



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

28
63

ESTABILIZACION DE SUELOS UTILIZANDO CAL.

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a n

JOSE FRANCISCO FERNANDEZ ROMERO

SERGIO RENE GONZALEZ OLGUIN

GHERMAN CASTELLANOS ROMAN



México, D. F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

OBJETIVO	Pág.	9
CAPITULO 1: <i>Introducción.</i>	Pág.	10
CAPITULO 2: <i>Características de los suelos - expansivos.</i>	Pág.	20
CAPITULO 3: <i>Métodos de estabilización de - suelos.</i>	Pág.	69
CAPITULO 4: <i>Estabilización de suelo con cal Análisis de las variaciones de resistencia y deformación volu- métrica.</i>	Pág.	83
CAPITULO 5: <i>Conclusiones y Recomendaciones</i>	Pág.	109

Objetivo: Evaluar la variación de las propiedades índice y mecánicas de un suelo expansivo al mezclarlo con cal.

1) INTRODUCCION

1.1) *Reseña Histórica.*

En muchos casos el suelo de un sitio en el cual se va a desarrollar una obra de ingeniería, no se puede considerar de calidad adecuada, es decir que su resistencia al corte sea la necesaria para soportar las cargas y que su deformabilidad sea mínima bajo la acción de las mismas. En algunas ocasiones el ingeniero puede deshacerse de los problemas potenciales - que un suelo puede ocasionarle escogiendo otro sitio para la construcción de la obra o removiendo el suelo indeseable y reemplazándolo por un suelo - de mejores características de resistencia y deformación. Cuando se inició la construcción de carreteras un procedimiento ampliamente usado para evitar este tipo de suelos (como en el caso de un pantano), era por ejemplo, el de desviar la ruta, sin embargo se construyeron muchas terracerías con préstamos laterales, que para su época eran las más adecuadas por el tipo de cargas y el número de vehículos que transitaban. Sin embargo el incremento de la velocidad y tipo de vehículos han forzado a cambiar los lineamientos y estándares en el diseño de carreteras y autopistas. Por otra -- parte, el crecimiento de las ciudades y áreas industriales (polos de desarrollo) han limitado las alternativas de selección de ruta, obligando, en algunos casos, a seleccionar aquella que desde el punto de vista del suelo no es la más adecuada.

Actualmente, cabe aclarar que este tipo de soluciones son muy - caras y se hubieran podido evitar si se hubiese tenido una planeación regional, ubicando la Red Federal de Carreteras en los sitios más adecuados y limitando la construcción en las zonas federales.

En algunos casos el ingenio del proyectista debe llegar incluso a alternativas de solución como la de mejorar las características de los suelos. Esta solución se está volviendo cada vez más factible y más atractiva, conociéndose frecuentemente con el nombre de estabilización de suelos, la cual en su sentido más amplio es la modificación de alguna o algunas de las propiedades del suelo para incrementar su resistencia al corte y disminuir su compresibilidad.

Como ejemplos en los que se requiere el mejoramiento del suelo se puede mencionar entre otros, los siguientes:

Incremento de la resistencia al corte del suelo en estudio (como en aquellos casos en los que se desea mejorar los suelos que forman la subrasante de un pavimento), o la reducción de la permeabilidad (como en la cimentación de una presa).

El mejoramiento del suelo puede ser una medida temporal para -- realizar de una manera más fácil la construcción, por ejemplo, cuando se coloca una red formada por ramas de árboles como cama de trabajo, pero también puede ser una medida permanente para mejorar el comportamiento de la obra durante su vida útil. Cabe agregar que existen varias experiencias - en la República Mexicana sobre mejoramiento de las características de resistencia y deformación de un suelo que forma la estructura de un pavimento con distintos agregados tales como, cal, cemento, etc., pero esta in-formación se encuentra dispersa y falta asociarla a pruebas de resistencia y de consolidación, lo cual será en parte el objetivo de este trabajo.

1.2) Generalidades.

Las técnicas de mejoramiento de suelos se pueden clasificar de

la siguiente manera:

- a) estabilización química,
- b) estabilización mecánica y
- c) estabilización térmica.

Muchas de estas técnicas las discutí Lambe en 1962 y aunque la gran mayoría de los datos sobre mejoramiento de suelos, han sido obtenidos de una intensa experiencia de campo, se pueden nombrar entre otras a: --- Sherard que en 1963 trató el mejoramiento de éstos para presas; el Road -- Research Laboratory que en 1952 estudió el mejoramiento para el caso de camino y aeropistas; Fruco and Associates (1966) analizó el mejoramiento del suelo para excavaciones profundas y también, Leonads (1962) y el ASCE (1964) trataron el tema en problemas de compactación, bombeo y precarga.

Enfocándonos ahora al problema de mejoramiento de suelos para carreteras es muy importante mencionar que el uso de estabilizante junto con la mecánica del proceso de estabilización, son la base en la que debe apoyarse la selección del tipo y cantidad de estabilizante a usar. A continuación se enumeran varias razones para usar estabilizantes o aditivos:

1) Condiciones de baja calidad de alguna o algunas capas de la sección estructural de un pavimento, debido a un alto contenido de finos - plásticos y que por algún motivo existe la necesidad de utilizar este tipo de material.

2) Control de humedad para evitar cambios volumétricos ya sea impidiendo que el material se seque o se sature, por ejemplo para reducir

el potencial de expansión de una arcilla.

3) Rescate de carreteras viejas, en mal estado o de aquellas -- que han llegado a su vida útil de diseño.

4) Construcción de bases de superior calidad para algunos casos especiales. Se puede citar como ejemplo, en la construcción de los patios de rodaje de PEMEX, las cuales deberán soportar sobrecargas muy grandes.

La estabilización puede ser utilizada para mejorar la calidad - desde subrasantes hasta bases y de esta manera disminuir el espesor requerido por el diseño del pavimento.

Por lo que compete a la estabilización química, algunas sustancias químicas mezcladas con el suelo incrementan su resistencia y disminuyen su compresibilidad.

Una gran cantidad de esfuerzo se ha aplicado en el rescate de - carreteras viejas utilizando un agente cementante poco plástico para aumentar la resistencia de la estructura del pavimento. Este tipo de solución da como resultado una estructura rígida y que por lo tanto, hace que esta alternativa y su funcionamiento correcto estén garantizados solamente para algunos casos, por ejemplo, cuando las condiciones desde el punto de vista de la deformación del suelo de apoyo lo permiten.

A continuación nos referiremos a las técnicas de mejoramiento de suelos, haciéndolo brevemente para la estabilización mecánica y para la estabilización térmica y no así para la estabilización tipo químico, ya - que ésta, está totalmente ligada al tema que concierne a esta tesis.

1.2.1) Estabilización Mecánica.

Con respecto a este tipo de estabilización se puede mencionar que básicamente se tiene como tratamientos de tipo mecánico a la compactación, - la cual ha sido estudiada y analizada con anterioridad por diferentes investigadores, debido a que es el más común y por otra parte, se puede hablar - de estabilización por mezcla de un suelo con otros, la cual se ha venido -- usando a partir de la 2a. década del presente siglo en los Estados Unidos, - siendo los primeros trabajos realizados por Terzaghi y Casagrande entre --- otros. En México, se pueden mencionar los trabajos realizados en el Boulevard Constitución, localizado en las márgenes de la Laguna del Carpintero en el estado de Tamaulipas junto a la desembocadura del Río Pánuco, en el cual la estabilización consistió en mezclar dos partes de arena con una de arcilla. Cabe agregar por último, que en el diseño de una mezcla de suelo - se deben de tener en cuenta la granulometría de la fracción gruesa, así como la plasticidad de la fracción fina.

1.2.2) Estabilización Térmica.

Con respecto a este tipo de estabilización se puede decir que se han llevado a cabo algunos intentos por calcinar la arcilla, pero todos estos intentos, así como los resultados obtenidos están dispersos, no pudiéndose llegar así a una conclusión confiable.

1.2.3) Estabilización Química.

Los variados tipos de estabilización química han sido catalogados de acuerdo a las propiedades que le mejoran al suelo, las cuales están

indicadas en la tabla 1.1 (Ref 1). Los tipos de aditivo incluyen agentes cementantes, modificadores, agentes impermeabilizantes, agentes que retienen el agua, agentes retardadores de agua y muchas variedades de productos químicos.

El comportamiento de cada uno de estos aditivos es diferente de cada uno de los otros; cada uno tiene su uso particular y sus propias limitaciones.

Los principales materiales cementantes que se pueden usar incluyen cemento Portland, cal, cal con puzolanas y derivados del petróleo.

El cemento Portland ha sido utilizado para mejorar la calidad de la sección estructural de las carreteras y se emplea también para estabilizar suelos en estado natural, para reforzar capas de bases y sub-bases de todo tipo. Puede ser utilizado en suelos granulares, suelos limosos y arcillas de baja calidad, pero no puede ser utilizado con material tipo -- orgánico. Dado que las mezclas de suelo-cemento han indicado mejorar las condiciones de resistencia comparadas con materiales naturales, han sido -- muy utilizadas para la construcción de bases.

Otro agente cementante muy usado es la cal hidratada la cual -- aumenta la resistencia del suelo primeramente por una acción puzolánica -- que se debe a la formación de silicatos y aluminatos cementantes. Este material es más eficiente cuando se utiliza en materiales de tipo granular y arcillas de baja calidad.

Las puzolanas tienen generalmente un alto contenido de sílice y

Propiedades	Tipo	Aditivo	Mecánica de Estabilización	Uso	Situación mas adecuada	Cantidad en peso (aprox.)
Incrementan la resistencia por acción cementante.	Agentes	Cemento Portland.	Hidratación principalmente. Modificación de arenas minerales de arcilla	Base y Sub-base	Que los arenosos arcillas	9-15 % 5-9 %
		Cal	Cambia la película de agua, - flocculación	Base y Sub-base	Materiales gravilares o arcilla	2-5 %
		Cal y puzolanas.	Acción puzolánica de la cal y el sílice alguna modificación de los minerales de arcilla	Base y Sub-base.	"	2-5% cal 10-20% puzolanas
		Derivados del asfalto			Base y Sub-base	Materiales gravilares
Disminuyen la plasticidad pueden o no incrementar la resistencia	Modificadores.	Cemento	Modificación de propiedades físico químicas de la arcilla	Mejora las características de calidad de bases y sub-bases probremente graduados	Mejorar las características de agregados existentes, arcillas	2-4 %
		Cal	"	"	"	1-4 %
Incrementan la resistencia	Agentes Impermeabilizante	Derivados del asfalto	Retarda la absorción de humedad por los granos del suelo	Principalmente en sub-bases	Suelos arenosos o materiales de mala calidad	4-6 %
		Membranas	Previenen movimientos del agua	Principalmente en Sub-bases y subrasantes.	Suelos arenosos y arcillosos	—
Efectuar cambios mineralógicos	Agentes retenido	Cloruro de Calcio	Reacciones químicas con los oxidrilos libres del agua		Suelos arenosos y arcillosos	0.5 -
		Cloruro de Sodio	"			0.5-1.5 %
Incrementan la resistencia	Agentes retardadores de absorción de agua	Resinas y Polímeros	Modifican la composición mineralógica de la arcilla	Sub-bases		

Tabla 1.1.- Diversos tipos de estabilización química en base a las propiedades que le mejoren al suelo.

aluminio; por lo tanto, la adición de éstas a suelos estabilizados con cal aceleran la acción puzolánica anteriormente explicada. Generalmente sin embargo, la cantidad de puzolanas requeridas para una estabilización adecuada es relativamente alta, restringiendo su uso a áreas que tienen disponible grandes cantidades de puzolanas relativamente a bajo precio.

Muchas veces el uso de un material cementante está restringido por el costo y por lo tanto, bajas cantidades del material deben ser adicionadas al suelo solamente para modificarlo. Entre los modificadores que son altamente usados se incluyen el cemento, cal y derivados del petróleo, tales como cemento asfáltico, emulsiones y FR-3. El cemento y la cal modifican los minerales de arcilla de alguna manera, la cual en el caso de ésta última se explicará más adelante, haciendo decrecer el índice plástico del suelo. Pequeñas cantidades de materiales derivados del petróleo son ampliamente usados en agregados de baja calidad, donde la función de estos derivados es retardar la absorción de humedad de la fracción fina en la mezcla suelo-agregado. Estos materiales modificantes están generalmente adaptados para ser usados en los materiales frontera de la capa base.

El siguiente tipo de estabilización incluye a los materiales impermeabilizantes, como lo son también los materiales derivados del petróleo los cuales se mezclan con él o con los granos del agregado y retardan o detienen completamente la absorción de humedad. La estabilización con materiales derivados del petróleo se adapta mejor para suelos granulares o para aquellos que tienen un bajo porcentaje de finos (menor del 25 %). En este grupo de estabilización pueden ser también incluidas las membranas de tipo plástico como lo son los geotextiles.

Algunas sustancias químicas incrementan la cantidad de absorción de agua, como el cloruro de sodio y el cloruro de calcio, estos materiales disminuyen la presión de vapor del agua del suelo, realizando reacciones químicas con los oxidrilos (o hidroxilos) libres de ésta.

Estos materiales pueden ser usados como un medio de construcción para retardar la evaporación del agua del suelo en la compactación y en algunos casos, para prevenir el congelamiento del agua de éste.

Muchas otras sustancias químicas están disponibles para la estabilización de suelos. Estos componentes químicos como lo son los polímeros y las resinas, decremantan la cantidad de agua absorbida, pero en general son muy costosos, lo cual limita su aplicabilidad.

REFERENCIAS.

- 1.- *Principles of Pavement Design*
E. J. Voder, M.W. WITCZAK
John Wiley and Sons, Inc. U.S.A. 1975

BIBLIGRAFIA

- 1.- *Soil Mechanics*
T. William Lambe, Robert V. Whitman
John Wiley and Sons, Inc. U.S.A. 1969
- 2.- *Principles of Pavement Design.*
Idem.
- 3.- *Apuntes de la Clase: " Problemas de Geotecnia".*
Ing. Gabriel Moreno Pecero.
México, 1983.

2) CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

2.1) Suelos expansivos.

Ultimamente ha cobrado importancia el estudio del comportamiento de las arcillas expansivas en vista del creciente número de obras en las que es necesario usarlas. Estas arcillas son sensibles a los cambios de humedad es decir, son aquellas que tienen susceptibilidad a sufrir un apreciable cam b io de volumen con el correspondiente cambio en la humedad, ya sea durante la construcción ó la operación de una estructura. Los materiales de este tipo se encuentran principalmente en depósitos residuales de material fino, aunque claro, estos materiales también pueden ser transportados y deposita dos en algún otro sitio.

Una arcilla tiende siempre a la expansión volumétrica al ser ali viada de cargas preactuantes, las características de expansividad guardan una estrecha relación con las de compresibilidad pudiéndose afirmar que las arcillas más expansivas en la descarga son también fuertemente compresibles en procesos de carga en la rama virgen de su curva de compresibilidad.

La disminución de esfuerzos efectivos, como sea que se produzcan, es el factor que más contribuye a provocar la expansión, siempre que exista la posibilidad de que un suelo adquiera agua (se sature) y transcurra el tiempo necesario para que el fenómeno se desarrolle, por ejemplo, si una construcción se efectúa sobre materiales expansivos y posteriormente por las condiciones propias de la obra cambia la humedad del subsuelo, los estratos de estos materiales pueden sufrir fuertes movimientos perjudicando la construcción que soportan. Se puede citar como ejemplo las primeras

construcciones que se erigieron en Cd. Obregón en donde se observaron grietas en muros y pisos y levantamiento de éstos, los daños más severos ocurrían, al igual que en el presente, en estructuras ligeras, obviamente las más numerosas, de ahí la importancia que ha caracterizado el problema. Así la experiencia local indicó que un manto superior, arcilloso, denominado "barrial", origina los daños de las estructuras y el levantamiento de los pisos y pavimentos en él apoyados; por el contrario, los daños son mínimos si las cimentaciones se desplantan en un manto subyacente arenolimoso con inclusiones de carbonato de calcio, denominado "tierra blanca". En el caso de plazas, banquetas y pavimentos la utilización de cal ó cemento para estabilizar el "barrial" en vez de sustituirlo arrojó buenos resultados.

Por su parte, los estudios del subsuelo confirmaron la presencia de suelos expansivos y cuantificaron su deformabilidad por carga ó saturación, su resistencia al corte y otras propiedades mecánicas, con el conocimiento de la estratigrafía y propiedades del subsuelo se determinaron las soluciones de cimentación. (Ref. 1).

2.2) Composición Mineralógica de las Arcillas

En los suelos cohesivos la composición mineralógica parece ser el factor de control más importante de muchas de sus propiedades, siendo algunas de éstas de interés ingenieril.

Como ya se dijo, la mayor parte de las arcillas se encuentran en depósitos de tipo residual, esto es, se forman básicamente por reacciones químicas las cuales involucran algunos procesos físicos y estas reacciones determinan la naturaleza de la arcilla final así como su comportamiento.

De acuerdo con lo anterior la generación de reacciones químicas constituyen acciones de tipo eléctrico, por lo que puede decirse que, el comportamiento de los suelos finos se circunscribe al del campo eléctrico al que están sujetos, esto es, entre los sólidos del suelo fino se ejercen fuerzas eléctricas fundamentalmente y así, si se considera una partícula sólida y de acuerdo con la ley de Henry en donde se indica que en el interior de los cuerpos sólidos las fuerzas eléctricas están en equilibrio, lo que no sucede en la superficie y se puede aceptar que en el caso de las partículas sólidas se tienen fuerzas eléctricas que no están en equilibrio y que ejercen acciones de atracción ó repulsión, dependiendo del signo de estas fuerzas y del correspondiente a las fuerzas eléctricas de los elementos que rodean a los sólidos.

En base a lo anterior se considera que en la superficie del sólido se generan fuerzas eléctricas que son negativas; rodeando a los sólidos se tiene al agua constituida por un ión de hidrógeno con signo positivo y un ión hidroxilo de signo negativo; se dice que el agua es un elemen-

to bipolar y por lo tanto, por la acción del sólido, se orientan las moléculas de agua uniéndose a la partícula sólida a través de su polo positivo, -- ejerciéndose una fuerza de atracción tan intensa que el comportamiento de esta agua muy próxima al sólido es como el de un sólido; a esta agua que forma una capa alrededor del sólido se le puede denominar capa sólida. Rodeando a la capa sólida se tienen otras moléculas de agua en donde la influencia del sólido existe, pero con menor intensidad y puede llamársele a esa capa de agua "capa fluida" y finalmente rodeando a esas dos capas se tiene al agua que ya no está sujeta a la acción del sólido y que por lo tanto sigue las leyes del campo gravitacional y por lo tanto las leyes de la hidráulica a la que se le acostumbra llamar agua libre.

A la capa sólida y a la fluida se les acostumbra denominar capa de agua adsorbida. Sin embargo con las ideas anteriores sucede un hecho raro, pues al considerar dos partículas sólidas que quedan frente a frente, -- esto es, con cargas eléctricas del mismo signo, entonces deberíamos observar que las arcillas sufren una disgregación en el sentido de que sus partículas sólidas tiendan a separarse, lo que en general no sucede, por lo que pudiera pensarse que todo el razonamiento está equivocado, a menos que aparezca algún otro elemento que logre la unión que bien pueden ser elementos -- químicos de carga eléctrica positiva (N_a , Ca , Mg , etc). que efectivamente existen en el agua en forma de sales.

A los minerales que forman a las arcillas se les denomina minerales arcillosos, estando éstos principalmente formados por silicatos de -- aluminio hidratado con una estructura cristalina bien definida y de acuerdo a ese arreglo cristalino se dividen en tres grupos generales, según Grim.,

esos grupos son:

- Grupo de la Caolinita
- Grupo de la Illita
- Grupo de la Montmorilonita.

Se ha encontrado que los diferentes minerales arcillosos están formados principalmente por dos bloques constructivos o unidades estructurales:

1) Tetraedro de Sílica (SiO_2).- Consistente en un átomo de silicio rodeado por cuatro átomos de oxígeno colocados en los vértices de un tetraedro. (Fig. 2.1.a, Ref. 2)

2) Octaedro de hidróxido de Aluminio (Gibbsite) $\text{Al}(\text{OH})_3$.- Contiene un átomo de aluminio en el centro de un octaedro, en cuyos vértices hay átomos de oxígeno ó radicales OH. (Fig. 2.1.b, Ref. 2). Cuando en vez de aluminio se tiene magnesio a este octaedro de hidróxido de magnesio se le llama brucita.

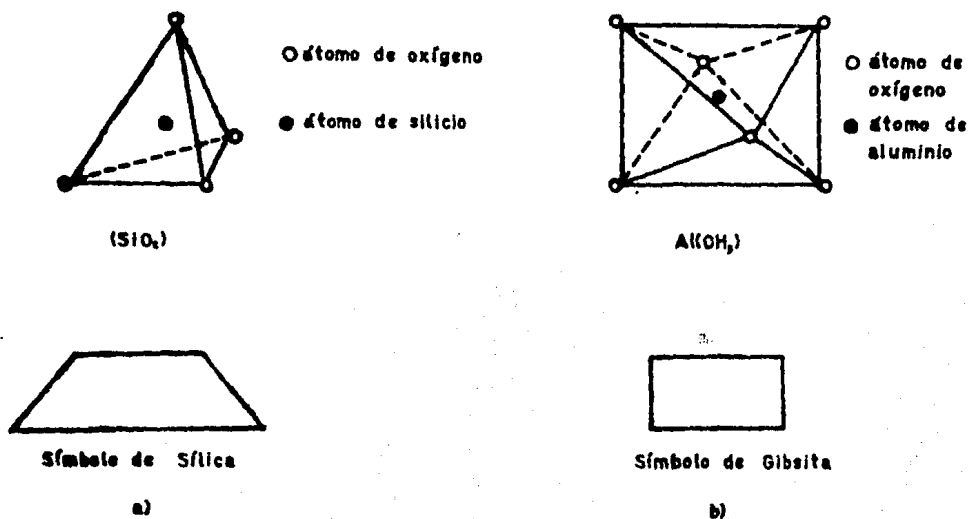


Figura 2.1.- Estructuras moleculares de los minerales de arcilla.

