - de pequeñas presiones, menores que  $0.1 \text{ ton/m}^2$ , mientras que para mayores presiones las reducciones de volumen son más pequeñas. - Para las demás variedades de montmorilonita se observa un compor - tamiento semejante aunque no tan pronunciado.

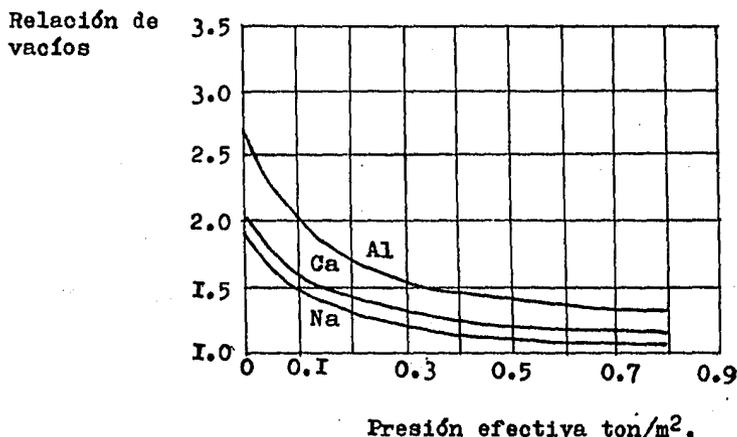


Fig. II.I5. Curvas de presión efectiva - Relación de vacíos para caolinitas. (Samuels).

Por lo que respecta a las caolinitas, la compresibilidad de éstas es mucho menor como puede observarse comparando las figuras II.I4 y II.I5. En esta última se ve que también a presiones menores de  $0.1 \text{ ton/m}^2$  la reducción de volumen es alta, tendiendo a disminuir la presión.

Lo anterior tiene una explicación que es, que en las arcillas montmoriloníticas en el límite líquido, la mayoría de las moléculas de agua se encuentran orientadas y solo una pequeña - parte es agua libre, que es la que con pequeñas presiones se desaloja, mientras que para desalojar el agua orientada, se necesitará una presión mayor. En el caso de las caolinitas hay menos

agua orientada y la mayor parte es agua libre, caso contrario al de las montmorilonitas, por lo que el agua será fácilmente removable y al aplicar una carga se tendrán inicialmente grandes variaciones de volumen, disminuyendo éstas al irse incrementando la presión.

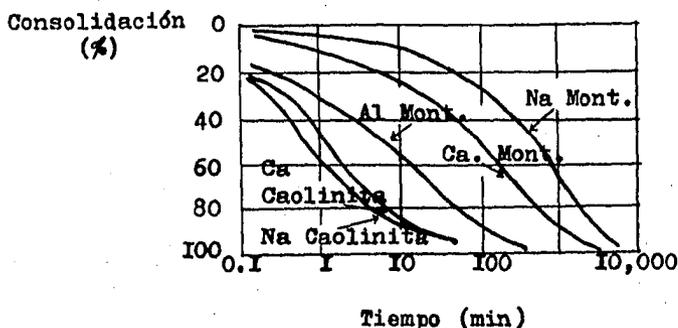


Fig. II.16. Curvas de consolidación de montmorilonitas y caolinitas con presiones de 0.4 a 0.8 ton/m<sup>2</sup>. (Samuels).

En la figura II.16, se observa que las montmorilonitas tienen un bajo porcentaje de consolidación inicial cuando el catión intercambiable es de sodio o de calcio. En el caso de las caolinitas dicho porcentaje de consolidación inicial es más alto.

En la figura II.17, se puede apreciar que al incrementar -- se las presiones en la montmorilonita el coeficiente de consolidación decrece para luego permanecer prácticamente constante. En el caso de las caolinitas el coeficiente de consolidación tiende a aumentar al incrementarse la presión.

El bajo porcentaje de consolidación inicial de las arcillas montmoriloníticas, se puede explicar como resultado de la lentitud con la que el agua orientada se rompe, a la resistencia entre partículas, así como a la baja permeabilidad y al tamaño de las mismas. Todo en conjunto, hará que el agua salga con más dificultad a pesar del incremento de presión.

Coefficiente de consolidación  
 $\text{cm}^2/\text{min.} \times 10^{-3}$

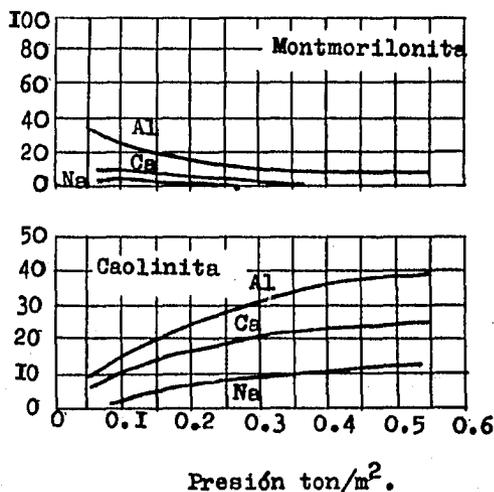


Fig. II.17. Curvas de coeficiente de consolidación - Presión efectiva. (Samuels).

En el caso de la caolinita, la pérdida de agua y la consolidación inicial es mayor que en la montmorilonita al principio de la aplicación de la carga, por lo que el coeficiente de consolidación se incrementa al aumentar la carga. Esto es debido a la mayor permeabilidad, al mayor tamaño de partícula y a la menor cantidad de agua orientada en comparación con la montmorilonita.

#### II.2.8.- ADSORCION DE AGUA Y EXPANSION.

En las figuras II.18 y II.19, se muestra la cantidad de adsorción de agua, para una serie de minerales arcillosos, para los cuales las muestras fueron secadas al aire, sin compactar y con material formado por partículas cuyo tamaño nominal es menor al de la malla 200.

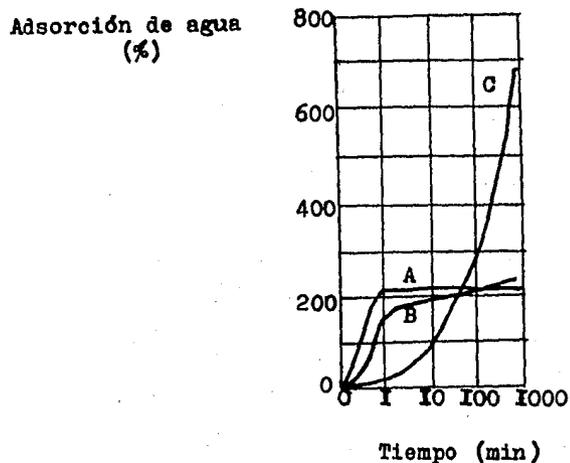


Fig. II.18 Curvas de adsorción de agua para atapulgita (A); Montmorillonita Cálcica (B); y Montmorillonita Sódica (C); - (White y Fichler).

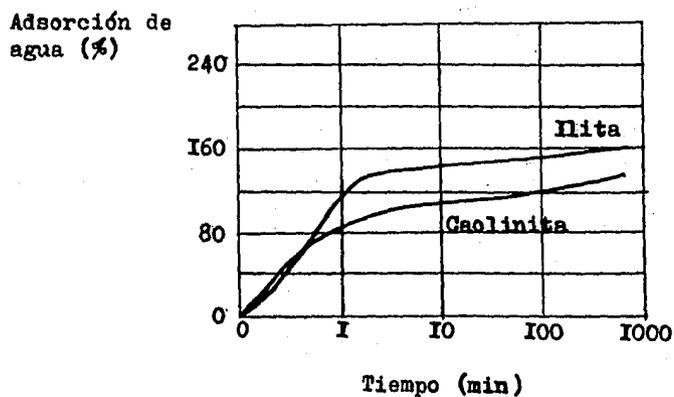


Fig. II.19. Curvas de adsorción para la illita y caolinita - (White y Fichler).

Por otra parte, se puede decir que para los principales minerales arcillosos, la cantidad de agua adsorbida está en el orden siguiente: Montmorilonita, Ilita y Caolinita.

Mielenz y King encontraron en sus investigaciones que la adsorción de agua de las arcillas, va acompañada de una expansión cuya magnitud varía dependiendo de la clase y cantidad de los minerales de arcilla presentes, sus iones intercambiables, su contenido electrolítico en su fase acuosa, la distribución del tamaño de sus partículas, así como la distribución y tamaño de vacíos, su estructura interna, su contenido de agua, la sobrecarga y tal vez otros factores.

Quizás el factor más importante que propicie la expansión, sea la clase de mineral presente en la arcilla. La tabla II.7, obtenida por Mielenz y King, demuestra que la expansión decrece en el siguiente orden: montmorilonita, ilita y caolinita. Esto mismo se reafirma con la figura II.20, donde se puede observar el porcentaje de expansión para la montmorilonita y para la caolinita.

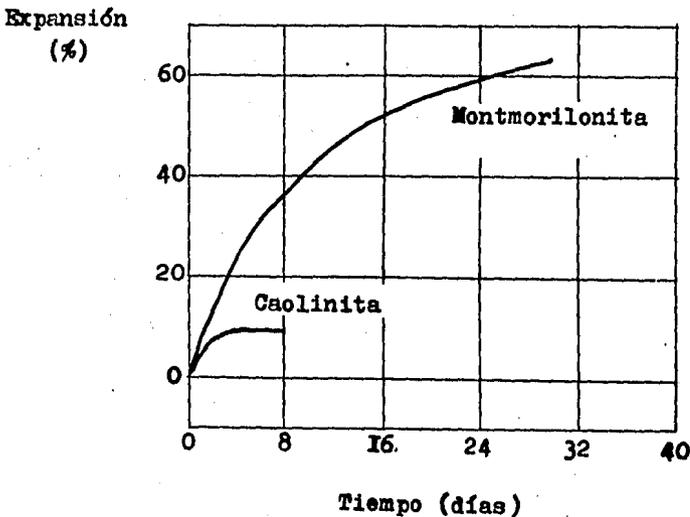


Fig. II.20. Porcentaje de expansión para montmorilonita sódica y caolinita. (Mielenz y King).

TABLA II.7.

Datos de expansión libre para minerales arcillosos en % (Mielenz y King).

MINERAL ARCILLOSO	EXPANSION LIBRE EN %
<b>Montmorilonita Cálcica.</b>	
Forest, Mississippi.....	I45
Wilson Creek Dam, Colo.....	95
Davis Dam, Arizona.....	45-85
Osage, Wyoming.....	I25
<b>Ilita:</b>	
Fithian, Illinois.....	II5-I20
Morris, Illinois.....	60
Tazewell, Virginia.....	I5
<b>Caolinita:</b>	
Mesa Alta, New México.....	5
Macon, Georgia.....	60
Langley, N. Carolina.....	20
Haloisita, Santa Rita, New México.....	70

Los mismos investigadores Mielenz y King, consideran que son dos los mecanismos involucrados en la expansión de las arcillas: (I) la relajación del esfuerzo efectivo debido al crecimiento de partículas y (2) una penetración osmótica de agua a los minerales de arcilla con una estructura propensa a la expansión. La gran expansión de las arcillas montmoriloníticas, es el resultado de la propiedad de este mineral de adsorber gruesas capas de agua entre todas las capas de silicatos, por lo que estas arcillas son las que tienen el potencial de expansión más alto.

### II.3.- METODOS DE IDENTIFICACION DE SUELOS EXPANSIVOS.

Quando se pretende realizar la estabilización de algún suelo es menester, identificar las características y propiedades de éste, ya que en base a estas se podrá seleccionar más adecuadamente el método y/o el material estabilizante.

Los métodos de identificación de suelos expansivos, consisten básicamente en la identificación del tipo de mineral del que está constituido el suelo o bien a través de criterios basados en sus propiedades índice.

#### III.3.I.- IDENTIFICACION DEL TIPO DE MINERAL.

Sabiendo que los suelos expansivos son aquellas arcillas -- constituidas por minerales de ilita y montmorilonita, si de alguna manera nosotros podemos conocer el tipo de minerales que en el suelo existen, sabremos entonces si el suelo es potencialmente expansivo o no. Lo anterior, puede lograrse por cualquiera de los siguientes métodos:

- a) Observación Directa.
- b) Microscopio Electrónico.
- c) Difracción de Rayos X.
- d) Espectometría con Rayos Infrarrojos.
- e) Análisis Químicos.

#### a) Observación Directa.

Sin lugar a dudas la observación directa, es el método de -- identificación más rápido, más sin embargo es el que más experiencia requiere, como una solución a este problema, algunos ingenieros australianos han desarrollado una metodología, la cual les -- permite inferir el tipo de mineral constitutivo del suelo en estudio y que consiste en lo siguiente:

- i) Observaciones generales del lugar, del perfil de los suelos, así como de los agrietamientos, los cuales -- son típicos en lugares donde existen suelos expansivos.
- ii) Apreciación de la textura del suelo la cual puede in

dicarnos la presencia de arenas o bien de limos o arcillas en el caso de tenerse una textura pastosa. Si se permite que el suelo se seque entre los dedos, el suelo arenoso no se adherirá a ellos, el limo se desprenderá fácilmente, mientras que la arcilla se adherirá fuertemente. Esto, es una manera rápida de identificar la existencia de arenas, limos o arcillas.

- iii) Inmersión del espécimen del suelo en agua de lluvia o destilada, para ello, se recomienda la "Prueba del Grumo", que consiste en colocar un pequeño grumo de suelo secado al aire y sumergirlo en agua destilada o de lluvia, observando su comportamiento después de la inmersión durante un lapso de 10 minutos. Con estas observaciones y con las tablas II.8, II.9, II.10 y de la figura II.21, es posible inferir para fines prácticos, el tipo de mineral, lo cual nos permitiría saber si se trata de un suelo expansivo o no.

