

88



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**"ESTABILIZACION DE ARCILLAS EXPANSIVAS
CON CLORURO DE CALCIO"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

JAVIER ALEJANDRO RODRIGUEZ ALBORES



ASESOR: M. en I. GABRIEL GARCIA ALTAMIRANO

MEXICO, D. F.

200374

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/031/91

Señor
JAVIER ALEJANDRO RODRIGUEZ ALBORES
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. **GABRIEL GARCIA ALTAMIRANO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

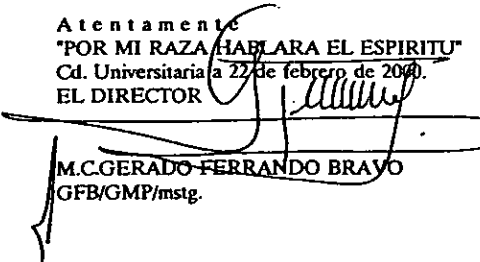
"ESTABILIZACION DE ARCILLAS EXPANSIVAS CON CLORURO DE CALCIO"

- I. INTRODUCCION
- II. ANTECEDENTES
- III. ESTABILIZACION DE ARCILLAS EXPANSIVAS CON CLORURO DE CALCIO
- IV. PRUEBAS DE LABORATORIO
- V. ANALISIS DE RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VII. BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 22 de febrero de 2000.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

***Gracias Señor Jesucristo, por permitirme
alcanzar este anhelo.***

**A MIS PADRES: ESTHER ACICIA ALBORES GONZÁLEZ y
ROGELIO RODRÍGUEZ GÓMEZ**
*por su amor, amistad y ejemplo que me han
brindado*

**A MIS HERMANOS: SILVIA ACICIA
ALMA ROSA
ROGELIO EDUARDO**
por su apoyo, su amistad y sus consejos.

**A MIS SOBRINOS: ARLETH ADRIANA
ROGELIO FERNANDO
KENIA
SILVIA ELIZABETH
AZUAR EDUARDO**
por todos los momentos vividos

**EN MEMORIA DE MI ABUELITO: JOSÉ LUZ RODRÍGUEZ
Y MI PADRINO: EDUARDO JAVIER ALBORES
GONZÁLEZ.**

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, A LA FACULTAD DE INGENIERÍA, FORJADORES DE INTELIGENCIA Y SABIDURÍA.

AL MAESTRO EN INGENIERÍA GABRIEL GARCÍA AETAMIRANO, POR SU VALIOSA DIRECCIÓN EN LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO.

A LOS PROFESORES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, COMO UN TRIBUTA SU IMPORTANTE LABOR.

CON UN ENORME AGRADECIMIENTO A Ma de los ANGELES ESCALANTE MEMBRICCO, POR HABER REALIZADO LA REPRODUCCIÓN DE ESTE INFORME EN COMPUTADORA, Y A SU ESPOSO ENRIQUE CABRAE BEVELES, POR SU AMISTAD Y SUS CONSEJOS.

AL PERSONAL DEL LABORATORIO DE GEOTECNIA Y MECÁNICA DE SUELOS, DE LA DIR. DE SERVICIOS TÉCNICOS DE LA S.C.T., POR SU VALIOSA AYUDA EN LA ELABORACIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

A MIS VERDADEROS AMIGOS, POR SIEMPRE:

**Ma. de los ÁNGELES SPÍNDOLA CONSUELO
ANA BERTHA ÁVALOS ARZATE
RAQUEL GARCÍA VÁZQUEZ
SERGIO GÓMEZ BECERRIL
VÍCTOR GÓMEZ BECERRIL
JESÚS RAMÍREZ CABRERA
EDUARDO MONTIEL ACOSTA
LUIS LUNA ROSAS
AELVARO HERNÁNDEZ ESPINOSA**

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS.

ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS CON CLORURO DE CALCIO.

INDICE GENERAL

	Página
I.- INTRODUCCIÓN.	1
II.- ANTECEDENTES	4
Intercambio catiónico.	10
Identificación de suelos expansivos.	11
Estabilización de arcillas.	24
Estabilización de arcillas con cemento.	26
Estabilización de arcillas con cal.	35
Diseño de la estabilización con cal.	37
Estabilización con productos asfálticos.	39
Estabilización de arcillas con diversos productos.	43
a) Sales.	44
Estabilización con silicato de sodio.	46
Otros tipos de sales.	48
b) Estabilización con ácidos inorgánicos	48
Estabilización con ácido fosfórico.	48
Estabilización con ácido fluorhídrico.	52
c) Tratamiento con resinas y polímeros.	52
Empleo combinado de aditivos en la estabilización de suelos.	54
1).- Empleo de puzolanas con cemento Portland o cal.	54
2).- Cemento Portland con productos químicos diversos.	55
3).- Empleo de la cal con productos químicos diversos.	56
Estabilización de suelos empleando enzimas orgánicas.	58
III.- ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS CON CLORURO DE CALCIO (Ca Cl ₂).	62
IV.- PRUEBAS DE LABORATORIO.	68
1.- Granulometría.	74
2.- Prueba AASHTO o Próctor Estándar.	74
3.- Límites de consistencia o límites de plasticidad.	76
4.- Valor Relativo de Soporte.	76
5.- Compresión Simple.	77
6.- Expansión Libre.	78
7.- Expansión bajo carga.	79

V.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.	80
V.1. Pruebas de calidad o pruebas índice	80
V.1.1. Granulometría.	80
V.1.2. Límites de consistencia.	80
V.II. Pruebas de resistencia.	84
V.II.1. Prueba Próctor Estándar.	87
V.II.2. Valor relativo de soporte (VRS).	88
V.II.3. Resistencia a la compresión simple.	90
V.III. Pruebas de deformación.	90
V.III.1. Expansión Libre.	90
V.III.2. Expansión bajo carga.	91
CONCLUSIONES.	93
REFERENCIAS	110
BIBLIOGRAFÍA	111

I.-INTRODUCCIÓN

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

Los daños que el fenómeno causa a las estructuras desplantadas en este tipo de suelos, ocasionan pérdidas materiales cuyo monto, en la mayoría de los casos, representa varios millones de pesos.

El problema crece en importancia si se toma en cuenta que en muchos países en vías de desarrollo, entre ellos México, están incrementando su infraestructura, lo cual implica que en algunos casos, las áreas constructivas habrán de irse extendiendo hasta invadir aquellas zonas que ahora han sido evitadas por la presencia de suelos expansivos. Algunas zonas urbanas de la República Mexicana donde se tiene conocimiento de la existencia de este tipo de suelos, se indican en la figura No. 1

Con esta perspectiva, puede preverse que al futuro habrá de requerirse una mayor evolución en el conocimiento del fenómeno de expansión de arcillas, lo cual permitirá obtener mejores soluciones para la cimentación de estructuras en áreas con este tipo de suelos.

En éste sentido, en los últimos 45 años se han realizado considerables esfuerzos para lograr una mejor comprensión de la naturaleza de los suelos expansivos. Actualmente se han logrado los mayores avances en los estudios referidos a la mineralogía de los suelos, estructura y modificación de la estructura, tendientes a lograr un mejor comportamiento del suelo.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de una arcilla expansiva, procedente del estado de Querétaro, México, al mezclarse con cloruro de calcio, mediante la realización de las pruebas de laboratorio de calidad, resistencia y deformación indispensables en la elaboración de estudios geotécnicos.

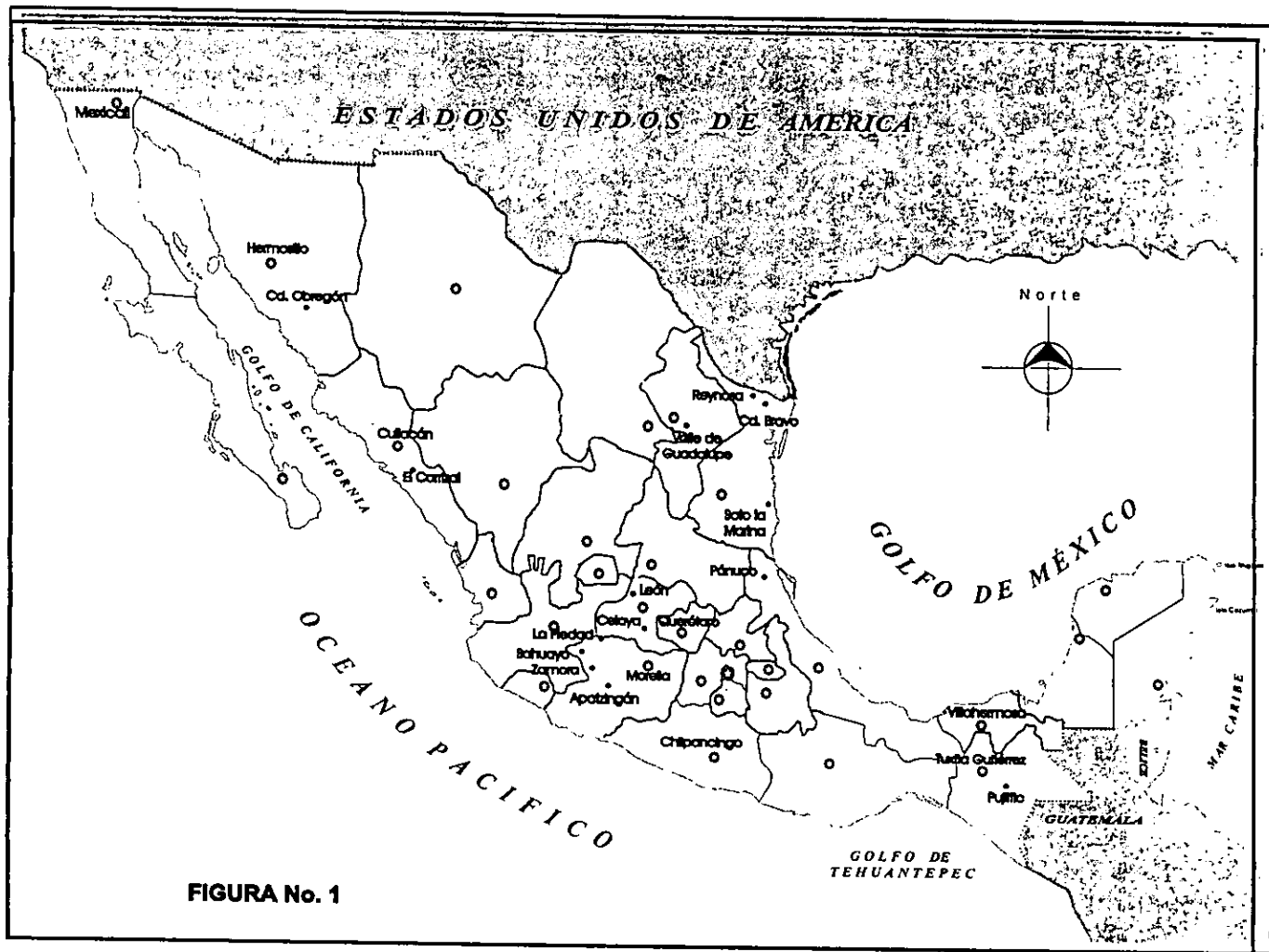


FIGURA No. 1

Para llevar una secuencia que permita una mejor comprensión, éste trabajo se dividió en seis capítulos cuyos contenidos se describen a continuación.

El Capítulo I comprende la presente introducción. En el Capítulo II, titulado "Antecedentes", se presenta una recopilación de la información existente en cuanto a la fisico-química de las arcillas, su constitución mineralógica y un resumen de su comportamiento ante diferentes agentes estabilizantes como el cemento, cal, materiales asfálticos y diferentes sales.

El desarrollo del capítulo III corresponde a una investigación acerca del cloruro de calcio: qué es, como se obtiene, qué propiedades físicas y químicas posee, etc.

El procedimiento y desarrollo de las pruebas de laboratorio efectuadas en la mezcla de la arcilla procedente de la ciudad de Querétaro con el cloruro de calcio, se indican en el capítulo IV y el análisis de los resultados se desarrolla en el capítulo V. Finalmente, en el capítulo VI se presentan las conclusiones y recomendaciones generadas por la realización de éste estudio.