Se dice que una ligadura ó unión entre minerales de arcilla es fuerte ó débil dependiendo del tipo de unión que se tenga entre las partículas arcillosas, de esta manera, tenemos los siguientes tipos de uniones:

1) De valencia primaria.- Es la fuerza de unión entre átomos para formar moléculas y se debe a que los átomos comparten los electrones de sus órbitas incompletas, siendo este tipo de unión la más fuerte.

2) De valencia secundaria ó de Van Der Waals.- Es cuando se unen átomos de una molécula a los átomos de otra y se debe a la interacción de moléculas dipolares y actúan en distancias mayores de 5 Angströms.

3) Unión hidrógeno.- Es cuando un átomo H^+ es atraído a otros dos átomos formando un puente entre ellos. Este tipo de unión actúa en distancias del orden de 3 Angströms y la fuerza de unión es aproximadamente 10 veces mayor que la de valencia secundaria.

4) Unión Catiónica.- Se presenta cuando un catión es igualmente atraído a dos moléculas cargadas negativamente, es similar a la unión hidrógeno pero es mucho más débil e inestable.

5) Unión Electroestática.- Es la que ocurre entre todas las partículas cargadas eléctricamente, las estructuras de la molécula pueden ser pobres y entonces se pueden desarrollar fuerzas de Van Der Waals dependiendo de la orientación y espaciamiento de las partículas.

Atendiendo a las anteriores estructuras moleculares y distin--

tos tipos de unión, de acuerdo a la clasificación hecha por Grim tenemos:



Debido a que las fuerzas de valencia en los átomos de oxígeno -- superiores, en la lámina de sílica, se encuentran incompletas, así como los espaciamientos que guardan entre sí dichos oxígenos, resulta posible que la mencionada lámina se una a una de gibsita al tenerse la sustitución de dos -- de los oxígenos de la lámina sílica por dos de los hidroxilos de cada unidad octaédrica de la gibsita estableciéndose una liga del tipo de valencia la -- cual es demasiado fuerte. Se pueden unir láminas de este tipo unas sobre -- otras para formar cristales de caolín conocidos como caolinita, siendo las -- fuerzas que las unen del tipo hidrógeno desarrolladas entre los iones oxígeno y los iones hidroxilo, esta unión es también relativamente fuerte. A pe -- sar de que las láminas de sílica y gibsita pueden sobreponerse indefinida -- mente, las partículas de caolín se encuentran en la naturaleza en forma de -- placas hexagonales con diámetros del orden de 0.5 a 1.0 micras y de 0.05 micras de espesor. (Fig. 2.2, Ref. 2)

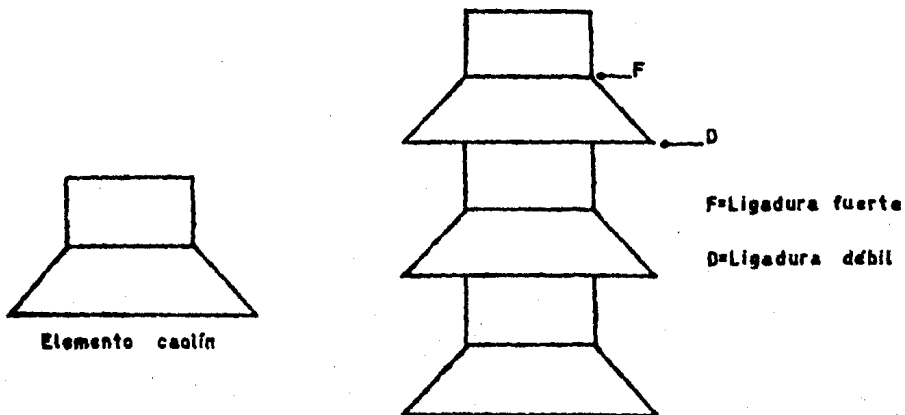


Figura 2.2.- Representación gráfica del Elemento Caolín.

Grupo Montmorilonita. $(Si_4 O_{10}) (OH)_2 Al_2$.

La estructura de los montmorilonitas consiste en la unión de una lámina octaédrica aluminica (gibbsita) en medio de dos de sílica (Fig. 2.3, - Ref. 2) y al tenerse sustituciones isomorfas, los cuales consisten en la -- sustitución de un átomo por otro se pueden originar cargas residuales negativas y si el agua contiene cationes tales como el sodio y el potasio, estos -- son atraídos a las unidades que tratan de satisfacer la carga negativa resultante de la sustitución isomorfa. El problema es que estos cationes no quedan fijos en la estructura de las láminas sino que se pueden intercambiar. -- Al tenerse una unión catiónica en la montmorilonita se tiene una liga débil y dependiendo de la capacidad del catión para ordenar moléculas de agua se -- pueden disociar las unidades estructurales de la montmorilonita, separándose unas respecto a otras, macroscópicamente esto se manifiesta en forma -- de expansión.

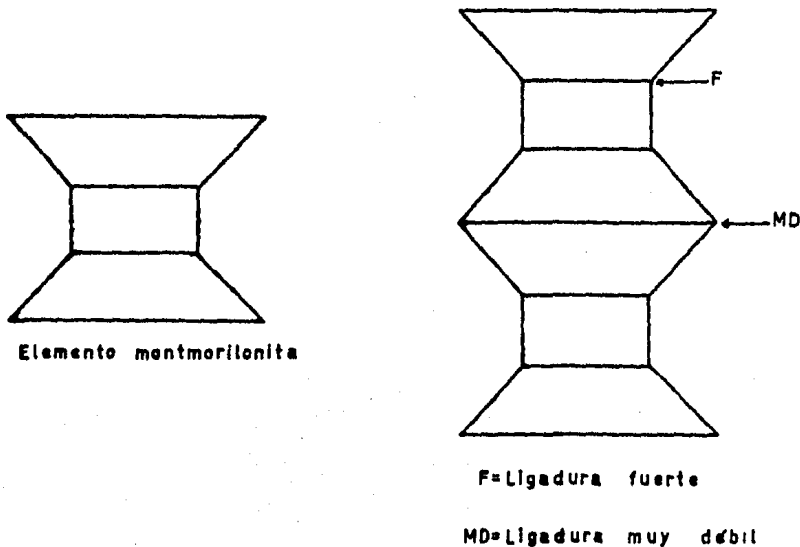


Figura 2.3.-Representación gráfica del Elemento Montmorilonita.

Existen cationes que al hidratarse pueden aumentar de tamaño hasta 7 veces, es decir, la capa de agua ordenada es muy grande, tal es el caso del sodio que aproximadamente tiene un radio de 0.98 Angströms y al hidratarse se pueden llegar a 7.8 Angströms de radio. Las capas de montmorilonitas -- son sumamente pequeñas y se encuentran en la naturaleza formando placas con un diámetro del orden de 0.05 micras y con un espesor 400 veces menor a este diámetro, o sea 0.000125 micras.

Grupo Ialitas. $(K_y Fe_4 Mg_4 Mg_6) (Si_8-y Al_y O_{20} (OH)_4)$.

Es similar a la montmorilonita pero se tienen sustituciones isomorfas adicionales en la lámina sílica, por lo tanto hay una carga negativa mayor, que en su mayor parte está balanceada por iones no intercambiables de potasio, que ocupan el espacio entre átomos de oxígeno adyacentes, haciendo que las dos capas de mineral estén más fuertemente ligadas que la montmorilonita, por lo que la illita no se expande tanto en presencia de agua como la montmorilonita (Fig 2.4, Ref. 2).

Sustitución isomorfa adicional en la lámina sílica

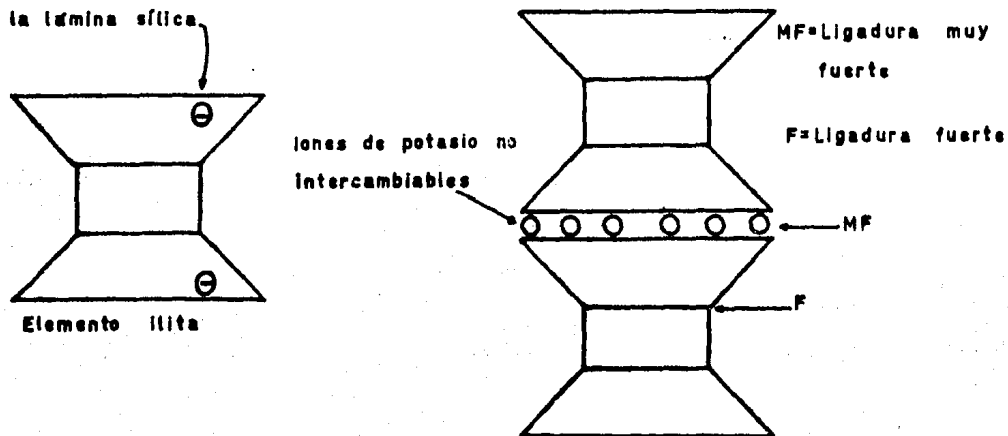


Figura 2.4.-Representación gráfica del Elemento Illita.

Este mineral se encuentra en la naturaleza formando partículas - que tienen un diámetro del orden de 0.5 micras y de un espesor 50 veces menor que el diámetro.

Los cambios en la composición de los iones intercambiables de la solución externa, pueden producir fuertes cambios en la expansividad y de - otras propiedades físicas de las masas arcillosas como se verá posteriormente.

A través de un Microscopio Electrónico de Barrido, las arcillas que no son expansivas tienen la apariencia de superficies planas y relativamente gruesas.

Las arcillas expansivas como la montmorilonita, tienen un aspecto arrugado, como de hojuelas tostadas de maíz (corn flakes) encimadas unas con otras.

Las illitas tienen un aspecto intermedio algo más cercano al de la montmorilonita.

2.2.1 Influencia del tamaño de las partículas.

White (1949) presentó una tabla de datos tabla 2.1 (Ref.3) en la que muestra la relación que existe entre el tamaño de los minerales de - arcilla con los valores límite de Atterberg. Los valores de los límites se incrementan al decrecer el tamaño de las partículas, y el límite líquido -- tiende a incrementarse un poco más que el límite plástico. Entre los factores que determinan los valores de los límites de una arcilla se encuentran entre otros: la fineza de sus partículas en su estado natural y el - grado al cual las partículas y agregados son remoldeados durante la prepa-

Mineral de arcilla y tamaño de la partícula	LP	LL	I _p
<i>Illita, Grundy County, Ill.</i>			
< 1 μ	39.6	83	43.4
< 0,5 μ	52.3	103.7	51.4
<i>Illita, La Salle County, Ill</i>			
< 1 μ	46.2	85.6	39.4
< 0.5 μ	53	111.2	58.2
<i>Caolinita, Anna, Ill</i>			
< 1 μ	37.1	64.2	27.1
< 0.5 μ	39.3	71.6	32.3
<i>Montmorilonita, Pontotoc, Miss.</i>			
<i>intacta</i>	81.4	117.5	36.1
< 1 μ	109.5	177.6	66.1

Tabla 2.1.- Relación del tamaño de la partícula con sus valores límite de Atterberg (White, 1947)

ración de la muestra y la determinación de los valores. El último punto es ilustrado al observar unas muestras de bentonita en estado natural a través de un microscopio, teniéndose una masa compuesta de partículas de montmorilonita de al menos unas micras de diámetro. Ya que las partículas de montmorilonita se disgregan muy fácilmente cuando se hacen los análisis del tamaño de la partícula; una determinación del tamaño de las partículas puede indicar sólo el grado de disgregación y no representar la distribución del tamaño de partículas del tamaño original. Así como el grado de disgregación es importante, la determinación de la distribución del tamaño de las partículas puede correlacionarse con valores límite de arcillas montmoriloníticas.

Frecuentemente la distribución del tamaño de las partículas de una arcilla se relaciona con el grado de cristalización alcanzado por los componentes de los minerales arcillosos, conforme las partículas son más pequeñas éstas son menos ordenadas. Por ejemplo, comparando los valores límite para dos caolinitas ó dos ilitas que tengan el mismo catión intercam

biable pero con diferente distribución de tamaño de las partículas, los valores límite más altos que se obtienen de las muestras con las partículas más pequeñas deben explicarse, por la presencia de estas partículas más pequeñas y también porque estas partículas son menos ordenadas.

Otro factor que influye es el que los minerales de arcilla mal ordenados se disgregan en partículas más pequeñas más fácilmente que los minerales bien ordenados. De esta manera para minerales mal ordenados una pequeña cantidad de trabajo bastará para dispersar a la arcilla. Como resultado el considerar solamente la variación en el tamaño de las partículas llevaría a una pequeña diferencia en los valores límite, pero como el grado de ordenación de las partículas interviene la diferencia en los límites es mayor.

Un decremento en el tamaño de las partículas debe estar acompañado por un incremento en la superficie total, y por lo tanto, debe esperarse un incremento en el índice de plasticidad.

Si se llama " Superficie Específica" a la relación del área entre el peso de las partículas, entonces podemos decir que las arcillas que tengan mayor superficie específica deben tener acciones eléctricas más intensas y quizá esto se refleja en el hecho de que son más susceptibles a las variaciones del contenido de agua, así por ejemplo, las montmorilonitas que efectivamente exhiben una superficie específica bastante grande son más susceptibles a la acción del agua que las ilitas. Sin embargo puede decirse que no es el tamaño de las partículas sólidas lo que interesa sino más bien al área expuesta al contacto con el agua y así por ejemplo, si se tiene una partícula sólida pequeña, ésta tendrá una cierta superficie espe

efica que podrá ejercer mayor acción sobre el agua adyacente aumentando el índice de plasticidad como se ve en la figura 2.5 (Ref.3)

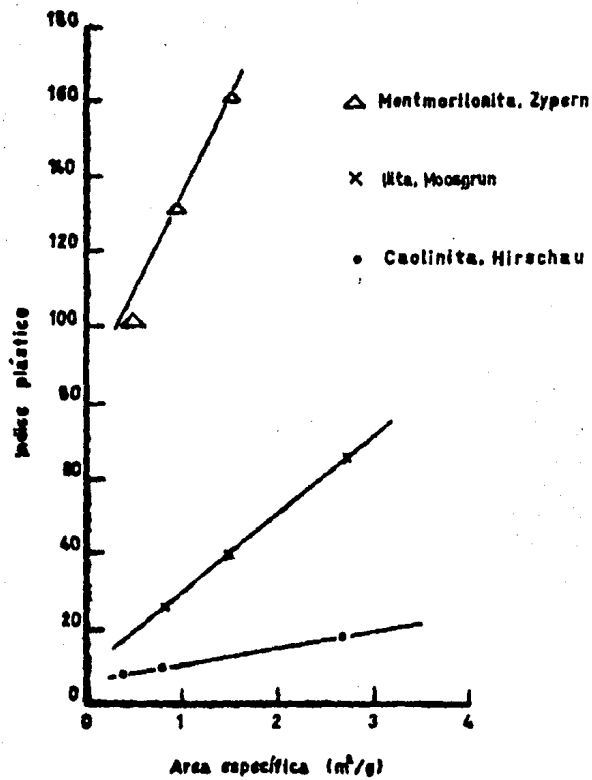


Figura 2.5.- Índice plástico contra Área Específica para distintos minerales arcillosos (Platen y Winkler, 1958)

2.3) *Propiedades Índice y mecánicas de las arcillas.*

Para poder diseñar con cierto grado de confiabilidad una obra de ingeniería, el ingeniero necesita conocer el comportamiento del suelo en -- cuanto a sus deformaciones, sus esfuerzos y su relación con el tiempo, de -- esta manera, el utilizar propiedades índice (características intrínsecas -- del suelo) como lo son por ejemplo los valores límites de Atterberg, que se -- basan en pruebas empíricas simples, dan como resultado el poder correlacio-- nar estas propiedades índice con propiedades mecánicas fundamentales tales como la resistencia al corte y la compresibilidad.

2.3.1) *Límite Plástico.*

Observando los datos de las tablas 2.2 (Ref.3) y 2.3 (Ref. 3) se ve que no hay un valor o un rango de valores representativo del límite plás-- tico que sea característico de un mineral particular de arcilla, dentro del rango de valores del límite plástico para un mineral de arcilla se pueden -- tener grandes variaciones como es el caso de las montmorilonitas. Estas -- variaciones no son debidas solamente a las variaciones de la composición -- del catión intercambiable y a la presencia de componentes minerales no ar-- cillosos, sino también a las variaciones inherentes de la estructura y com-- posición dentro del mismo mineral de arcilla. Esto se refleja en la fuerte variación de los límites plásticos para la montmorilonita con litio.

Tipo de Arcilla	Cación Intercambiable	Ca ⁺⁺			Mg ⁺⁺			K ⁺			NH ₄ ⁺			Na ⁺			Li ⁺		
		LP	LL	Ac	LP	LL	Ac	LP	LL	Ac	LP	LL	Ac	LP	LL	Ac	LP	LL	Ac
Montmorilonita	(1)	65	166	1.26	59	158	1.24	57	161	1.30	75	214	1.74	93	344	3.14	50	638	6.98
	(2)	65	155	1.20	51	199	1.97	57	125	0.91	75	114	0.52	59	445	4.72	59	565	6.75
	(3)	63	177	1.34	53	162	1.24	60	297	2.79	60	323	3.09	97	700	7.09	60	600	6.35
	(4)	79	123	0.44	73	138	0.65	78	108	0.32	74	140	0.66	50	280	1.12	52	292	2.10
Illita	(1)	40	90	0.50	39	83	0.44	43	81	0.38	42	82	0.40	34	61	0.27	41	68	0.27
	(2)	36	69	0.33	35	71	0.55	40	72	0.32	37	60	0.23	34	59	0.25	38	63	0.25
	(3)	42	100	0.55	43	98	0.55	41	72	0.31	39	76	0.37	41	75	0.34	40	89	0.49
Caolinita	(1)	36	73	0.37	30	60	0.30	38	69	0.31	34	75	0.41	26	52	0.26	33	67	0.34
	(2)	26	34	0.08	28	39	0.11	28	35	0.07	28	35	0.07	28	29	0.01	28	37	0.07

Montmorilonita: (1) Pontotoc, Miss; (2) Cheto, Ariz.; (3) Belle Fourche, S. Dak.; (4) Elmsted, Ill. (Contiene aprox. 25 % de illita mezclada)

Illita: (1) Fithian, Ill.; (2) Jackson County, Ohio; (3) Grundy County, Ill. (Contiene aprox. 5 % de montmorilonita mezclada)

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

Tabla 2.2.- Límites de Atterberg (White, 1955)

Arcilla	Natural		
	LP	LL	
Montmorilonita	(1)	97	700
	(2)	72	124
	(3)	82	118
Illita	(4)	25	36
	(5)	24	29
Caolinita	(6)	30	35
	(7)	37	58
Illita + 10% Mo	(8)	26	58
Illita + 5% Mo	(9)	35	61
Caol. + 10% Mo	(10)	33	65

Tabla 2.3.- Límites de Atterberg (Grin, 1950)

(a) Mezclas naturales.

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

En el caso de las montmorilonitas el sodio y el litio como cationes intercambiables pueden provocar límites plásticos altos. Hay una pequeña diferencia entre los valores para muestras de estos minerales con los que se tienen en muestras con cationes intercambiables de calcio, magnesio, potasio y amonio. Según Williams (1953), debe esperarse que las montmorilonitas *6*-*6*-*6* mezcladas con un catión divalente, por ejemplo el calcio deben mostrar una variación considerable en los límites plásticos, con la relativa abundancia de tales iones.

En el caso de otros minerales arcillosos la naturaleza de los cationes intercambiables provoca variaciones relativamente insignificantes - en el límite plástico; esto debe esperarse por su baja capacidad para intercambiar cationes. Para los materiales en estado natural compuestos de minerales de arcilla diferentes a la montmorilonita, otros factores, tales como la presencia de materiales no arcillosos provocarán probablemente mayores - variaciones en los límites plásticos que los que provocarían algunas diferencias en la composición de los cationes intercambiables. Una excepción importante es que el sodio produce un pequeño decremento en el límite plástico para estos minerales de arcilla, mientras que incrementa este valor en las montmorilonitas.

Los datos de la tabla 2.2 (Ref. 3) muestran la importancia de la montmorilonita en los límites plásticos. La montmorilonita (4) contiene - aproximadamente 25 % de *illita* y muestra grandes variaciones en el límite - plástico, indicando que la montmorilonita es el componente que domina. La *illita* (3) contiene una pequeña cantidad de montmorilonita (5%) con cationes intercambiables de sodio, la cual es adecuada para provocar una varia-

ción en el límite plástico y como se mostrará más adelante generalmente provoca un incremento en el límite líquido y por lo tanto en el índice plástico.

2.3.2) Límite Líquido.