Cuando se lleva a cabo una observación directa, no se debe olvidar, el realizar una inspección a las construcciones cercanas al lugar, si es que existen, a fin de conocer los daños ocasionados por estos suelos y que en determinado momento nos pueden ser de utilidad dependiendo de la magnitud de éstos.

#### b) Microscopio Electrónico.

El microscopio electrónico fué usado por primera vez en la identificación de minerales arcillosos, por Eitel en 1939. A partir de entonces, su empleo ha resultado de vital importancia - en la identificación de estos minerales, cuyo tamaño es menor de 2 micras, permitiendo distinguir el arreglo de las partículas de los diferentes minerales arcillosos y saber así, el mineral presente en el suelo.

El uso del microscopio electrónico resulta poco práctico en nuestro país por el poco conocimiento en el manejo y en la interpretación de los resultados.

#### c) Difracción de Rayos X.

Este método también es poco usado en México, y consiste en comparar las intensidades de las líneas de difracción de los -

TABLA II.8.

## Principales tipos de minerales.

Grupo	Minerales	Tamaño promedio	Características físicas principales.
Arena muy fina	Cuarzo	I micra	Abraasiva, sin cohesión.
Mica	Muscovita, biotita	I micra	Sin cohesión, se intemperiza fácilmente, compactable.
Carbonato	Calcita, dolomita	Variable	Se pulveriza fácilmente.
Sulfato	Yeso	I micra	Ataca al cemento.
Alófono	Aluminosilicatos amorfos, atapulgita, alúmina y sílica hidratadas.	Variable	Alta relación de vacíos, alta plasticidad.
Caolín	Caolinita y haloysita	I micra	No expansivo, baja plasticidad, baja cohesión.
Illita	Illita y micas parcialmente degradadas	0.1 micra	Expansiva, plasticidad media, baja permeabilidad.
Montmorilonita	Montmorilonita y bentonita	0.01 micra	Altamente expansiva, muy plástica, permeabilidad extremadamente baja.
Clorita	Clorita, Vermiculita	0.1 micra	Expansión baja, resistencia al cortante baja.
Materia orgánica	Presencia de ácido húmico y humatos	Variable	Alta permeabilidad, difícilmente compactable, se puede degradar rápidamente por oxidación.

TABLA II.9.

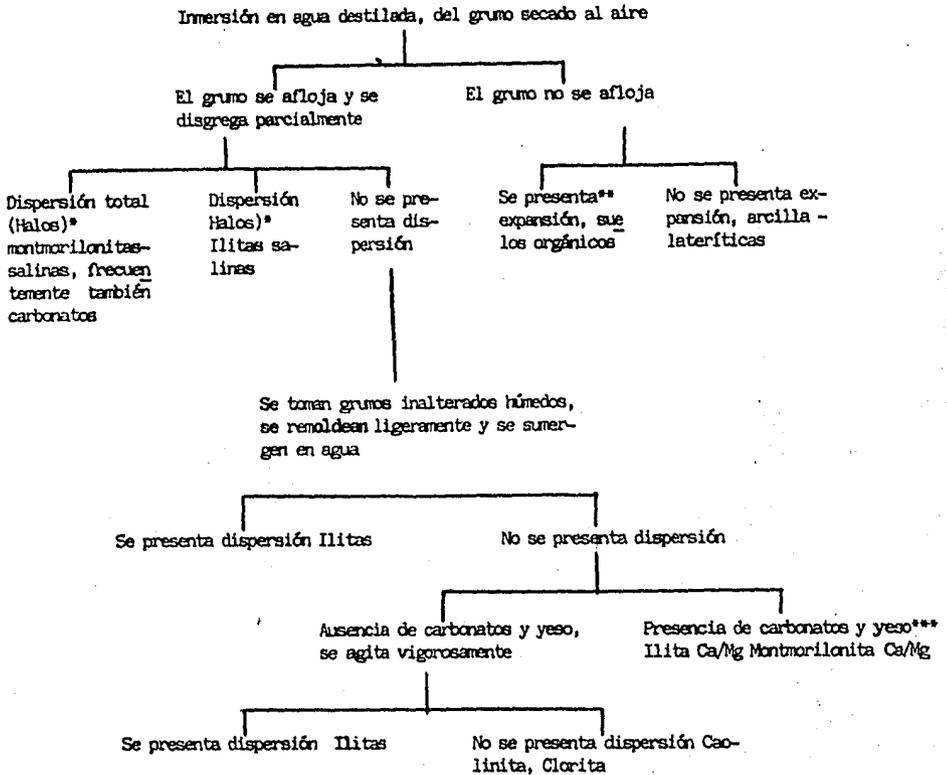
## Inferencias de la observación visual.

Observaciones	Componentes arcillosos dominantes.
Aguas turbias de coloraciones amarillo-café a rojo-café.	Montmorilonita, ilitas y salinidad de suelos.
Aguas claras.	Calcio, magnesio o suelo rico en hierro, suelos altamente ácidos, arenas.
Aguas claras con tonos azules.	Caolines no salinos.
Zanjas de erosión o tubificaciones en el suelo natural.	Arcillas salinas, usualmente montmorilonitas.
Ligeras erosiones o tubificaciones en el suelo natural.	Caolinitas.
Desprendimientos de suelos.	Caolinitas y cloritas.
Microrelieves superficiales.	Montmorilonitas.
Formaciones rocosas graníticas.	Caolinitas, micas.
Formaciones rocosas basálticas topografía.	Montmorilonitas.
Formaciones rocosas basálticas, topografía.	Caolinitas.
Formaciones rocosas de areniscas.	Caolinitas.
Formaciones rocosas de lutitas y pizarras.	Montmorilonitas o ilitas, usualmente con salinidad de suelos.
Formaciones rocosas calizas.	Montmorilonitas alcalinas, y cloritas con propiedades muy variables.
Formaciones recientes de piroclásticos.	Alófanos.

TABLA II.IO.

## Inferencias de la observación del perfil de suelos.

Arcillas moteadas o jaspeadas, con coloraciones rojo, naranja y blanco.	Caolinitas.
Arcillas moteadas o jaspeadas, con coloraciones amarillo, naranja y gris.	Montmorilonitas.
Arcillas gris oscuro y negras.	Montmorilonitas.
Arcillas café o café rojizo.	Illitas con algo de Montmorilonita.
Arcillas gris claro o blancas.	Caolinitas y bauxitas.
Partículas pequeñas de alta refracción (micas)	Suelos micáceos.
Cristales pequeños, fácilmente disgregables.	Suelos ricos en yeso o zeolitas.
Nódulos suaves, diseminados, solubles en	Carbonatos.
Nódulo duros, café rojizo.	Hierro, lateritas.
Agrietamiento intenso, con grietas amplias, profundas y con espaciamentos de 5 a 6 cm.	Illitas ricas en calca y montmorilonitas.
Igual al anterior pero con espaciamento en las grietas hasta de 30 cm. o más.	Illitas.
Suelos disgregables de textura abierta con cantidades apreciables de arcillas.	Suelos usualmente asociados con carbonatos, alófanos, o caolín, pero nunca montmorilonita y rara vez illita.
Suelos disgregables de textura abierta con cantidades apreciables de arcilla, de color negro.	Suelos orgánicos, turba.
Suelos disgregables de textura abierta con bajo contenido de arcilla.	Carbonatos, limos y arena.
Suelos que presentan una apariencia rugosa en la superficie expuesta al intemperismo.	Montmorilonitas con salinidad de suelos.
Horizontes de suelos blancuzcos, de espesores relativamente pequeños y cerca de la superficie (hasta 60 cm. de la superficie).	Arriba del horizonte blancuzco se tienen limos finos, y abajo arcilla dispersa. (En Australia).



\* La dispersión se detecta mediante la formación de halos nebulosos finos alrededor de cada grumo, fácilmente visibles contra un fondo oscuro, mientras más pronunciados sean los halos, más alta será la dispersión. El asentamiento del suelo en el líquido que permanece claro durante menos de 10 minutos será un signo de la ausencia de dispersión.

\*\* Si el grumo no está bien secado al aire al hacer la primera inmersión, el esquema sigue siendo válido, pero en esta categoría estarán contenidas las illitas no salinas y las montmorilonitas, así como los suelos orgánicos.

\*\*\* Si no se reconoce fácilmente la presencia de carbonatos, ésta se puede verificar mediante la efervescencia del suelo al colocar una gota de ácido en éste.

Fig. II.21. Esquema de la prueba de inmersión del grumo en agua.

diferentes minerales, con las intensidades de la substancia catión, con lo que en base a la difracción se puede conocer también la presencia de ilitas o montmorilonitas en el suelo.

d) Espectometría con Rayos Infrarrojos.

La espectometría con rayos infrarrojos es semejante a la difracción con rayos X, desde el punto de vista de la comparación que se hace entre el color del haz de luz del suelo en estudio y la coloración típica ya establecida de cada mineral.

e) Análisis Químicos.

Cuando se quiere conocer la existencia de minerales con características de expansibilidad, también es posible recurrir a un análisis químico; por ejemplo, la existencia en un suelo de óxido de potasio ( $K_2O$ ), sugiere la presencia de ilita, o bien una capacidad de intercambio catiónico del orden de 100 meq por cada 100 g para componentes inorgánicos indicaría la presencia de montmorilonita. (meq = miliequivalentes, unidad en que se mide la capacidad de intercambio catiónico).

Es conveniente señalar, que la identificación de los minerales que forman un suelo por medio del microscopio electrónico, - por difracción de rayos X, por espectometría con rayos infrarrojos o bien por medio de un análisis químico, si bien es cierto - que disminuyen la incertidumbre de la composición mineralógica de un suelo, a la fecha y para los fines de ingeniería que no sean de investigación, resultan poco prácticos en nuestra República. - Es así por lo que para identificar un suelo expansivo para fines prácticos se hace a través de ciertas propiedades índice.

### II.3.2.- IDENTIFICACION A TRAVES DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO TRADICIONALES.

Otra manera de saber si un suelo es potencialmente expansivo, es realizando pruebas de límites de consistencia, de expansión libre así como conociendo el contenido de finos (partículas menores a 2 micras), ya que en base a las pruebas de laboratorio tradicionales, existen criterios para identificar un suelo expansivo. Entre estos criterios se pueden mencionar los siguientes:

a) Criterio de W. G. Holtz.

b) Criterio de Skempton.

- c) Criterio de Altmeyer.
- d) Criterio de U.S.B.R.
- e) Criterio de Mc. Dowell.
- f) Criterio de Seed.

a) Criterio de W. G. Holtz.

Este criterio toma en cuenta el límite de contracción, el índice de plasticidad, el porcentaje de partículas menores que una micra, o así como el grado de expansión, que es el porcentaje de expansión de una muestra de suelo secada al aire y colocada en un consolidómetro, anegada en agua y a una presión vertical de  $0.07 \text{ Kg/cm}^2$  ( $1 \text{ lb/plg}^2$ ); con lo anterior Holtz define de una manera cualitativa el potencial de expansión (Tabla II.II).

TABLA II.II.

Clasificación de suelos expansivos según Holtz y Gibbs.

Potencial de expansión	Expansión en consolidómetro, bajo presión vertical de $0.07 \text{ kg/cm}^2$	Límite de contracción	Índice de plasticidad	Porcentaje de partículas menores que una micra	E. L.
	%	%	%	%	%
Muy alto	> 30	< 10	> 32	> 37	> 100
Alto	20-30	6-12	23-45	18-37	> 100
Medio	10-20	8-18	12-34	12-27	50-100
Bajo	< 10	> 13	< 20	< 17	< 50

De la tabla anterior, se puede ver que un suelo con potencial de expansión alto, puede llegar a tener una expansión libre (E.L), mayor del 100%, definiéndose ésta como:

$$E.L = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100$$

donde: E.L: Expansión libre del suelo en porcentaje.

V: Volumen de la muestra de material que pase la malla No. 40 después de introducir la probeta graduada de 100 cm<sup>3</sup> llena de agua.

V<sub>0</sub>: Volumen de la muestra antes de introducirla en el agua, igual a 10 cm<sup>3</sup>.

Según este criterio, se observa que al aumentar el índice plástico y el porcentaje de partículas menores de 1 micra aumenta el potencial de expansión, es decir, las arcillas expansivas se caracterizan por tener un valor alto de índice plástico.

#### b) Criterio de Skempton.

Considerando la actividad de la arcilla, Skempton propuso la siguiente clasificación (Tabla II.I2).

TABLA II.I2.

Clasificación de los suelos finos según su tendencia a la expansión (Skempton).

Actividad	Categoría del suelo
Menor que 0.75	Suelo inactivo
0.75-1.25	Suelo normal
Mayor que 1.25	Suelo activo.

Tomando en cuenta esta clasificación y lo mencionado en párrafos anteriores, las montmorilonitas resultan ser las arcillas más activas, las ilitas las normales y las caolinitas las inactivas.

c) Criterio de Altmeyer.

En base al límite de contracción, Altmeyer califica cualitativamente el grado de expansibilidad, de donde se deduce - que a límites de contracción bajos, el grado de expansibilidad es crítico. (Tabla II.I3).

TABLA II.I3.

Criterio de Altmeyer.

LIMITE DE CONTRACCION (L. C.)	GRADO DE EXPANSIBILIDAD
$< I0$	CRITICO
$I0 - I2$	MARGINAL
$> I2$	NO CRITICO

d) Criterio de U.S.B.R.

Según el U.S.B.R., un suelo es estable, colapsible - o expansivo en función de su límite líquido, su peso volumétrico seco en el lugar y de su densidad de sólidos. (Fig. II.2I).