El presente trabajo forma parte de una investigación que sobre el mismo material, pero con diferentes productos estabilizantes, ha dirigido el M. en I. Gabriel García Altamirano, y que es recomendable se continuen realizando a través de tesis profesionales, pero no solo estudiando los suelos de la Cd. de Querétaro, sino en todos aquellos existentes en el país que pueden ocasionar problemas en las obras de Ingeniería Civil.

II.- ANTECEDENTES

Los suelos, y en especial las arcillas, son el producto de la desintegración de las rocas, formados en gran parte por reacciones químicas y físicas. El comportamiento de los suelos se determina por la naturaleza de las rocas que les dan origen y está directamente relacionado con los minerales que los integran.

Se define con el nombre genérico de arcilla, al suelo compuesto por una masa de pequeñas partículas de minerales que se encuentran unidas por ciertas cantidades de agua y que, en conjunto, mantienen propiedades de plasticidad. Estas propiedades que se manifiestan en el cambio de comportamiento de las arcillas, obedecen a variaciones en las fuerzas generadas entre las moléculas superficiales de las partículas adyacentes, se estima que esta actividad en la superficie de la partícula individual es fundamental para tamaños menores a 2 micras (0.002 mm). Un mineral es una sustancia inorgánica y natural, que tiene una estructura interna característica determinada por un cierto arreglo específico de sus átomos e iones. Su composición química y sus propiedades físicas, o son fijas, o varían dentro de límites definidos.

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

1.- Nexos Primarios.

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

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

Nexos ó Enlaces Covalentes: se presentan entre dos átomos a los cuales les falta uno o más electrones en sus bandas extremas. En este caso, los átomos se combinan para compartir uno o más electrones.

2.- Nexos a través de un núcleo de Hidrógeno.

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

3.- Nexos Secundarios.

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

4.- Unión Catiónica.

Se tiene cuando un catión (Na^+ , Ca^+ , K^+ , etc.) es atraído a dos moléculas cargadas negativamente. Esta unión es similar a la del Hidrógeno, sólo que es más débil e inestable que ésta.

5.- Unión Coulómbica.

Llamada también electrostática, ocurre entre todas las partículas cargadas eléctricamente. Las estructuras de la molécula pueden ser polares, por lo que en esta unión se presentan fuerzas de Van Der Waals, dependiendo de la orientación de las partículas.

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

Los minerales básicos que constituyen las arcillas son los silicatos de aluminio hidratados y, en algunas ocasiones, los silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la aluminica.

La primera está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose en conjunto en forma de tetraedro, tal como se muestra en la figura 2-a. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada dos tetraedros. Un esquema de una unidad hexagonal aparece en la figura 2-b. Las unidades hexagonales repitiéndose indefinidamente, constituyen una red lamina.

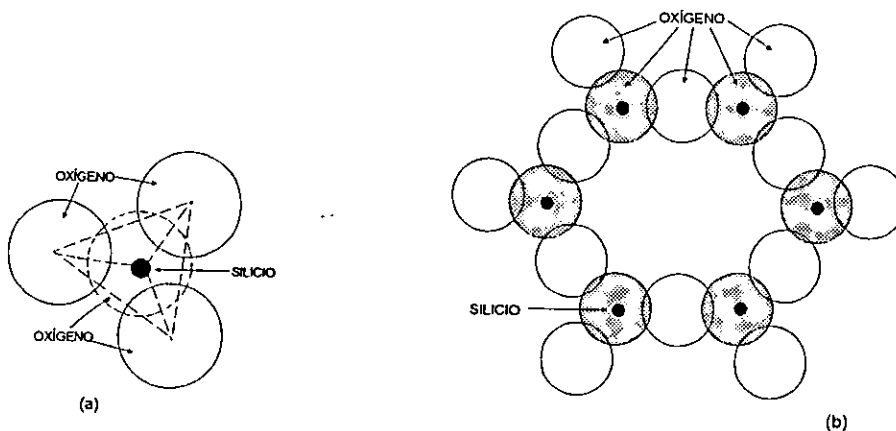


Fig. 2 Esquema de la estructura de la lámina silícica.

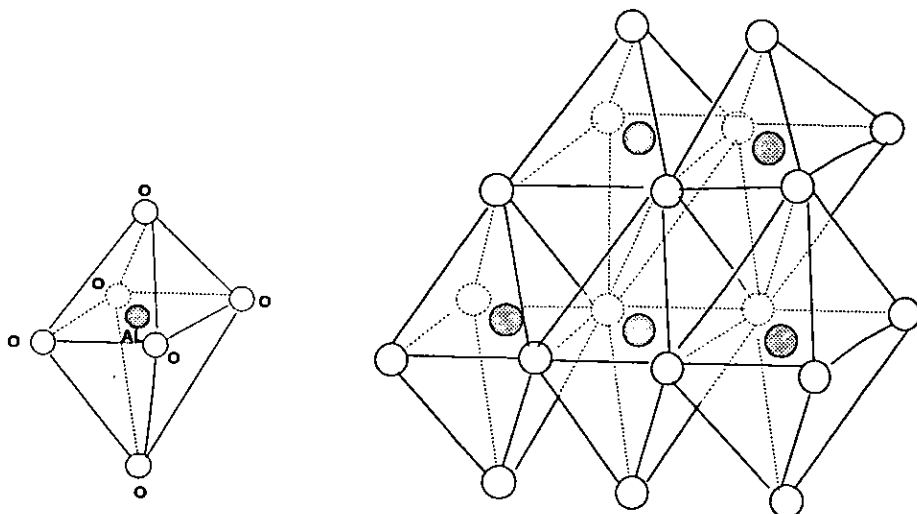


Fig. 3 Unidad octaédrica que constituye la lámina aluminica.

Las láminas aluminicas están formadas por retículas de octaedros, dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor, tal como aparece esquemáticamente en la figura No. 3. Vuelve a ser el oxígeno el nexo entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la retícula.

De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se encasillan en tres grupos: caolinitas, montmorillonitas e illitas. Las caolinitas están formadas por una lámina silícica y otra aluminica, que se superponen indefinidamente. La unión entre las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción), por lo tanto, en presencia del agua, las arcillas caolínicas serán relativamente estables.

Las montmorillonitas están formadas por una lámina aluminica, entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente siendo la unión entre moléculas débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Con ello, se produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente en una expansión. Las arcillas montmorilloníticas, especialmente en presencia de agua, presentan fuerte tendencia a la inestabilidad.

Un ejemplo característico del grupo de las arcillas montmorilloníticas, son las bentonitas, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico.

El grupo de las illitas está estructurada en forma análoga al de las montmorillonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su expansividad es menor que la de las montmorilloníticas, y, en general se comportan mecánicamente en forma más favorable para el ingeniero.

El comportamiento mecánico e hidráulico de las arcillas está regido por las fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la superficie de los compuestos minerales. En general, se estima que esta actividad en la superficie de la partícula individual es fundamental para tamaños menores a dos micras (0.002 mm).

La superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa, tal como se señaló en la estructura iónica arriba descrita en cada grupo de arcillas. La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. Así la partícula atrae a los iones positivos del agua (H^+) y a cationes de diferentes elementos químicos, tales como Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{+++} , Fe^{+++} , etc. Lo anterior conduce al hecho de que cada partícula individual de arcilla, se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua adsorbida).

Las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellos no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes: al ligarse a la partícula por su carga (+), el polo de carga (-) queda en posibilidad de actuar como origen de aleación para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen moléculas de agua, gracias a la naturaleza polarizada de éstas, de modo que cada catión está en posibilidad de poseer un volumen de agua en torno a él. El agua adsorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de éste y con su radio iónico. Por lo anterior, cuando las partículas del suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. El espesor de la película de agua adsorbida por el cristal de suelo es así función no sólo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos. Así, por ejemplo, un catión Ca^{++} , atrae más moléculas de agua que un catión Na^+ . Ahora bien, los radios atómicos de ambos elementos son 1.06 y 0.93 respectivamente. De esto podemos inferir que por cada catión Ca^{++} puede absorberse en la superficie del cristal dos Na^+ .

El volumen de dos cationes Na^+ es de 7.88 \AA^3 y el de un catión Ca^{++} , 4.99 \AA^3 ; por ello los cationes Na^+ tienen una capa más gruesa de agua absorbida a su alrededor que junto con el catión, puede formar una película de agua adsorbida, particularmente gruesa, alrededor de los cristales.

Esta película de agua posee propiedades diferentes de las del agua ordinaria, a causa de la gran presión a que está sometida por las fuerzas electrostáticas de adsorción. Los cambios de volumen en las arcillas se explican con esta teoría.

La magnitud de las presiones de adsorción existentes en la película de agua que rodea a un cristal de arcilla, ha sido estimada en $20\,000 \text{ Kg./cm}^2$. Estudios efectuados sobre la variación del punto de congelación del agua, cuando ésta está sujeta a grandes presiones, han revelado que dicho punto corresponde a temperaturas cada vez mayores respecto al valor normal de 0°C , a medida que la presión se incrementa a partir de 600 Kg./cm^2 . Para $10\,000 \text{ Kg./cm}^2$, la congelación del agua ocurre a $+30^\circ\text{C}$.

De lo anterior puede deducirse que a las temperaturas a que se encuentra normalmente en la masa de suelo, la película de agua adsorbida por los cristales de arcilla, tendrá las propiedades similares a las del hielo sólido (capa sólida). Más alejadas del cristal, otras moléculas de agua se encuentran sometidas a presiones gradualmente menores. Esta agua tiene propiedades intermedias entre el hielo y el agua en estado líquido normal, pudiendo decirse que su comportamiento es el de un fluido de alta viscosidad (capa viscosa). Las moléculas de agua no sujetas al cristal por fuerzas de superficie mantienen sus características usuales (agua libre o gravitacional).

Terzaghi y Peck estiman que la capa sólida y viscosa puede tener un espesor de 0.005 micras, si bien indican que el agua no presenta sus propiedades normales por completo hasta un alejamiento de 0.1 micras aproximadamente, a partir de la superficie del cristal.

INTERCAMBIO CATIONICO.

Los cristales de arcilla pueden cambiar los cationes adsorbidos en su película superficial; por ejemplo, una arcilla hidrógena (con cationes H^+) puede transformarse en sódica, si se hace que circule a través de su masa agua con sales de sodio en disolución. En realidad lo que ocurre es un intercambio de cationes entre el agua y las películas adsorbidas por las partículas minerales algunas veces en reacción rápida. Los cationes intercambiables más usuales son: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , y $(NH_4)^+$.

Las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las montmorillonitas, y las illitas poseen la propiedad en grado intermedio.

La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir, es mayor si el pH del suelo es menor; la actividad catiónica se hace notable, en general, para valores del pH menores que 7. La capacidad de intercambio también crece con la velocidad y concentración de la solución que circule por la masa de suelo.

Las propiedades mecánicas de una arcilla pueden cambiar al variar los cationes contenidos en sus complejos de adsorción, pues a diferentes cationes ligados, corresponden distintos espesores de la película adsorbida, lo que se refleja sobre todo en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo. Por esta razón, el intercambio catiónico forzado se ha usado y se usa para tratar suelos con fines de mejorar su comportamiento mecánico.

En general, los cationes pueden disponerse según su efecto benéfico decreciente en la resistencia de las arcillas de acuerdo con la lista: $(NH_4)^+$, H^+ , K^+ , Fe^{+++} , Al^{+++} , Mg^{++} , Ba^{++} , Ca^{++} , Na^+ , Li^+ .

Las relaciones entre los cristales que componen las arcillas y el agua que los rodea, han adquirido una importancia cada vez más significativa, de la que se hace un uso reciente para explicar los comportamientos macrofísicos de las arcillas en las obras ingenieriles. El comportamiento macrofísico, a gran escala de las arcillas, de interés ingenieril, no es más que un reflejo de la estimulación de toda una serie de fenómenos microfísicos, que ocurren en lo más íntimo de los suelos finos.