Como en el caso del límite plástico los datos de las tablas 2.2 (Ref. 3) y 2.3 (Ref. 3) muestran que no hay un límite líquido que sea característico o representativo para un mineral arcilloso. El rango del límite líquido para un grupo particular de minerales de arcilla es mucho más grande que el rango para los límites plásticos. Los minerales arcillosos ordenados conforme a valores decrecientes del límite líquido son aproximadamente como sigue: montmorilonita con sodio ó con litio, calcio, magnesio, potasio, amonio; illita; caolinita mal cristalizada; caolinita bien cristalizada. Los datos de la tabla 2.2 (Ref. 3) muestran los grandes valores de los límites líquidos para muestras de montmorilonita con sodio y litio. El límite líquido de estos materiales es difícil de determinar y de hecho no existe un valor definido para ellos debido a su alto grado de tixotropía. Otro -- factor que influye es que el desarrollo de tixotropía toma mucho tiempo relativamente, la cual varía de una muestra de montmorilonita a otra, de tal manera que el límite líquido puede cambiar con el paso del tiempo después de la preparación de la muestra. Los valores dados, por lo tanto, simplemente representan un orden de magnitud. Los valores para las muestras de montmorilonitas en las cuales se presentaron intercambios con calcio, magnesio, amonio y potasio no muestran diferencias substanciales en el límite líquido y son todos aproximadamente el 50 % ó menos que los valores de los límites de las montmorilonitas con sodio y litio. Las diferentes --- muestras de montmorilonitas tratadas con el mismo catión muestran diferencias en el límite líquido, las cuales pueden ser de más del 100 %, indi

cando otra vez que el carácter del catión no es el único factor que tiene influencia sobre este valor y que la estructura y la composición del silicato es también importante.

Los valores de la montmorilonita (4) (tabla 2.2, Ref. 3) indican que la illita en cantidades importantes por ejemplo 25 % mezcladas con la montmorilonita provoca generalmente un decremento en el límite líquido, mientras que el efecto es mucho menor en el límite plástico. En el caso de la illita (3), la cual contiene aproximadamente 5 % de montmorilonita, la presencia de este mineral incrementa el límite líquido, particularmente las muestras con sodio y litio. Parece no tener efecto en las muestras con potasio y amonio. Una comparación de los límites líquidos de las muestras (8) y (9) comparadas con las muestras (4) y (5) de la tabla 2.3 (Ref. 3) muestran que la presencia del 5 al 10 % de montmorilonita en una muestra de illita puede provocar un incremento significativo en el límite líquido.

Analógicamente una comparación de los valores de la muestra (10) con las muestras (6) y (7) de la tabla 2.3 (Ref. 3) muestra que la presencia de aproximadamente 10 % de montmorilonita en una muestra de caolinita puede provocar un gran incremento en el límite líquido, estos datos sirven para enfatizar el hecho extremadamente importante de que pequeñas cantidades de montmorilonita asociada con otro material de arcilla puede incrementar significativamente los valores límites y provocar que la naturaleza del catión intercambiable se convierta en un factor de control. Por lo que es importante a la hora de valorar las propiedades, que los análisis de minerales de arcilla sean completos para revelar la presencia de pequeñas cantidades de todos los minerales constitutivos.

2.3.3) Índice de Plasticidad.

Los índices de plasticidad de los minerales de arcilla varían de más del 600 % para algunas montmorilonitas sódicas a 1 % para unas caolinitas sódicas (tabla 2.2, Ref. 3) aproximadamente en el siguiente orden: montmorilonita, illita y caolinita. Las montmorilonitas con sodio y litio dan -- valores muy altos alrededor de 300 % a 600 %. Las montmorilonitas con otros cationes dan valores que varían de cerca de 50 a 300 % con la mayoría de éstos entre 75 % a 125 % por lo tanto, no hay una variación sistemática con la composición del catión. También los datos muestran una gran variación -- para un catión particular con diferentes montmorilonitas (por ejemplo los -- valores para las muestras con amonio). Es más, una montmorilonita que particularmente muestra un valor grande para un catión, no necesariamente muestra un valor grande para otro catión.

La tabla 2.3 [Ref. 3] muestra que la presencia de pequeñas cantidades de montmorilonita en muestras de caolinita e illita incrementan el índice de plasticidad al incrementar el límite líquido. En el caso de la -- montmorilonita (4) (tabla 2.2, Ref. 3), la presencia de aproximadamente -- 25 % de illita sirve para reducir fuertemente el índice plástico. El índice de plasticidad de la montmorilonita (4) es similar a las de las illitas, mientras que su límite plástico es mucho más grande que aquellos para las illitas.

2.3.4) Efecto de secado

A. Casagrande [1932] señaló que el secado podía alterar la plas

tividad de un suelo y numerosos investigadores desde entonces han confirmado este descubrimiento. Lambe y Martin (1953), por ejemplo, presentaron datos para mostrar la reducción de los valores límite para una variedad de suelos después de secarlos, algunos de los cuales fueron margas calcáreas con contenidos orgánicos principalmente y otros fueron suelos lateríticos rojos con hierro férrico (F^{+3}) hidratado libre y alúmina. Los suelos formados por estos componentes son muy propensos a mostrar con el secado al aire el decremento más grande de los valores límites. De esta manera la oxidación de componentes orgánicos y la deshidratación de los componentes del $F_2 O_3$ deben esperarse para desarrollar una unión entre las partículas la cual debe ser resistente a la penetración del agua.

El secado del suelo es acompañado por un enjutamamiento, el cual tiende a acercar a las partículas tanto, que las fuerzas de atracción se vuelven tan fuertes que el agua no puede penetrar más entre las partículas. Se sabe que en el caso de las montmorilonitas el desalojo de toda el agua entre las partículas provoca un completo colapso de la estructura. Esto quiere decir, que el completo removimiento del agua adsorbida destruye las propiedades coloidales y la capacidad de expansión de este mineral. Generalmente se necesita más que el secado por aire para provocar una completa deshidratación. Sin embargo el secado en cualquier grado tiende a provocar un cambio irreversible en arcillas de cualquier composición tendiendo a disminuir los valores de los límites.

Para que sean representativos de las propiedades naturales, por lo tanto, los valores límite deben ser determinados en muestras sin secar.

2.3.5] Actividad.

Actividad (Skempton, 1953) es el cociente de dividir el índice plástico entre la abundancia de la fracción arcillosa definida como el porcentaje en peso seco de las fracciones menores de dos micras de la muestra. La actividad es un valor muy utilizado para indicar el índice plástico de la fracción arcillosa del suelo.

Los valores de la actividad para varios minerales de arcilla con diferentes cationes intercambiables están indicados en la tabla 2.2 (Ref. 3) La actividad de las montmorilonitas varía aproximadamente de 5 a 7. Skempton (1953) de los siguientes valores para los minerales de arcilla: montmorilonita sódica 7.2 ; montmorilonita cálcica 1.5 ; illita 0.9 y caolinita de -- 0.33 a 0.46. Estos valores son más grandes que los obtenidos por White -- (1955) debido a que en el trabajo de Skempton las arcillas naturales que fueron utilizadas contenían algunos materiales más grandes que dos micras. Parece que los componentes más grandes que dos micras producen alguna actividad la cual es añadida a la producida por la fracción menor de dos micras. Los valores de la actividad de arcillas naturales y suelos, por lo tanto, - tienden a ser más grandes que los valores predichos para su composición mineral arcillosa basada en datos de minerales puros de arcilla. Esto es -- particularmente cierto cuando la montmorilonita no es un componente y cuando la fracción menor que dos micras es muy pequeña.

En 1953 Skempton sugirió tres clases de actividad (Activa, Normal e Inactiva) y subdividió las tres clases en cinco grupos como sigue:

Grupo 1.-	Inactiva con actividad menor que	0.50
Grupo 2.-	Inactiva con actividad de 0.50 a	0.75
Grupo 3.-	Normal con actividad de 0.75 a	1.25
Grupo 4.-	Activa con actividad de 1.25 a	2.00
Grupo 5.-	Activa con actividad mayor que	2.00

Una inspección a los datos de la tabla 2.2 (Ref. 3) muestra que solo hay una correlación general entre la composición mineral de la arcilla y la clasificación de Skempton. Y esto es de esperarse dado que el tamaño de la partícula, sales solubles y material orgánico son otros factores que influyen en la actividad. La caolinita y la illita estarán en la clase inactiva, generalmente en el grupo 1. En el grupo 3 se deben esperar algunas - montmorilonitas y algunos arreglos de illita con capas mezcladas de montmorilonitas. Las montmorilonitas con cationes intercambiables que no sean so--dio deben esperarse en el grupo 4, mientras que las montmorilonitas sódicas deben estar en el grupo 5.

En general debe esperarse que las arcillas activas tengan una relativa gran capacidad de retención de agua, gran compactación bajo carga, - gran capacidad de intercambio de cationes y por lo tanto, las propiedades - varian notablemente con la naturaleza del catión intercambiable, ellas también deben ser altamente tixotrópicas, tener baja impermeabilidad y baja - resistencia al corte.

2.3.6) Sensitividad.

La sensitividad fue definida por Terzaghi (1944) como el co--

ciente de la resistencia de un suelo en estado inalterado entre la resistencia del suelo remoldado, al mismo contenido de agua. Una clasificación de sensibilidad de arcillas se muestra en la tabla 2.4 (Ref. 3) y las curvas - esfuerzo - deformación para una arcilla sensitiva típica están en la Fig. - 2.6 (Ref. 3)

Arcilla insensitiva	< 1
Arcilla de baja sensibilidad	1 - 2
Arcilla de mediana sensibilidad	2 - 4
Arcilla sensitiva	4 - 8
Arcilla extrasensitiva	> 8
Arcilla rápida	> 16

Tabla 2.4.- Clasificación de las arcillas de acuerdo a su sensibilidad. (Skempton y Northey 1952)

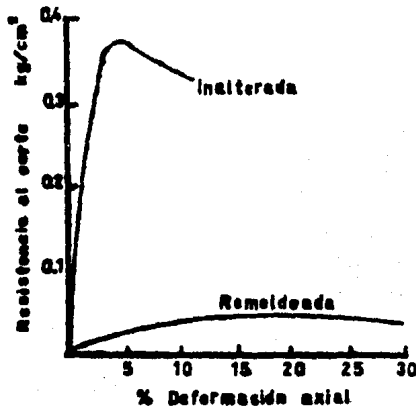


Figura 2.6- Curva esfuerzo -deformación de una arcilla sensitiva típica (Skempton y Northey, 1952)

Las arcillas que han sido fuertemente sobreconsolidadas durante

su historia geológica son insensitivas. Las arcillas y en general los suelos con altos valores de sensibilidad son aquellos con muy poca resistencia después de ser remoldeados. Existen casos en los cuales con sólo un pequeño disturbio basta para provocar que un material relativamente fuerte se comporte como un fluido. Las arcillas sensitivas generalmente tienen altos contenidos de humedad y un fuerte cambio en el contenido de agua puede provocar un gran incremento en la sensibilidad, algunas veces con resultados desastrosos. Algunas arcillas con moderada a alta sensibilidad presentan una recuperación de la resistencia cuando la muestra remoldeada se conserva sin que se pierda agua. Estos materiales son tixotrópicos. La cantidad de resistencia recuperada varía de suelo a suelo y con el contenido de agua. Skempton y --- Northey (1952) mostraron (Fig. 2.7, Ref. 3) que la recuperación de la resistencia es considerable en las montmorilonitas, moderada a pequeña en las illitas y prácticamente nula para caolinitas. Esto quiere decir, que los suelos compuestos básicamente por montmorilonitas tienen consecuentemente una gran actividad, son muy tixotrópicos y tienen de moderada a alta sensibilidad. El recuperamiento tixotrópico parece ser máximo en estas arcillas cuando el contenido de agua se aproxima al límite líquido. Así como el contenido de agua decrece por debajo del límite líquido el recuperamiento tixotrópico decrece. Arriba del límite líquido la relación no es muy clara pero probablemente depende de la naturaleza del catión intercambiable que posee la montmorilonita. Con el sodio como catión intercambiable probablemente habrá más recuperación arriba del límite líquido que cuando otros catiónes estén presentes.

La cantidad de recuperación de resistencia es mayor, como debía esperarse en arcillas de gran actividad, esto es en arcillas que tienen montmorilonita como su componente principal. Esto es una consecuencia del

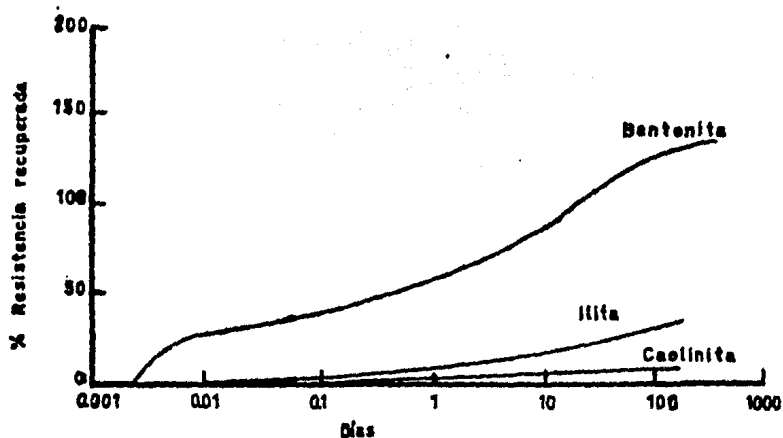


Figura 2.7 Recuperación de resistencia contra tiempo
(Skempton y Northey, 1952)

extremadamente pequeño tamaño de la montmorilonita y de su gran capacidad de absorción de agua, favoreciendo así el desarrollo de agua orientada en las superficies de los minerales de arcilla. También, debe esperarse que el sodio como catión intercambiable favorezca particularmente tal recuperación de resistencia, particularmente a altos contenidos de agua, debido a que el ión de sodio favorece el desarrollo de capas gruesas de agua orientada en las superficies de las partículas de los montmorilonitas. A menores contenidos de agua la naturaleza del catión, probablemente tenga una menor importancia de acuerdo a este concepto del efecto del catión intercambiable se observa esencialmente en el desarrollo de agua orientada y sólo indirectamente sobre las fuerzas de unión entre partículas.

Lambe (1958) trata de explicar el recuperamiento tixotrópico de la resistencia en suelos remoldeados sobre la base del efecto de las fuerzas de unión entre las partículas sin considerar el papel del agua adsorbida. A Grim le parece que el carácter del agua adsorbida es el factor más importante. Cuando se remoldea el suelo la orientación de las moléculas

las es destruida y la unión es rota ó al menos se reduce mucho su resistencia. Esto quiere decir, que al remoldearse, se desarrolla agua flúida entre las partículas y la resistencia es perdida. Cuando la muestra remoldeada - se deja reposar, la orientación del agua se desarrolla gradualmente otra vez y la resistencia se recupera. Este es un fenómeno de cristalización y se -- requiere de algún tiempo para que el agua se recristalice, y por lo tanto - la resistencia se recupere. A bajos contenidos de agua, la cantidad de agua que sirve como unión es pequeña; entonces habrá poca agua para recristalizar y habrá poco recuperamiento tixotrópico. El efecto del tiempo y de la humedad sobre la resistencia recuperada es fácil de explicar tomando en cuenta - el concepto en el cual se le atribuye mayor importancia a la naturaleza del agua adsorbida.

2.3.7) Resistencia a la compresión simple.

Los suelos cohesivos normalmente son clasificados sobre la base de la fuerza de compresión requerida para provocar la falla de una muestra inalterada probada bajo condiciones no confinados de la siguiente manera:

Consistencia muy suave	:	Menor de 0.25	Kg/cm ²
Consistencia suave	:	de 0.25 a 0.50	Kg/cm ²
Consistencia media	:	de 0.50 a 1.00	Kg/cm ²
Consistencia dura	:	de 1 a 2	Kg/cm ²
Consistencia muy dura	:	de 2 a 4	Kg/cm ²
Consistencia extremadamente dura	:	mayor de 4	Kg/cm ²

La resistencia a la compresión simple depende de la composición

mineralógica de la arcilla, de los materiales con que ésta se encuentre mezclada, de la distribución del tamaño de las partículas, de la forma de las partículas y del arreglo de las partículas unas con respecto a otras (por -- ejemplo, un arreglo paralelo contra un arreglo aleatorio de los minerales -- que forman la arcilla en forma de hojuelas). La historia de esfuerzos (historia geológica) de un material de arcilla puede en algunos casos ejercer un control más grande sobre la resistencia a la compresión que los factores de composición antes mencionados. Mielenz y King (1955) han mostrado que la mezcla de pequeñas cantidades de arcilla con una arena ó con un limo incrementa la resistencia a la compresión y que la máxima resistencia de tales mezclas en algunos casos puede exceder la resistencia de la arena, el limo ó la arcilla sola en las mismas condiciones de compactidad o consistencia. La tabla 2.5 (Ref. 4) muestra datos de mezclas preparadas con arena, caolinita y montmorilonita corroborando la anterior conclusión. Los datos también muestran que la montmorilonita, la cual presenta generalmente menos resistencia cuando no se mezcla con arena, proporciona resistencias mayores que la caolinita cuando se mezclan con arena. Las determinaciones de resistencia de los minerales de arcilla puros, por lo tanto tienen poca importancia.

Mezcla % de peso	Especímenes Húmedos		Especímenes Secados al Aire			
	Montmorilonita Sódica _a	Caolinita _b Arena	Contenido de agua, c %	Resistencia a la compresión, Kg/cm ²	Contenido de agua, % Inic. Fin.	Resistencia a la Compresión, Kg/cm ²
100			17.1	3.90	20 70	13.73
25		75	14.4	2.95	18.1 1.3	38
25	25	50	13.9	6.03	19.6 2.6	37.54
	25	75	13.6	0.64	17.8 0.1	5.38
	100		14.2	7.05	17.8 0.4	4.61

a Montmorilonita Sódica de Osage, Wyo.

b Caolinita de Bath, S.C. (bien cristalizada, fina)

c Contenido de humedad óptimo para la resistencia.

Tabla 2.5 Resistencia a la compresión de mezclas de arena y arcilla (Mielenz y King, 1955)

2.3.8) Resistencia al corte.

La resistencia al corte se mide a través del esfuerzo cortante - en la máxima deformación antes de la falla. Generalmente se determina bajo condiciones de incremento de carga.

La resistencia al corte de un suelo depende de los factores mencionados en la resistencia a la compresión simple y también de la carga impuesta sobre el suelo.

La resistencia al corte varía con la profundidad y consecuentemente con el incremento de presión efectiva (fig. 2.8 ; Ref. 3)

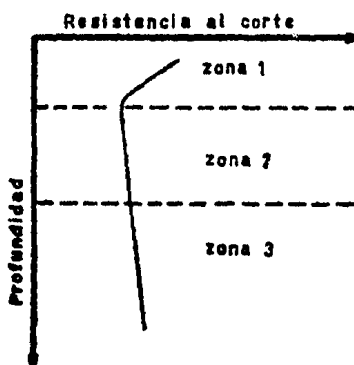


Figura 2.8.-Variación de la resistencia al corte con la profundidad de una arcilla normalmente consolidada sujeta a la superficie a secado.

A medida que se incrementa la profundidad puede haber una zona (zona 2 Fig. 2.8, Ref. 3) en la cual la resistencia al corte permanece constante aunque la presión de la carga se incrementa. Skempton (1948 y 1953) y Bjerrum (1954) mostraron que la resistencia se incrementa relativamente más rápidamente con la profundidad para arcillas con altos valores del Índice de plasticidad. De esta manera incrementos relativamente rápidos deben esperarse para arcillas montmoriloníticas.

Samuels (1950) mostró que en una muestra de montmorilopita -- (Bentonita de Wyoming) la resistencia al corte en relación con la composición del catión intercambiable se incrementa en el siguiente orden: sodio, calcio y aluminio. (Fig. 2.9, Ref. 3)

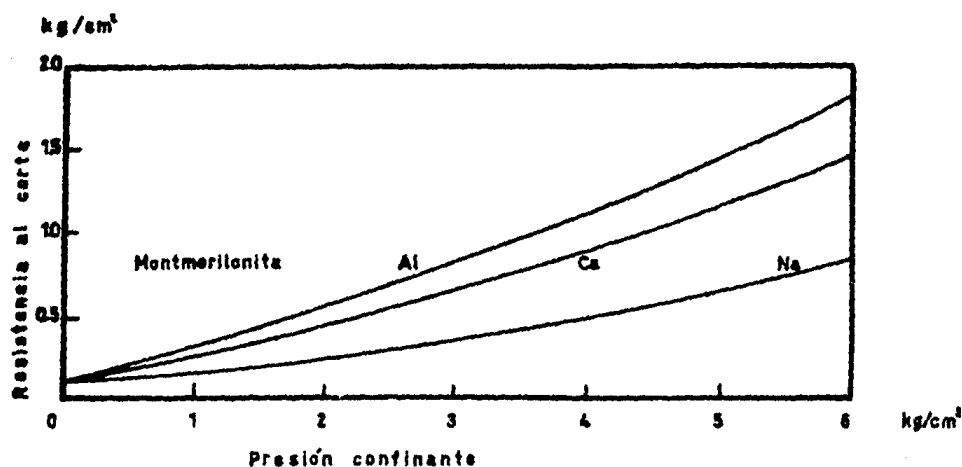


Figura 2.9 Efecto del catión intercambiable en la resistencia al corte. Samuels, 1950

La cohesión generada por las montmorilonitas no se puede explicar tomando solamente en cuenta su alta capacidad de retención de agua o el pequeño tamaño de sus partículas. Parece más lógico apoyarse en la base de su habilidad para orientar el agua adsorbida. También parece lógico que el agua fluida tenga una pequeña resistencia cohesiva pero que el agua orientada (capa sólida) tenga un considerable poder cohesivo. En el caso de las montmorilonitas el incremento de la resistencia al corte en función de la composición del catión intercambiable decrece en el siguiente orden: sodio, calcio y aluminio, parece lógico también, que a los contenidos de humedad encontrados en algunos suelos, los espesores de las películas de agua serán tales, que el calcio desarrollará una considerable mejor orientación de las moléculas de agua que la que haría el sodio.