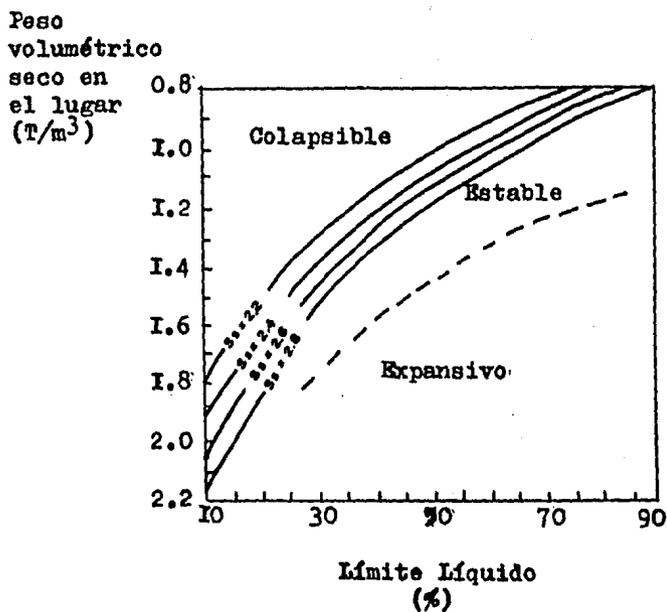


Fig. II.22. Clasificación según U.S.B.R. para suelos expansivos y colapsibles.

e) Criterio de Mc. Dowell.

Mc. Dowell, define un porcentaje de cambio volumétrico en la muestra de suelo sujeta a absorción capilar con una presión de cámara de  $0.07 \text{ Kg/cm}^2$  ( $1 \text{ lb/plg}^2$ ), en una cámara triaxial. El tiempo que se dejan los especímenes sujetos a la absorción capilar depende de la plasticidad de la arcilla y se recomienda un número de días igual al índice plástico, cuando éste es mayor de 15.

Mc. Dowell, encontró que el cambio volumétrico para unas condiciones iniciales dadas, puede correlacionarse con el Índice de Plasticidad, con lo que se tiene otro criterio de identificación. (Fig. II.23).

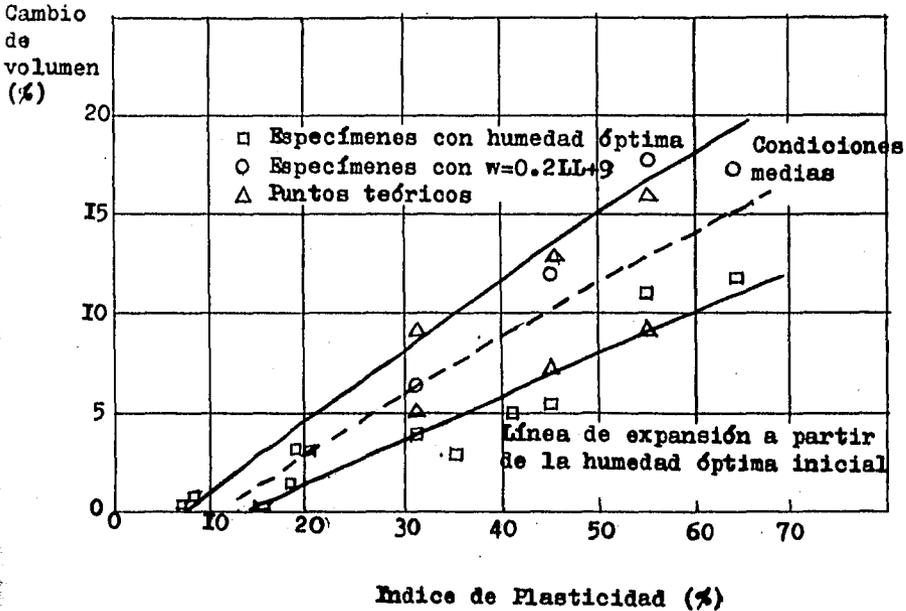


Fig. II.23. Correlación entre la expansión volumétrica y el índice de plasticidad, según Mc. Dowell.

#### f) Criterio de Seed.

Seed por su parte, definió el potencial de expansión como el porcentaje de expansión vertical de una muestra compactada, con su contenido de agua óptimo y su peso volumétrico máximo cuando se coloca en un consolidómetro y se anega en agua bajo una presión vertical de  $0.07 \text{ Kg/cm}^2$ .

El potencial de expansión lo expresa como:

$$P.E = K C^x$$

donde:

P.E = Potencial de Expansión.

C = Porcentaje de partículas menores que 2 micras.

x = Número que depende del tipo de arcilla.

K = Factor que depende del tipo de los minerales de arcilla.

Seed utilizó un valor de  $x = 3.44$   
y un valor de  $K = 3.6 \times 10^{-5} \times A^{2.44}$ .

donde A es la actividad de la arcilla según Skempton.

Como A depende del índice de plasticidad y del porcentaje de partículas menores que 2 micras, Seed llegó a relacionar el índice de plasticidad con el potencial de expansión y estableció una clasificación de suelos en función de su potencial de expansión (Tablas II.I4 y II.I5).

TABLA II.I4.

Correlación entre el Potencial de Expansión y el Índice de Plasticidad, según Seed y sus colaboradores.

I.P. %	Potencial de expansión %
10	0.4- 1.5
20	2.2- 3.8
30	5.7-12.2
40	11.8-25.0
50	20.1-42.6

TABLA II.15.

Clasificación de suelos según su Potencial de Expansión.(Seed).

Característica de expansión de los suelos	Potencial de expansión %
Baja	0- 1.5
Media	1.5- 5.0
Alta	5.0-25.0
Muy alta	> 25.0

C A P I T U L O   I I I  
 RESUMEN DE LOS TIPOS  
 DE ESTABILIZACION

Vistas ya las principales propiedades y características de los suelos expansivos, haremos a continuación una breve descripción de las diferentes maneras de estabilizar suelos.

III.I.- ESTABILIZACION MECANICA.

Los dos métodos fundamentales de estabilización mecánica son la compactación y el mejoramiento de un suelo a través de la mezcla con otro u otros de mejor calidad y resistencia.

III.I.I.- COMPACTACION.

Conociendo que un suelo es un conjunto de partículas sólidas, aire y agua, la compactación, por tanto, puede definirse como la expulsión del aire y del agua en exceso del conjunto, dicho de otra manera, la compactación en la reducción de vacíos de un suelo.

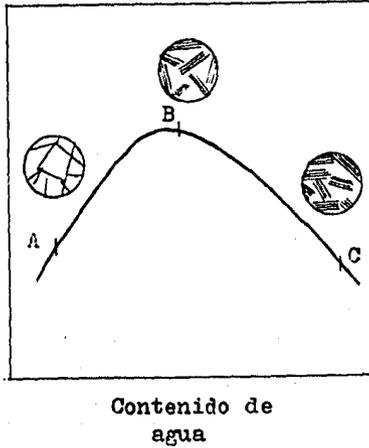
La compactación de un suelo puede lograrse mediante vibración, por impacto o por presión, dependiendo en forma determinante de las características del suelo a compactar.

Refiriéndonos a la compactación de suelos cohesivos cuando estos suelos se compactan con humedades inferiores a la óptima se forma una estructura heterogénea mientras que cuando se hace con humedades altas, se forma una estructura dispersa con las partículas escamosas alineadas casi paralelamente.

En el caso de arcillas, el emplear la compactación como un método para mejorar sus características de calidad y resistencia no es recomendable ya que en las figuras III.I(a) y III.I(b), se observa como disminuye la resistencia al buscar altas compactaciones aumentando el contenido de agua. El problema se agrava si se trata de arcillas expansivas, ya que en este caso, la expansión es mayor mientras mayor sea el grado de compactación.

En la figura III.2, se muestran las curvas esfuerzo-deformación en función del contenido de agua, se observa que con humedades inferiores a la óptima la falla en compresión simple es frágil, mientras que con humedades superiores la falla es plástica.-

Peso Volumétrico Seco



Resistencia a la Compresión Simple

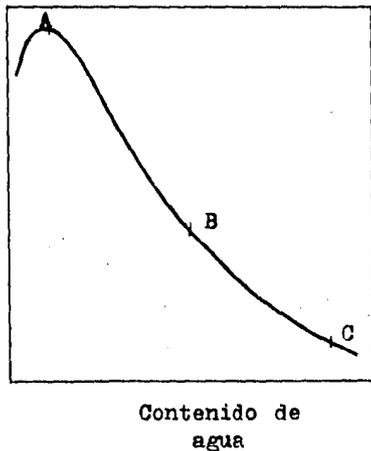


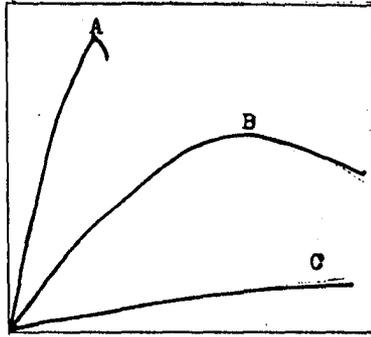
Fig. III.I.(a) Efecto de la compactación sobre la estructura de un suelo arcilloso.

Fig. III.I.(b) Efecto de la compactación en la resistencia a la compresión simple de un suelo arcilloso.

Lo anterior es consecuencia de la estructura heterogénea o dispersa que se forma en cada caso.

En la figura III.3 se puede observar que el valor máximo de la permeabilidad en arcillas, se alcanza al compactarlas con la humedad óptima.

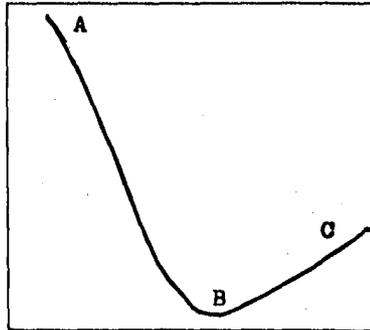
Esfuerzo



Deformación

Fig. III.2. Curvas esfuerzo - deformación típicas para diferentes contenidos de agua en un suelo arcilloso. (A, B y C - se refieren a la figura III.I. (a).)

Permeabilidad



Contenido de  
agua

Fig. III.3. Variación de la permeabilidad con el contenido - de agua de compactación. (A, B y C se refieren a la figura - III.I. (a).)

Por consiguiente este método de estabilización es recomendable solo en el caso de suelos que contengan cierto porcentaje de suelos granulares, en los cuales al aumentar el grado de compactación si se logra un incremento en su resistencia.

### III.I.2.- MEZCLA DE SUELOS.

Otro proceso de mejoramiento de suelos consiste en mezclar - dos o más suelos naturales, para obtener un material superior en cuanto a sus características de calidad y resistencia.

Quando se trata de diseñar mezclas de suelos, son dos los -- factores principales a considerar, que son la granulometría de la fracción gruesa así como la plasticidad de la fracción fina.

Cada uno de los componentes de una mezcla tiene una función, la fracción gruesa da a la mezcla la fricción interna y reduce la compresibilidad e idealmente consiste en partículas fuertes y angulosas bien graduadas, mientras que la fracción fina proporciona la cohesión y la impermeabilidad.

El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, ya que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar produciendo superficies muy rugosas. La presencia de contenidos importantes de materiales finos menores que la malla 200, puede hacer difícil el lograr una buena resistencia y reducir la compresibilidad, sobre todo si se tienen arcillas de alta plasticidad y expansivas.

En relación a la mezcla de suelos como estabilizantes de arcillas tendiendo a modificar las características de calidad y resistencia, se ha visto que agregando arenas finas o bien finos menos activos se logra reducir la plasticidad y la compresibilidad así como aumentar la resistencia.

### III.I.3.- SOBRECARGA.

Otro método que puede considerarse mecánico para estabilizar suelos expansivos es el que consiste en sobrecargar el terreno aprovechando al máximo su capacidad de carga, de manera que se logre neutralizar la expansión. El problema estriba que en muchas ocasiones y en el caso de pavimentos este criterio podría llevar

a la necesidad de proyectar pavimentos de gran espesor, lo cual - es muy costoso, por lo que este método puede resultar más ventajoso en el caso de cimentaciones.

### III.2. ESTABILIZACION QUIMICA.

Dentro de la estabilización química, se encuentran las estabilizaciones más utilizadas en la práctica común como lo son el empleo de cemento, asfalto y cal, los cuales al añadirse al suelo, provocan algunas reacciones químicas que hacen que se modifiquen satisfactoriamente las propiedades de resistencia y deformación.

#### III.2.1. ESTABILIZACION CON CEMENTO.

El uso de cemento como estabilizante parece ser que se remonta a 1917, cuando Amies patentó un primer procedimiento de mejora de suelos con cemento, a partir de entonces su empleo se ha ido acrecentando cada vez más, empleándose con buenos resultados en suelos arcillosos.

El proceso químico que tiene lugar entre el suelo arcilloso y el cemento se describe a grandes rasgos enseguida.

En primer lugar se produce un efecto primario en el que la hidratación del cemento produce silicatos y aluminatos hidratados de calcio, hidróxido de calcio e iones de calcio, que elevan la concentración de electrolitos de agua intersticial aumentando su pH. A continuación, se presenta un fenómeno secundario consistente en dos fases. En la primera, se produce un intercambio iónico entre los iones de calcio y otros absorbidos por los minerales de arcilla, lo cual tiende a flocularla. En la segunda fase se presentan reacciones químicas puzolánicas entre la cal y los elementos que componen los cristales de arcilla. Los elementos sílicos y aluminicos reaccionan con los componentes cálcicos para formar elementos cementantes; el resultado final es la transformación de una estructura arcillosa originalmente floculada y vaporosa en un agregado resistente. En esta misma segunda fase, el hidróxido de calcio que se va consumiendo puede reponerse por la cal que se libera durante el proceso primario de hidratación del cemento. En las superficies expuestas al aire, el calcio se carbonata, con el correspondiente efecto de cementación adicional.