No se sabe exactamente que factores determinan el tipo de arcilla que se formará cuando se intemperiza una roca. Probablemente el clima desempeña un papel muy importante, pues la caolinita tiende a formarse como resultado del intemperismo químico intenso en climas cálidos y húmedos, en tanto que la illita y la montmorillonita parecen desarrollarse mejor en climas más secos y fríos. También la historia de la roca parece tener influencia. Por ejemplo, cuando se forma un suelo a partir de una roca sedimentaria en la que ha sido incorporada una arcilla, se encuentra con frecuencia que el suelo contiene el mismo tipo de arcilla que la roca original. El análisis de cierto número de rocas sedimentarias y de los suelos desarrollados sobre tales rocas, ha demostrado que cuando la roca original tiene illita, ésta es la arcilla que predomina en el suelo, independientemente del clima. Es claro que tanto el medio como la herencia parecen influir en el tipo de arcilla que se desarrollará por el intemperismo químico.

IDENTIFICACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS

El fenómeno de expansividad de un suelo, se manifiesta al cambiarle su contenido de agua. Algunos suelos arcillosos sufren expansiones con el aumento del contenido de agua y contracciones con las disminuciones. Este fenómeno está relacionado con el desequilibrio de las fuerzas físico - químicas entre las partículas de los minerales arcillosos tales como la caolinita, illita y montmorillonita, siendo ésta última la que manifiesta mayor potencial de expansividad.

La presencia de un suelo expansivo en las zonas pobladas, es evidenciada por la experiencia local, basada en el comportamiento que presentan las estructuras ligeras sobre ellos construidas. Varios edificadores de residencias han sufrido pérdidas financieras al construir numerosas residencias en suelos expansivos, cuyos cambios de volumen pueden ser del 5 al 10% ó mayores.

Para identificarlos en campo, los suelos expansivos suelen ser duros y agrietarse cuando se secan. Las grietas pueden tener un ancho de 1 a 2.5 cm. y varios pies o metros de profundidad. Los terrones duros del suelo son como ladrillos y no se pueden romper con facilidad; cuando está mojado, el suelo es plástico como arcilla de alfarería.

Algunos métodos que identifican a un suelo con propiedades expansivas, son los siguientes:

Observación Directa.

Sin lugar a dudas la observación directa es el método de identificación más rápido, sin embargo, es el que más experiencia requiere. Como una solución a este problema, algunos ingenieros australianos han desarrollado una metodología¹, la cual les permite inferir el tipo de mineral constitutivo del suelo en estudio y que consiste en lo siguiente:

- i) Observaciones generales del lugar, del perfil de los suelos, así como de los agrietamientos los cuales son típicos en lugares donde existen suelos expansivos.
- ii) Apreciación de la textura del suelo, la cual se debe estimar con la ayuda de agua de lluvia o destilada. Una textura áspera en el suelo amasado con agua, indica la presencia de arena; una textura pastosa, la presencia de arcilla, y la ausencia de ambas, la existencia de limo. Si se permite que el suelo se seque en los dedos, el suelo arenoso no se adherirá a ellos, el limo se desprenderá fácilmente y la arcilla se adherirá fuertemente a ellos.
- iii) Inmersión del espécimen de suelo en agua de lluvia o destilada, para ello, se recomienda la "Prueba del Grumo", que consiste en colocar un pequeño grumo de suelo secado al aire (aproximadamente del tamaño de un frijol), y sumergirlo en agua destilada o de lluvia, observando su comportamiento después de la inmersión durante un lapso de 10 minutos. Con estas observaciones y con las tablas I, II, III y de la figura A, es posible inferir para fines prácticos, el tipo de mineral y con ello determinar si se trata de un suelo expansivo o no.

La arcilla activa tiene la particularidad de desintegrarse como una granada al ser sumergida en el agua destilada.

Todas las observaciones de campo deben señalarse de manera apropiada, anotando además de los datos de localización, registros como los siguientes:

¹ Ingles O. G., Metcalf. "Soil Stabilization, Principles and Practice". Butterworths, Sidney 1972.

- profundidad a partir de la superficie
- color: cuando se presenten motas, anotar sus coloraciones
- inclusiones: indicar si se trata de carbonatos, hierro, raíces, materia orgánica, etc.
- textura y consistencia
- dispersión en agua
- tipo de perfil
- geología: tipo de rocas o formaciones en la región
- aguas superficiales: coloración, turbidez, etc.
- erosión: tipo de erosión
- presencia de deslizamientos
- microrelieve en los suelos
- mineral inferido.

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

TABLA I

PRINCIPALES TIPOS DE MÍNERALES			
Grupo	Minerales	Tamaño promedio [micras]	Características físicas principales
Arena muy fina	Cuarzo	1.0	Abrasiva, sin cohesión.
Mica	Muscovita, biotita	1.0	Sin cohesión, se intemperiza fácilmente, compactable.
Carbonato	Calcita, dolomita	Variable	Se pulveriza fácilmente.
Sulfato	Yeso	1.0	Ataca al cemento.
Alófano	Aluminosilicatos amorfos, atapulgita, alúmina y sílica hidratadas	Variable	Alta relación de vacíos, alta plasticidad.
Caolín	Caolinitas y halloysita	1.0	No expansivo, baja plasticidad, baja cohesión.
Illita	Illita y micas parcialmente degradadas	0.1	Expansiva, plasticidad media, baja permeabilidad.
Montmorillonita	Montmorillonita y bentonita	0.01	Altamente expansiva, muy plástica, permeabilidad extremadamente baja.
Clorita	Clorita, vermiculita	0.1	Expansión baja, resistencia al cortante baja.
Materia orgánica	Presencia de ácido húmico y humatos	Variable	Alta permeabilidad, difícilmente compactable, se puede degradar rápidamente por oxidación.

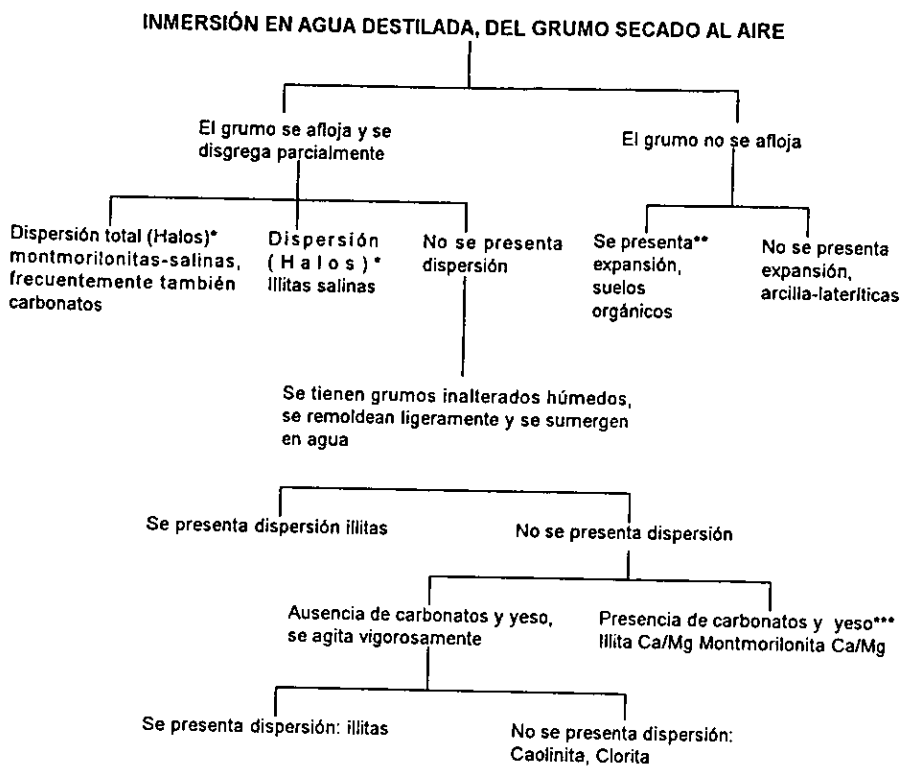
TABLA II

INFERENCIAS DE LA OBSERVACIÓN VISUAL.	
Observaciones	Componentes arcillosos dominantes.
Aguas turbias de coloraciones amarillo-café a rojo-café.	Montmorillonitas, illitas y salinidad de suelos.
Aguas claras.	Calcio, magnesio o suelo rico en hierro, suelos altamente ácidos, arenas.
Aguas claras con tonos azules.	Caolines no salinos.
Zanjas de erosión o tubificaciones en el suelo natural.	Arcillas salinas, usualmente montmorillonitas.
Ligeras erosiones o tubificaciones en el suelo natural.	Caolinitas.
Desprendimiento de suelos.	Caolinitas y cloritas.
Microrelieves superficiales.	Montmorillonitas.
Formaciones rocosas graníticas.	Caolinitas, micas.
Formaciones rocosas basálticas, topografía con drenaje pobre.	Montmorillonitas.
Formaciones rocosas basálticas, topografía con buen drenaje.	Caolinitas.
Formaciones rocosas de areniscas.	Caolinitas.
Formaciones rocosas de lutitas y pizarras.	Montmorillonitas o illitas, usualmente con salinidad de suelos.
Formaciones rocosas calizas.	Montmorillonitas alcalinas y cloritas con propiedades muy variables.
Formaciones recientes de piroclásticos.	Alófanos.

TABLA III

INFERENCIAS DE LA OBSERVACIÓN DEL PERFIL DE SUELOS	
Observaciones	Componentes arcillosos dominantes.
Arcillas moteadas o jaspeadas, con coloraciones rojo, naranja y blanco.	Caolinitas.
Arcillas moteadas o jaspeadas, con coloraciones amarilla, naranja y gris.	Montmorillonitas.
Arcillas gris oscuro y negras.	Montmorillonitas.
Arcillas café o café rojizo.	Illitas con algo de Montmorillonitas.
Arcillas gris claro o blancas.	Caolinitas y bauxitas.
Partículas pequeñas de alta refracción (micas).	Suelos micáceos.
Cristales pequeños, fácilmente disgregables.	Suelos ricos en yeso o zeolitas.
Nódulos suaves, diseminados.	Carbonatos.
Nódulos duros, café rojizo.	Hierro, lateritas.
Agrietamiento intenso, con grietas amplias, profundas y con espaciamiento de 5 a 6 cm.	Illitas ricas en calcio y montmorillonitas.
Igual al anterior pero con espaciamiento en las grietas hasta de 30 cm. o más.	Illitas.
Suelos disgregables de textura abierta con cantidades apreciables de arcillas.	Suelos usualmente asociados con carbonatos, alófanos o caolín, pero nunca montmorillonita y rara vez illita.
Suelos disgregables de textura abierta con cantidades apreciables de arcilla, de color negro.	Suelos orgánicos, turba.

INFERENCIAS DE LA OBSERVACIÓN DEL PERFIL DE SUELOS	
Observaciones	Componentes arcillosos dominantes.
Suelos disgregables de textura abierta con bajo contenido de arcilla.	Carbonatos, limos y arena.
Suelos que presentan una apariencia rugosa en la superficie expuesta al intemperismo.	Montmorillonitas con salinidad de suelos.
Horizontes de suelos blancuzcos, de espesores relativamente pequeños y cerca de la superficie (hasta 60 cm. de la superficie).	Arriba del horizonte blancuzco se tienen limos finos, y abajo arcilla dispersa. (En Australia).



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

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

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

Fig. A. Esquema de la prueba de inmersión del grumo en agua.

En el laboratorio, la identificación de estos suelos se basa en reconocer la presencia de minerales arcillosos activos a través de pruebas como la difracción de rayos X, la microscopía electrónica, el análisis térmico diferencial y el análisis químico. Desafortunadamente resultan costosas, y su aplicación queda supeditada a la importancia del estudio u obra por realizar. Por esta razón se han desarrollado técnicas indirectas como la interpretación a través de los límites de Atterberg que permiten identificar un suelo expansivo. La resistencia a la penetración estándar de un suelo, también ha sido relacionada con el fenómeno de expansión. Se ha observado que arcillas muy secas con resistencia a la penetración mayor de 15 golpes causan problemas de expansión.