Las contribuciones de otros minerales a la cohesión serán mas --

pequeñas que las producidas por las montmorilonitas debido a que ellos tienden a orientar a un menor porcentaje de agua presente en el suelo. Esto podría ser una consecuencia del tamaño de sus partículas que es más grande y probablemente también de las características inherentes a su estructura. La tabla 2.6 (Ref. 3) muestra algunas propiedades de algunos suelos.

Arcilla	Composición mineral de la fracción arcillosa en orden de abundancia	fracción arcillosa <2 μ , %	Actividad	Kg/cm ² Resistencia al corte inalterada	Sensitividad
St. Thorbé	Cuarzo, mica, montmorilonita (poca)	36	0.33	0.39	150 ⁺
Detroit	Mica, illita, calcita, cuarzo, montmorilonita.	36	0.36	0.175	2.5
Horten	Mica, illita, calcita, cuarzo, montmorilonita.	40	0.42	0.415	17
Beauharnois	Mica, illita, calcita, cuarzo, montmorilonita	79	0.52	0.185	14
Gosport	illita	55 ⁺	0.88	0.293	2.2
Shellhoven	illita, caolinita, algunos coloides orgánicos.	41 ⁺	1.33	0.37	7.6
México Cd.	Montmorilonita principalmente	90 ⁺	4.5	0.468	5.3

Tabla 2.6 Propiedades de algunos suelos (Skempton, Northey 1952).

La permeabilidad tiene una influencia decisiva sobre muchas de las propiedades ingenieriles de los sedimentos, por ejemplo, sobre la velocidad a la cual la relación de vacíos decrece al incrementarse la carga sobre los sedimentos y sobre la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de aplicación de la fuerza cortante.

Por lo general, los minerales de arcilla en los suelos son extremadamente finos y consecuentemente, tienden a llenar los espacios vacíos entre los granos de limo, arena y grava. Consecuentemente los minerales de arcilla reducen la permeabilidad de los suelos, especialmente de las arcillas remoldeadas en las cuales los rasgos estructurales, tales como grietas juntas, estratificación ó zonas de corte no se presentan. Si una arena contiene tan solo un pequeño porcentaje de mica, la ecuación dada por Terzaghi (1955) $K = 200 D_{10}^2 e^2$ la cual se aplica a arenas compuestas de granos más o menos equidimensionales en donde D_{10} es el diámetro efectivo, e la relación de vacíos y K la permeabilidad estimada, pierde su validez. Los factores que afectan la permeabilidad son composición mineral, distribución del tamaño de las partículas, textura, relación de vacíos, composición del caudal intercambiable, características del fluido y el grado de saturación. Debido a la gran variedad de factores que determinan la permeabilidad, el valor K de los sedimentos que no sean arenas limpias y la relación entre este valor y la relación de vacíos puede determinarse solo experimentalmente. Existe, de cualquier manera una correlación entre la composición mineralógica de la arcilla y el orden de magnitud de la permeabilidad.

Los datos de la tabla 2.7 (Ref. 3) muestran la reducción de la permeabilidad de una arena cuarzosa con la adición de mica. La adición del

Permeabilidad de arcillas y mezclas de arena y arcilla (Endell, 1938)

Arcilla y mezcla

Permeabilidad en cm/min.
a una presión de 65 Kg/cm²

Arena cuarzosa	1×10^{-3}
arena cuarzosa: mica	
9 : 1	4.6×10^{-4}
7 : 3	4.2×10^{-4}
1 : 1	5.8×10^{-4}
0 : 1	4.9×10^{-4}
arena cuarzosa: caolín	
9 : 1	9.5×10^{-5}
7 : 3	8.9×10^{-6}
1 : 1	2.5×10^{-6}
0 : 1	3.0×10^{-6}
arena cuarzosa: montmorilonita cálcica	
9 : 1	4.3×10^{-5}
7 : 3	2.1×10^{-6}
1 : 1	5.5×10^{-7}
0 : 1	2.0×10^{-7}
arena cuarzosa: montmorilonita sódica	
9 : 1	1.6×10^{-7}
7 : 3	3.0×10^{-8}
1 : 1	$< 10^{-8}$
0 : 1	$< 10^{-8}$

Tabla 2.7 Permeabilidad de arcillas y mezclas de arena y arcilla.

10 % de mica reduce la permeabilidad de la arena cuarzosa prácticamente -- a la de la mica pura. Los datos de esta tabla también muestran que al --- reemplazar la mica por caolinita se reduce aún más la permeabilidad y que -- cuando la montmorilonita es el mineral de arcilla, la permeabilidad se redu ce todavía más. En el caso de la montmorilonita, la variedad del sodio pro voca una mucho menor permeabilidad que la que provocaría la variedad de cal cio, cuando la arena contiene más del 30 % de montmorilonita sódica, la are na se convierte prácticamente impermeable. En todos los casos la máx ima re ducción de la permeabilidad se obtiene cuando los minerales de arcilla son aproximadamente la mitad ó un poco menos de la mezcla total.

Samuels (1950) mostró que para la montmorilonita la permeabili-- dad decrece en el siguiente orden: torio, aluminio, calcio y sodio y a la -- medida que la carga se incrementa las permeabilidades de las variedades de -- sodio y calcio son prácticamente nulas a presiones en exceso de aproximada-- mente 10.76 t/m^2 (Ref. 3). Este mismo autor mostró que la permeabilidad de la caolinita con distintos cationes intercambiables decrece en el siguien te orden: aluminio, calcio y sodio y que para tales arcillas el decremento --

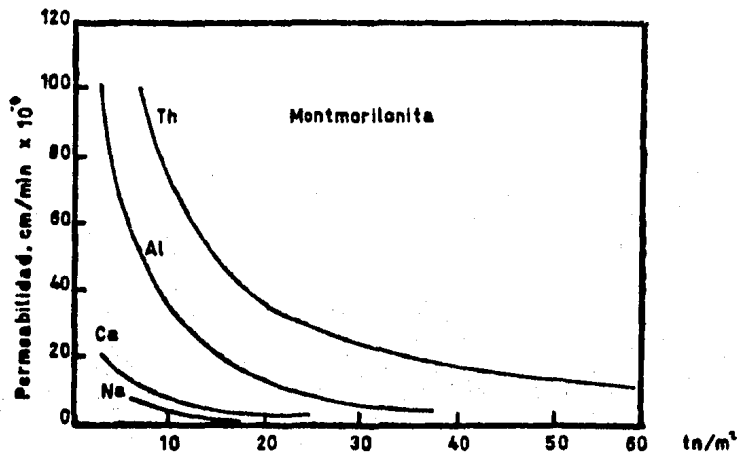


Figura 2.10.--Efecto del catión intercambiable sobre la permeabilidad de una montmorilonita.

de la permeabilidad al incrementarse la carga es mucho más gradual que con las montmorilonitas. En la fig. 2.11 (Ref. 3) los datos obtenidos por Samuels muestran la variación del coeficiente de permeabilidad y la relación de vacíos. La permeabilidad se incrementa al incrementarse la relación de vacíos, como era de esperarse. El incremento de la permeabilidad es prácticamente nulo en la montmorilonita sódica.

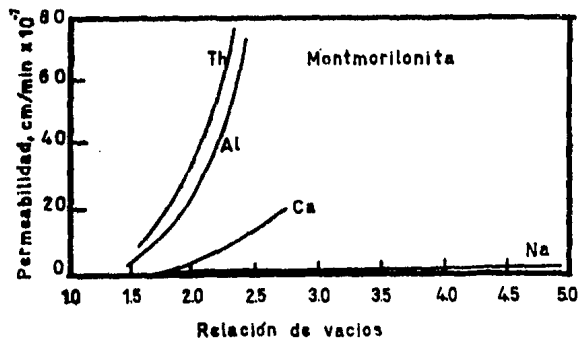


Figura 2.11 Permeabilidad contra relación de vacíos

La variación causada por la naturaleza del catión intercambiable -- puede en parte explicarse por el efecto dispersante del catión. De esta manera la reducción de la permeabilidad alcanzada cuando el sodio es el catión intercambiable es en parte una consecuencia del efecto dispersante de este catión al reducir el tamaño de las partículas de los minerales de arcilla.

Se ha propuesto que, en adición al efecto dispersante, los cationes intercambiables influyen en la permeabilidad a través de su influencia en la naturaleza y espesor del agua adsorbida en la superficie de los minerales de arcilla. Parece ser que las capas gruesas de agua adsorbida en la

superficie de las montmorilonitas con sodio sirven para impedir el flujo de agua por dos razones: (1) debido a la reducción del diámetro de los poros y (2) debido a la interferencia física del movimiento del agua libre contra una superficie de agua moderadamente orientada tal como la que existe en la capa molecular más lejana del agua adsorbida (agua fluida).

Cabe señalar que la muy baja permeabilidad de las arcillas montmoriloníticas, particularmente las de la variedad del sodio, hace desarrollar baja permeabilidad en una estructura tal como el corazón de una cortina de enrocamiento que forma parte de una presa.

2.3.10) Adsorción de agua y expansión.

Las figuras 2.12, 2.13, 2.14 (Ref. 3) muestran la cantidad y velocidad de adsorción de agua por una serie de minerales de arcilla en las cuales las muestras fueron compuestas por materiales sin compactar, secándolas al aire y con tamaños de partículas menores a la malla 200. Los datos muestran la muy alta adsorción inicial de agua de la montmorilonita só

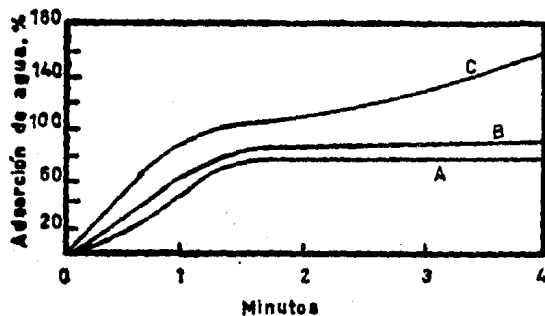


Figura 2.12.-Curvas de adsorción de agua de una ilita (A), caolinita con calcio (B) y sodio (C).

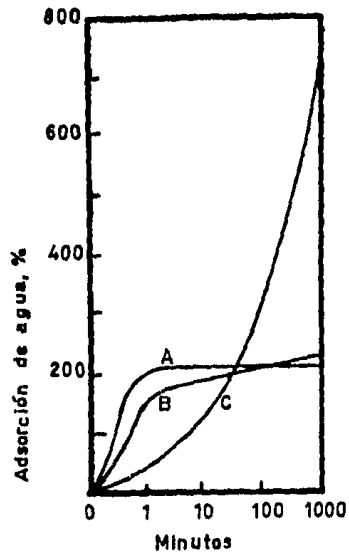


Figura 2.13. Curvas de adsorción de agua de una atapulgita (A),
montmorilonita cálcica (B) y montmorilonita sódica (C)

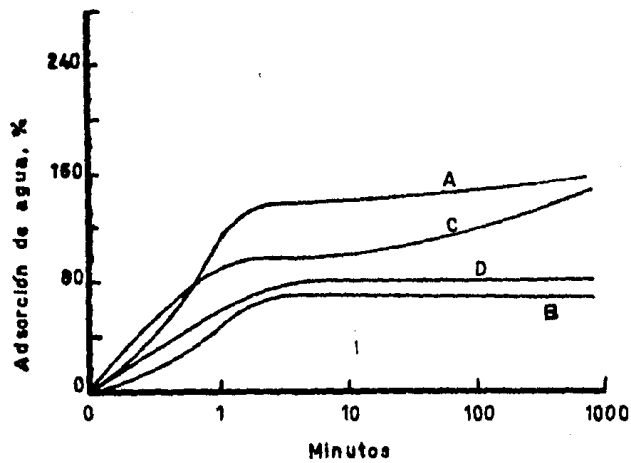


Figura 2.14. -Curvas de adsorción de agua de caolinitas e ilitas.
Irita de Grundy Ill. (A), ilita de Vermillion Ill. (B)
Caolinita de Union Ill. (E) caolinita de Georgia (D)

dica la cual empieza lentamente y después de aproximadamente 10 minutos se incrementa muy rápido. La lenta adsorción inicial probablemente se deba a la baja permeabilidad del material. La cantidad de agua adsorbida por las otras muestras se incrementa en el siguiente orden: montmorilonita cálcica, ilita mal ordenada e ilita mal ordenada (estructurada), caolinita mal ordenada, caolinita bien ordenada e ilita bien ordenada. Los datos muestran que para estas minerales de arcilla la adsorción de agua es muy rápida en los primeros minutos con lenta ó ninguna adsorción en grandes períodos de tiempo. La velocidad es relativamente menor para los minerales de arcilla en los cuales se tienen menores cantidades de adsorción de agua.

Mielenz y King (1955) señalaron que la adsorción de agua por las arcillas conduce a una expansión y que su magnitud varía ampliamente dependiendo de la clase y cantidad de los minerales de arcilla presentes, sus iones intercambiables, contenido de electrolito en su fase acuosa, distribución del tamaño de las partículas, distribución y tamaño de los vacíos, estructura interna, contenido de agua, carga sobrepuesta y posiblemente otros factores.

Los datos para mezclas sintéticas de bentonita de Wyoming (montmorilonita sódica), caolín y arena Fig. 2.14 (Ref. 4) revelan el potencial expansivo de la montmorilonita sódica. Bajo la carga de 0.0703 Kg/cm^2 restringida lateralmente; la montmorilonita sódica se expandió un 66 % durante 33 días de adsorción de agua y seguía aparentemente expandiéndose al final de la prueba.

Mielenz y King señalan que si una arcilla expansiva se sujeta a cargas iniciales de gran magnitud, se desarrollan presiones de expansión muy

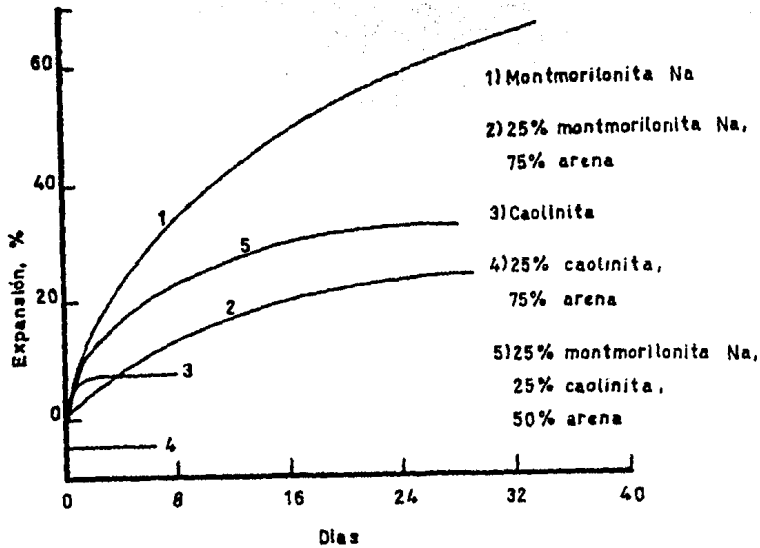


Figura 2.14.- Cambios de volumen de montmorilonita sódica, caolinita y mezclas de arena.

grandes. Se reportan valores tan altos como 38 Kg/cm^2 desarrollados en montmorilonita sódica que fue originalmente comprimida a 350 Kg/cm^2 humedeciéndose después de un período de descarga suficientemente largo para permitir la relajación del espécimen. La carga inicial de las arcillas a 210 Kg/cm^2 , en vez de a 350 Kg/cm^2 producen presiones de expansión menores. -- Pruebas de consolidación de arcillas no remodeladas y lutitas conteniendo ilitas ó montmorilonitas en la fracción arcillosa indican presiones potenciales de expansión tan grandes como 160 t/m^2

Dawson (1953) reporta que las presiones de expansión ejercidas por arcillas bentónicas confinadas alcanzaban hasta 160 t/m^2 cuando el rango normal varía entre 10 y 65 t/m^2 . Este investigador reporta también

que la presión de expansión tiene una gran reducción si a tales arcillas se les permite expanderse un poco, lo cual indica que la adsorción inicial de agua produce las presiones de expansión más grandes. Holtz y Gibbs (1953) establecieron que la presión de expansión, tiene una gran reducción con una pequeña expansión de las arcillas y lutitas y es más, que la expansión se reduce con un pequeño incremento de la carga.

De acuerdo a Mielenz y King (1955), dos mecanismos están involucrados en la expansión de los suelos: (1) una relajación de la resistencia efectiva a la compresión, relacionada con un crecimiento de películas capilares 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 del tipo de la montmorilonita es el resultado de la propiedad de adsorber capas gruesas de agua entre todas las capas de silicatos por tanto es de esperarse, y este es el caso, en el que se tiene el mayor potencial de expansión.

2.3.11) Compresibilidad y Consolidación.

Samuels (1950) presentó excelentes datos de compresibilidad para arcillas de montmorilonita y caolinita las figuras 2.15 y 2.16 (Ref. 3) son

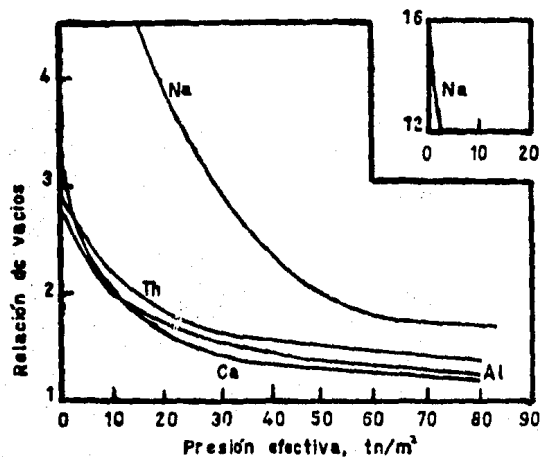


Figura 2.15.-Curvas de compresibilidad para distintas variedades de montmorilonita.

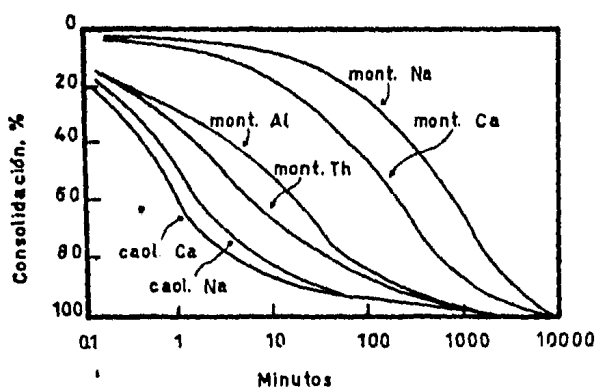


Figura 2.16.- Velocidad de consolidación de montmorilonitas y caolinitas a una presión de 40 a 80 t/m^2

de su publicación. Las pruebas empezaron con muestras a la consistencia del límite líquido con incrementos de carga de casi cero a aproximadamente 97 t/m^2 dejando actuar a cada incremento hasta que la consolidación primaria tenga lugar y la velocidad de la consolidación secundaria ha sido razonablemente establecida. Los datos muestran que para la montmorilonita natural, - la cual es de la variedad del sodio, tenga una gran reducción de volumen por la aplicación de pequeñas presiones y que mayores incrementos de presión provocan pequeñas reducciones en el volumen. Fig. 2.15 (Ref. 3).

Las curvas de velocidad de consolidación para la montmorilonita -- son particularmente interesantes en cuanto a que muestran una baja velocidad inicial de consolidación y un incremento en la velocidad con un incremento -- del tiempo. La gráfica es logarítmica de manera que la velocidad real de --- consolidación es más rápida al principio que lo que las curvas pueden sugerir. La velocidad inicial es particularmente pequeña para la variedad del sodio y algo más rápida para la variedad del aluminio y del torio; la variedad del calcio es intermedia.

En el límite líquido, las arcillas montmoriloníticas contienen -- gran cantidad de agua y las partículas individuales son muy pequeñas. El agua está presente en dos estados: (1) como agua líquida no orientada en los poros intersticiales (agua libre) y (2) como agua orientada rodeando a las partículas de mineral de arcilla (agua adsorbida). Se puede considerar que una pequeña cantidad de presión es requerida para remover el agua libre y que una presión considerablemente grande es probablemente necesaria para remover el agua orientada. En arcillas montmoriloníticas la mayoría de las moléculas del --- agua están orientadas y esto es particularmente cierto en la variedad del sodio, por lo tanto, debe esperarse que haya sólo una moderada pérdida de agua a bajas presiones y una considerable pérdida cuando la presión se incrementa.

El tamaño de las partículas de la variedad del sodio aumentan este efecto. También la pérdida de agua orientada alrededor de las partículas de montmorilonitas harán más difícil el ajuste de éstas en el espacio de unas -- con respecto a otras con la aplicación de presión. Este sería el caso cuando el agua está en forma líquida y puede actuar como lubricante. La variedad del calcio difiere de la del sodio en que tiene relativamente más agua libre y relativamente menos agua orientada la cual, de cualquier manera tiene mayor grado de orientación que en la variedad del sodio. Por lo tanto, debe esperarse que haya una relativa gran reducción en el volumen cuando se incrementa la -- presión.