Se sabe que las arcillas montmoriloníticas son las más reactivas ante el cemento, seguidas por las illitas y de las caolinitas. Sin embargo, el aumento de resistencia del material ante la estabilización es inversamente proporcional a la reactividad de la arcilla.

El grado de pulverización de las arcillas se refleja en la reactividad, que aumenta con aquel; en montmorilonitas e illitas - la incorporación previa al cemento de pequeños porcentajes de cal, del orden del 1% al 2%, favorece la pulverización de la arcilla y facilita la incorporación posterior del cemento.

Con relación al cambio en las propiedades de los suelos arcillosos al añadirseles cemento, se ha comprobado que la resistencia y la capacidad de carga aumentan, como puede verse en la fig. III.4, de donde se observa que la resistencia a la compresión simple aumenta al incrementarse el contenido de cemento, esta variación es prácticamente lineal y la pendiente depende del tipo de suelo. Por lo que respecta a la permeabilidad, ésta se ve disminuida al igual que la expansibilidad de ciertas arcillas. Así mismo, se ha visto que la estabilización con cemento de arcillas, disminuye la acción nociva del intemperismo.

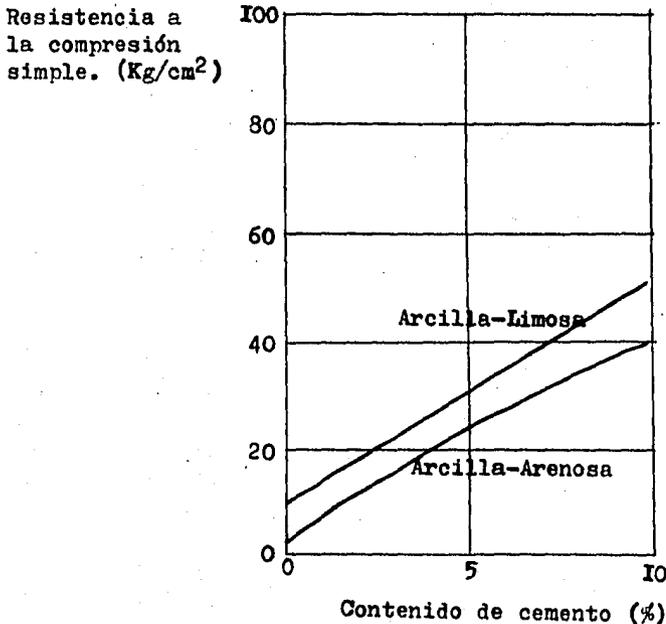


Fig. III.4. Variación de la resistencia a la compresión simple de arcillas estabilizadas con cemento.

### III.2.2.- ESTABILIZACION CON CAL.

La estabilización de suelos con cal, parece ser más antigua que con cemento y se diferencia de esta en dos aspectos principales. En primer lugar la cal ha tenido una mayor aceptación para la estabilización de suelos arcillosos ya que en éstos se han obtenido buenos resultados con un costo más bajo que con cemento. - En segundo lugar, la cal puede emplearse también como un pre-tratamiento sin satisfacer necesariamente todos los requisitos de una estabilización definitiva como es el caso del cemento.

El efecto básico de la cal es la formación de silicatos de calcio producidos por la acción química de la cal sobre los minerales de arcilla para formar compuestos cementadores. Cuando se lleva a cabo una estabilización con cal se presentan 2 tipos de reacciones químicas entre la cal y el suelo. La primera se presenta en forma inmediata y consiste en una fuerte captación de iones de calcio por las partículas de suelo. La segunda es la reacción cementante, misma que se atribuye a una interrelación entre los iones de calcio de la cal y los componentes aluminicos y silicatos de los suelos, llegándose a formar de este modo los silicatos de calcio. Cabe señalar que la existencia de esta reacción es muy dependiente del tipo de suelo.

La cal como ya se ha mencionado tiene poco efecto en suelos muy orgánicos o en suelos sin arcilla. Se ha visto que tiene su máximo efecto en las gravas arcillosas, en las que puede producir mezclas más resistentes que las que se obtendrían con cemento.

Quando la cal se emplea en arcillas, las hace más trabajables y fáciles de compactar, por lo que frecuentemente se usa como pre-tratamiento a una estabilización con cemento además de que también se puede utilizar como estabilizante definitivo. También se ha comprobado que el efecto de la cal es mucho mayor en las arcillas montmoriloníticas que en las caolíníticas. La cal al emplearse en las arcillas muy plásticas disminuye el índice de plasticidad, aumenta la resistencia a la compresión simple al mismo tiempo que en el caso de arcillas expansivas disminuye la expansión. Lo anterior se muestra en las figuras III.5, III.6 y III.7.

Otra característica importante de las arcillas estabilizadas con cal, es que el V.R.S. puede aumentarse hasta en más del 100%, con el 3% de cal como en el caso de la arcilla de Queretaro Gro., (Tabla III.I).

Considerando todo lo anterior se podría decir que la cal es

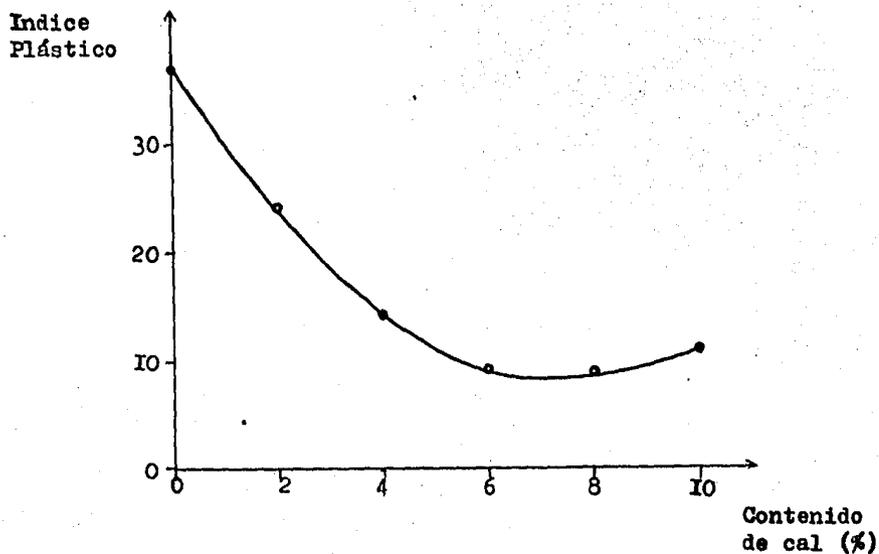


Fig. III.5. Variación del índice plástico con el contenido de cal para la arcilla de la Cd. de Queretaro Qro.

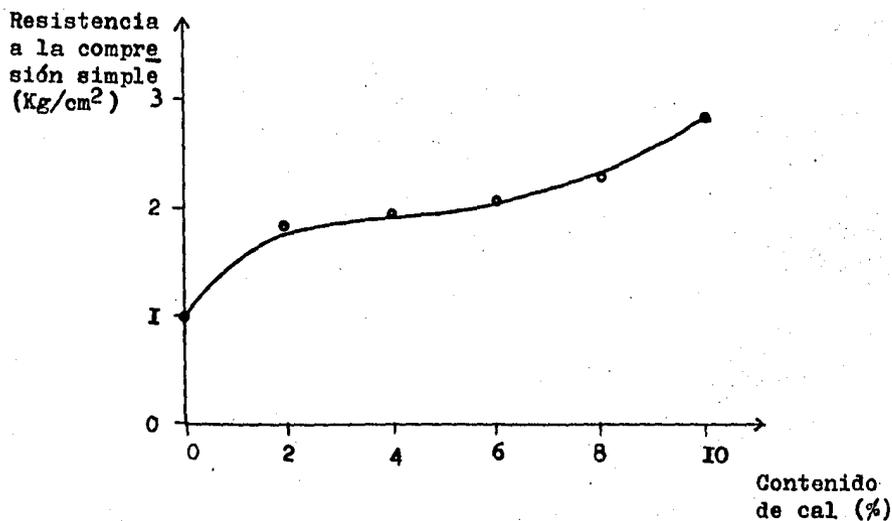


Fig. III.6. Variación de la resistencia a la compresión simple con el contenido de cal.

un efectivo estabilizante de arcillas, sin embargo hace falta investigar si su efectividad se conserva con el tiempo.

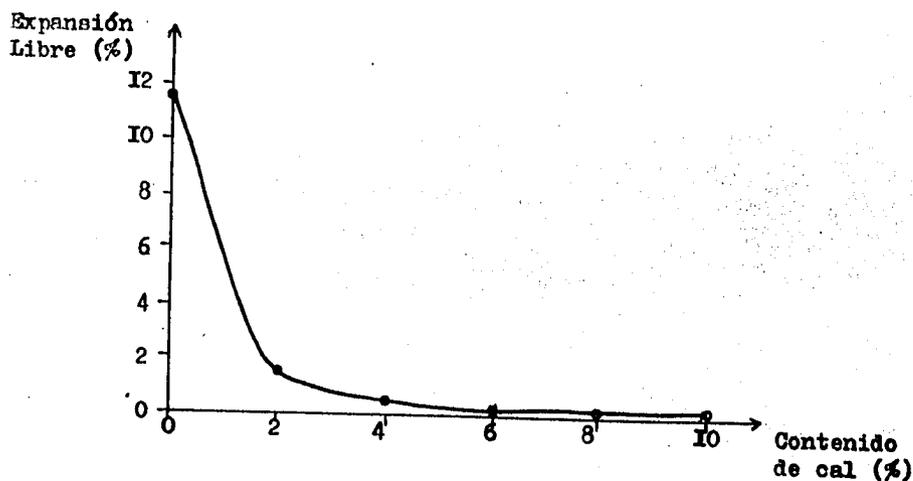


Fig. III.7. Variación de la expansión libre con el contenido de cal para la arcilla de la Cd. de Queretaro Qro.

TABLA III.I.

Valores del V.R.S. con contenidos de cal.

% de Cal en Peso	V.R.S.(%)
0	2
2	33
4	125
6	221
8	234
10	208

### III.2.3. ESTABILIZACION CON ASFALTO.

El mejoramiento de un suelo mediante productos asfálticos ha resultado una buena técnica empleada frecuentemente. Dentro de la gran variedad de estos productos que existe, las emulsiones y los asfaltos rebajados son los productos más comunmente usados.

En general, todos los tipos de suelo responden a la estabilización con asfalto, incluyendo las arcillas compresibles y activas, sin embargo, los mejores resultados se obtienen con arena y gravas arenosas.

Los efectos estabilizantes del asfalto se presentan a través de dos mecanismos. El primero consiste en una ligadura entre las partículas a través del asfalto, lo que da una cohesión al conjunto; el segundo es la protección del suelo contra la acción del agua. Puede decirse que el primer mecanismo es importante en suelos granulares, mientras que el segundo lo es para los suelos -- cohesivos.

Refiriéndonos al mejoramiento en el comportamiento de los suelos finos al mezclarse con asfalto, se ha visto que la resistencia a la compresión simple permanece prácticamente constante -- al incrementarse el contenido de asfalto como puede verse en la figura III.8, sin embargo, en la misma figura puede observarse -- que cuando la mezcla es re-humedecida, la resistencia si aumenta con el contenido de asfalto con lo cual queda demostrado el efecto estabilizante ante el agua del asfalto en suelos finos.

Con relación al V.R.S., este al igual que el valor de la resistencia a la compresión simple, se ha visto que aumenta con el contenido de asfalto en presencia de agua.

Se debe hacer notar que el aumentar indiscriminadamente el contenido de asfalto en los suelos finos puede resultar inconveniente, dado que los solventes del asfalto rebajado o el agua de las emulsiones, hacen crecer demasiado la fase líquida de la mezcla, volviéndose demasiado plástica y poco resistente.

De los tres estabilizantes mencionados hasta aquí, el que presenta mayores ventajas por su costo y resultados para su aplicación en suelos expansivos es la cal, no olvidándonos que aún no se tienen resultados para mediano y largo plazo.

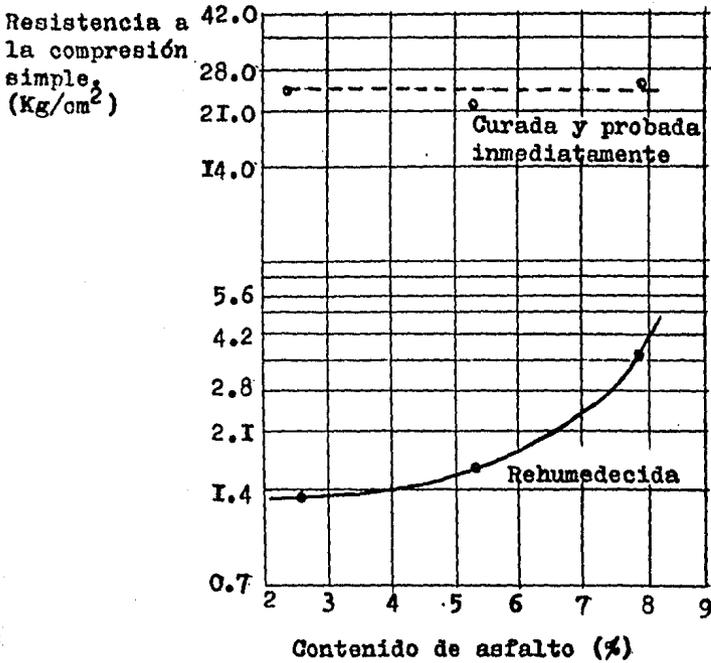


Fig. III.8. Efecto del contenido de asfalto en la resistencia a la compresión simple de especímenes del limo arcilloso, estabilizados con emulsión.