Algunos métodos mecánicos que permiten determinar las características de expansividad de un suelo arcilloso, se describen a continuación.

- Método de Seed.- Valora el grado de expansión (GE) de un suelo en función del cambio volumétrico que sufre una muestra compactada en un anillo de consolidación, al aplicársele la prueba estándar AASHTO y clasifica la expansión en la forma siguiente:

GE	Muy alto	Alto	Medio	Bajo
V/Vo (%)	25	5 - 25	1.5 - 5	0 - 1.5

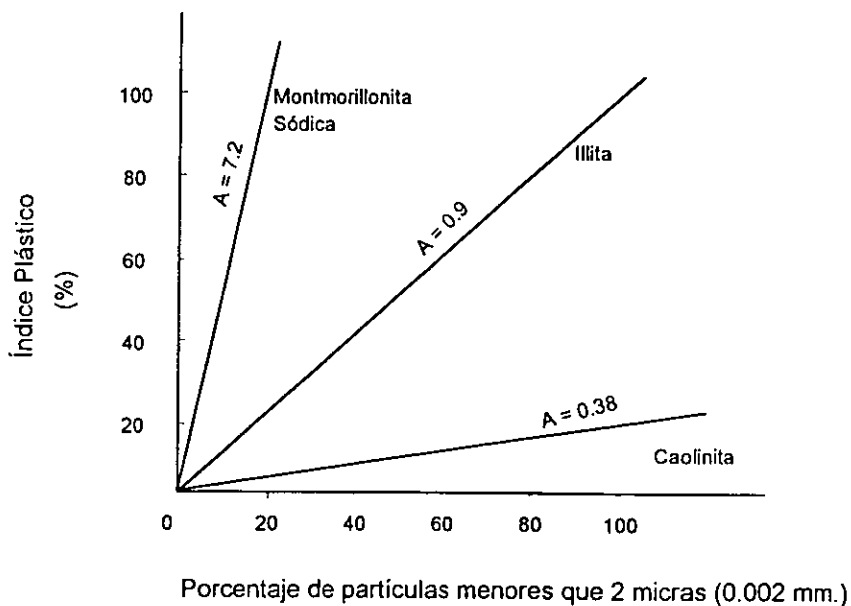
- Método de Mc Dowell.- Se basa en el cambio volumétrico (V/Vo) bajo absorción capilar de una muestra de suelo sujeta a una presión confinante de 0.07 kg./cm² en cámara triaxial, el cual se correlaciona con el índice de plasticidad (Ip), según se muestra a continuación:

V/Vo (%)	0	3	5	10	15	20
Ip (%)	8 - 15	15 - 30	20 - 35	35 - 50	50 - 80	70

- Método de Lambe.- Establece una correlación entre la presión que ejerce una muestra de suelo sobre un dinamómetro al saturarse y el cambio volumétrico correspondiente, a fin de calificar el grado de expansión (GE), según la tabla siguiente:

GE	Muy crítico	Crítico	Marginal	No crítico
V/V ₀ (%)	2	2 - 4	4 - 6	6

- Método de Skempton.- Se basa en el parámetro de actividad coloidal A_c , la cual se define como la relación entre el Índice de Plasticidad y el porcentaje de partículas menores de dos micras. En la siguiente ilustración se muestra esta relación y se observa que la actividad para la montmorillonita sódica alcanza valores iguales o mayores de 7.2, la de la Illita tiene un valor de 0.9 y la de la caolinita, es de 0.38.

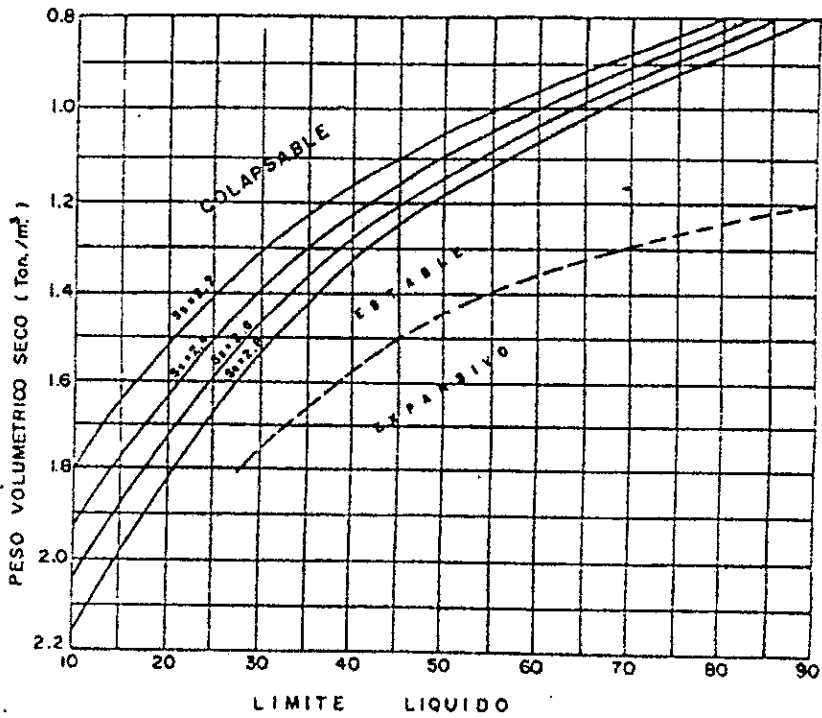


- Método de Holtz.- Determina el grado de expansión de un suelo (GE) en función del cambio volumétrico (V/Vo) de una muestra de suelo secada al aire, la cual, después de ser saturada, se coloca en un anillo de consolidación y se somete a una sobrecarga de 0.07 kg./cm². Para fines prácticos se ha correlacionado el Índice de Plasticidad (Ip) con el límite de contracción (LC) y con el contenido de coloides (Cc) con V/Vo y GE. Este es el método más usado de todos.

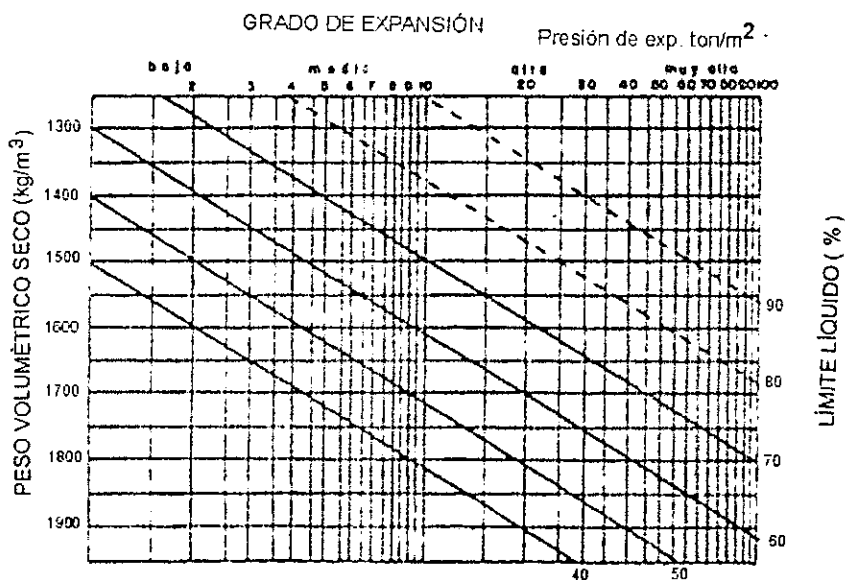
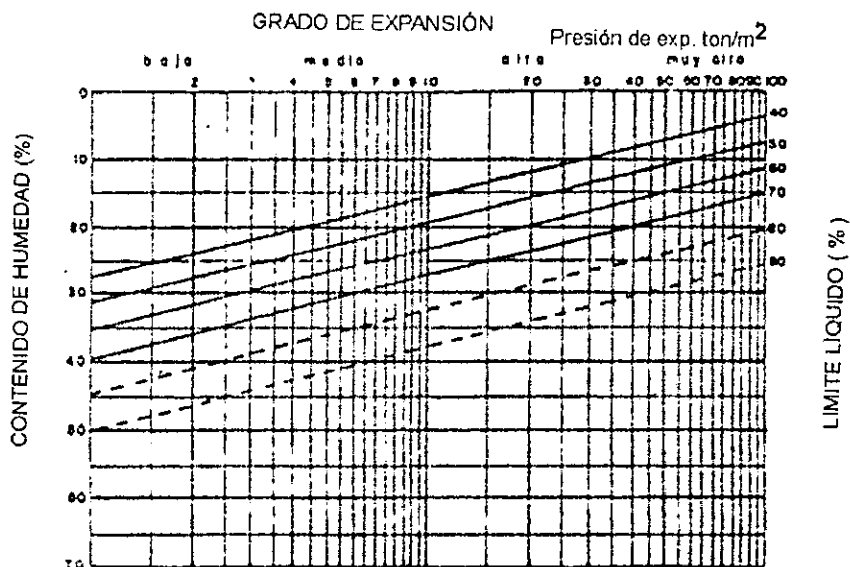
GE	Muy alto	Alto	Medio	Bajo
LC %	< 11	7 - 12	10 - 15	> 15
Ip %	> 35	25 - 41	15 - 28	< 18
Cc %	> 28	20 - 31	13 - 23	< 15
V/Vo %	> 30	20 - 30	10 - 20	< 10

- Criterio del Bureau of Reclamation.- Se basa en la siguiente gráfica a partir del peso volumétrico seco y el límite líquido:

CRITERIO DEL BUREAU OF RECLAMATION PARA LA IDENTIFICACION DE SUELOS EXPANSIVOS Y COLAPSABLES



- Criterio de Ghazzaly y Vijayvergiya. - El criterio de estos autores se resume en las siguientes gráficas:



Las pruebas que se realizan mediante los métodos descritos presentan un amplio margen de error ya que están sujetas a la preparación del material, a la ejecución de la prueba e incluso a la interpretación de ésta, por ello en algunos casos un suelo expansivo no se identifica sino hasta que causa daños en la estructura.

ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS.

Las propiedades de un suelo se pueden alterar de muchas formas como puede ser: por medios mecánicos, drenaje, medios eléctricos, cambios de temperatura o agentes estabilizantes.

Siempre debe tenerse muy presente que debido a la gran variedad de suelos, cada método resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos y que, además, la estabilización no es una herramienta mágica que nos ayude a mejorar todas las propiedades de un suelo, por lo tanto, deben apreciarse las propiedades que se deseen mejorar pues es fundamental para tomar la decisión correcta acerca de la estabilización. Asimismo, no debe pensarse en el uso de la estabilización solamente como una medida correctiva, sino como una medida preventiva o de seguridad contra condiciones adversas que se desarrollen durante la construcción o en la vida de la estructura.

Por definición, la estabilización de un suelo corresponde al incremento en la resistencia del mismo mediante la adición de una pequeña porción, normalmente menor del 10%, de un agente estabilizante y que dicho aumento en la resistencia no debe verse reducida al saturar el suelo estabilizado, razón por la cual deben efectuarse, además, estudios en donde se tenga en cuenta éste aspecto y así garantizar la estabilización efectiva.

En el diseño de la estabilización se deben tener muy presentes las variaciones que se espera lograr en cuanto a las propiedades del suelo (como permeabilidad, compresibilidad, estabilidad volumétrica, etc.) ya que puede darse el caso de que el mejoramiento de alguna o algunas de sus características mediante la estabilización, ocasione que otras características resulten en condiciones desfavorables, tal como sucede, por ejemplo, en la estabilización mediante compactación.

El diseño de estabilizaciones con agentes estabilizantes, consiste en primer término en llevar una adecuada clasificación del suelo, con lo cual se determina el tipo y cantidad de agente así como el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño depende del uso que se pretenda dar al suelo, y resulta complicado debido a la gran dificultad que existe al tratar de juzgar los efectos inmediatos y permanentes que producirán en el suelo; por ejemplo, un cemento Portland puede rigidizar a un suelo, mientras que un asfalto lo hace flexible. Por otro lado, la mayor parte de la investigación y desarrollo de los productos estabilizantes está a cargo de los propios productores, por lo que podría esperarse que éstos solo presenten estudios de los artículos que representan y no indicar comparativamente sus desventajas, sino que las ocultan amparadas con las ventajas más sobresalientes que descubran.