En el caso de las arcillas caoliníticas la cantidad de agua en el límite líquido es pequeña y una gran parte de ésta es agua libre. Habrá menos agua orientada que en el caso de las arcillas montmoriloníticas y puede ser que la orientación sea menos perfecta. Como consecuencia, el agua será más fácil de remover y será más fácil para las partículas ajustarse ellas --

mismas unas a otras, de tal manera que, en la aplicación de presión, se tendrán inicialmente grandes reducciones de volumen y a continuación una pérdida pequeña, en la manera en que se incrementa la presión.

El efecto diferente que tiene el sodio en las arcillas de caolinita y montmorilonita es de interés. En las arcillas de caolinita el efecto del ión de sodio será destruir substancialmente cualquier orientación, esto tal vez se pueda explicar por la presencia de pequeñas cantidades de agua orientada, el efecto del sodio será solo reducir en algo el efecto de la orientación. También en el caso de las caolinitas el efecto dispersante del sodio será importante en cuanto que desarrolla partículas más pequeñas, mientras que en el caso de las arcillas de montmorilonita el efecto dispersante del sodio en el estado plástico será pequeño o nulo.

Las arcillas de montmorilonita se consolidan relativamente lento al principio y luego se incrementa la velocidad de consolidación con el tiempo; el incremento de la velocidad cambia muy poco a medida que la presión se incrementa. Esto puede explicarse como el resultado de la lentitud con la cual el agua orientada se rompe y la resistencia al ajuste entre partículas debido a las películas del agua sólida, el tamaño de las partículas finas y la baja permeabilidad, todo sumado a una muy lenta pérdida de agua. Visto de otra manera, el tamaño pequeño de los poros, el carácter del agua y la resistencia friccionante de las partículas al ajuste mutuo, harán que el agua salga de la arcilla y el incremento en las presiones tendrá poca importancia en el desalojo.

En el caso de la caolinita la pérdida de agua y la reducción de

volúmen es rápida desde el inicio de la aplicación de la carga y la velocidad de la reducción de volumen se incrementa al incrementarse la carga. También hay una pequeña diferencia debida a las variaciones de la composición del catión. Esto es de esperarse debido al incremento de la permeabilidad, incremento en la cantidad de agua libre comparada con la orientada y el incremento del tamaño del poro comparada con la montmorilonita

2.4) Identificación de suelos expansivos.

Se han propuesto diversos criterios para identificar suelos expansivos, algunos de ellos se basan en propiedades índice relativamente sencillos de obtener en laboratorio y algunos otros son más sofisticados y complejos -- pero más exactos. Entre los criterios recurridos más frecuentemente se encuentran por ejemplo los siguientes:

- Criterio de W.G. Holtz
- Criterio de Skempton
- Criterio de Altmeyer
- Criterio del U.S.B.R.

Criterio de W.G. Holtz

W.G. Holtz ha propuesto un sistema de clasificación basado en el porcentaje de contenido de finos, valor del índice de plasticidad y valor del límite de contracción, con estos tres valores combinándose se puede calificar cualitativamente el grado de expansibilidad de la arcilla y estimar la probable expansión que puede sufrir una pastilla en un consolidómetro su-

jeta a una carga de 0.07 Kg/cm², al variar su contenido de humedad de seco a saturado. Los valores propuestos por W. G. Holtz son los indicados en la tabla 2.8 (Ref. 1)

Contenido de finos < 0.001 mm	Índice de plasticidad Ip	Límite de Contracción L.C.	Expansión Libre %	Grado de expansibilidad
> 28	> 35	< 11	> 30	Muy alto
20-31	25-41	7-12	20-30	alto
13-23	15-28	10-16	10-20	medio
< 15	< 18	> 15	< 10	bajo

Tabla 2.8.- Clasificación según W.G. Holtz para suelos expansivos.

Criterio de Skempton.

Skempton, propuso un criterio de clasificación con base en la actividad de la arcilla, según este criterio los suelos se clasifican de acuerdo a la tabla 2.9 (Ref. 1)

Actividad	Categoría de suelo
Menor de 0.75	Suelo inactivo
0.75 a 1.25	Normal.
Mayor que 1.25	Suelo activo.

Tabla 2.9.- Clasificación según Skempton para suelos expansivos.

De acuerdo con la anterior clasificación, un suelo con una actividad mayor que 1.25 muy probablemente presentará propiedades expansivas de importancia.

Criterio de Altmeyer.

Altmeyer califica el grado de expansibilidad de los suelos únicamente con el Límite de Contracción. (tabla 2.10 Ref. 5)

Límite de Contracción (L.C.)	Grado de Expansibilidad
Menor de 10	Crítica
10 a 12	marginal
Mayor que 12	no crítico

Tabla 2.10.- Clasificación según Altmeyer para suelos expansivos.

Criterio del U.S.B.R.

El U.S.B.R. clasifica el suelo en estable, colapsible o expansivo, de acuerdo a su límite líquido y a su peso volumétrico seco, utilizando además la densidad de sólidos en el caso de suelos colapsibles, como se indica en la figura 2.17 (Ref. 1)

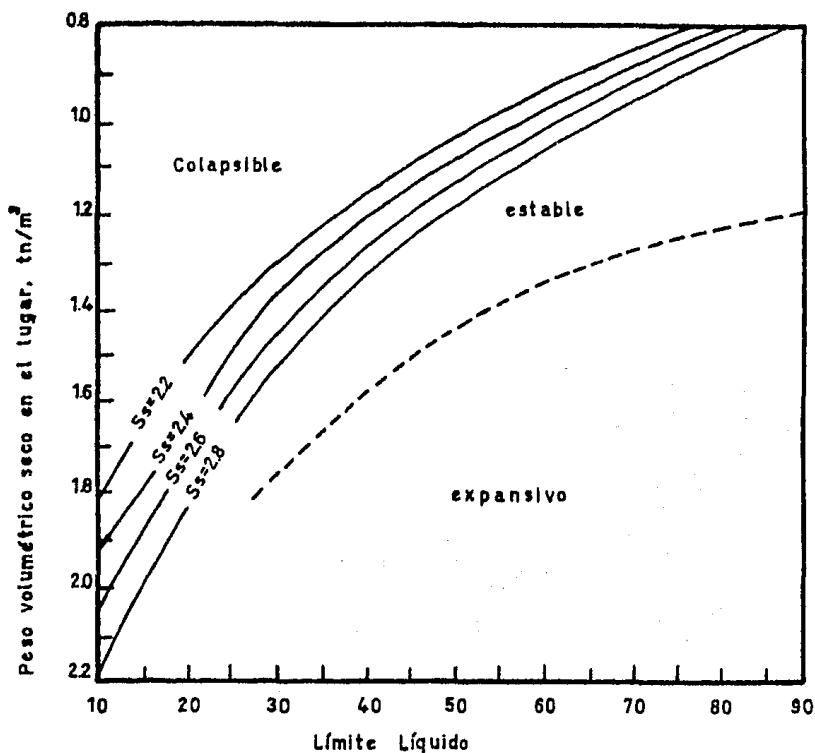


Figura 2.17.- Clasificación según U.S.B.R. para suelos expansivos y colapsibles.

Como se ha visto con anterioridad, los suelos arcillosos con el mineral Montmorilonita como su componente principal son los más susceptibles de sufrir expansiones y para la identificación exacta de los minerales arcillosos presentes en el suelo se requiere de análisis químicos y difracción de rayos X, este último método consiste esencialmente en comparar las relaciones de las intensidades de las líneas de difracción de los diferentes minerales, con las intensidades de la sustancia catión. Lo -- que ocurre en la práctica es que la gran mayoría de los laboratorios de -- Mecánica de Suelos no cuentan con los costosos equipos necesarios para es-

te tipo de identificación, que además requieren de especialistas en el ramo y entonces cuando se sospecha que un suelo puede presentar propiedades expansivas, primero se identifica cualitativamente en base a sus propiedades Índice y luego se recurre a otro parámetro que cuantitativamente refleja el potencial de expansión de dicho suelo, este parámetro es conocido como presión de expansión y se define como: "la presión requerida para mantener el volumen de una muestra constante", dicha presión se puede obtener utilizando consolidómetros ó el expansómetro de Hveem.

REFERENCIAS

- 1.- Memoria de la VII Reunión de Mecánica de Suelos.
1974 Guadalajara, México
- 2.- Métodos de Mejoramiento y Estabilización de Suelos.
Carlos Fernández Loaiza
- 3.- Applied Clay Mineralogy
Ralph E. Grim. 1962
- 4.- Physical- Chemical Properties and Engineering
Performance of Clays.
Mielenz R.C., and M.E. King. 1955
- 5.- Procedimientos Diversos para Estabilizar Suelos Expansivos.
Inq. Hugo S. Haas. Revista de Ingeniería Núm. 4, 1981.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Applied Clay Mineralogy
Ralph E. Grim. 1962
- 2.- Mejoramiento y Estabilización de Suelos
Carlos Fernández Loaiza
- 3.- La Ingeniería de suelos en las vías Terrestres
Alfonso Rico, Hermilo del Castillo.
- 4.- Apuntes de la Clase. " Problemas de Geotecnia"
Ing. Gabriel Moreno Pecero.
México, 1983.

3) METODOS DE ESTABILIZACION DE SUELOS.

Como ya se indicó en el capítulo 1, básicamente se tienen 3 tipos de técnicas de mejoramiento de suelos que son:

- a) mecánicas,
- b) térmicas y
- c) químicas.

En este capítulo se describirán y explicarán en una forma breve los diferentes tipos de estabilización química más utilizados en la práctica de la ingeniería, debido a que como ya se dijo con anterioridad, son éstos los que más relación tienen con el tema principal de esta tesis.

3.1) Estabilización con Cemento Portland.

La estabilización de un suelo utilizando cemento, es un método - que consiste en agregar una cierta cantidad de cemento Portland a un suelo seco pulverizado y permitir que la mezcla endurezca por hidratación con el cemento. Este material resultante (suelo-cemento), posee un incremento en la resistencia, sin embargo por ser rígido no acepta grandes deformaciones.

Los fenómenos químicos que ocurren entre el suelo y el cemento, cuando ambos se mezclan con el apropiado contenido de agua, aún no son comprendidos del todo, pero básicamente consisten en reacciones del cemento con los componentes silicosos de los suelos, que producen aglutinantes --- inertes que ligan a las gravas y arenas si se trata de un suelo grueso y

a los limos y arcillas si se trata de un suelo fino.

Entre las variables que influyen en la elaboración del suelo-cemento están: el tipo de suelo, la cantidad de cemento, el control de calidad, - el tiempo de curado (Fig. 3.1, Ref. 2) y la densidad en seco del material - compactado (grado de compactación).

Muchos tipos de suelos se pueden mencionar como adecuados para estabilizarlos con cemento, exceptuando a aquellos que contienen una apreciable cantidad de materia orgánica activa, ya que la reacción suelo cemento se ve minimizada o nulificada cuando esto sucede, pues los ácidos orgánicos poseen gran avidez por los iones de calcio que libera la reacción original del cemento y los captan, dificultando la acción aglutinante del propio cemento. Por esta razón las especificaciones de casi todos los países exigen que el contenido de materia orgánica en un suelo no sobrepase el 1 o 2 % en peso (Ref. 3), si ha de ser considerado apropiado para ser estabilizado con cemento.

Debido a que la hidratación del cemento hace a la mezcla suelo-cemento un material resistente, puede ser usado como base en la sección estructural de un pavimento en algunos casos, como por ejemplo, cuando las deformaciones del suelo o capa que la subyacen son pequeñas.

El suelo-cemento ha sido usado muy extensamente en reconstrucción de pavimentos para reforzar las diferentes capas que lo forman, en donde - estas son escarificadas, disgregadas, mezcladas, estabilizadas y recompactadas. Un factor importante que debe ser considerado es el tiempo de cura

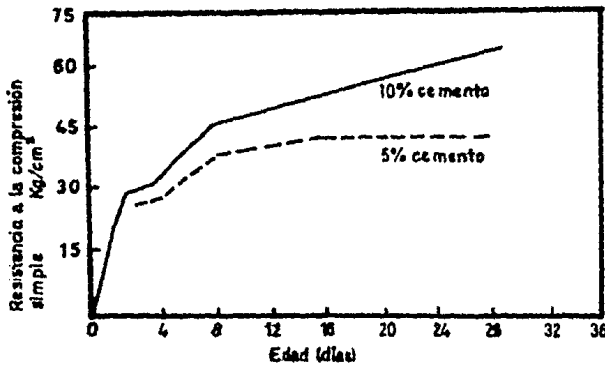


Figura 3.1.- Efecto del tiempo de curado en la elaboración de un suelo-cemento.

do que tendrá la mezcla compactada de suelo-cemento. El comportamiento de carreteras construidas de esta manera es adecuado si se les protege con un riego de sello o un tratamiento a base de carpetas de riegos, para prevenir desprendimientos bajo la acción abrasiva del tránsito.

En muchas ocasiones el proyectista pensará en usar cemento para reducir la plasticidad del suelo.

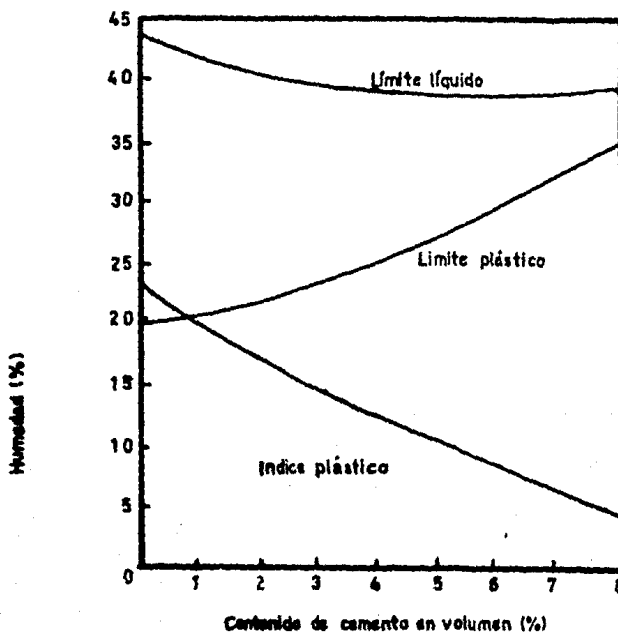


Figura 3.2.- Efecto del cemento en el límite líquido y en el límite plástico de una arcilla limosa.

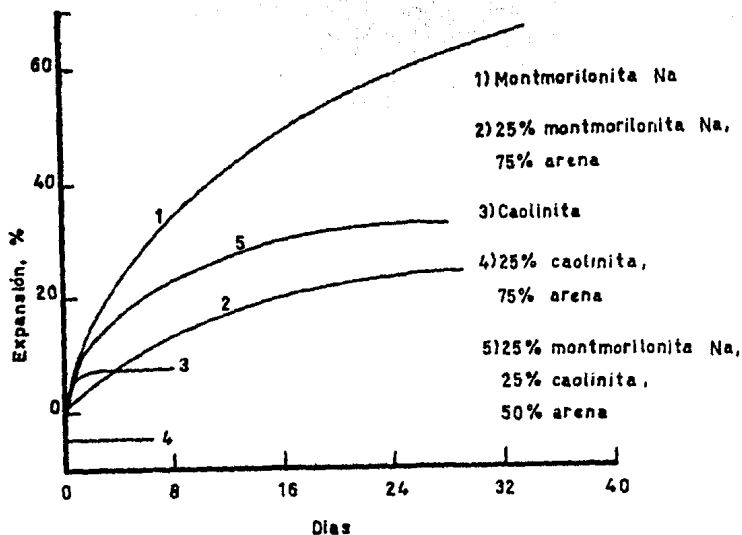


Figura 2.14¹.- Cambios de volumen de montmorilonita sódica, caolinita y mezclas de arena.

grandes. Se reportan valores tan altos como 38 Kg/cm^2 desarrollados en montmorilonita sódica que fué originalmente comprimida a 350 Kg/cm^2 humedeciéndose después de un período de descarga suficientemente largo para permitir la relajación del espécimen. La carga inicial de las arcillas a 210 Kg/cm^2 , en vez de a 350 Kg/cm^2 producen presiones de expansión menores. -- Pruebas de consolidación de arcillas no remoldeadas y lutitas conteniendo ilitas ó montmorilonitas en la fracción arcillosa indican presiones potenciales de expansión tan grandes como 160 t/m^2

Dawson (1953) reporta que las presiones de expansión ejercidas por arcillas bentónicas confinadas alcanzaban hasta 160 t/m^2 cuando el rango normal varía entre 10 y 65 t/m^2 . Este investigador reporta también

Finalmente se puede decir que, existen varios métodos para la construcción de capas de suelo estabilizadas con cemento Portland cuyo fin será formar parte de la sección estructural de una carretera; las operaciones constructivas se pueden resumir como las siguientes:

a) escarificación, pulverización y prehumedecimiento del suelo, - si fuera necesario.

Tipo de capa	Resistencia a la compresión simple. (1)	V. R. S. (2)	Expansión	Pérdida de peso en prueba de humedecimiento y secado (3)
-----	Kg/cm ²	%	%	%
Sub-bases. Material de relleno para -- trincheras.	3.5-10.5	20-80	2	7
Sub-bases o bases para -- tránsito muy ligero (4)	7-14	50-150	2	10
Bases para -- tráfico intenso.	14-56	200-600	2	14
Protecciones de terraplenes contra -- erosión y acción de agua.	> 56	600	2	14

Tabla 3.1.-Propiedades comúnmente exigidas en una mezcla suelo-cemento.

Nota: cabe aclarar que los valores de VRS exigidos en esta tabla son demasiado altos en relación con los que se usan en nuestro medio.

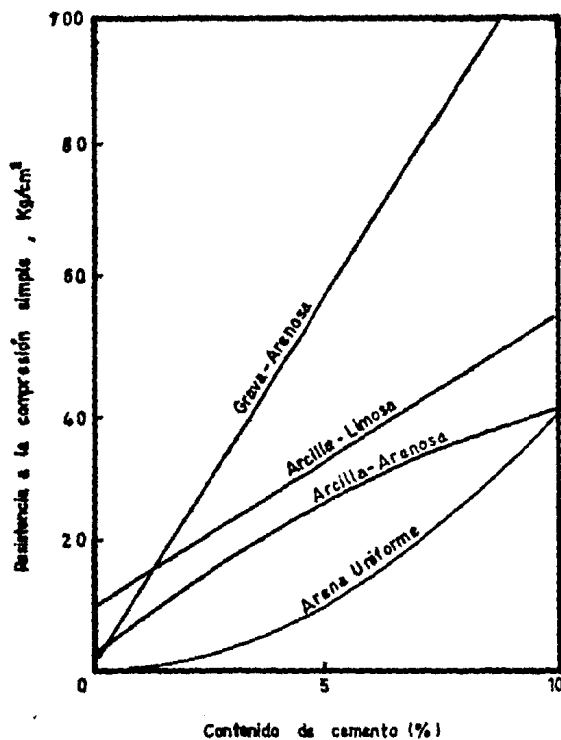


Figura 3.3.- Variación de la resistencia a la compresión simple de diversos suelos estabilizados con cemento.

- b) dosificación y aspersion del cemento,
- c) aplicación del agua,
- d) mezclado de los materiales, en el lugar, en planta móvil o en planta estacionaria,
- e) tendido,
- f) compactación,
- g) acabado y
- h) curado.

A continuación se muestra en la figura 3.4 (Ref. 2) el método -- de construcción en el lugar usando mezcladoras rotatorias.

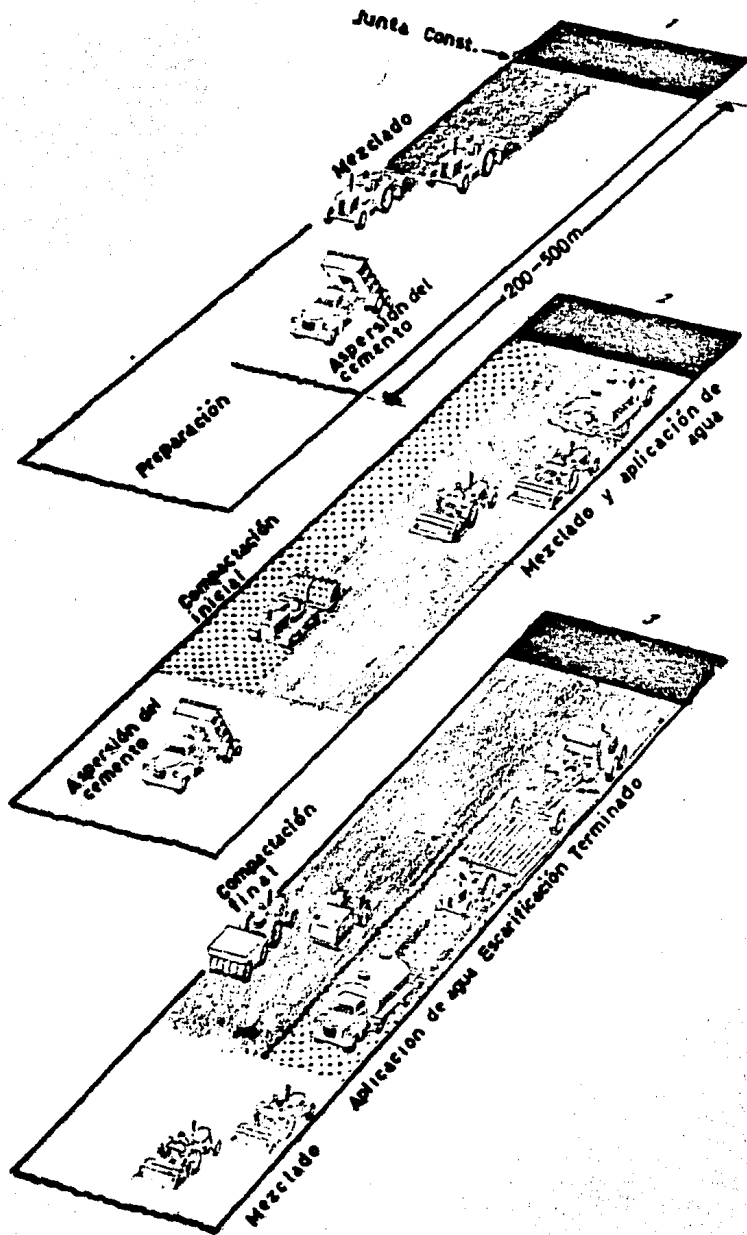


Figura 3.4.-Método de construcción usando mezcladoras rotatorias.