Existen otros estabilizantes químicos como los ácidos y sales, de los cuales se tiene poca información de su uso. Caso especial por se objeto del presente trabajo son las sales las cuales se tratarán en el capítulo siguiente.

### III.3.- ESTABILIZACION POR SUBDRENAJE.

La estabilización por subdrenaje tiene la finalidad de reducir al máximo los cambios de contenido de agua del suelo, lo cual es lo que origina la expansión de algunos suelos arcillosos.

Los procedimientos más comunes para mantener la humedad de los suelos dentro de un rango determinado, consisten esencialmente en la instalación de barreras impermeables con sistemas de subdrenaje adecuados, así como el control de la cobertura vegetal.

Las barreras horizontales o verticales se emplean por lo general alrededor del perímetro del pavimento.

Quando se decide este tipo de solución para controlar la humedad del suelo expansivo en los pavimentos debe tenerse en cuenta que la mayor parte de los daños serios en los pavimentos contruidos sobre arcillas expansivas ocurren por cambios de contenido de agua en las partes laterales de los terraplenes por lo que las obras de subdrenaje deberán proyectarse para controlar sobre todo estas zonas.

Una de las maneras de combatir también la expansión de las arcillas es evitar que tengan cambios de humedad, lo cual se puede lograr cubriendo las arcillas expansivas con membranas asfálticas las cuales actúan como impermeables, sin embargo el problema de estas membranas es que requieren continuos trabajos de mantenimiento, ya que una pequeña fisura sería suficiente para propiciar el flujo de agua hacia la arcilla.

### III.4.- OTROS METODOS DE ESTABILIZACION.

Otros métodos susceptibles de aplicarse a las arcillas expansivas lo son la estabilización térmica y la electrólisis.

La estabilización térmica consiste en aplicar calor al suelo ya sea por llama directa en su superficie o por circulación de gas calentado. En el primer caso se abren en el suelo 2 agujeros inclinados e intercomunicados en un punto donde se provoca la combustión; un agujero es para la introducción del combustible, el otro para la salida de gases. Cuando la estabilización se lleva a cabo por la circulación de gas se practica un agujero en el suelo al fondo del cual se forma una cámara de combustión, cuya temperatura se controla por sobrepresión, el calentamiento del suelo se realiza al paso del aire caliente comprimido a través de sus poros.

El resultado de este método es que al calcinar la arcilla, ésta alcanza una gran resistencia y a temperatura suficiente el proceso es irreversible lo cual se logra a 900°C.

Sin embargo y aunque en la práctica resulta suficiente llegar a la temperatura en la que la rehidratación de la arcilla se torne imposible, (entre los 200 y 400°C), este método a pesar de ser muy útil en el caso de las arcillas expansivas, a la fecha es muy costoso y poco práctico dadas las temperaturas que hay que alcanzar.

La electrólisis es otro de los métodos susceptibles de emplearse con fines estabilizantes. Consiste en un intercambio catiónico producido por una corriente eléctrica aplicada a la masa de suelo. Los cationes de aluminio se desprenden de un electrodo positivo de aluminio y emigran hacia el electrodo negativo efectuándose durante el recorrido de los cationes de aluminio el intercambio catiónico en el suelo. Al mismo tiempo el agua contenida en el suelo emigra al electrodo negativo estableciéndose de este modo también un sistema de drenaje.

La desventaja de este método estriba en que para lograr una estabilización definitiva mediante el intercambio catiónico se requiere demasiado tiempo, por lo que resulta poco práctico y muy costoso. Sin embargo, la electrólisis se ha empleado con bastante éxito como un método de drenaje en excavaciones.

## C A P I T U L O   I V

### ESTABILIZACION CON SALES

Como ya se mencionó al principio de este trabajo, las sales no han tenido una aplicación práctica abundante como material estabilizante de suelos, dado que las investigaciones realizadas no son muchas en comparación con las realizadas con la cal, el cemento y el asfalto, además de la poca difusión que han tenido.

En la actualidad, existe una gran incertidumbre en cuanto a las variaciones que puedan sufrir las propiedades mecánicas de los suelos al mezclarse con sales, dado que los resultados con que se cuentan no son del todo consistentes, es decir, existen discrepancias entre las investigaciones realizadas.

#### IV.I.- TIPOS DE SALES.

Las sales químicamente se forman mediante un proceso de neutralización de un ácido con una base.

Cuando las sales no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno ( $H^+$ ) ni básicos de hidroxilo ( $OH^-$ ) se denominan sales neutras, tales como el cloruro de sodio ( $NaCl$ ), cloruro de calcio ( $CaCl_2$ ) o cloruro de potasio ( $KCl$ ). Existen también sales que tienen exceso de iones de hidrógeno, a las que se les llama sales ácidas, así como sales que contienen exceso de iones hidroxilo, a las cuales se les designa como sales básicas.

Entre las sales, las que han sido más estudiadas son el cloruro de sodio, el cloruro de calcio y silicato de sodio.

Es de especial interés la estabilización con cloruro de sodio, ya que con esta sal se realizaron pruebas de laboratorio, a fin de saber si esta sal es efectiva para lograr la estabilización de arcillas expansivas. Se eligió esta sal por ser la más comercial y económica.

##### a) Cloruro de Calcio.

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en forma de salmuera en algunos procesos industriales, aunque también se puede obtener de algunos arroyos y pozos naturales siendo la fuente más común, el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos.

Esta sal, ha sido la que más se ha estudiado por los investigadores desde el punto de vista del mejoramiento mecánico de los suelos, su opinión, es que cuando se trata de estabilizar arcillas se presenta un mecanismo de intercambio catiónico, el cual se ha puesto en evidencia al abatirse el valor del pH y producirse el intercambio.

La adición de cloruro de calcio según investigadores, provoca que se disminuyan las fuerzas de repulsión entre las partículas de arcilla dado que en el intercambio catiónico se sustituye un ión de  $\text{Ca}^{++}$  por dos iones de  $\text{Na}^+$ , lo cual hace que el espesor de la doble capa se vea reducido, haciendo que se reduzca el potencial eléctrico y por consiguiente las fuerzas de repulsión entre las partículas.

#### b) Silicato de Sodio.

El silicato de sodio se produce con diferentes grados de alcalinidad tamaño de partícula y pureza. Se obtiene de materiales con alta proporción de sílice tratados con sales de sodio y agua. Se puede preparar por varios métodos entre los que destaca el llamado "proceso húmedo" en el que se incluyen soluciones de infusorios o tierras de diatomeas en hidróxidos alcalinos.

También es posible obtener silicato de sodio mediante la reacción del hidróxido de sodio con los residuos obtenidos en la extracción de metales como el aluminio, berilio y tungsteno. Además de los métodos mencionados, la mayor parte de los silicatos de sodio se obtienen de la fusión de una cierta arena con carbonato de sodio a altas temperaturas, el producto que se obtiene es un vidrio fundido al que se le puede permitir su solidificación para molerlo posteriormente al tamaño deseado, o bien para disolverlo mediante la aplicación de vapor a alta presión y obtener la consistencia líquida de diferentes concentraciones.

Todos los silicatos de sodio son alcalinos, y si se les mezcla en una solución con un material ácido, se obtiene una mezcla lechosa e iridiscente. Si ocurre que la concentración de sílice es superior a 1% o 2%, se precipita ácido silícico y se forma un gel (masa coherente elástica formada por floculación de una solución coloidal). Las soluciones con concentraciones menores de sílice producen un sol (suspensión de partículas sólidas de dimensiones coloidales en un líquido), cuyas partículas coloidales hidratadas adquieren en general carga negativa.

Algunos investigadores indican que en la reacción del silicato de sodio con el suelo, se presenta un intercambio aniónico, formándose corazas de silicatos insolubles alrededor de las partículas de suelo, produciendo una acción cementante entre las partículas; otros reportes indican que el silicato se precipita formando una matriz continua, en la que se presenta una liga iónica fuerte y rígida entre las partículas de suelo y el estabilizante.

c) Otras Sales.

Se debe mencionar que se han probado otras sales - con fines estabilizantes como es el caso del sulfato de cobre, - el sulfato de bario, sulfato de aluminio y el sulfato de magnesio. Estas sales fueron investigadas en el Instituto de Tecnología de Massachusetts U.S.A., habiéndose encontrado que no producen cambios significativos a los suelos, o bien la mejoría era pequeña y el costo elevado para justificar sus aplicaciones.

Con relación a los cambios en las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos al mezclarse con las sales antes mencionadas, no se cuenta con datos concretos de las variaciones de dichas propiedades.

#### IV.2.- ESTABILIZACION CON CLORURO DE SODIO.

El cloruro de sodio o sal común se puede producir mediante 3 métodos. El más antiguo consiste en el empleo del calor solar para producir la evaporación del agua de mar, obteniendo de este modo residuos de sal. Otro método es mediante la extracción directa de las minas de sal. Finalmente, también puede obtenerse, utilizando hornos para producir la evaporación del agua de mar más rápidamente.

El cloruro de sodio se presenta en forma de cristales solubles en agua, los cuales son higroscópicos. Esta sal se consigue en el mercado en forma de cristales grandes o polvo fino y con diferentes grados de pureza.

Para explicar los mecanismos que se pueden presentar al añadir cloruro de sodio a un suelo esencialmente arcilloso, recordemos que en el capítulo referente a las características y propiedades de los suelos expansivos, se dijo que la expansión de una arcilla se debe principalmente a las fuerzas de repulsión que se originan entre sus partículas, cuya magnitud depende entre otros factores del espesor de la doble capa y la valencia de los cationes existentes en torno a las partículas arcillosas.

Ahora bien si añadimos cloruro de sodio a una arcilla, el campo eléctrico negativo que circunda la partícula atraerá los iones de sodio quedando libres los iones de cloro, los cuales podrán combinarse con los iones negativos existentes alrededor de la partícula o bien sustituir iones de sodio, ya que el quedar libres podrán actuar con diferentes valencias (-1, +1, +3, +5, +7). Lo anterior puede tener las siguientes consecuencias.

1) Se podrán sustituir iones de sodio por iones de cloro al tener el cloro valencias superiores a los del sodio, por lo que la valencia de los iones alrededor de la partícula arcillosa será mayor, cambiándose así las uniones débiles por uniones fuertes, reduciéndose también de este modo el espesor de la doble capa ya que como se mencionó en el Capítulo II, el espesor de la doble capa varía de manera inversamente proporcional a la valencia de los cationes existentes alrededor de la partícula.

2) Al disociarse el cloro y el sodio, también se aumentará la concentración de cationes en la suspensión, haciendo disminuir el potencial repulsivo al disminuir el espesor de la doble capa, ya que el espesor de ésta también varía de manera inversa-

mente proporcional a la raíz cuadrada de la concentración de cationes en solución.

Al disminuir el espesor de la doble capa y de acuerdo a la ecuación II.I, el potencial eléctrico disminuye así como las fuerzas repulsivas entre partículas y por consiguiente la expansión.

$$Z = \frac{4 Q d}{AK} \text{ (ec. II.I).}$$

donde: Z = Energía Potencial.  
 Q = Carga Eléctrica.  
 d = Espesor de la doble capa.  
 A = Area Superficial.  
 = Constante Dieléctrica.

Como consecuencia de la disminución del potencial repulsivo entre las partículas de arcilla y debido a las fuerzas de atracción de Van der Waals las partículas arcillosas se atraerán con lo que al unirse las partículas se producirá también el fenómeno de floculación.

Los investigadores han encontrado que con respecto al cambio en el peso volumétrico de una arcilla con la adición de cloruro de sodio, algunos investigadores reportan un incremento así como una disminución en la humedad óptima. Se dice que el añadir cloruro de sodio a una arcilla, hace que ésta se estructure en forma dispersa, produciéndose así un acercamiento entre las partículas aumentando así el peso volumétrico. Aunado a esto, puede decirse también como se mencionó anteriormente, que la sal hace que se reduzcan las fuerzas repulsivas, con lo cual se aumenta el peso volumétrico y se reduce la humedad óptima.

En relación a la plasticidad de las arcillas al mezclarse con sal, los resultados obtenidos son muy variados aunque se obtienen mejores resultados cuando más alto sea el límite líquido, pues en estos casos dicho límite se abate.

En lo que a la resistencia a la compresión simple se refiere, existe mucha controversia ya que algunos investigadores señalan que las sales la aumentan y otros reportan disminuciones.

En la bibliografía actual no se tienen reportes concretos de los resultados de estabilización de suelos arcillosos con sal común que comprueben las hipótesis antes mencionadas por lo que con la finalidad de tener datos más precisos, se realizó en el laboratorio una estabilización de arcilla con cloruro de sodio, por ser la sal más comercial y económica, a fin de investigar si dicha sal minimiza los cambios volumétricos y aumenta la resistencia de las arcillas expansivas.

#### IV.3.- PRUEBAS DE LABORATORIO.

Las pruebas de laboratorio que se realizaron y que nos serán útiles para saber mediante resultados concretos si la sal mi ni m i n i m i z a los cambios volumétricos y aumenta la resistencia de una arcilla expansiva fueron los siguientes:

- a) Prueba Próctor Estándar.
- b) Límites de Plasticidad.
- c) Valor Relativo Soporte.
- d) Compresión Simple.
- e) Expansión Libre.
- f) Expansión Bajo Carga.

La arcilla con la cual se realizaron las pruebas de laboratorio se obtuvo mediante pozos a cielo abierto en muestras alteradas de la zona industrial de la Cd. de Querétaro, Qro., la cual tiene un límite líquido de 70, un índice plástico de 35 y una expansión libre de 32%.

Por lo que respecta a la sal, la que se empleó fué el cloruro de sodio ya que como se mencionó anteriormente es la más económica y la más comercial, utilizándose la "sal común" del tipo "sal de cocina" por ser la de grano más fino, la cual facilitó su uso en el laboratorio.