La elección del método de estabilización deberá quedar a cargo del Ingeniero de suelos, pues él será el único que podrá estimar la viabilidad de la estabilización con base en sus conocimientos teóricos y prácticos y no basarse únicamente en la publicidad dada a tal o cual producto, sin antes haber llevado a cabo un estudio racional y detallado de la variación en las características del suelo con la aplicación de la estabilización propuesta. Así mismo, al estudiar los efectos de una estabilización, debe tenerse presente el fin que se busca, ya que si el suelo estabilizado permanecerá húmedo en las condiciones de trabajo, entonces la determinación de la resistencia bajo estas circunstancias sería la adecuada, sin embargo, si el suelo permanecerá seco y agrietado, probablemente sea más efectivo realizar pruebas, con cargas repetidas para estudiar efectos de disgregación y pulverización. Para suelos de textura abierta y mal graduados sería más importante determinar su susceptibilidad a recomprimirse provocando con ello deformaciones en las estructuras que sobre ellos se apoyen.

Debe también tenerse en mente la forma como se va a utilizar el suelo, ya que si se va a emplear tal como se encuentra in situ, puede ser más conveniente utilizar pruebas de resistencia in situ que en el caso de suelos remoldeados, en donde las pruebas efectuadas en el laboratorio sí pueden servir para estimar los parámetros de resistencia, siempre y cuando exista similitud entre lo que se hará en el campo y lo hecho en el laboratorio.

Algunas veces resulta sumamente difícil tratar de incrementar la resistencia de un suelo mediante la adición de agentes estabilizantes, tal es el caso de los suelos con alto contenido de materia orgánica, del orden del 10%, ya que ésta inhibe la acción de tales agentes.

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO

El cemento Portland fue inventado en 1824 por un albañil inglés, Joseph Aspdin, y se le dio ese nombre debido a que su color se asemejaba mucho a las formaciones de las piedras calizas naturales encontradas en la isla de Portland, cerca de Inglaterra.

Consiste de aproximadamente 60% de cal, 25% de sílice y 10% de alúmina y el resto formado por óxido de hierro y yeso, la materia prima se tritura, muele y mezcla en la proporción apropiada. Esta mezcla se calienta o quema en un horno de cuba hasta que se funde; el clinker (escorias) resultante se muele finamente con una pequeña cantidad de yeso para obtener la conocida consistencia de polvo muy fino.

El cemento Portland es un agente estabilizador muy versátil. Puede usarse con éxito para estabilizar cualquier tipo de suelo, con la excepción de aquellos altamente orgánicos y de productos de desechos industriales que contienen agentes químicos que impiden el endurecimiento apropiado.

El suelo cemento asemeja a un concreto sucio y débil. Cuando se combinan el cemento, el suelo y el agua, el primero comienza inmediatamente a hidratarse y, durante todo el periodo de fraguado y secado, forma una aglutinación cementosa entre las partículas de suelo consistente principalmente en hidratos complejos de silicatos y aluminatos de calcio. El diseño se basa en la resistencia de la mezcla suelo-cemento después de 7 o 28 días de secado. Sin embargo, la mezcla continúa aumentando su resistencia a medida que pasa el tiempo.

Las resistencias a la compresión logradas con las mezclas de cemento (suponiendo que la mezcla, contenido de humedad y densidad son apropiados), dependen del tipo de material, su dosificación y el porcentaje de cemento usado en la mezcla. Los aumentos de la resistencia son casi lineales desde la adición de solo pequeñas cantidades de cemento hasta la cantidad necesaria para durabilidad.

Para efectuar una buena estabilización con cemento, se han llevado a cabo muchas investigaciones, artículos técnicos, métodos de diseño, procedimientos de construcción etc., pero se ha descuidado un poco a las técnicas para la selección económica de una buena mezcla de suelo estabilizado a base de

cemento. Este último punto es muy importante pues se ha encontrado que con el empleo de algún aditivo agregado a la mezcla de suelo-cemento, se pueden lograr no solamente considerables ahorros, sino que se mejoran las propiedades del suelo estabilizado en forma muy notable. Es pues de fundamental importancia que el ingeniero conozca a fondo las reacciones que se llevan a cabo en el interior de un suelo al serle incorporados productos estabilizantes.

La técnica de la estabilización involucra una buena disgregación del suelo (especialmente en el caso de arcillas), la adición del cemento mezclado en seco y la adición del agua tanto de fraguado, como la necesaria para la compactación. Una vez hidratado el cemento, se obtiene una mezcla más dura y resistente que un suelo sin estabilizar. La adición de pequeñas cantidades de cemento del orden de 2 a 3% puede modificar las propiedades del suelo, mientras que cantidades del orden de 5 a 6% puede originar que el suelo cambie radicalmente sus propiedades.

Durante el endurecimiento de una mezcla de arcilla y cemento Portland, se puede distinguir un proceso primario y uno secundario. Como reacción primaria se tiene la hidratación del cemento; durante este período se forma hidróxido de calcio que reacciona más fácilmente que la cal ordinaria. Las partículas de la arcilla participan entonces en el proceso secundario, que consiste en que los iones de calcio producidos durante la hidratación del cemento atacan a la arcilla tendiendo a intensificar la floculación iniciada por el incremento en la proporción de electrolito que acompaña a la adición del cemento.

El hidróxido de calcio inicia el ataque de las partículas arcillosas y de los constituyentes amorfos, se combina la sílice y la alúmina disueltas con los iones de calcio y se precipitan formando un material cementante adicional. El hidróxido de calcio utilizado en el proceso secundario es proporcionado por la cal liberada durante la hidratación del cemento; en esta forma los productos de la reacción primaria proporcionan el reactivo necesario para la continuación del proceso secundario. Debido a que la materia cementante secundaria se formaría sobre o cerca de la superficie de las partículas arcillosas, una vez floculadas, se pegarían en los puntos de contacto gracias a la formación de los materiales cementantes secundarios, por lo que pueden esperarse que se desarrollen uniones muy fuertes entre la pasta del cemento hidratado y las partículas arcillosas que cubren los granos del cemento endurecido. Los procesos secundarios aumentan la resistencia y la estabilidad de la mezcla obtenida en el proceso primario.

Algunos autores afirman que la mayor reactividad se presenta con las arcillas de tipo montmorillonítico siguiendo en orden las del tipo de las caolinitas y finalmente las illitas. Esto podría esperarse debido a que las montmorillonitas presentan la capacidad de intercambio catiónico mayor.

Se ha reconocido que en general la materia orgánica y el exceso de sales en el suelo, especialmente los sulfatos, pueden retardar o evitar la hidratación normal del cemento en las mezclas de suelo y cemento. Una razón del porque la materia orgánica retarda la hidratación en el cemento, puede ser el hecho de que dicha materia orgánica absorbe iones de calcio.

Para determinar la proporción óptima de cemento Portland en una estabilización, se deben tener en cuenta los factores que más influyen, tales como la proporción de materia orgánica, acidez del suelo (pH), porcentajes de los diferentes materiales arcillosos presentes en el suelo, tipo de cemento, granulometría del suelo, etc.

Es muy conveniente que el ingeniero se apoye en un estudio efectuado sobre el suelo que se pretenda estabilizar, realizado por un químico o un técnico especializado que proporcione a priori una idea de la posible respuesta del suelo a la estabilización. La ejecución de esta etapa es de suma importancia, pues gracias a ello se puede ahorrar esfuerzo, dinero y tiempo. El químico puede deducir de los resultados obtenidos, una pobre reacción del suelo o, aún más, un posible ataque del suelo al propio cemento, lo que podría ser una razón más que suficiente para desechar la posibilidad del empleo del cemento. Sin embargo, este mismo especialista podría indicar al ingeniero algunas posibilidades de llegar al éxito mediante la inclusión, por ejemplo, de un aditivo secundario, como en el caso del un suelo muy ácido que podría ser neutralizado en primer término con cal viva (CaO) para neutralizar su acidez, posteriormente adicionar cemento para dar resistencia al suelo. Los procedimientos empleados para determinar a priori las características importantes, tanto en los suelos sin estabilizar como estabilizados, requieren de técnicas especializadas, como el método de refracción de rayos X, determinación del pH, espectrometría con rayos infrarrojos, análisis térmico diferencial, microscopio electrónico y análisis químico. Una vez contando con la ayuda previa del especialista, se puede proceder a la ejecución de pruebas de tipo geotécnico, las cuales son relativamente sencillas, como las pruebas de tipo clasificación, compresión simple, intemperismo, desgaste, etc.

Asimismo, es de suma importancia que el ingeniero tenga presente que para llevar a cabo la estabilización de suelos arcillosos con cemento, es necesario el previo secado y disgregado de dicho suelo, ya que el mezclado en húmedo es prácticamente imposible pues el cemento fragua al quedar en contacto con el agua. Es esta la razón por la cual algunas instituciones recomiendan que el suelo a estabilizar no debe contener finos arcillosos.

La buena práctica de construcción, como también el costo del cemento, indica que el cemento debe extenderse lo más cuidadosamente posible. Aunque una superficie del terreno parezca estar completamente seca, el cemento, después de cierto tiempo absorbe humedad suficiente del suelo para comenzar la hidratación. Esto, mas cualquier posibilidad de lluvia, indica que la extensión no debe cubrir un área demasiado grande adelante de la mezcla. Si pareciera que va a llover, se debe parar inmediatamente la extensión de material.

Si llueve después que se ha extendido el cemento, mezclarlo lo más rápido posible. No es necesario que la mezcla alcance la profundidad completa especificada, la mezcla de 2 ó 3 pulgadas de suelo es suficiente para impedir aglomeración. Hay que compactar de inmediato, cubriendo la superficie para impedir que el suelo se moje en exceso. Una vez que la lluvia cese, se puede mezclar el cemento hasta la profundidad total proyectada. Si continúa lloviendo después de oscurecer, la mayoría de las especificaciones permite la adición de no más de 2% de cemento extra la mañana siguiente. Los retrasos de más de una noche, generalmente requieren la adición de toda la cantidad de cemento especificada nuevamente y luego volver a mezclar.

Para lograr la densidad de diseño de una mezcla de suelo-cemento, es absolutamente esencial una compactación adecuada y oportuna. La hidratación comienza tan pronto el agua y el cemento se combinan y, con ello, debe iniciarse de inmediato la compactación pues, de lo contrario, declina la densidad máxima factible. Para el bien de una construcción de alta calidad, es preferible mezclar un área que no sea más grande de lo que se pueda terminar dentro de aproximadamente dos horas.