3.2] Estabilización con cal.

Como otra alternativa de estabilización, se puede utilizar cal -

hidratada, la cual puede ser mezclada con ciertos tipos de suelos para tener el resultado de un material de calidad adecuada pero a su vez menos rígido - que el que se obtendría al utilizar cemento.

Este tipo de estabilización se tratará con detalle en el capítulo 4 de esta tesis.

3.3) Estabilización con derivados del petróleo.

Un buen número de materiales derivados del petróleo incluyendo - residuos del asfalto, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados se pueden usar satisfactoriamente como agentes estabilizantes y/o aglutinantes sobre todo si se trata de suelos granulares ya que su uso con suelos finos plásticos, está limitado por las dificultades en el mezclado y la construcción; estos productos son demasiado viscosos para que se puedan incorporar directamente al suelo, por ello han de usarse calentados, emulsificados en agua o rebajados con un solvente generalmente volátil como la gasolina.

Un primer propósito para usar derivados del petróleo como estabilizantes es el de hacer decrecer la cantidad de absorción de agua, como se muestra en la figura 3.5 (Ref. 2). Por otra parte estos materiales incrementan la resistencia del suelo al juntar o aglutinar las partículas sólidas de éste.

Respecto al contenido de asfalto, puede decirse en términos generales que, es necesario determinar el contenido óptimo de asfalto, ya que, si la cantidad de asfalto es demasiada la resistencia de la mezcla - disminuye.

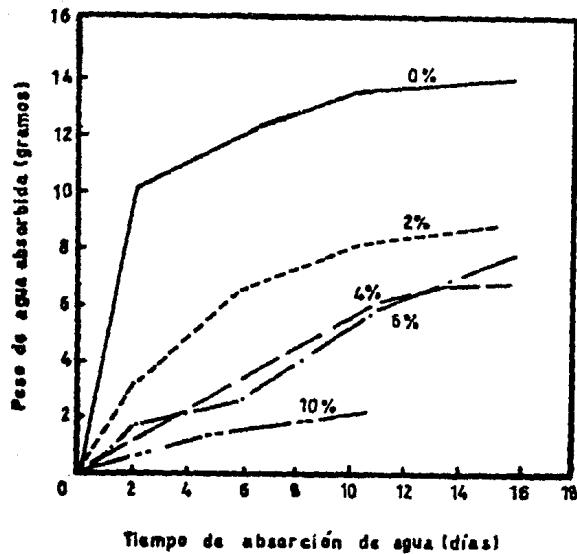


Figura 3.5 Efecto de los derivados del petróleo en la absorción de agua.

Por otra parte cuando se puede estabilizar con asfalto a suelos finos de naturaleza cohesiva (por las razones anteriormente expuestas), la característica que se busca preponderantemente es la de dar estabilidad ante el agua a este tipo de suelos; la figura 3.6 (Ref.3) muestra que la estabilidad ante el agua de los suelos finos mezclados con asfalto aumenta mucho con el contenido de éste.

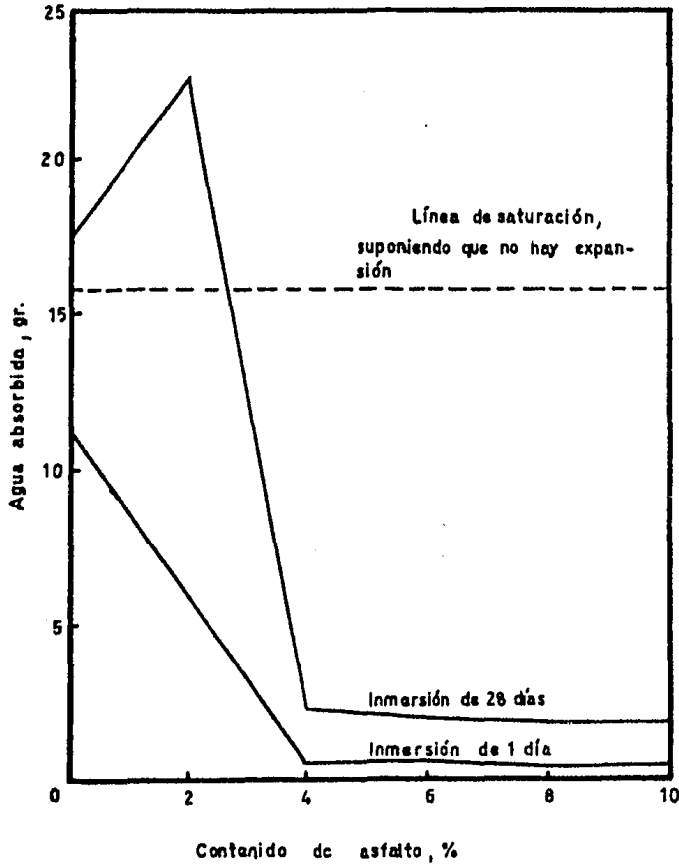


Figura 3.6.- Estabilidad ante el agua de los suelos finos estabilizados con asfalto.

La figura 3.7 (Ref. 3) muestra curvas típicas de compactación de laboratorio en pruebas AASHO modificadas para varios tipos de suelos finos estabilizados con los porcentajes que se señalan de asfalto rebajado y de fraguado medio; el contenido de agua con que se efectuaron las mezclas se refiere al total de la fase líquida.

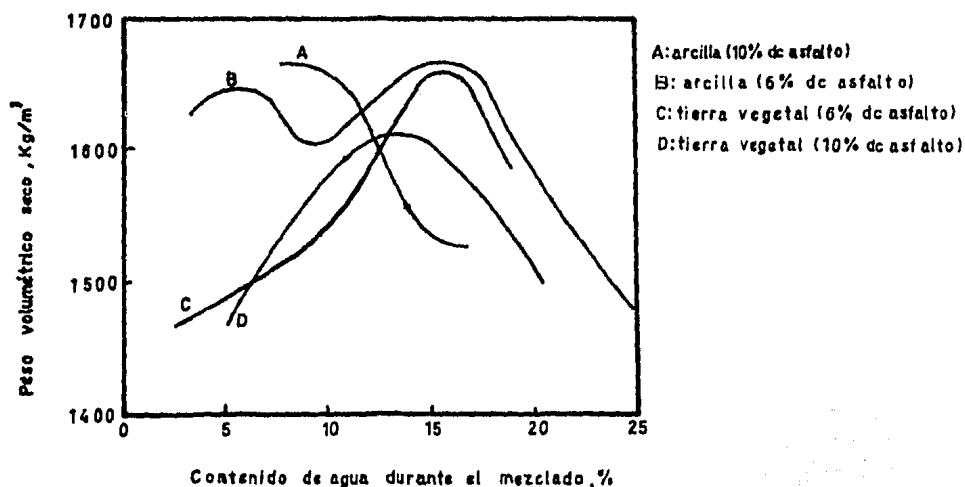


Figura 3.7.- Curvas típicas de compactación de laboratorio en pruebas AASHO.

Finalmente, el proceso de mezclado que conduce a un suelo a ser estabilizado con asfalto, parece tener considerable influencia en el comportamiento de mezclas de suelos finos en lo que se refiere a su estabilidad frente al agua: a continuación se muestra la figura 3.8 (Ref. 3) para la mejor comprensión de lo expuesto en el párrafo anterior.

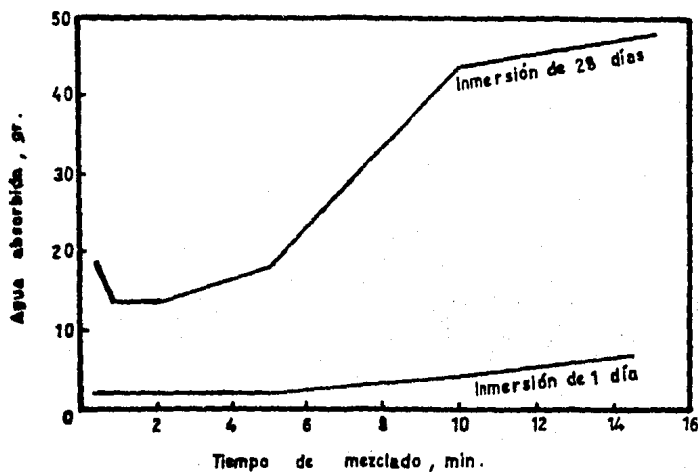


Figura 3.8.- Influencia del proceso de mezclado en un suelo-asfalto en su estabilidad ante el agua.

3.4) Estabilización con cloruro de sodio.

El cloruro de sodio ha sido muy utilizado como un estabilizante de acción de poca duración como ayuda en la superficie de deslizamiento contra el graneo.

El cloruro de sodio es efectivo en todo tipo de suelos finos arcillosos, aunque lo es mucho menos en aquellos que contienen materia orgánica. El efecto de este tipo de estabilizante es el de producir reacciones coloidales y alterar las características del agua contenida en el suelo, (abattimiento del punto de congelación, incremento en la tensión superficial y abattimiento en la presión de vapor). Normalmente actúa como floculante y este fenómeno suele ayudar en la compactación.

Un uso prometedor del cloruro de sodio es el disminuir la permeabilidad de algunas arcillas, lo que lo hace útil para tratar a las arcillas expansivas. Cabe agregar que en algunas pruebas que se han realizado se ha visto que la resistencia del suelo se ve aumentada de alguna manera al ser éste mezclado con cloruro de sodio.

3.5) Estabilización con sulfato de calcio (yeso) y cloruro de calcio.

Los efectos que producen estas sustancias son muy parecidos a los del cloruro de sodio, aunque su efecto en la compactación es mucho menos marcado. El yeso se ha utilizado en mezclas de suelo-cemento como aditivo para acelerar el fraguado.

3.6] Otros tipos de estabilizantes.

Algunos otros tipos de estabilizantes como lo son: el ácido fosfórico y los fosfatos, el hidróxido de sodio o sosa cáustica, las sales de aluminio, el azufre y las resinas y polímeros, están aún en gran parte en su fase experimental y para el primer tipo mencionado, es posible que nunca pase de Ésta; con los demás tipos se han tenido algunas experiencias favorables - pero los resultados están dispersos y como ya se dijo anteriormente en fase experimental, por lo cual no se presentan en este trabajo.

REFERENCIAS

- 1.- Highway Engineering
Robert Ashworth
Heinemann Educational Books LTD Inglaterra
- 2.- Principles of Pavement Design.
E.J. Yoder, M.W. WITCZAK
John Wiley and Sons, Inc. USA 1975
- 3.- La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres.
Alfonso Rico, Hermilo del Castillo
Volumen 2 Limusa México 1982

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Mejoramiento y Estabilización de Suelos.
Carlos Fernández Loaiza
Limusa, México 1982
- 2.- La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres
Alfonso Rico, Hermilo del Castillo
Volumen 2 Limusa México 1982

4) ESTABILIZACION DE SUELOS CON CAL. ANALISIS DE LAS VARIACIONES DE RESISTENCIA Y DEFORMACION VOLUMETRICA.

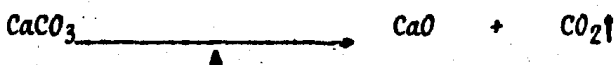
En términos generales se puede decir que los métodos de estabilización de suelos con cal, son muy similares a los que se tienen usando para este fin cemento, pero existen dos variantes que conviene establecer:

1) la cal se utiliza más para materiales de tipo arcilloso que el cemento, así como éste se utiliza más para suelos granulares;

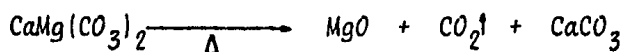
2) la cal no siempre se utiliza como un estabilizante definitivo, sino que en algunas ocasiones se utiliza como pre-tratamiento anterior a una estabilización con cemento o aún más se utiliza la cal y otro aditivo.

Para poder comprender mejor este tipo de estabilización es conveniente, en primer término, dar una breve reseña de lo que comúnmente se conoce por cal. Químicamente la cal es el óxido de calcio (CaO), se puede decir que se obtiene en el proceso de la calcinación de rocas de naturaleza calcárea -- (Ref. 3) como lo son las calizas y las dolomitas. Las primeras contienen de un 95 a un 99 % de mineral calcita (CaCO₃), que químicamente se llama carbonato de calcio (Ref. 1); las segundas contienen una gran parte de mineral dolomita (CaMg(CO₃)₂) en su composición (Ref. 4) y del cual de un 60 a 70 % es de carbonato de calcio (CaCO₃) (Ref. 1).

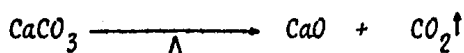
El proceso por el cual se obtiene la cal utilizando calizas, es a presión atmosférica a una temperatura de 900 grados centígrados, de esta manera la roca se descompone en óxido de calcio y bióxido de carbono, es decir:



Por otra parte si se utilizan dolomitas, a una temperatura de 730 grados centígrados aproximadamente, se descompone en óxido de magnesio, bióxido de carbono y carbonato de calcio; finalmente, a una temperatura de 900°C se descompone el carbonato de calcio en los productos ya indicados, por lo tanto:



después



En ambos casos al material obtenido (CaO) se le llama cal viva, el cual es muy inestable y está ávido de agua, lo que hace que tanto su manejo como su almacenamiento sean difíciles; para evitar estos problemas se le suele hidratar inmediatamente y al producto obtenido se le llama cal hidratada, $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$.

4.1) Comportamiento del suelo al mezclarse con la cal.

Las montmorilonitas son minerales que tiene una alta reactividad con la cal debido a que, como ya se vió en el capítulo 2, al reemplazarse de alguna manera un ión Al^{+++} por uno Mg^{++} lo cual constituye una sustitución isomorfa, se tiene la entrada de iones positivos entre láminas con lo cual se tienen ligaduras débiles, las cuales permiten que al añadir la solución de cal ésta circule fácil y rápidamente, de suerte que las superficies en contacto con esta solución sufran cambios en una primera fase debido a un intercambio catiónico que, para el caso de montmorilonitas sódicas, que son las más críticas en cuanto a expansión se refiere, se reemplazan los catio-

nes alcalinos Na^+ contenidos por éstas por cationes Ca^{++} y adicionalmente en una segunda fase, se tiene aporte de iones Ca^{++} y OH^- que hacen que se desarrollen fuerzas eléctricas que flocculan la parte arcillosa haciendo así -- que aumente la relación de vacíos. Por otra parte la acción cementante se debe a una relación directa entre los iones de calcio y los componentes aluminicos del suelo.

De este modo al modificar la cal la composición mineralógica del suelo modifica también la respuesta del agua al reducir su plasticidad teniendo en tonces por resultado que los cambios volumétricos sean mucho menores.

Con respecto a la resistencia a la compresión simple de un suelo fino estabilizado con cal, en pruebas de laboratorio, se puede decir que en general ésta aumenta para porcentajes de cal que llegan hasta un 8% (Ref. 2), ya que para contenidos mayores la resistencia permanece aproximadamente constante, excepto en el caso de materiales muy arcillosos (es decir, que la mayor parte de la composición de estos materiales son arcillas), en los que la resistencia puede aumentar aún para contenidos de cal del 10% o mayores (Ref.2) así también se ha visto en el laboratorio que con respecto a la edad de un suelo cal, en general al aumentar ésta, también aumenta la resistencia de la mezcla (Ref. 2).

El efecto de la materia orgánica contenida en un suelo al ser estabilizado con cal influye en la resistencia disminuyéndola, como se puede observar en la figura 4.1 (Ref. 2) para especímenes de arcilla limosa estabilizada con un 12% de cal hidratada.

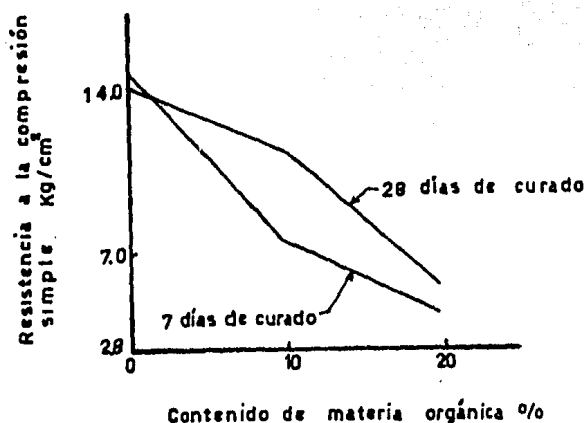


Figura 4.1.-Variación de la resistencia a la compresión simple con el contenido de materia orgánica.

Así también se puede ver en la figura 4.2.a (Ref. 1) que para contenidos de cal mayores al 6%, el límite líquido de una arcilla montmorilonítica, permanece constante, sin embargo el límite plástico de la misma arcilla se -

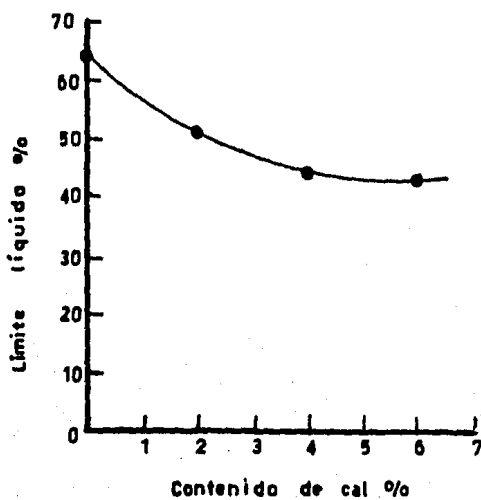


Figura 4.2.a-Variación del límite líquido de una arcilla montmorilonítica para diferentes contenidos de cal.

incrementa aún para porcentajes de cal mayores al 6% (figura 4.2b Ref. 1), -- por consiguiente en la figura 4.2c se puede apreciar un decremento en el índice plástico de esta arcilla aún para valores de cal mayores al 6%.

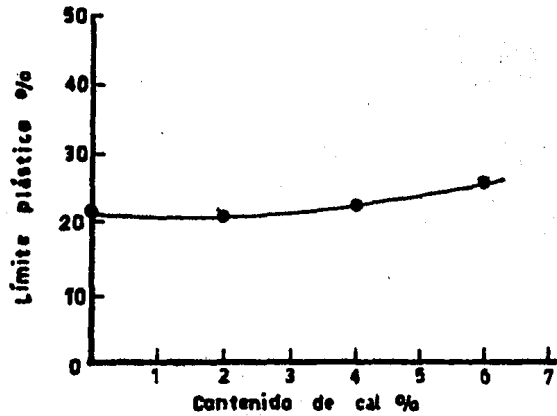


Figura 4.2b.-Variación del límite plástico de una arcilla montmorilonítica para diferentes contenidos de cal.

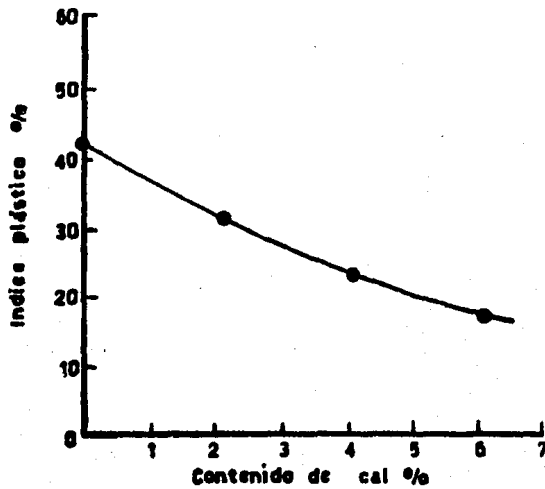


Figura 4.2c.-Variación del índice plástico de una arcilla montmorilonítica para diferentes contenidos de cal.

Las anotaciones anteriores llevan a que la arcilla sin cal estuviera clasificada en la carta de plasticidad como una CH y al agregarle cal pase a ser una CL (Ref. 1) como se muestra en la figura 4.3 (Ref. 1), con lo cual se puede afirmar que la cal reduce la plasticidad de la arcilla reduciendo así también su potencial de expansión o bien de compresión.