A excepción de la prueba próctor estándar, todas las demás pruebas se efectuaron con la arcilla sin sal y con contenidos de sal de 2, 4, 6, 8 y 10% en peso. La prueba próctor estándar además de realizarse sin sal, también se hizo con 4 y 8% de sal.

Es importante señalar que los especímenes para las pruebas de valor relativo soporte, expansión libre, expansión bajo carga y compresión simple se buscaron compactar al 95% de su peso volumétrico seco máximo, ya que de tenerse buenos resultados al mezclar la arcilla con la sal, esta arcilla podría utilizarse como capa subrasante la cual generalmente se compacta al 95% de su peso volumétrico seco máximo.

#### 1.) Prueba Próctor Estándar.

La primera prueba que se realizó, fué la prueba próctor estándar con la arcilla sin sal; con la finalidad de determinar la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo de la arcilla, para añadir a la mezcla arcilla-sal la cantidad de agua requerida y obtener el 95% de su peso volumétrico seco máximo.

Para la realización de la prueba próctor estándar se hizo lo siguiente:

- 1) Una vez seco el material, se disgregó para obtener material que pasara la Malla No. 4 (4.76 mm).
- 2) Se obtuvieron 4 porciones de arcilla, una para cada cilindro próctor, y se le agregó diferentes cantidades de agua, dejándose en bolsas de plástico cerradas durante 24 horas para que se homogenizara la humedad.
- 3) Transcurridas las 24 horas, se compactó la arcilla en los moldes próctor en 3 capas y con 25 golpes por capa.
- 4) Finalmente se peso el molde con la arcilla y se obtuvo una muestra del suelo para determinar el contenido de agua. Previamente los moldes habían sido medidos para conocer su volumen y poder determinar el peso volumétrico.

Sin embargo, durante las pruebas se observó que en ocasiones el peso volumétrico de algunos especímenes resultaba mayor del peso volumétrico seco máximo de la arcilla sin sal, por lo que se hicieron las pruebas próctor para contenidos de sal de 4 y 8% y verificar el efecto de la sal en el peso volumétrico.

Para realizar la prueba próctor con el 4 y 8% de sal, se siguieron los siguientes pasos para cada porcentaje:

- 1) Se disgregó la arcilla para obtener material que pasara la Malla No. 4 (4.76 mm).
- 2) Se obtuvieron 4 porciones de material, a cada una de las cuales se le añadió la cantidad de sal en el porcentaje correspondiente, mezclándose en seco.
- 3) Se añadió agua en diferentes cantidades para obtener 4 humedades diferentes.

- 4) Se colocó el material en bolsas de plástico cerradas durante 3 días a fin de que se homogenizara la humedad y para que la sal y la arcilla reaccionaran.
- 5) Transcurrido el tiempo, se compactaron las muestras siguiendo el procedimiento de prueba para la prueba próctor estándar.

b) Límites de Plasticidad.

La finalidad de obtener los límites de plasticidad de las diferentes mezclas arcilla-sal, es la de saber si la sal disminuye la plasticidad de la arcilla.

Para efectuar las pruebas de límites, se procedió de la siguiente manera:

- 1) Se disgregó material para obtener material que pasara la Malla No. 40.
- 2) El material así obtenido se mezcló en seco con los diferentes contenidos de sal. En este caso la sal se molió aún más a fin de que fuera más fina y pudiera mezclarse correctamente con arcilla, se pasó por la Malla No. 40.
- 3) Homogenizada la mezcla en seco, se le agregó el contenido de agua óptima obtenido en la prueba próctor para dejar la mezcla en bolsas de plástico cerradas durante 72 horas para que la sal y la arcilla reaccionaran.
- 4) Después de las 72 horas se determinaron los valores del índice líquido y del límite plástico.

c) Valor Relativo Soporte.

El objeto de esta prueba fué el de conocer el efecto que la sal tiene en la resistencia a la penetración de la arcilla en estudio.

El procedimiento que se siguió para realizar la prueba para todos los contenidos de sal y para la arcilla sin sal fué el siguiente.

- 1) Se disgregó el material y se obtuvo material que pasó la Malla No. 4.
- 2) Habiéndose obtenido la cantidad de suelo necesaria para cada molde, se le agregó el contenido de sal respectivo en cada caso mezclándose manualmente.
- 3) Luego de obtener una mezcla homogénea se le agregó la cantidad de agua requerida para obtener un grado de compactación del 95%, mezclando manualmente.
- 4) Agregada el agua se dejó el material en una bolsa de plástico cerrada, a fin de que se homogenizara la humedad y para que el suelo reaccionara con la sal, durante 72 horas.
- 5) Transcurridas las 72 horas se procedió a compactar la mezcla arcilla-sal en el molde próctor para dejarlo saturar durante 5 días y posteriormente realidizar la prueba.

#### d) Compresión Simple.

El objetivo de esta prueba fué conocer la variación en la resistencia a la compresión simple de la arcilla en estudio al mezclarse con sal.

El procedimiento para la realización de la prueba de compresión simple fué el siguiente:

- 1) Se disgregó la arcilla y se obtuvo material que pasó la Malla No. 4 en cantidad suficiente para compactarla en un molde próctor.
- 2) Se añadió el porcentaje de sal correspondiente y se mezcló manualmente.
- 3) A la mezcla homogénea de sal y suelo se le añadió la cantidad de agua necesaria para lograr el 95% de compactación y se mezcló en forma manual.
- 4) La mezcla de sal y suelo se dejó en una bolsa de plástico para que se uniformizara la humedad y reaccionara la sal con la arcilla durante 72 horas.

- 5) Luego de las 72 horas se compactaron las mezclas arcilla-sal en el molde próctor en 3 capas con 25 golpes por cada una.
- 6) Mediante un émbolo hidráulico se sacó del molde próctor el cilindro compactado de arcilla con sal, del cual se labraron probetas de 8.55 cm. de altura y 3.67 cm. de diámetro con una relación de esbeltez de 2.33.
- 7) Habiendo obtenido la probeta se colocó en un marco de carga para realizar la prueba de compresión simple con el método de carga controlada.
- 8) Posteriormente se fabricaron del mismo modo otras probetas, para verificar los resultados con el método de deformación controlada, aplicando una velocidad de deformación de 0.72 mm/min.

e) Expansión Libre.

Dado que la arcilla en estudio poseó características expansivas, se realizaron pruebas de expansión libre para los diferentes contenidos de sal para conocer el efecto de ésta en la expansión de la arcilla.

El procedimiento que se siguió en esta prueba para los diferentes contenidos de sal fué el siguiente:

- 1) Se procedió de la misma manera que para el caso de la prueba de compresión simple hasta el inciso 5.
- 2) Del cilindro compactado se labró una dentro de un anillo de consolidación.
- 3) Una vez labrada la muestra dentro del anillo ésta se colocó dentro de una charola en medio de 2 piedras porosas así como entre dos anillos, el inferior para evitar que al saturarse la arcilla el anillo que lo confina deslizará, y el superior para evitar que el material se derramase al expanderse. Así mismo se le colocó en la parte superior un micrómetro a fin de medir las expansiones.
- 4) Colocado el micrómetro se procedió a sumergir el espécimen

men en agua, tomando lecturas del micrometro desde el -  
primer minuto.

Todo lo anterior se llevó a cabo con los diferentes conteni-  
dos de sal y con la arcilla sin sal.

f) Expansión Bajo Carga.

Dado que de resultar exitosa la estabilización con sal -  
la arcilla se emplearía como capa subrasante, se efectuó una -  
prueba de expansión bajo una presión de  $0.07 \text{ Kg/cm}^2$ , la cual es  
la presión que se considera le transmite las capas superiores de  
pavimento a la subrasante.

Esta prueba se realizó de la misma manera en que se llevó a  
cabo la prueba de expansión libre, a excepción de que la prueba  
bajo carga se efectuó en un consolidómetro, aplicando al espécimen  
una presión de  $0.07 \text{ Kg/cm}^2$ . Esta presión se aplicó mediante  
la colocación de pesas al consolidómetro previamente nivelado to-  
mando en cuenta el peso del balín y de la piedra porosa.

Colocada la presión de  $0.07 \text{ Kg/cm}^2$  sobre la muestra, antes  
de comenzar a saturarla, se dejó que se consolidara la muestra -  
por efecto de la carga, tomándose lecturas al primer minuto: des-  
pués de comenzar a saturarla.

## IV.4.- RESULTADOS.

## a) Prueba Próctor Estándar.

Habiéndose realizado la prueba próctor con la arcilla sola, se obtuvo la curva de compactación que aparece en la figura - IV.I. De esta curva puede observarse que el peso volumétrico seco máximo es de  $1.28 \text{ T/m}^3$  y que la humedad óptima es de 32%.

Sin embargo, al estar realizando las pruebas de expansión libre, expansión bajo carga y de compresión simple, y verificar sus compactaciones, se dieron casos en las que se sobrepasaba el peso volumétrico seco máximo que se había obtenido con la arcilla sin sal, por lo que se realizaron también las pruebas próctor con contenidos de sal de 4 y 8%, obteniéndose las curvas de compactación que aparecen en la misma figura IV.I.

En la figura IV.I, se puede apreciar como el peso volumétrico se incrementa a la vez que se disminuye el contenido de agua - óptimo cuando se incrementa el contenido de sal.

TABLA IV.I.

Variación del peso volumétrico y de la humedad óptima con el contenido de sal.

Sal (%)	Peso Volumétrico Seco Máximo ( $\text{T/m}^3$ )	Variación (%)	Humedad óptima (%)	Variación (%)
0	1.28		32%	
4	1.32	3.1	24%	- 25%
8	1.34	4.7	23%	- 28%

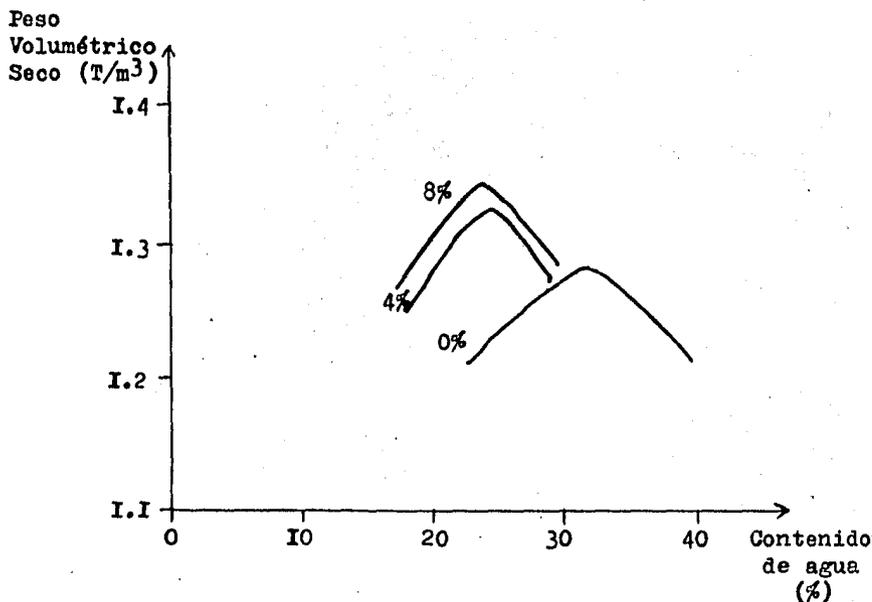


Fig. IV.I. Curvas de compactación para contenidos de sal de 0%, 4% y 8%.

La variación del peso volumétrico seco máximo y de la humedad óptima con el contenido de sal se presenta en las figuras - IV.2 y IV.3.

En la tabla IV.I, se observa que mientras el incremento del peso volumétrico es poco significativo (3.1% y 4.7%), la disminución del contenido de agua óptima es del 25 y 28% para contenidos de sal de 4 y 8% respectivamente.

Esta disminución del contenido de agua óptimo y el aumento - del peso volumétrico, puede deberse a la disminución de las fuerzas de repulsión entre las partículas al reprimirse la doble capa, así como a la estructuración dispersa que la sal origina.

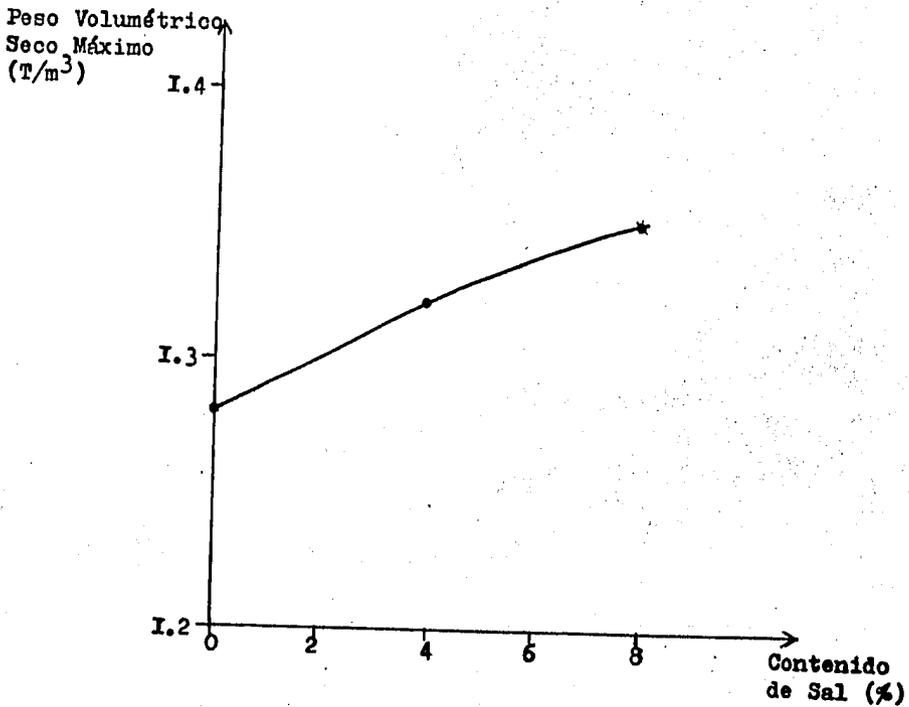


Fig. IV.2. Variación del peso volumétrico seco máximo con el contenido de sal.