En consecuencia, para lograr una estabilización apropiada de suelos arcillosos con cemento, deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos durante la construcción:

- Efectuar en el lugar de tendido los trabajos de limpieza y drenaje con bastante anticipación a la colocación de la mezcla de suelo con cemento.
- Se debe verificar que el equipo a emplear este en buenas condiciones y tener la suficiente dotación de refacciones para cambiar las partes mas expuestas a desgaste o descompostura.
- El almacenamiento tendrá por lo menos, una capacidad igual al consumo para dos jornadas de trabajo, y deberá estar protegido en lo posible contra el aire y humedad, sobre todo el cemento. La ubicación de los almacenamientos estará lo mas cerca posible del lugar de tratamiento.
- En el caso de mezclas en el lugar, el equipo empleado para la distribución del cemento, tendrá una capacidad de circulación y operación en cualquier tipo de terreno y de preferencia, estará provisto de un sistema para dosificar el cemento en función de la velocidad de avance. La tolva de extendido del equipo de distribución, estará en buenas condiciones y contará con dispositivos que viertan el cemento hasta que quede en contacto con el suelo sin ser arrastrado por el viento. El mezclado también podrá efectuarse en plantas cuyas características sean suficientes para la magnitud y tipo de obra.
- En lo referente a la compactación, se vigilará que los espesores de las capas a compactar no excedan de los especificados, así como tomar en cuenta la capacidad de soporte del suelo subyacente. Si es muy blando, será casi imposible intentar compactar las primeras capas con rodillos muy pesados.
- Contar con personal competente para apreciar las variaciones que se presenten en la obra, sobre todo en los contenidos de agua o cemento por agregar.
- Deben programarse las etapas de tendido, mezclado y compactación con el fin de que no se obstaculicen unas operaciones con otras.
- De requerirse disgregaciones o pulverizaciones, debe contarse con el equipo apropiado y tener presente que algunos suelos son más disgregables en húmedo que en seco y viceversa. Se tienen que cumplir los siguientes requisitos:

- El 100% de los grumos de la mezcla pasan la malla de 25.0 mm. (1").
- El 80% de los grumos de la mezcla pasan la malla de 4.75 mm. (No. 4).
- El tamaño máximo de las partículas de roca no debe ser mayor de 50.0 mm. (2").
- Se dispondrá de los elementos necesarios para construir sin dilación una protección adecuada del suelo con cemento, ya sea para el curado o impermeabilización,
- Debe programarse la temporada en que se efectuará la construcción, especialmente en zonas con climas extremos
- En el caso de que se prevea un tránsito considerable del equipo de construcción sobre el suelo con cemento, se tenderá una carpeta de un riego o una capa de rodamiento provisional.

El cemento puede aplicarse ya sea distribuyéndolo en sacos, a granel en forma mecánica o bien en plantas dosificadoras de suelo y cemento.

"En el caso de que la aplicación se haga distribuyéndola en sacos, deberán estos repartirse sobre el material. Se abren y se distribuye al cemento de manera uniforme y en franjas longitudinales, que después se extienden mediante rastras. La figura B puede ser un buen auxiliar para calcular la distribución de los sacos de cemento de 50 Kg. Sin embargo, deberá verificarse la proporción de cemento mediante pruebas de laboratorio.

Para la distribución en el lugar mediante procedimientos mecánicos, se puede utilizar una gran variedad de equipos que aplican el cemento a granel. Con el auxilio de la figura C se puede estimar la cantidad de cemento necesaria por metro

cuadrado, cuando se emplea este procedimiento de distribución".²

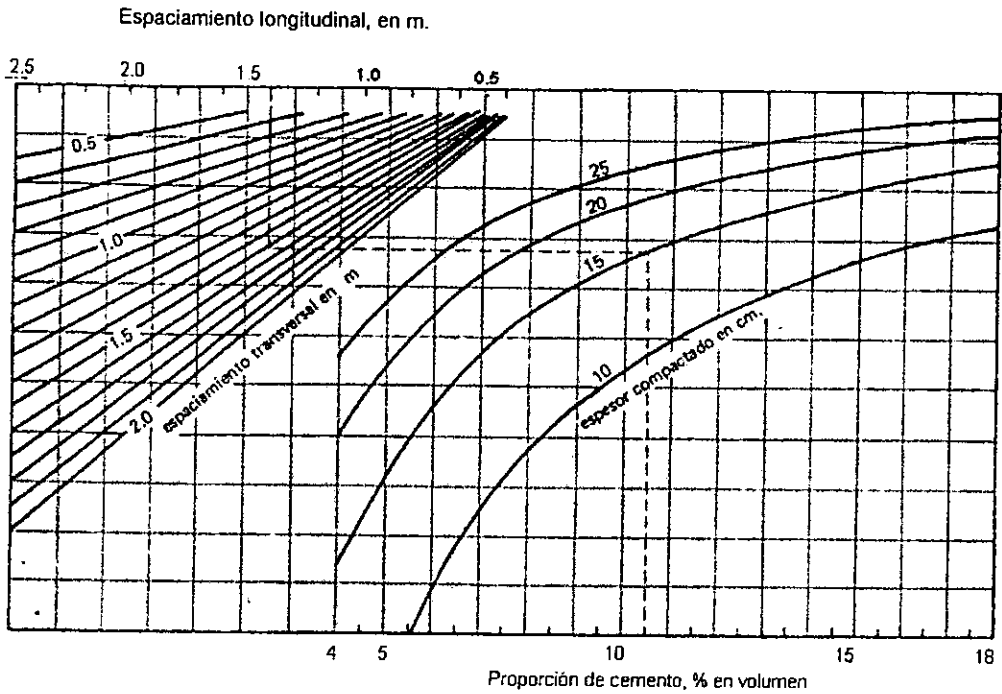


Figura B: Espaciamientos longitudinal y transversal de los sacos de cemento de 50 kg para la estabilización de suelos.

² Fernández Loaiza, Carlos. "Mejoramiento y Estabilización de Suelos", pág. 198.

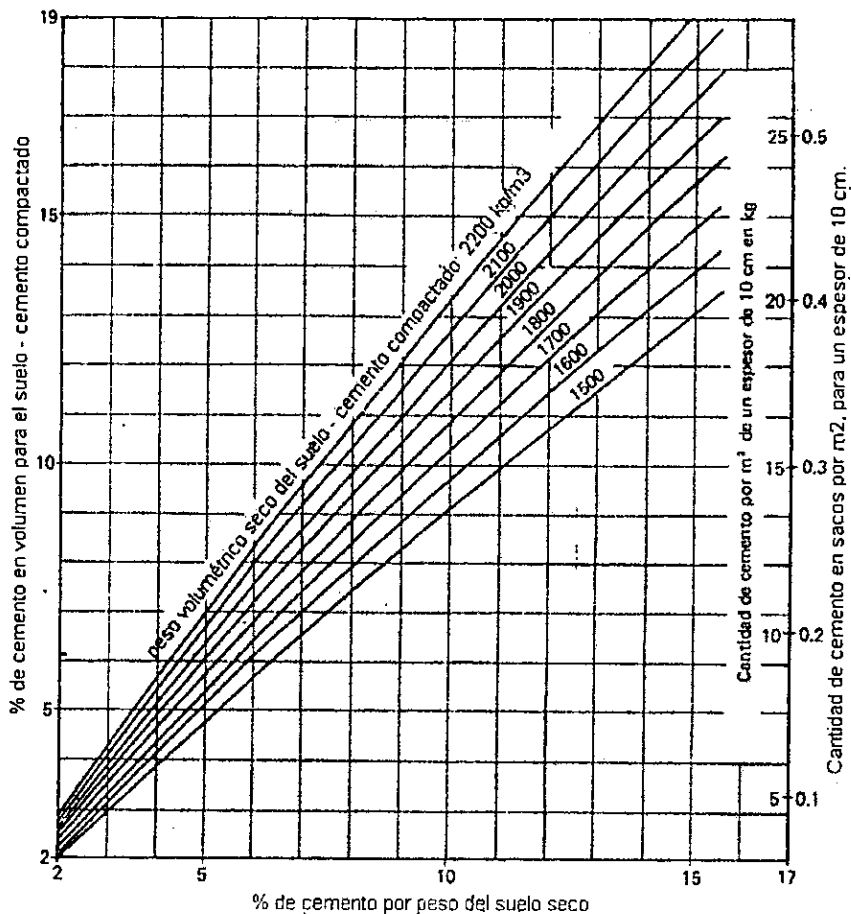


Figura C: Gráfica de la conversión de la proporción de cemento para facilitar la construcción y el control de campo.

La incorporación del cemento en las plantas dosificadoras puede efectuarse, tanto en forma continua, como por bachadas, y es semejante a la que se utiliza comúnmente en las plantas dosificadoras de morteros o concreto.

En el caso de mezcla en el lugar, se tienen equipos que en forma automática recogen al material acamellonado (suelo con cemento), lo mezclan en seco, lo humedecen mediante aspersores, vuelven a mezclar en húmedo y finalmente, lo depositan acamellonado. Otros equipos contienen sistemas múltiples de mezclado e inclusive se cuenta con dispositivos de pulverización.

En la etapa de mezclado se puede utilizar desde simples arados de disco hasta plantas muy sofisticadas dependiendo de las necesidades de la obra, del tipo de suelo, calidad deseada y factores económicos. El problema de compactación se trata profusamente en la literatura técnica y en muchas referencias, sin embargo, como no se ajustan exactamente a la compactación de mezclas de suelo con cemento, se considera conveniente hacer algunos breves comentarios al respecto.

En primer lugar se procurará que entre la etapa final de mezclado y el inicio de la compactación no transcurra un período mayor de 30 minutos, compensando con ligeros riegos de agua las pérdidas por evaporación.

El rodillo pata de cabra resulta adecuado en el caso de suelos finos y generalmente se ha recomendado lastrarlos para lograr mayor eficiencia. Se recomienda su empleo en la compactación inicial utilizando presiones de contacto de 10 a 21 Kg./cm² para suelos con arcilla de plasticidad alta. Se recomienda así mismo no compactar capas con espesores superiores a los 15 cm.

Los rodillos lisos resultan adecuados en la compactación final, proporcionan un buen acabado a la superficie de suelo con cemento y generalmente se emplean rodillos de 6 toneladas.

Cualquiera que sea el tipo de rodillo empleado, es indispensable que la compactación se realice en tal forma, que no transcurra un período mayor de 2 horas desde que el cemento quedó en contacto con el agua hasta el final de la compactación. Sin embargo, si se prevé un tiempo mayor deberá estudiarse previamente en el laboratorio el empleo de retardadores.

Una vez terminada la etapa de acabado, se deberá evitar que se evapore el agua necesaria para el fraguado, para lo cual puede aplicarse sobre la superficie un riego de producto asfáltico o cualquier otro procedimiento que logre el fin buscado, o bien pueden aplicarse riegos sucesivos de agua. El tipo de asfalto generalmente puede ser emulsión de rompimiento rápido o medio en cantidades que varían de 0.7 a 1.4 lts/m².

En obras importantes es conveniente construir tramos de prueba, que deberán ser de dimensiones, tanto en espesor como en longitud, adecuadas para poder analizar la eficiencia del mezclado, proporcionamientos aplicados de cemento,

eficiencia de los equipos de compactación y variabilidad de los espesores tendidos y compactados.

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL

El uso de la cal como estabilizador de suelos se remonta a unos 3000 años atrás, cuando los chinos lo usaron en el mejoramiento de los caminos de sus aldeas. Los romanos usaron cal, tanto sola como combinada con cenizas volcánicas, para construir la Vía Apia, pero no es sino hasta hace unos 40 años que se empezaron a estudiar en forma racional a los mecanismos responsables de la estabilización, así como a las diferentes modificaciones sufridas por el suelo estabilizado.

Químicamente hablando, la cal se relaciona solamente con el óxido de calcio (CaO), sin embargo, en el uso común, el término incluye los productos de la calcinación de calizas calcíticas ó dolomíticas. Las cales calcíticas (alto contenido de calcio) se obtienen mediante la calcinación de rocas calcáreas que contienen del 95 al 99% de carbonato de calcio (CaCO_3). Las cales dolomíticas se obtienen de la calcinación de calizas dolomíticas ó de dolomitas que contengan de 30 a 40% de carbonato de magnesio (MgCO_3), siendo el resto carbonato de calcio (CaCO_3). Actualmente también se produce la cal usando conchas de almejas y ostras como fuente de calcio.

La piedra caliza finamente molida, comúnmente conocida como "cal agrícola", es relativamente inerte y su utilidad como agente estabilizador se limita a la estabilización mecánica, es decir, donde el resultado deseado es solamente mejoramiento de la granulometría del suelo.

El tratamiento de suelos arcillosos mediante la cal, puede lograr alguno o varios de los efectos siguientes:

- Se reduce el índice plástico en forma considerable. Esto se debe a un pequeño incremento en el límite plástico y una considerable reducción en el límite líquido.