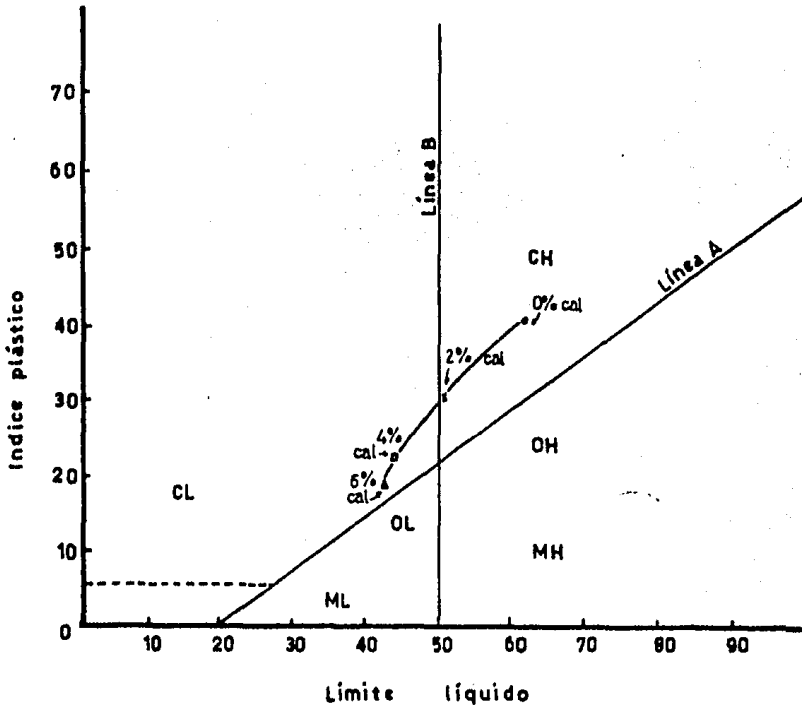


Figura 4.3.- Clasificación en la carta de plasticidad de una arcilla montmorilonítica mezclada con diferentes porcentajes de cal.

Por otra parte la figura 4.4 (Ref. 1) para una prueba de contracción lineal se puede ver que al aumentar el contenido de cal en la mezcla suelo-cal para el mismo tipo de arcilla, el porcentaje de contracción disminuye, factor que tiene mucha importancia en el caso de arcillas expansivas, ya que

Éstas al volver a tener contacto con el agua, también tendrán una expansión menor.

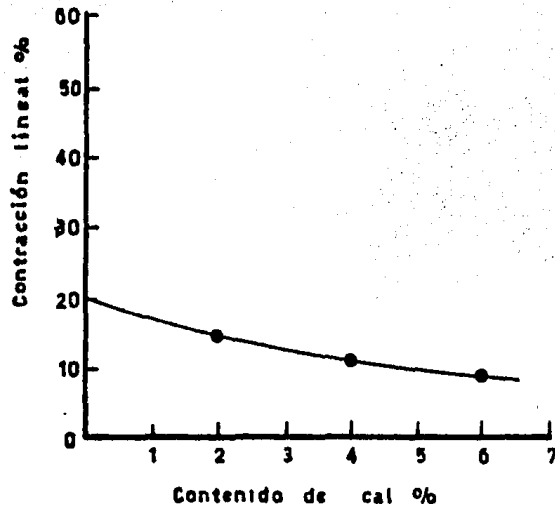


Figura 4.4.- Variación del porcentaje de contracción lineal de una arcilla montmorilonítica para diferentes contenidos de cal.

Ahora, en cuanto a deformabilidad se refiere, se puede decir que las mezclas de suelo-cal al igual que las de suelo cemento se vuelven más rígidas al aumentar el porcentaje de cal contenido por éstas (dentro de límites adecuados) y a su vez se vuelven con ello menos deformables que para el caso de pavimentos y su uso en bases y sub-bases está restringido como ya se ha dicho por las razones explicadas con anterioridad a las condiciones de apoyo que tengan estas capas.

En base a las consideraciones anteriores se puede anotar que la cal al mezclarse con el suelo expansivo hace a la mezcla suelo-cal menos susceptible a los cambios de volumen con el cambio en el contenido natural de agua

aumentando su resistencia y disminuyendo su capacidad para sufrir grandes deformaciones.

4.2) Pruebas de laboratorio efectuadas con un suelo arcilloso expansivo.

Debido al gran interés y a la gran importancia que tiene este tema en nuestro país y también, ante la necesidad de corroborar lo anteriormente escrito de este tema en cuanto a la variación de las características de resistencia y deformación, se realizaron una serie de pruebas de laboratorio con muestras alteradas representativas de arcilla expansiva, obtenidas de la zona industrial de la Cd. de Querétaro.

Estas muestras se extrajeron de una profundidad de entre 1 y 1.5 metros a las cuales fue necesario disgregar y dejar secar al aire libre.

En primer término, para obtener el peso volumétrico seco máximo $(\gamma_{d_{\max}})$ y la humedad óptima de compactación (w_{opt}) se realizó una prueba Proctor Estándar, según las Normas que se anotan en la referencia 3. Inmediatamente se prepararon muestras de suelo que pasaran la malla 100, para llevar a cabo con ellas pruebas de saturación bajo carga (Anexo 4.a), para determinar la presión de expansión generada por esta arcilla; pruebas de compresión simple (Ref. 5), para determinar la resistencia al corte de este suelo; pruebas de expansión libre (Anexo 4.b), para determinar el potencial de expansión de la arcilla; posteriormente, con muestras de suelo que pasaron la malla 40 se realizaron las pruebas de límites de plasticidad (Ref. 5) para determinar según el sistema SUCS, el tipo de suelo que se está manejando así como su situación en la carta de plasticidad; finalmente, con muestras de suelo que pasaron la malla 4 se llevaron a cabo pruebas V.R.S. (valor relativo de soporte) (Ref. 2) debido a que en la tecnología de pavimentos, éste es el

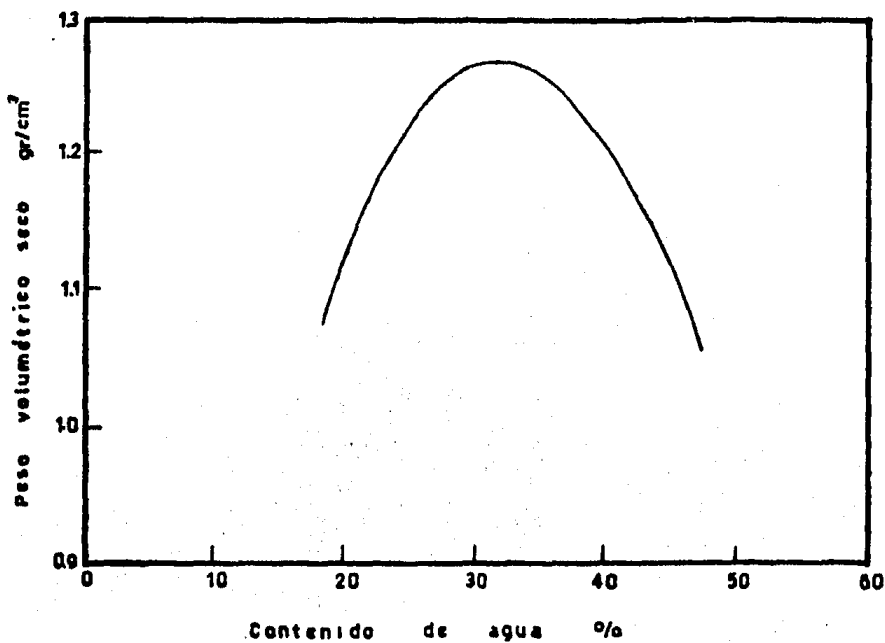
criterio más usual para el diseño de los mismos, regulándose este criterio claro está, con las diferentes propiedades del suelo-cal anteriormente mencionadas; todas estas pruebas se llevaron a cabo contenidos de cal de 0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 % y 10 %.

4.3] Resultados de las pruebas de laboratorio

4.3.1] Prueba Proctor Estándar

Al analizar la figura 4.5 se puede decir lo siguiente:

- a) Se encontró que el peso volumétrico seco máximo del suelo es -
 $\gamma_{dmax} = 1.27 \text{ ton/m}^3$ y su contenido de agua óptimo es $W_{opt} \% = 32\%$



Dígura 4.5 Curva de compactación del suelo utilizando una prueba Proctor Estándar.

4.3.2) Límites de Plasticidad.

Al observar las figuras 4.6a, 4.6b, 4.6c y 4.7 se puede afirmar lo siguiente:

- Se tienen reducciones en los límites líquidos de hasta un 20% para contenidos de cal de 6%, mayores a éstos los límites líquidos se vuelven a incrementar ligeramente.
- Se tienen aumentos considerables de los límites plásticos de hasta un 48% para contenidos de cal de 8% después de los cuales, éstos empiezan a mantenerse aproximadamente constantes.
- De lo dicho en los incisos anteriores se concluye que se tienen -- fuertes decrementos del índice plástico de hasta un 74% para contenidos de cal de 6%, mayores a éstos, el índice plástico aumenta ligeramente.
- Con la adición de cal, en algunas ocasiones (dependiendo del tipo de suelo arcilloso) se logra que una arcilla de alta plasticidad -- (CH) se comporte como un limo (MH), con lo cual se reduce su -- plasticidad y su potencial de expansión.

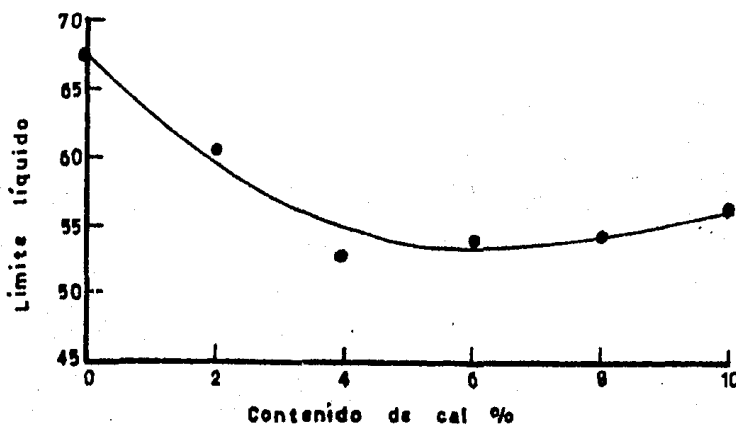


Figura 4.6.a.-Variación del límite líquido del suelo para diferentes contenidos de cal.

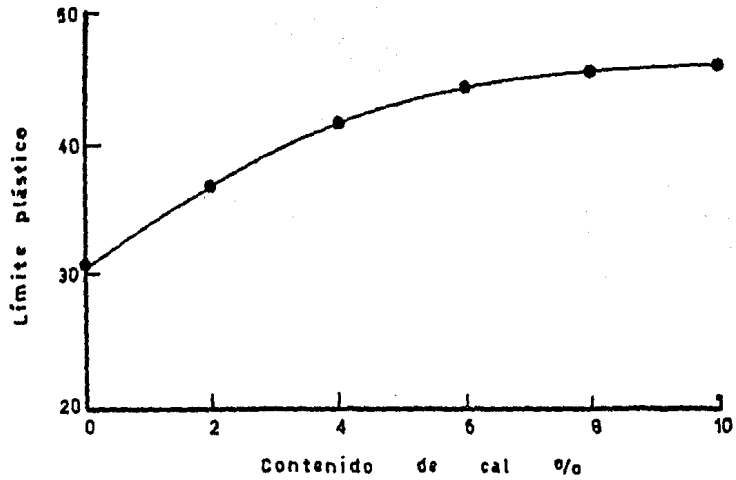


Figura 4.6.b.-Variación de límite plástico del suelo para diferentes contenidos de cal.

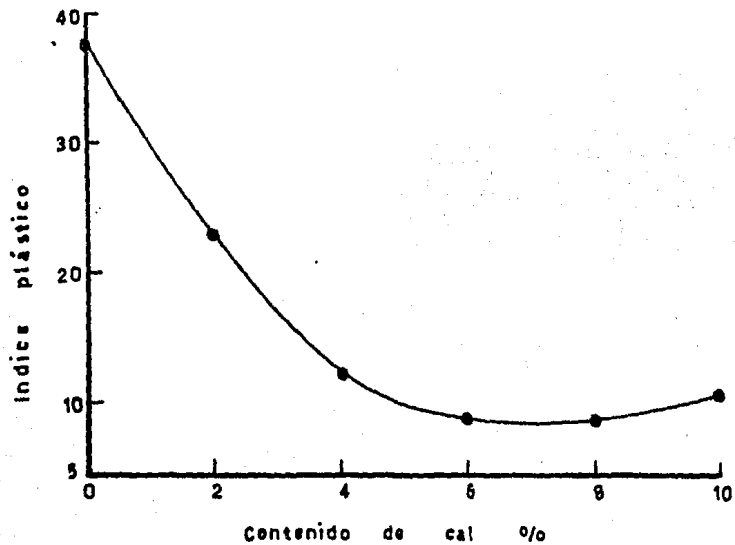


Figura 4.6.c.- Variación de índice plástico del suelo para diferentes contenidos de cal.

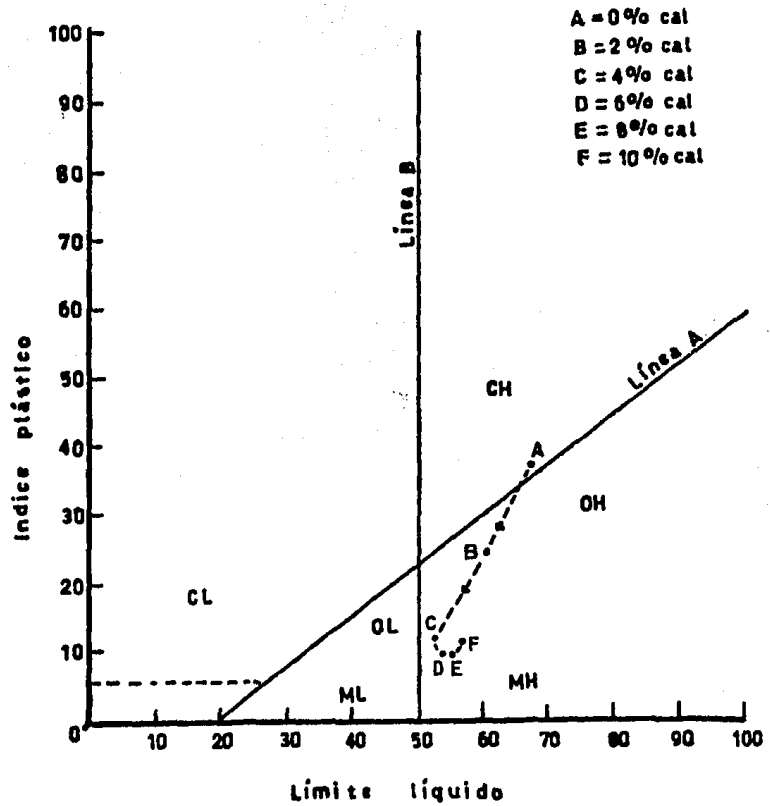


Figura 4.7.- Clasificación del suelo en la carta de plasticidad para diferentes porcentajes de cal.

4.3.3) Compresión Simple.

Al analizar la figura 4.8 se observa lo siguiente:

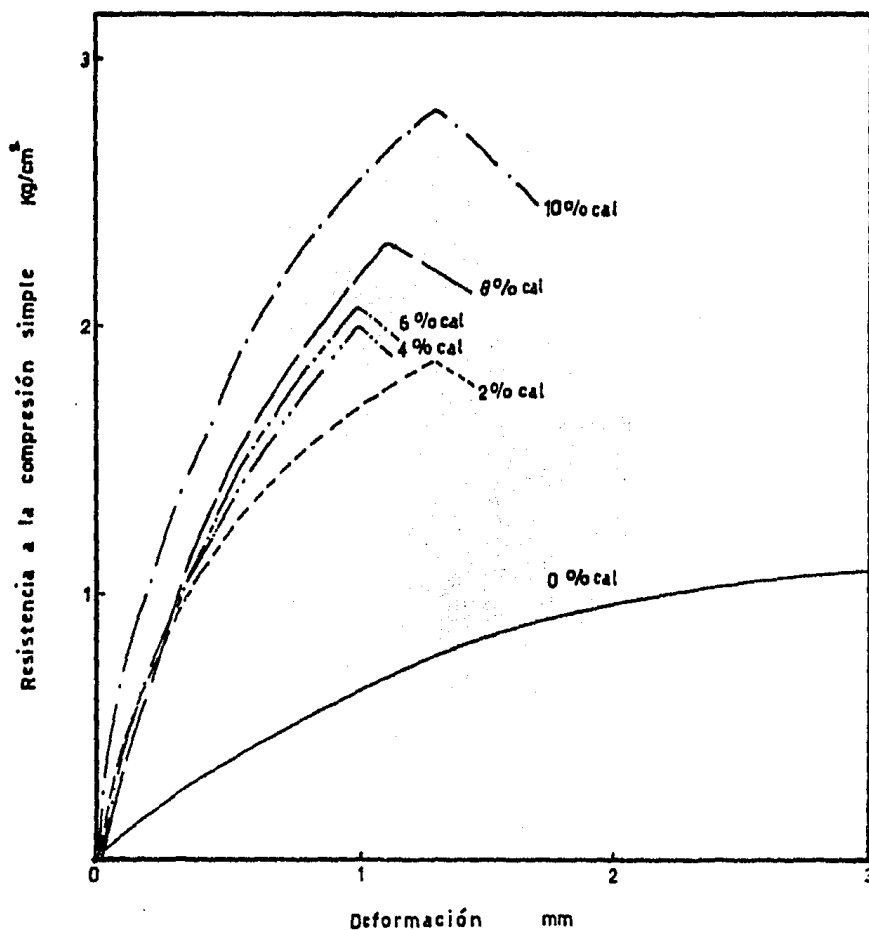


Figura 4.8 Resistencia a la compresión simple del suelo para diferentes contenidos de cal.

4.3.4) Expansión libre

Al estudiar la figura 4.9 se puede afirmar lo siguiente:

- a) Al aumentar el contenido de cal se reduce considerablemente la expansión, notándose claramente este resultado en las muestras de 0% y 2% de cal.

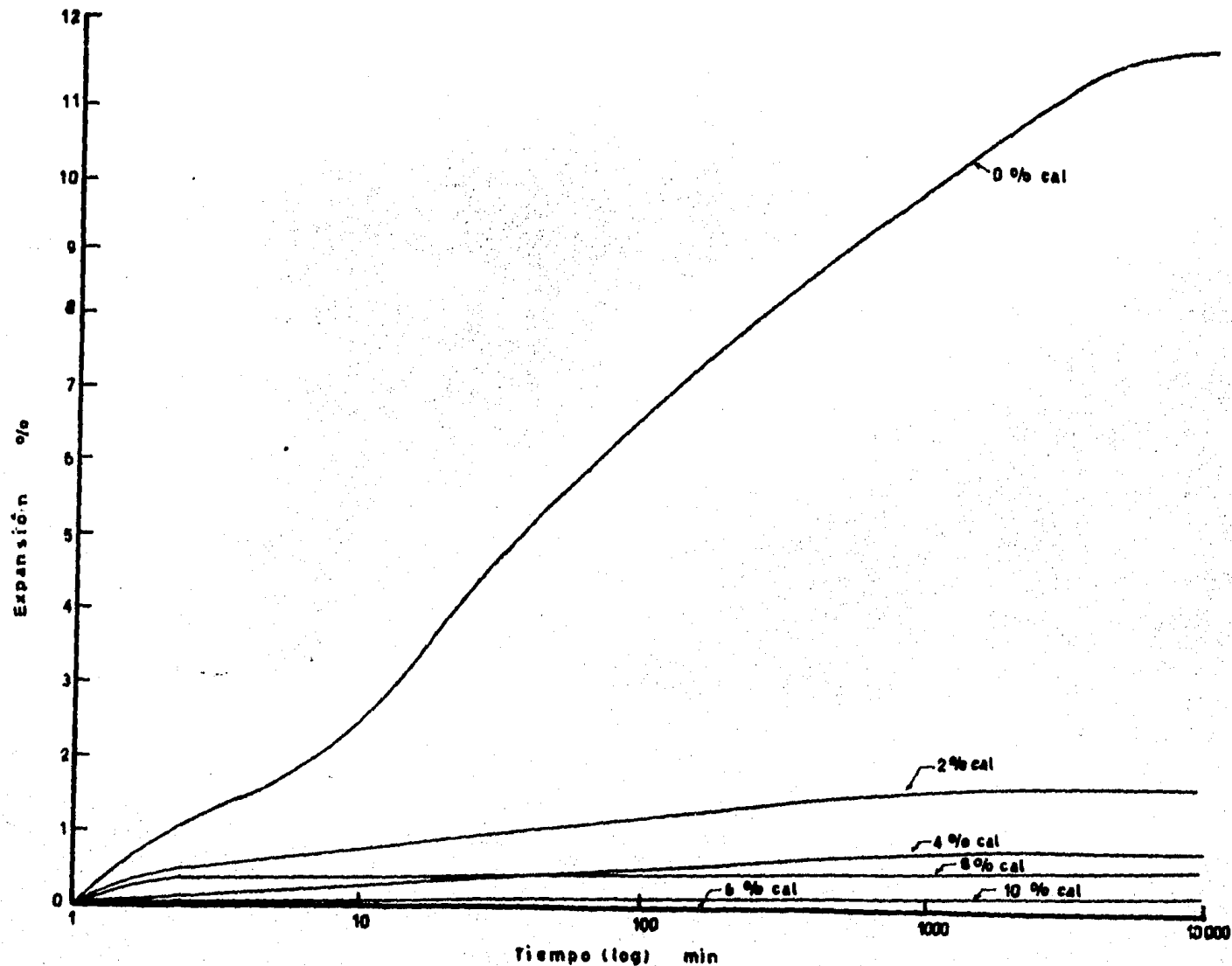


Figura 4.9.- Porcentajes de expansión registrados en el tiempo para diferentes contenidos de cal.