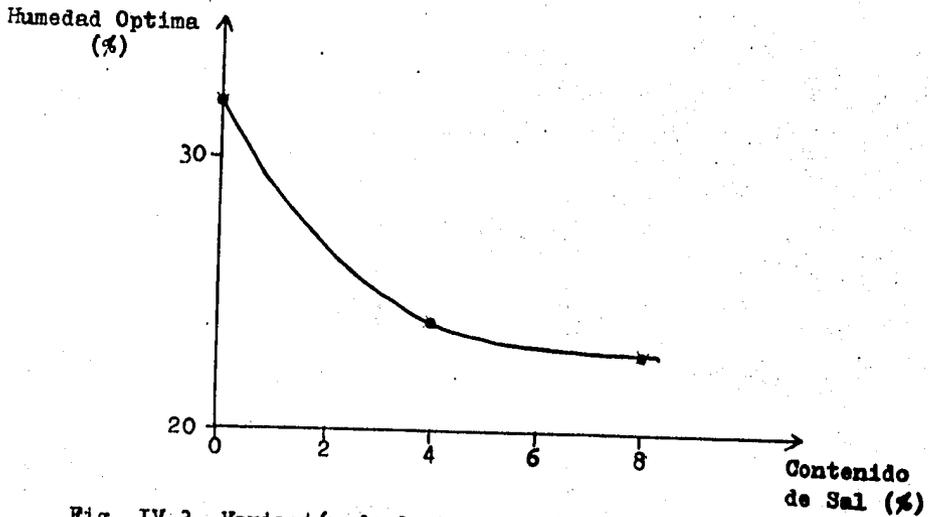


Fig. IV.3. Variación de la humedad óptima con el contenido de sal.

b) Límites de Plásticidad.

Los resultados de las pruebas de límites de plasticidad a parecen en las figuras IV.4, IV.5 y IV.6.

En la figura IV.4, puede apreciarse la disminución del valor del límite líquido al aumentar el contenido de sal. Esta disminución es significativa hasta con 6% de sal (-22.9%), ya que con 4% de sal el decremento es apenas de 9.5%.

TABLA IV.2.

Valores de los límites de plasticidad en función del contenido de sal.

Sal (%)	Límite Líquido		Límite Plástico		Índice Plástico	
	L.L en Variación %	(%)	L.P en Variación %	(%)	I.P en Variación %	(%)
0	74		35		39	
2	69	-6.7	35	0	34	-12.8
4	67	-9.5	35	0	32	-17.9
6	57	-22.9	29	-17.0	28	-28.2
8	56	-24.3	30	-16.6	26	-33.3
10	53	-28.4	29	-17.1	24	-38.5

El límite plástico también tiene una ligera tendencia a disminuir como se observa en la figura IV.5, aunque no muy significativa y solo con contenidos de sal mayores al 6%.

Como consecuencia de la disminución del límite líquido, el índice plástico también disminuye de manera semejante que el primero como se aprecia en la figura IV.6.

En la tabla IV.2, aparecen los valores obtenidos y el porcentaje de decremento que se obtuvo en cada caso con el aumento de sal, en dicha tabla se observa que el decremento significativo en los valores del límite líquido y del índice plástico se obtiene -

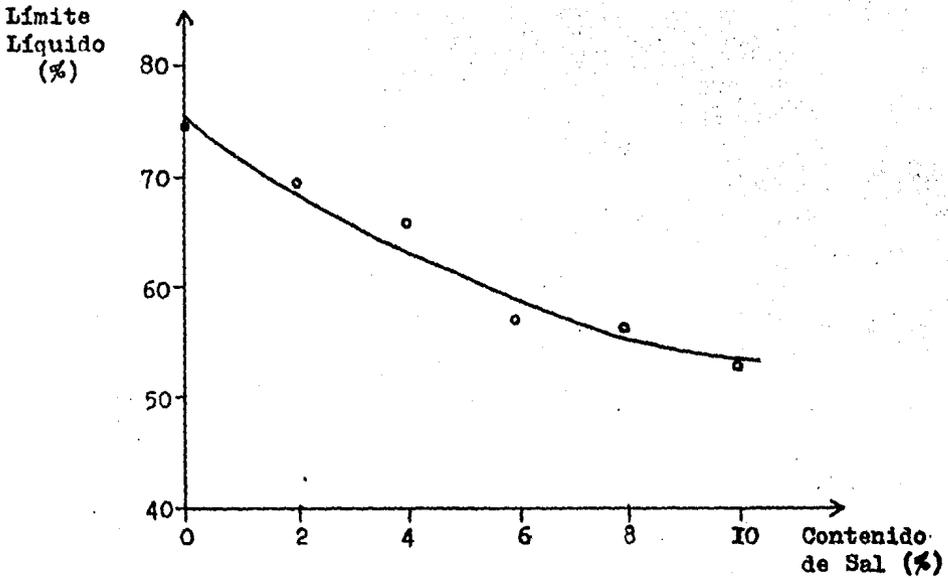


Fig. IV.4. Variación del límite líquido con el contenido de sal.

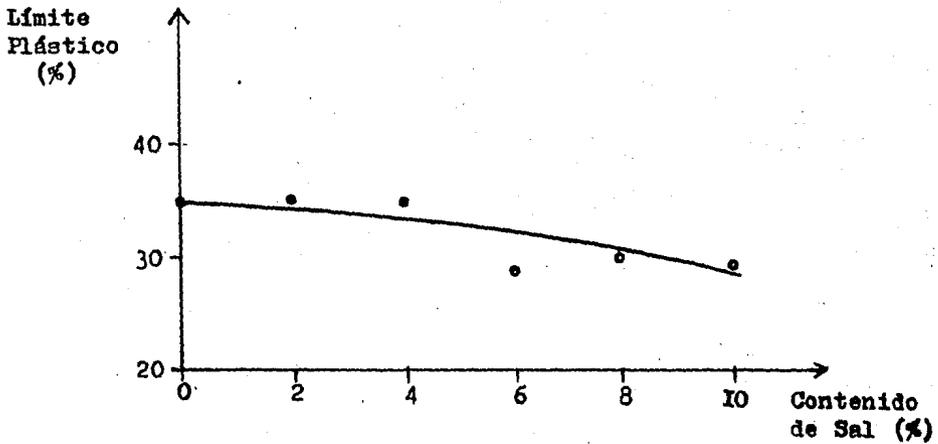


Fig. IV.5. Variación del límite plástico con el contenido de sal.

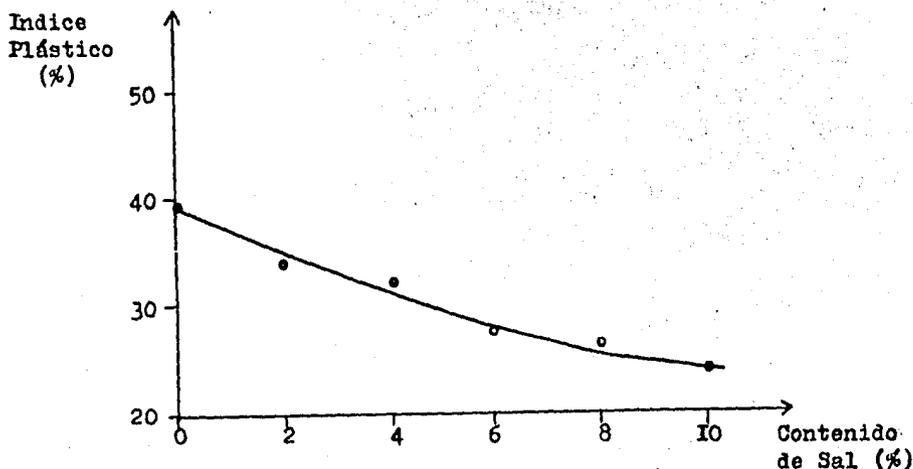


Fig. IV.6. Variación del índice plástico con el contenido de sal.

con contenidos de sal mayores del 6%.

La disminución de la plasticidad que la sal le provoca a la arcilla, hace que ésta sea más trabajable, disminuyendo los problemas que representa el trabajar con una arcilla de este tipo.

#### c) Valor Relativo Soporte. (V.R.S.)

En la tabla IV.3 y en la figura IV.7, se presentan los resultados de la prueba de valor relativo soporte saturado realizadas con diferentes contenidos de sal.

Los resultados obtenidos no presentan una variación significativa y prácticamente como se aprecia en la figura IV.7, el V.R.S. permanece sin variación al incrementarse el contenido de sal.

A diferencia de la cal, la sal no tiene ningún efecto en el valor relativo soporte, ya que con la cal se obtienen valores supe

riores al 100%, esto es debido a que la sal no propicia en la arcilla ninguna cementación.

TABLA IV.3.

Resultados de la prueba de V.R.S. saturado.

Sal (%)	V.R.S. Saturado (%)	Variación (%)
0	I.32	
2	I.47	II.4
4	I.32	0.0
6	I.32	0.0
8	I.47	II.4
10	I.47	II.4

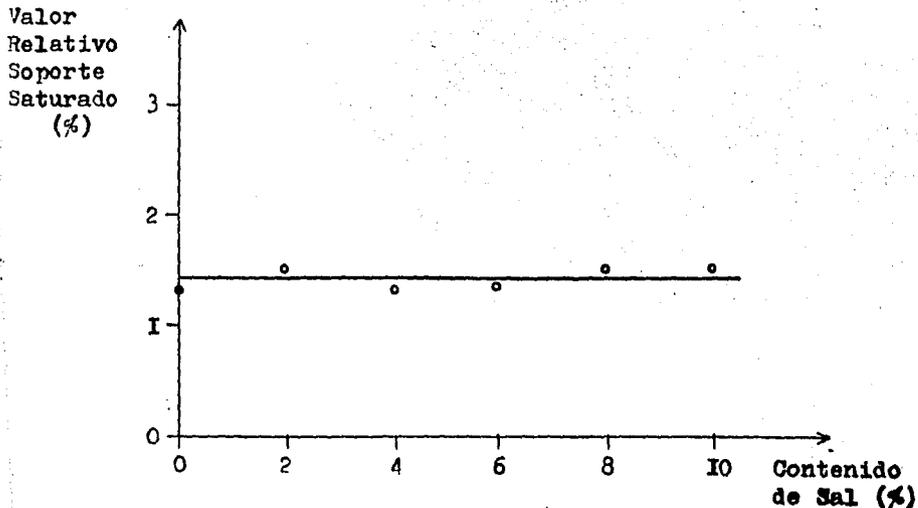


Fig. IV.7. Variación del Valor Relativo Soporte (V.R.S.) con el contenido de Sal.

d) Resistencia a la Compresión Simple.

En la tabla IV.4 y en la figura IV.8, aparecen los resultados y la representación en forma gráfica de la variación de la resistencia a la compresión simple de la arcilla con diferentes contenidos de sal, de donde se observa que al incrementarse el contenido de sal la resistencia a la compresión simple disminuye. Esto podría ser consecuencia de la estructura dispersa que se forma al aumentar el contenido de sal, ya que como se mencionó en el Capítulo III al estructurarse una arcilla en forma dispersa su resistencia a la compresión simple disminuye.

También en la figura IV.8, se observa que los resultados obtenidos con el método de carga controlada son semejantes a los que se obtuvieron con el método de deformación controlada.

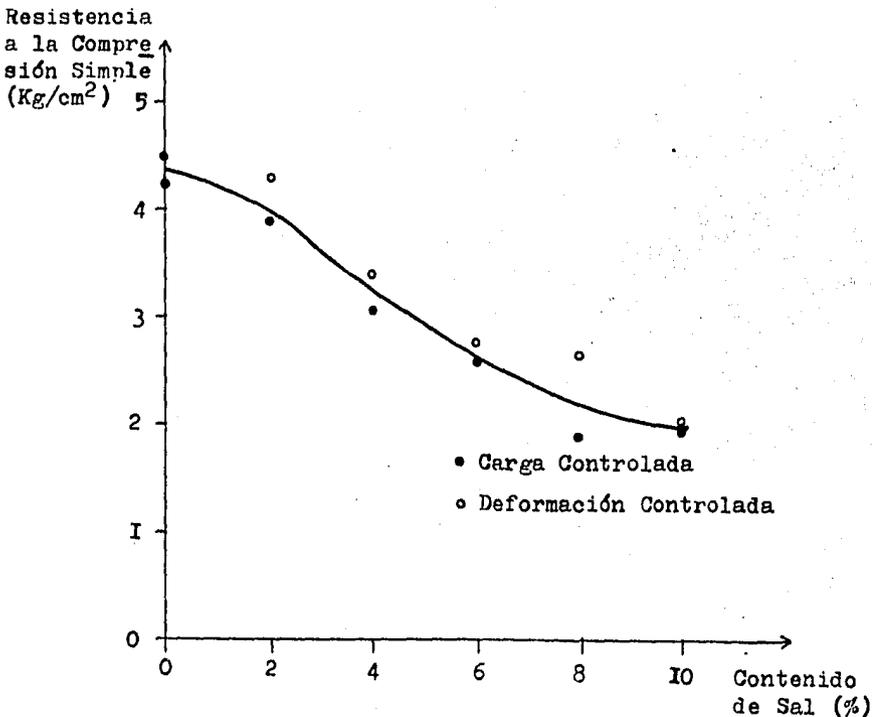


Fig. IV.8. Variación de la resistencia a la compresión simple con el contenido de sal.