- El agua y la cal aceleran la disgregación de los grumos de arcilla durante la pulverización, lo cual facilita la trabajabilidad.
- Se reducen los efectos aglomerantes.
- En áreas pantanosas en donde los suelos tienen humedades superiores a la óptima, la aplicación de la cal facilita el disgregado del suelo, lo que a su vez propicia un secado más rápido.
- Las contracciones y expansiones debidas a cambios de humedad se reducen.
- La resistencia del suelo a la compresión, se incrementa, así como el valor relativo de soporte.
- La capa estabilizada proporciona una excelente plataforma de trabajo para la construcción de las capas superiores de la sección estructural de un camino

Las caolinitas son poco sensibles a la cal comparadas con las montmorillonitas, necesitando de tiempos de contacto largos para sufrir modificaciones. Los productos formados son principalmente silicatos de calcio hidratados, acompañados de aluminatos tricálcicos.

Las montmorillonitas son minerales altamente reactivos de la cal. El ataque de la cal origina la formación de aluminatos.

La illita es el mineral arcilloso que reacciona más difícilmente con la cal. La cal, al modificar la composición mineralógica de la arcilla, también altera sus respuestas al agua, reduciéndose la plasticidad y teniéndose menores cambios volumétricos para variaciones en la humedad.

Se ha observado que el incremento en la temperatura acelera en mucho la acción de la cal y permite una cristalización más rápida de las nuevas especies formadas.

Debe tomarse en cuenta que es indispensable la presencia del agua para tener éxito en el tratamiento, y que la presencia de carbonatos y materia orgánica en el

suelo, inhiben la acción de la cal. Asimismo hay que considerar la necesidad de utilizar cales de buena calidad, es decir, que contengan un alto porcentaje de cal libre y que además se presente como un polvo muy fino y/o carbonatado, para evitar respuestas mediocres a la estabilización.

Diseño de la estabilización con cal.

El diseño de una estabilización con cal debe basarse en las características deseadas en el suelo estabilizado, siendo desde luego indispensable el conocer a las características originales de los minerales arcillosos presentes en el suelo, ya que con base en ellos se puede estimar a priori, las ventajas al emplear la cal.

Son muy diversos los factores que influyen en la elección del contenido óptimo de cal, destacando entre otros el contenido óptimo de materia orgánica, porcentaje de los diferentes minerales arcillosos en el suelo, tipo de cal, porcentaje de finos y gruesos en el suelo a tratar, etc.

Cabe señalar que cualquiera que sea el procedimiento empleado para el estudio de la estabilización, existe un punto en el contenido de cal más allá del cual prácticamente ya no produce mejorías notables en el material, al menos a corto plazo. A este punto se le conoce como "Punto de Fijación" y significa que con ese contenido de cal se ha satisfecho la reactividad potencial de los minerales arcillosos, e inclusive la de la materia orgánica.

Es conveniente que el ingeniero se apegue estrictamente al procedimiento de laboratorio establecido para cada método de diseño, pero esto no debe ser un impedimento para realizar otras investigaciones, teniendo presente la posibilidad de reproducir en el campo lo hecho en el laboratorio y previendo la influencia de los agentes climáticos y del medio ambiente. En síntesis, debe llevarse a cabo un programa de pruebas que sirva para determinar la cantidad de cal necesaria para obtener una estabilización satisfactoria.

La estabilización con cal debe sujetarse a lo siguiente:

- Se debe emplear cal hidratada de buena calidad y que cumpla con las especificaciones respectivas.
- En general la estabilización deberá realizarse por capas, teniendo éstas un espesor menor o igual a 15 cm.
- Para una completa estabilización es esencial una disgregación adecuada de la fracción arcillosa. Por lo que, donde se tengan arcillas francas, es necesario efectuar el mezclado en dos etapas, permitiendo entre ambas un cierto período de curado y empleando en cada etapa, la mitad del porcentaje de cal obtenida en el diseño. Durante el período inicial de curado, la arcilla forma grumos pequeños lo que facilita la pulverización en la etapa final.
- Una vez que se ha descubierto al suelo hasta el nivel superior de la capa que se desea estabilizar, se conforma a dicha superficie y se escarifica hasta la profundidad deseada y posteriormente se pulveriza hasta que el 80% del material pase la malla No. 4 y se produzca el intercambio iónico. Se deberán tomar las medidas necesarias para no incluir las raíces, turba, materia orgánica o agregados mayores de 7.5 cm. en el suelo por estabilizar.
- Se adiciona la cal dosificándola con respecto al peso seco del suelo y se extiende en forma uniforme en seco,
- Para permitir que el agua y la cal rompan los grumos de arcilla, es necesario permitir un tiempo de curado de 1 a 48 hrs.
- Deberá compactarse a la mezcla de suelo-cal de acuerdo con lo indicado en el proyecto y tomando en cuenta los resultados del estudio de laboratorio. La compactación se efectuará en capas con espesor máximo de 15 cm. utilizando rodillos neumáticos pesados, o rodillos vibratorios o una combinación de rodillo pata de cabra y rodillo ligero.

ESTABILIZACIÓN CON PRODUCTOS ASFÁLTICOS.

En algunas ocasiones se han aplicado productos asfálticos a las arcillas mediante riegos, buscando únicamente lograr la impermeabilidad superficial, ya sea de los grumos arcillosos, o de las grietas en las partes expuestas de una arcilla, tanto en estado natural como compactada; en cambio, en la estabilización de suelos no cohesivos, el asfalto produce cohesión, lo que hace que se adhieran entre sí las partículas de suelos. No obstante lo anterior, se puede asegurar que la estabilización de una arcilla con el empleo de productos asfálticos, es más costosa y desventajosa que la realizada con otros productos químicos más apropiados (cal, cemento, etc.), mientras que ciertos productos asfálticos sí pueden competir en algún caso, económicamente hablando, con otros productos químicos, sobre todo en el caso de agregados friccionantes. Algunos autores indican que si el índice plástico de los finos es superior a 6, los resultados que se obtendrán serán dudosos o pueden estar condenados al fracaso, mientras que si es menor a 4 se pueden esperar muy buenos resultados.

Los productos asfálticos que generalmente se emplean en la República Mexicana, provienen del petróleo crudo, extraído de pozos y al que se le ha separado en sus constituyentes en una refinería mediante destilación fraccionada. Dependiendo del tipo de petróleo crudo que se emplee, podemos obtener en el proceso de destilación: asfalto, parafinas, aceite, lubricantes, gasolina y kerosina. El asfalto es el residuo de la destilación, pues ni se evapora ni hierve durante este proceso.

El residuo de cemento de asfalto que queda después de la evaporación de los volátiles de la mezcla estabilizada con asfalto fluidificado, es la única porción de todo el material que provee la adhesión de las partículas en el suelo con el cual se mezcla. Las consideraciones ambientales también son responsables de la decadencia del uso de los asfaltos fluidificados. Los volátiles contenidos en éste, aumentan la cantidad de hidrocarburos en el aire, lo cual es algo a considerar en zonas densamente pobladas.

Entre el material asfáltico y el suelo no se produce ninguna reacción química, por lo tanto el mejoramiento comprendido en la estabilización del suelo por asfalto, es de naturaleza mecánica.

En muchos casos en donde el porcentaje de material fino (menor a la malla 200) hace que la estabilización de un suelo por asfalto sea antieconómica, es

conveniente considerar el pretratamiento o preacondicionamiento con cal. Una de las reacciones de la cal con un suelo arcilloso es la floculación ó aglomeración de partículas de arcilla y sedimentos reactivos en partículas de tamaño más grande. Este cambio en la granulometría del suelo dará por resultado una reducción de la cantidad requerida de asfalto. El resultado final del pretratamiento con cal será un aumento de la cohesión de la mezcla de suelo-asfalto y un aumento de su capacidad para aguantar cargas con un contenido más bajo de asfalto, y en muchos casos a un costo menor que sin el pretratamiento.

El asfalto es un material pegajoso, lo que hace que se adhiera a las partículas de suelo o agregado pétreo, es impermeable y además resistente a la mayoría de los ácidos, alcális y sales. Se dice que el asfalto o bitumen es termoplástico porque se suaviza al calentarse y endurece al enfriarse. Estas características son las que hacen del asfalto un material tan útil en carreteras, pues al reblandecerse mediante calentamiento para su manipulación y mezclado con agregados, proporciona cementación, impermeabilidad y durabilidad a la mezcla obtenida.

El producto obtenido como residuo en la destilación del petróleo crudo es, a la temperatura ambiente, un material semisólido, negro, pegajoso y altamente viscoso y se le designa como cemento asfáltico. Al asfalto se le puede fluidificar calentándolo, o bien con la adición de solventes; o se le puede emulsificar en agua, dando lugar a los productos conocidos como cementos asfálticos, asfaltos rebajados y emulsiones respectivamente.

Como se acaba de mencionar, calentando al asfalto se le puede reblandecer, al enfriarse se vuelve a tener la consistencia semisólida original. A los productos de este tipo se les define como cementos asfálticos y su aplicabilidad está restringida al caso de mezclas asfálticas de la más alta calidad, elaboradas en planta, donde se cuida en forma muy especial a la temperatura, dosificación y mezclado para su empleo en carpetas o superficies de rodamiento asfálticas, sometidas a tránsito intenso, pesado y en donde se deben tener las mejores condiciones de resistencia y estabilidad, como es el caso de aeropistas y obras viales de importancia.

Los asfaltos rebajados se obtienen disolviendo el asfalto en diferentes tipos de solventes. Estando el asfalto disuelto, se le mezcla con los agregados y al evaporarse los solventes, el residuo se adhiere a las partículas de suelo cementándolas. A las mezclas obtenidas se les designa también como "mezclas en frío", pero se suele calentar un poco el producto. Además es costumbre referirse a ellas como "mezclas en el lugar" aunque se ille gan a fabricar mezclas en

planta con este producto.

A los asfaltos rebajados que hoy en día prácticamente ha desaparecido su fabricación, se les designa como asfaltos rebajados de fraguado rápido (FR, constituidos por cemento asfáltico, disuelto en un solvente muy volátil como la gasolina o nafta); de fraguado medio (FM, el solvente es la kerosina); y de fraguado lento (FL, en los solventes son aceites de baja volatilidad).

En la estabilización con productos asfálticos, la impermeabilización se aplica principalmente al caso de suelos cohesivos a los que se desea proteger de cambios en la estabilidad por efectos de la humedad, conservándolos lo más secos que se pueda y en el estado en que fueron compactados, o bien en el estado en que se encuentren en la naturaleza.

Se ha encontrado que los agregados granulares al estabilizarse con asfalto, se adaptan a la teoría de que quedan cubiertos y pegados unos a otros. En el caso de los suelos finos, esto no sería posible debido a su gran área específica, lo que se traduce en contenidos de asfalto muy elevados, además de la dificultad que presentan para su separación en partículas individuales. El mecanismo de taponamiento del asfalto, funciona en los suelos que contienen arcilla; el asfalto cubre a los grumos y actúa como impermeabilizante al taponar los vacíos, es decir, que el objetivo del asfalto es reducir la entrada del agua a los grumos, propiciada por el asfalto.

Los tipos de productos asfálticos que actualmente se emplean en la estabilización de suelos, ya sea a temperaturas ambiente o ligeramente elevadas, son las emulsiones en sus diferentes variedades.

Sin embargo, es frecuente el caso de que los suelos no tengan la afinidad adecuada con el producto asfáltico que se desea emplear. En estos casos se hace necesario recurrir al empleo de aditivos secundarios que sirven para cambiar las características eléctricas de la superficie de las partículas.

En lo que respecta al contenido de agua adecuado para la compactación de mezclas asfálticas "en frío", ha existido mucha controversia y las tendencias generales han sido: emplear la humedad correspondiente a la óptima para obtener el máximo peso volumétrico en el suelo; o bien la humedad para dar a la mezcla asfáltica una consistencia de mortero; o la humedad óptima menos el contenido de producto asfáltico; o inclusive la mitad de la humedad óptima.