4.3.5) Saturación bajo carga.

Al observar las figuras 4.10 y 4.11 se encontró lo siguiente:

- a) Con muestras de suelo cuyo material constituyente pasa la malla 100 la presión de expansión disminuye hasta contenidos de cal del 6 %, teniéndose para contenidos mayores de cal, una presión de expansión aproximadamente constante.
- b) Con muestras cuyo material constituyente pasa la malla 4, la presión de expansión disminuye hasta contenidos de cal del 4 %, manteniéndose constante hasta el 8 % y después se registró una presión de expansión ligeramente mayor para contenidos de cal del 10 %, guardando la misma tendencia.

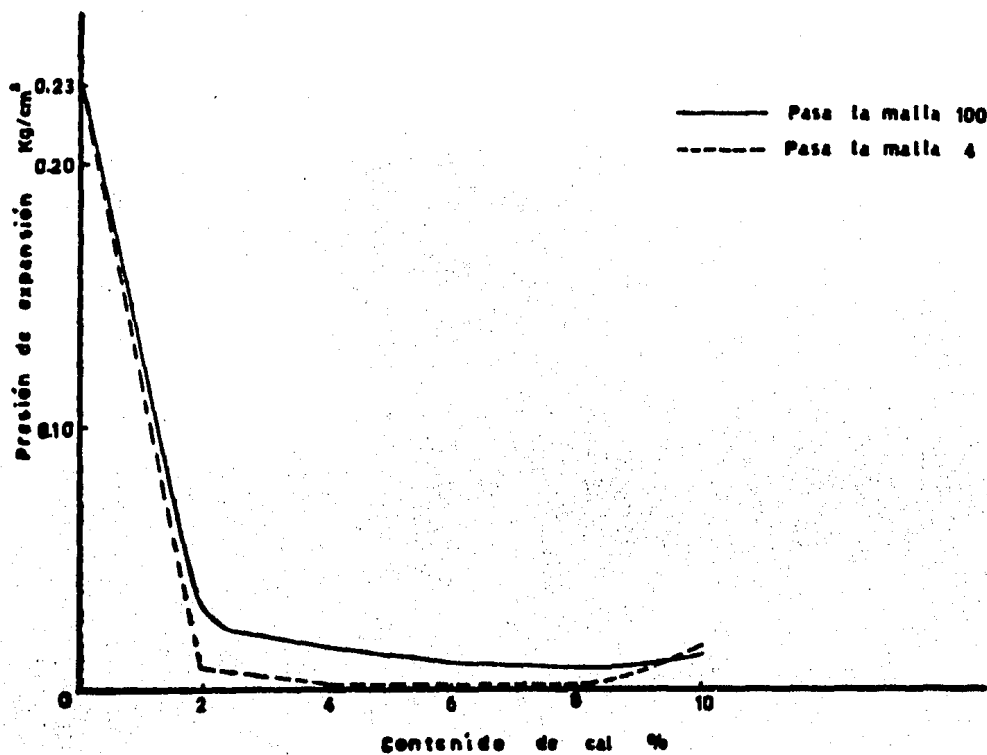


Figura 4.10.- Presión de expansión registrada del suelo para dos granulometrías y diversos contenidos de cal.

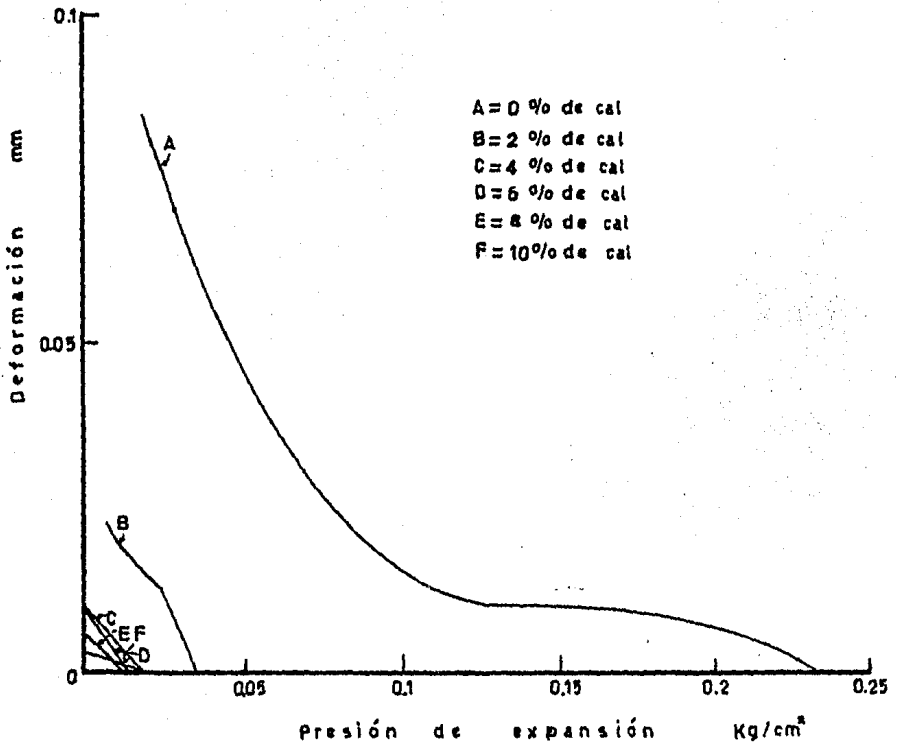


Figura 4.11.-Presión de expansión registrada contra deformaciones de la muestra para diferentes contenidos de cal.

4.3.6) Valor relativo de Soporte.

Al observar los resultados de la figura 4.12 se puede afirmar lo siguiente:

- a) El valor relativo de soporte de las mezclas suelo-cal se incrementa hasta en un 234 % para contenidos de cal de hasta 8% para contenidos de cal mayores el V.R.S. disminuye.

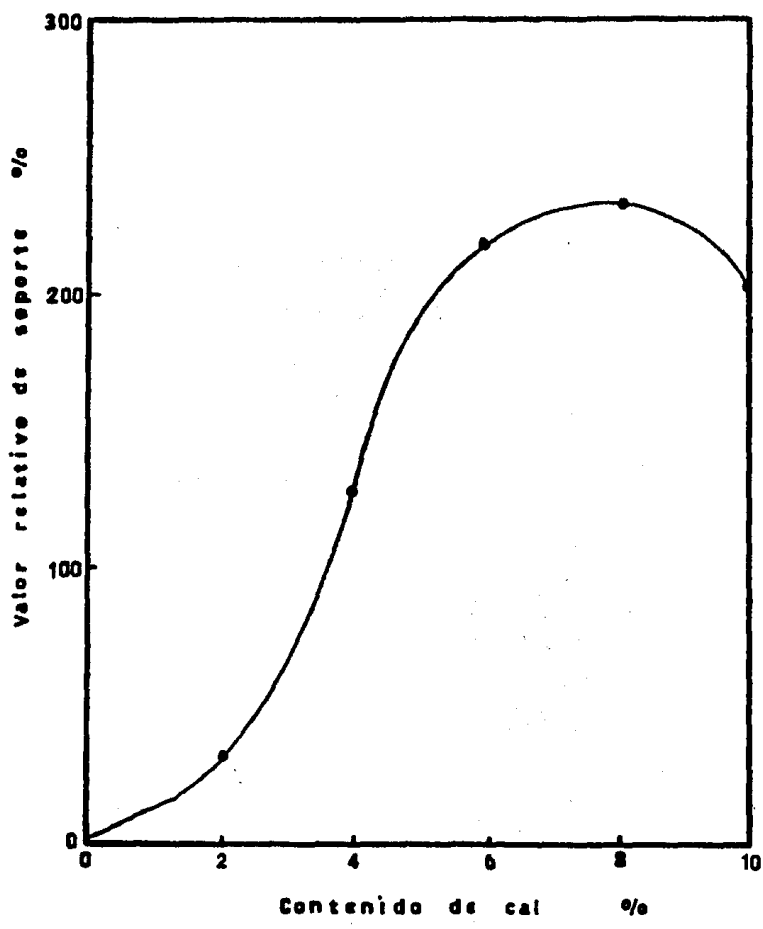


Figura 4.12.- Variación del valor relativo de soporte del suelo para diferentes contenidos de cal.

4.3.7) Tabla final de resultados..

En la tabla 4.2, en la cual se anotan en forma resumida los resultados de las pruebas realizadas, se puede observar que todas éstas se realizaron con muestras de suelo compactadas alrededor del 90 % de su peso volumétrico seco máximo, respecto a una prueba Proctor Estándar, por lo cual se pueden considerar representativas del comportamiento del suelo en el rango de compactación mencionado.

% de cal		0	2	4	6	8	10
Prueba							
Límites	LL	67.50	61.00	53.00	54.00	54.80	57.5
	LP	30.50	37.00	41.24	44.63	45.43	46.5
	IP	37.00	24.00	11.76	9.37	9.37	11
Compresión	Rcs	1.09	1.86	1.93	2.04	2.29	2.82
	% C	91.13	94.58	93.11	90.41	91.28	89.63
Expansión libre	% E	11.60	1.50	0.80	0.06	0.60	0.18
	% C	90.07	89.42	88.76	95.34	88.10	93.31
Saturación bajo carga	P E	0.230	0.034	0.019	0.012	0.006	0.019
	% C	91.48	89.11	90.53	91.80	95.60	91.54
V.R.S.	%	2	33	125	221	234	208

Nomenclatura:

Rcs Resistencia a la compresión simple en Kg/cm²

% C Grado de compactación con respecto a la prueba Proctor Estándar

% E Porcentaje de expansión máximo registrado.

P E Presión de expansión en Kg/cm²

L L Límite Líquido

L P Límite Plástico

I P Índice Plástico

V.R.S. Valor Relativo de Soporte

Anexo 4.a) Prueba de saturación bajo carga,

4.a.1) Introducción.

Las pruebas de saturación bajo carga se realizaron con el propósito de determinar la presión de expansión de una muestra de suelo expansivo, al ser éste sometido a saturación. En general en este tipo de prueba la presión inicial que se le dá al suelo antes de someterlo a saturación es de --- 0.07 kg/cm^2 ; sin embargo en esta prueba, no se le dió a la muestra de suelo ninguna presión inicial, excepto la que le impone la placa de carga y la piedra porosa (necesarias en la prueba), equivalente a 0.009 Kg/cm^2 , con el fin de hacer notar aún más la expansión debida a la saturación del suelo.

4.a.2) Equipo y material necesario.

1) Un consolidómetro incluyendo dos anillos para la ubicación de la muestra, dos piedras porosas, una placa de carga, un micrómetro con aproximación de 0.01 mm .

2) Equipo tal como balanzas, horno, una cazuela para saturar la muestra, cronómetro, bote de lámina para aplicar carga, arena sílica o de Ottawa y un pisón para compactar.

4.a.3) Preparación de la muestra.

1) A una muestra de suelo de aproximadamente 500 g se le agrega -- agua hasta que ésta tenga la necesaria para ser compactada al 90 ó 95 % de -

su peso volumétrico seco máximo [la cantidad de agua se habrá determinado con anterioridad en una prueba Proctor Estándar].

2) A continuación se compacta la muestra en uno de los anillos del consolidómetro utilizando para ello pisón, del cual se conoce previamente su peso; se le deben dar a la muestra tantos golpes, desde una altura fija, como sean necesarios para lograr compactar con una energía específica igual a la de la prueba Proctor Estándar.

3) Se coloca el segundo anillo sobre el primero y se asegura de tal manera que al expandirse el suelo no lo pueda levantar.

4) Se instalan los anillos en la cazuela, poniendo una piedra porosa en la parte inferior de la muestra de suelo así como una en la superior, - colocando sobre ésta última la placa de carga y su balín.

4.a.4) Montaje de la prueba.

Se coloca la cazuela en el consolidómetro, con mucho cuidado para evitar movimientos de los anillos o de las piedras; el consolidómetro debe estar calibrado y balanceado tomando en cuenta el peso del bote que servirá para cargar con la arena.

4.a.5) Procedimiento.

1) Se le agrega agua cuidadosamente a la cazuela para saturar la muestra.

2) Se registrarán las expansiones indicadas por el micrómetro así como la cantidad de arena necesaria para hacer regresar la aguja de éste a -

la lectura inicial. Se efectuarán lecturas a intervalos de tiempo establecidos que pueden ser por ejemplo de 1 minuto para la primera lectura, de dos minutos para la segunda, de cuatro para la tercera etc., y así hasta llegar a 24 horas, después se harán lecturas a cada 24 horas hasta que ya no se registren expansiones en el micrómetro.

4.a.6) Resultados y errores posibles de la prueba.

Regístrense los datos en forma de resumen, así como también los -- cálculos; grafíquense los resultados en curvas expansión contra carga.

En cuanto a los posibles errores que se pueden tener en la prueba, está el de llegar a consolidar la muestra al dar los incrementos de carga de acuerdo a las deformaciones que se presenten, por lo que se recomienda dosifi- carlos, para así dar tiempo a que salga el agua de la muestra y llegar con mayor aproximación a la lectura inicial del micrómetro.

Anexo 4.b) Prueba de expansión libre.

4.b.1) Introducción.

Esta prueba tiene por objeto conocer la expansión máxima que puede presentar una muestra de suelo al saturarse.

4.b.2) Instrucciones generales.

En esta prueba la preparación de la muestra, su montaje (en un con- solidómetro) y el procedimiento de ésta, son iguales a los de la prueba de saturación bajo carga, a excepción de que en la prueba de expansión libre -

se deja a la muestra de suelo expandirse hasta que ésta agote su potencial de expansión, es decir, nunca se le dará carga para regresar el micrómetro a su lectura inicial.

4.6.3) Resultados de la prueba.

Regístrense los datos en forma de resumen, así como también los -- cálculos; gráfiquense los resultados en una curva expansión contra tiempo.

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

- 1.- *Mejoramiento y Estabilización de Suelos.*
Carlos Fernández Loaiza
Limusa México 1982
- 2.- *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres.*
Alfonso Rico, Hermilo del Castillo.
Volumen 2 Limusa México 1982
- 3.- *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres.*
Alfonso Rico, Hermilo del Castillo
Volumen 1 Limusa México 1982
- 4.- *Fundamentos de Geología Física.*
L. Don Leet, Sheldon Judson.
Limusa México 1980
- 5.- *Mecánica de Suelos.*
Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico R.
Volumen 1 Limusa México 1980

B I B L I O G R A F I A

- 1.- *Principles of Pavement Design.*
E.J. Yoder. M.W. Witzak
John Wiley and Sons, Inc. U.S.A. 1975
- 2.- *Mejoramiento y Estabilización de Suelos.*
Idem.
- 3.- *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres.*

Alfonso Rico, Hermilo del Castillo
Volumen 2 Limusa México 1982

4.- Highway Engineering

Robert Ashworth

Heinemann Educational Books LTD

Inglaterra.

5) CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1) Conclusiones.

Dadas las condiciones actuales en que se encuentra el país, el ingeniero tendrá que enfrentarse con todo tipo de suelos, mejorando las características mecánicas de aquellos que así lo requieran.

Uno de estos suelos son las arcillas expansivas, o sea, las que cambian de volumen con el correspondiente cambio en su humedad natural. El suelo tratado en esta tesis es precisamente una arcilla expansiva proveniente de la zona industrial de Querétaro.

De las arcillas expansivas, las más inestables, son aquellas que contienen como mineral constituyente fundamental a la montmorilonita, en especial la de la variedad del sodio.

Hasta la fecha, la forma de identificar un suelo expansivo es a base de sus propiedades índice sin considerar las características de la composición mineralógica de los suelos con que se trabaja, pero en realidad el ingeniero no está actualmente familiarizado con este campo y no puede identificar exactamente con qué tipo de arcilla está tratando pues si lo conociera, se podría hacer el estudio de las estabilizaciones de una manera menos empírica e intentar una correlación entre estabilización de suelos y su composición mineralógica.

Las características de resistencia y deformabilidad de un suelo fino dependen, entre otras cosas de su origen, de la historia de cargas, consistencia y de su composición mineralógica. Al realizar una estabilización

el suelo se remoldea y se mezcla con otro tipo de material por lo que la composición mineralógica desempeña un papel fundamental en el comportamiento del suelo y de ahí la necesidad de conocer más a fondo esta característica.

Pudiera pensarse que para los fines comunes de la ingeniería lo anteriormente mencionado no es relevante pues se han obtenido resultados satisfactorios en las obras en donde el suelo ha sido estabilizado, sin embargo debe reflexionarse que si se conoce la composición mineralógica de un suelo fino inestable se puede decir cuales son los aditivos más adecuados para hacer la estabilización, por lo que se justifica hacer investigaciones en la composición mineralógica de este tipo de suelos. Por otra parte cuando un fenómeno se conoce en toda su extensión nos permite trabajar con mayor seguridad y optimización de recursos, tomando las decisiones adecuadas. Sin embargo el objetivo de la tesis era hacer el estudio en la forma tradicional, por lo que se usó este enfoque.

En esta tesis se analizó como medio para estabilizar a la arcilla, la cal, por tratarse de un producto totalmente industrializado, fácil de adquirir y más barato que otros aditivos, además de que se ha venido usando en forma empírica y era necesario conocer la variación de sus propiedades mecánicas.

Al comparar los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio para las mezclas de suelo con distintos porcentajes de cal, se concluye que para un contenido de cal del 4% al 6%, éste no presentará prácticamente problemas de expansión, la resistencia a la compresión simple aumenta en un orden del 90 % probada a las 24 horas, el índice plástico decrece en un orden del 74 %, y el valor relativo de soporte aumenta de 2 % en estado

natural a 221 % con 6 % de cal.

De lo anteriormente mencionado puede decirse que la estabilización con cal para este tipo de suelos hace que éste presente un comportamiento ingenieril aceptable.

Durante la realización de las pruebas de laboratorio se pudo observar que al usar material que pasa la malla # 4 se obtienen resultados similares a aquellos que resultaron al tomar material que pasa la malla # 100. Esto podría explicarse de la siguiente manera: al mezclarse la cal con el material que pasa la malla # 4, se tiene una reacción con la superficie de los grumos formándose una película de material estabilizado que aísla al material dentro del grumo, reduciéndose de esta manera el área específica susceptible de actuar bajo la acción del agua evitándose así las expansiones.

De lo anterior pudiera pensarse que el grado de disgregación alcanzado no es tan importante como el mezclado que se realice de la cal con el suelo.

Ahora bien, como el suelo estará sujeto a esfuerzos generados por la obra de ingeniería que en él se vaya a alojar, se puede utilizar un porcentaje de cal menor que el recomendado tratando de que la presión de expansión generada por el suelo expansivo sea igual a la presión de contacto que se genere.

5.2] Recomendaciones.

- a) Siendo el mezclado de la cal con el suelo entre los factores determinantes para lograr una buena estabilización,

el más importante, se debe tener en cuenta la profundidad a la que se pretenda estabilizar el suelo ya que de lo -- contrario podría redundar en costos excesivos, por lo que se recomienda utilizar este tipo de estabilización en -- obras de tipo superficial como lo son: carreteras, pavi-- mentación urbana, canales, etc. procurando no exceder 30 cm. de profundidad.

- b) Se puede diseñar la estabilización con cal de un suelo -- permitiendo cierta presión de expansión de tal manera que esta se equilibre con la descarga neta de la obra.
- c) Se recomienda tratar de establecer una correlación entre las pruebas comunes de la Mecánica de Suelos con la mine-- ralogía de éstos para llegar a soluciones ingenieriles -- que cumplan con los requisitos básicos de seguridad, eco-- nomía y funcionalidad.
- d) Debe existir un traslape o trabajo en equipo entre el in-- geniero que estudia este tipo de suelos y los químicos -- con el fin de determinar la composición mineralógica de -- éstos para determinar el o los aditivos más adecuados.
- e) Es recomendable poner atención en el índice de acidez del agua que se vaya a usar para llevar a cabo la estabiliza-- ción ya que en un medio ácido la cal se inhibe y por -- lo tanto entre más ácida sea el agua más cal habrá que -

añadir.

- f) Se recomienda poner especial atención al procedimiento de mezclado, ya que dentro del proceso constructivo de un suelo estabilizado con cal, desempeña un papel fundamental y no es tan importante llegar a disgregar totalmente las partículas pues se obtienen los mismos resultados con material que pasa la malla # 4 que con material que pasa la malla # 100.
- g) Un suelo expansivo puede estar contaminado con materia orgánica y con algunos carbonatos en cuyo caso la estabilización con cal no es efectiva, pues la acción de ésta se inhibe.
- h) Para el suelo tratado en esta tesis se recomienda utilizar del 4 al 6 % de cal, aunque claro, se puede disminuir el contenido de ésta dependiendo de la obra de que se trate y el uso que se le vaya a dar.
- i) Este trabajo muestra un modelo a seguir para el estudio de estabilización de suelos y de ninguna manera puede generalizarse, pero puede tomarse como prototipo para estudiar los diferentes tipos de suelos expansivos que existen en la República Mexicana y correlacionar las teorías con los resultados prácticos para proporcionar las recomendaciones definitivas al ingeniero que está a cargo de una obra y que se encuentre con este tipo de problemas.