TABLA IV.4.

Variación de la resistencia a la compresión simple con el contenido de sal.

Sal (%)	Carga Compactación (%)	Controlada Resist. a la Com presión Simple. (Kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación Compactación (%)	Controlada Resist. a la Com presión Simple. (Kg/cm <sup>2</sup> )
0	96	4.49	95	4.27
2	96	3.88	97	4.30
4	97	3.02	97	3.35
6	97	2.64	97	2.69
8	96	1.95	97	2.59
10	94	2.04	94	2.06

#### e) Expansión Libre.

Referente a las pruebas de expansión libre y de acuerdo a los resultados que aparecen en la tabla IV.5 y en la figura IV.9, puede observarse que la expansión disminuye al aumentar el contenido de sal, lo cual se debe probablemente al efecto que tiene el cloruro de sodio en la disminución del espesor de la doble capa y hace que disminuyan las fuerzas de repulsión entre las partículas arcillosas como ya se indicó anteriormente. Se debe aclarar que este efecto no se logra totalmente porque se tiene la seguridad de que no siempre se llegó al tamaño de la partícula coloidal.

Como se observa en la tabla IV.5, un contenido de sal del 8% reduce casi hasta un 40% la expansión, por lo que desde el punto de vista técnico un porcentaje recomendable para reducir la expansión es del 8% para el caso de la expansión libre.

Es importante señalar que el usar un 8% de sal resulta anti-económico, por lo que sería recomendable desde el punto de vista económico utilizar un porcentaje menor.

TABLA IV.5.

Resultados de la prueba de expansión libre con diferentes contenidos de sal.

Sal (%)	Compactación (%)	Expansión (%)	Variación (%)
0	91.9	32.5	
2	97.6	31.5	- 3.0
4	95.4	27.5	-15.4
6	94.0	26.0	-20.0
8	95.3	20.0	-38.5
10	95.3	16.0	-50.7

f) Expansión Bajo Carga.

Ya se mencionó que esta prueba es semejante a la de expansión libre, con la diferencia de que en este caso se le coloca al espécimen una presión vertical de  $0.07 \text{ Kg/cm}^2$ , la cual representa la carga muerta que actúa sobre la capa subrasante de un pavimento.

Con esta carga y con la adición de sal la expansión se ve disminuída aún más, como se aprecia en la tabla IV.6 y en la figura IV.9.

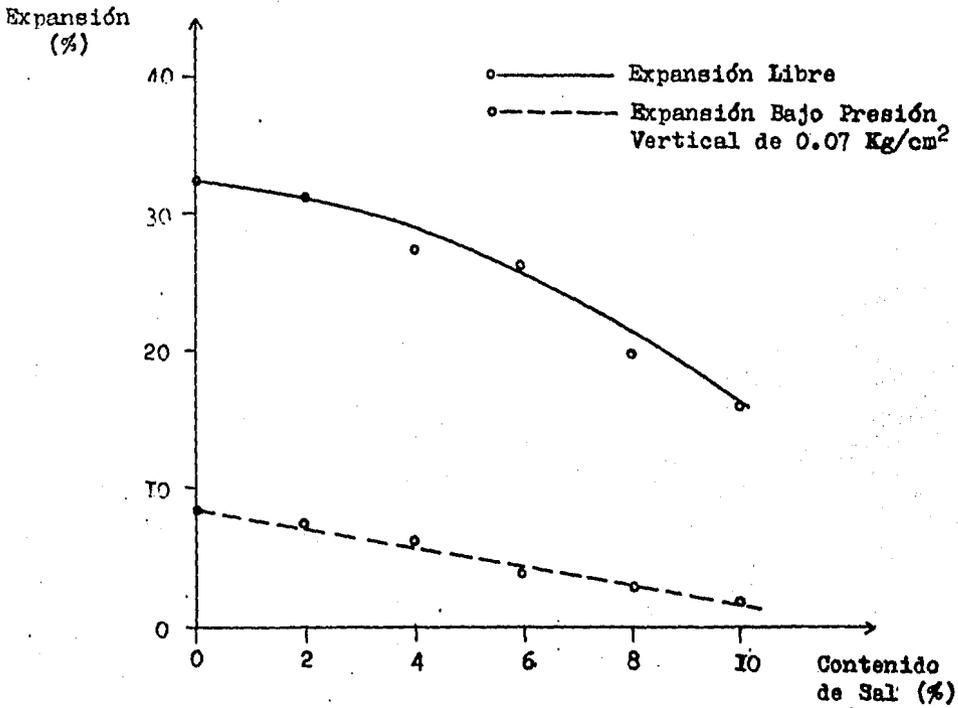


Fig. IV.9. Variación de la expansión libre y bajo presión - vertical con el contenido de sal.

TABLA IV.6.

Resultados de la prueba de expansión bajo presión vertical de -  
 0.07 Kg/cm<sup>2</sup> con diferentes contenidos de sal.

Sal (%)	Compactación (%)	Expansión (%)	Variación (%)
0	95.3	8.5	
2	94.6	7.6	-10.6
4	95.4	6.1	-28.2
6	94.6	4.0	-52.9
8	95.3	3.0	-64.7
10	94.0	2.0	-76.4

## V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El presente estudio forma parte de un trabajo de estabilización de suelos que se viene realizando en arcillas expansivas, empleando diferentes aditivos en este caso se hizo el estudio con sal a corto plazo y las conclusiones a las que se llegó se indican a continuación.

I.- Las características de la arcilla sin sal fueron las siguientes:

Clasificación SUCS	- - - - -	CH
Expansión Libre	- - - - -	32.5%
Expansión bajo presión vertical de 0.07 Kg/cm <sup>2</sup>	- - - - -	8.5%
Límite Líquido	- - - - -	74%
Límite Plástico	- - - - -	35%
Índice Plástico	- - - - -	39%
Valor Relativo Soporte Saturado	- - - - -	I.32%
Peso Volumétrico Seco Máximo	- - - - -	I.28 Ton/m <sup>3</sup>

Estos valores se compararon con los criterios de Holtz y Seed para la identificación de suelos expansivos indicados en el Capítulo III. Según Holtz, la arcilla en estudio tiene un potencial de expansión alto en función del índice de plasticidad y bajo si se toma en cuenta la expansión producida con presión vertical de 0.07 Kg/cm<sup>2</sup>. Por otro lado, Seed en base al índice de plasticidad y para un índice de 39% reporta potenciales de expansión que varía de 11.8% a 25.0% dichos resultados se aproximan al obtenido en el laboratorio (del 8.5%). Asimismo, Seed establece una expansión alta para un potencial de expansión que varíe entre 5% y 25%, por lo que se puede concluir que la arcilla en estudio es expansiva.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio, el criterio de Seed en este caso fué el más acertado.

Los otros criterios de identificación a través de pruebas de laboratorio no se pudieron comprobar, ya que son función del límite de contracción, de la actividad y del peso volumétrico del lugar, con los cuales no se cuenta.

- 2.- Con relación a los métodos de identificación de minerales arcillosos se realizó la "Prueba del Grumo", la cual forma parte de la metodología ideada por ingenieros australianos. Al realizar esta prueba, se encontró que al sumergir en agua deshidratada un grumo de la arcilla en estudio, éste se desintegró formando "Halos", por lo que de acuerdo a la figura II.21, esta arcilla está constituida por montmorilonita, cuyas características hacen que la arcilla sea expansiva y muy plástica.

Los demás métodos de identificación de minerales arcillosos - no se pudieron emplear por no tenerse al alcance, aunque debe decirse también que son poco prácticos desde el punto de vista ingenieril.

- 3.- Se observó que el cloruro de sodio incrementa aunque de manera poco significativa (apenas 4.7% con el 8% de sal) el peso volumétrico seco máximo, a la vez que disminuye el contenido de agua óptimo (de 32.5% a 24% con el 4% de sal).

En el Capítulo III, se mencionó que en el caso de suelos cohesivos, al aumentar el contenido de agua para obtener pesos volumétricos altos, ocasiona la formación de una estructura dispersa que hace que disminuya la resistencia. Con la sal el peso volumétrico también se incrementa, sin tener que aumentar el contenido de agua.

- 4.- En contrapartida al punto anterior, en las pruebas de compresión simple realizadas se encontró que la sal disminuye la resistencia; esto puede deberse a que el cloruro de sodio hace que en un cierto porcentaje la arcilla se estructure en forma dispersa, haciéndola menos resistente.
- 5.- Otro hecho desfavorable, es que el valor relativo soporte saturado, no sufre incremento alguno con la sal, también como -

consecuencia de que la sal no contiene ningún agente cementante (Calcio).

- 6.- Por lo que respecta a sus características de plasticidad, el límite líquido disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de sal, por ejemplo, de 74% a 57% con el 6% de sal, mientras que el límite plástico y el índice plástico para el mismo porcentaje de sal se reducen de 35% a 29% y de 39% a 28% respectivamente.

Aunque el límite líquido y el índice plástico disminuyen, el suelo sigue siendo una arcilla de alta plasticidad, sin embargo si debe decirse que al disminuir su plasticidad se tienen por tanto mejores condiciones para su empleo facilitando así la compactación.

- 7.- El cloruro de sodio también disminuye la expansión hasta un 38% con el 8% de sal en el caso de expansión libre y hasta en un 64% con el mismo contenido de sal en el caso de la expansión bajo una presión vestical de  $0.07 \text{ Kg/cm}^2$ , teniendo en este caso una expansión apenas del 2%

Esta disminución de las características expansivas de la arcilla, puede ser consecuencia de la reducción del espesor de la "doble capa" existente alrededor de las partículas arcillosas mediante el mecanismo explicado en la parte IV.3 de este trabajo.

- 8.- Conjuntamente en lo expresado anteriormente se concluye que la arcilla mezclada con sal no alcanza los requisitos de resistencia necesarios para emplearse como capa subrasante, ya que se requiere un VRS mínimo de 5% de acuerdo a las normas actuales de la Secretaría de Comunicaciones.
- 9.- Comparando los resultados de estabilización con cal y sal a corto plazo, se puede decir que la cal es más eficiente que la sal ya que la primera además de disminuir la plasticidad y la expansión, incrementa la resistencia.

10.- Debido a que se utilizó material que pasó la malla No. 4, es posible que la reacción iónica mencionada en el Capítulo IV. no se haya presentado totalmente. Sin embargo, se hizo de esta manera porque en la obra es imposible disgregar todo el material hasta obtener un tamaño de 2 micras para que la reacción sal-arcilla sea más eficiente.

Considerando lo anterior se puede recomendar lo siguiente:

- 1) Dado que la sal no aumenta la resistencia, pero si disminuye la plasticidad y la expansión, podría emplearse como un pre-tratamiento en combinación con otro estabilizante que si aumenta la resistencia como la cal o el cemento.
- 2) En caso de emplear sal como pre-tratamiento se recomienda en una proporción del 4% al 6% en peso y solo para abatir la plasticidad y la expansión en suelos arcillosos.
- 3) Como se observa el porcentaje de sal para un pre-tratamiento puede resultar alto, sin embargo de utilizarse en sitios cercanos al mar, su empleo no resultaría muy costoso.
- 4) Una desventaja que tiene la sal, es su solubilidad en agua, por lo que podría pensarse que las desventajas de su uso son reversibles, sin embargo no se ha demostrado si esto de verdad ocurre, ya que podría suceder que al entrar en contacto con el agua la sal se disolviera y la reacción sal-arcilla se realice de todas formas o quizás hasta de mejor modo, lo cual sería recomendable investigar.

Estas fueron las conclusiones y recomendaciones de una investigación cuya finalidad fué el conocer la variación en las propiedades mecánicas de resistencia y deformación que sufre una arcilla expansiva al mezclarla con cloruro de sodio comúnmente llamada sal.

Este trabajo forma ahora parte de una serie de investigaciones que se han realizado, con la finalidad de lograr un mejor a-

provechamiento de los recursos con que cuenta el país de una manera eficiente y económica, así como conocer de manera práctica lo que la teoría y las hipótesis planteadas dicen sobre la estabilización con sal.

## BIBLIOGRAFIA

- I.- Applied Clay Mineralogy. Ralph E. Grim. Mc. Graw - Hill. - New York, 1962.
- 2.- Física. Hazen W. y Pidd R. Editorial Norma. Cali Colombia 1969.
- 3.- Física General. Landau L., Ajeizer A. y Lifshitz E. Editorial Mir. (Traducción de Manuel Gisbert Talens). Moscú 1973.
- 4.- Ingeniería de Cimentaciones. R.B. Peck, W.E Hanson y T.H. - Thornburn. Editorial Limusa. México, D.F., 1974.
- 5.- La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Alfonso Rico y Hermilo del Castillo. Editorial Limusa. México, D.F., - 1978.
- 6.- Mecánica de Suelos. (Tomos I y III), Juárez Badillo y Rico Rodríguez. Editorial Limusa. México, D.F., 1974.
- 7.- Mecánica de Suelos. Lambe T.W. y Whitman, R.V. Editorial - Limusa. (Traducción de J.A. Jiménez Salas y J.M. Rodríguez). México, D.F., 1972.
- 8.- Mejoramiento y Estabilización de Suelos. Fernández Loaiza - C. Editorial Limusa. México, D.F., 1982.
- 9.- Principles of Pavement Design. Yoder E.J. John Wiley and - Sons, Inc. New York, 1975.
- 10.- Química General. Luna S.A. y Castrillon V.S. Editorial Enseñanza. México, D.F., 1971.
- II.- Soil Stabilization. O.G. Ingles and J.B. Metcalf. John - Wiley and Sons. New York, 1973.