Las mezclas asfálticas se ven seriamente afectadas por los factores tiempo y temperatura, en adición al nivel de esfuerzos, deformaciones, etc., lo que ocasiona ese comportamiento tan complejo que presentan estos materiales. En la mayoría de los métodos que tratan de describir el comportamiento de los suelos estabilizados con asfalto, se ha supuesto que el material se comporta en forma elástica, lo que no es compatible con el comportamiento real de estos materiales en el campo. Como un ejemplo a lo dicho, se sabe que al cabo de un cierto período o número de aplicaciones de carga sobre una mezcla asfáltica, se han producido deformaciones de carácter permanente en adición a las transitorias o elásticas. Al producirse estas deformaciones, las partículas sólidas del suelo estabilizado se desplazan y cambian de orientación, mientras que los materiales fluidos (asfalto, solventes, agua) sufren deformaciones plásticas y probablemente rupturas.

El diseño de la estabilización de suelos finos con asfaltos, es un tema muy controvertido y esto se debe a los grandes problemas que de por sí involucran las arcillas, pues se puede requerir diferentes porcentajes de producto asfáltico, dependiendo del tamaño, forma y características físico-químicas de las arcillas que contenga el suelo. A las caolinitas se les logra estabilizar con relativa facilidad, pero a las montmorillonitas difícilmente se les puede mezclar en forma homogénea con agua y, por lo tanto, es mucho más difícil con productos asfálticos. Algunos autores aseveran que mientras más compuestos silíceos contenga la arcilla, se requerirá más producto asfáltico, y que mientras mayor sea el contenido de compuestos de hierro y aluminio en la arcilla, menor será la cantidad requerida de producto asfáltico. Así mismo, se dice que a medida que la valencia de los cationes intercambiables en la arcilla es mayor, se tendrá mayor facilidad para estabilizar el suelo.

Existe una gran diversidad de procedimientos de construcción para la estabilización de suelos con productos asfálticos. El mezclado en planta no es frecuente aplicarlo debido a que los costos resultan relativamente muy altos y en nuestro medio se ha preferido efectuar el mezclado en el lugar con el empleo de equipos tradicionales.

Para el mezclado en el lugar, la ejecución de los trabajos comprende las siguientes fases:

- Conformación y limpieza de la capa sobre la que se va a construir la estabilización.

- Acamellonamiento del suelo que se va a estabilizar, disgregado por lo menos el 80% del material, para que pase la malla No. 4 (4.75mm).
- Secar o humedecer al material, según se requiera, con la ayuda de una motoconformadora.
- Aplicación del producto asfáltico.
- Tendido de la mezcla en el espesor requerido.
- Compactación.

El mezclado con planta móvil es el más eficiente: un cargador mecánico recoge el material y lo vierte en una tolva; de ahí es transportado al sistema de dosificación y mezclado, en donde se elabora la mezcla para tenderla posteriormente. Existe un gran número de variantes en este tipo de máquinas, desde unas muy elementales hasta aquellas que escarifican, secan, pulverizan, mezclan al suelo con el asfalto, tienden a la mezcla y la compactan ligeramente.

ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON DIVERSOS PRODUCTOS

En la actualidad se ha aplicado un gran número de productos químicos con el fin de estabilizar el efecto expansivo de las arcillas, la mayoría de ellos con resultados satisfactorios. A continuación se señalan los puntos sobresalientes de estabilización con las sales comúnmente empleadas para este fin; ácidos inorgánicos y polímeros y resinas.

A: Sales.

La sal se forma de la neutralización de un ácido con una base. Las sales comunes como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl) son sales neutralizadas, es decir, que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO_3), ni básicos de hidróxido (OH^-). A las primeras se les designa como sales ácidas y a las segundas sales básicas.

Se ha estudiado en el laboratorio un gran número de sales (NaCl , NaNO_3 , Na_2CO_3 , BaCl_2 , MgCl_2 , KCl) pero tanto la economía como su disponibilidad, han hecho que solamente se utilicen unas cuantas, fundamentalmente el cloruro de sodio.

El cloruro de sodio se produce mediante 3 métodos. El más antiguo consiste en el empleo de calor solar para producir la evaporación del agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal. Otro método consiste en la extracción directa de las minas de sal, el procedimiento más reciente consiste en la evaporación del agua de mar mediante el empleo de hornos.

Aparentemente no existe controversia en lo que respecta a las modificaciones que produce la incorporación de sal a un suelo; en lo referente a los mecanismos internos de estabilización, si existe, por lo que en todo estudio deben involucrar tanto aspectos físicos como químicos.

Se ha discutido mucho respecto al cambio en el peso volumétrico de una arcilla con la adición de cloruro de sodio, pues mientras algunos investigadores aseguran pequeño incremento, otros no han encontrado tal cosa; pero en lo que sí existe un común acuerdo, es en que la adición de sal hace que se disminuya la humedad óptima. Técnicamente el cloruro de sodio ocasiona que la arcilla se estructure en forma dispersa, produciéndose así un acercamiento entre las partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico, pero en la práctica, éste criterio no se ha verificado en todos los casos, por lo que no se debe generalizar.

El cloruro de sodio ayuda a reducir los cambios de humedad en los suelos, pero aún se discute la magnitud de esta reducción. Se considera que se reduce la evaporación del agua debido al incremento en la tensión superficial, al agregar la sal. Sin embargo cuando la aportación de agua a la superficie expuesta es menor que la evaporación, la superficie se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie, y en los vacíos, les puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones. Inclusive se han obtenido relaciones que indican que la velocidad de evaporación es inversamente proporcional al espesor de la barrera referida. Al saturarse esta barrera, nuevamente se disuelve y es arrastrada hacia abajo, con lo que la arcilla, al perder su estabilizante, se expande y retarda el movimiento del agua en el suelo.

En lo que respecta a la plasticidad, los efectos de la adición de cloruro de sodio a una arcilla, son muy diferentes, ya que existe una gran dependencia de los tipos de minerales presentes en la arcilla. Se logra mayor efectividad y durabilidad de los efectos de la sal a medida que el límite líquido es más alto. Salvo algunas excepciones, se puede decir que la adición de sal produce un decremento en la contracción volumétrica o lineal. Estos cambios físicos, la formación de la costra superficial y la reducción de la variación en la humedad, mantienen más unidas las partículas no arcillosas y cuando éstas se encuentran en la superficie, se desprenden con menos facilidad cuando sufren los ataques abrasivos del tránsito.

En cuanto a la resistencia existe una gran controversia. Se ha asegurado por ejemplo, que se tiene un incremento en la resistencia, solamente en la medida en que se incremente el peso volumétrico a contenidos bajos de humedad.

En forma definitiva lo que sí se ha visto, es que la adición de sal a un suelo reduce el problema de congelamiento.

Las técnicas empleadas para la incorporación de sal a un suelo, son generalmente las mismas empleadas en otros tipos de aditivos y varían desde la sofisticada mezcla en planta con alto grado de control, hasta la simple mezcla en el lugar realizada con el equipo tradicional en la construcción de pavimentos.

Con el equipo tradicional, los pasos a seguir son:

- Escarificación

- Disgregación hasta la malla No. 4 (4.75mm) por lo menos en 80% del material
- Adición del cloruro de sodio
- Adición del agua
- Mezclado con motoconformadora
- Tendido y compactación

Finalmente, cuando se intente la estabilización con sal, deberán tenerse presentes las siguientes limitaciones:

- a El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento.
- b La materia orgánica inhibe la acción de la sal.
- c El rodillo pata de cabra no ha dado buenos resultados en la compactación de suelos con sal adicionada.
- d Es necesaria la intervención de un técnico especializado en todo estudio de estabilización.

Estabilización con Silicato de Sodio (Na_2SiO_3)

El silicato de sodio pertenece al grupo de compuestos químicos que poseen un amplio intervalo en sus propiedades físicas y químicas. Se ha empleado como adhesivo, cementante, detergente, defloculante, catalizador, etc. Se le produce con diferentes grados de alcalinidad, tamaño de partículas y pureza. Se obtiene de materiales con alta proporción de sílice tratados con sales de sodio y agua. También se ha obtenido el silicato de sodio mediante la reacción del hidróxido de sodio con los residuos obtenidos en la extracción de metales como el aluminio,

berilio y tungsteno. La mayoría de los silicatos de sodio, se obtienen de la fusión de una cierta arena con carbonato de sodio a altas temperaturas. El producto obtenido es un vidrio fundido al que se le puede permitir su solidificación y posterior molienda al tamaño deseado, o bien se puede disolver a dicho vidrio, mediante la aplicación de vapor a alta presión para obtener la consistencia líquida de diferentes concentraciones.

El silicato de sodio en solución es incoloro e inodoro y actúa como un jabón fuerte, y causa mucho daño a los ojos si se llegase a introducir en ellos. Se considera como no tóxico, pero si se le traga, puede ocasionar dolores y vómito.

La estabilización de suelos con silicato de sodio, se ha aplicado aproximadamente desde 1945 y al parecer, los mejores resultados se han obtenido en el caso de suelos arenosos en climas moderados.

El efecto de la adición de un silicato a cierto tipo de suelos, ha sido el de incrementar la permanencia del agua de compactación, aumentar la resistencia al disgregado, abatir el índice plástico y la expansión.

Sin embargo, algunos estudios han puesto de manifiesto que en las arcillas poco activas como la caolinita, la aplicación del silicato de sodio las hace menos activas, pasando lo contrario con las arcillas de alta actividad como las montmorilonitas.

Sobra señalar la enorme necesidad de avalar todo estudio de estabilización con una detallada investigación química en el laboratorio. En algunos estudios de estabilización efectuados con arcillas puras, en cuanto a resistencia, los resultados obtenidos no han sido del todo satisfactorios; en cambio, en el caso de las arenas, los resultados han sido alentadores.

En lo que respecta al peso volumétrico, no existen datos que confirmen tendencias en forma categórica, sin embargo, parece ser que lo que se puede presentar es un incremento en la humedad óptima.

En cuanto a la permeabilidad, se ha encontrado que la adición de silicato de sodio no altera a dicha propiedad en los suelos.

Empleo de otros tipos de Sales.

En el Instituto Tecnológico de Massachusetts se encontró mediante un estudio exhaustivo, que otros tipos de sales diferentes a las referidas, tales como el sulfato de cobre, sulfato de bario, sulfato de aluminio, sulfato de magnesio, etc. no producen cambios significativos a los suelos o bien la mejoría resultaba demasiado pequeña y su costo muy elevado como para justificar la aplicación de dichas sales.

B.- Estabilización con Acidos Inorgánicos.

De los productos ácidos que han demostrado ser efectivos para modificar favorablemente un suelo, algunos son económicamente competitivos contra otros productos más comunes, sin embargo, se debe contar con la asesoría de especialistas en la materia, tanto en la etapa de diseño, como en la construcción de la estabilización, pues en éste caso se involucran peligros no solo para las personas, sino también para los equipos.

Los productos ácidos empleados, son muy variados, pero son dos los que cubren una amplia gama de ácidos inorgánicos, como son el ácido fosfórico y el fluorhídrico.

Estabilización con Acido Fosfórico (H_3PO_4)

El tratamiento con este producto está indicado para suelos de naturaleza ácida y han resultado ser ineficaces en los casos de materiales alcalinos, en limos y en arenas.

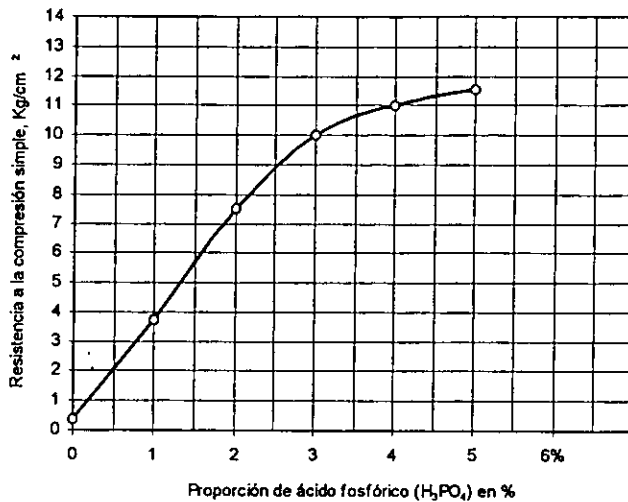
El uso del ácido fosfórico en la estabilización presenta dos ventajas muy particulares. La primera, consiste en que el mineral arcilloso denominado "clorita", cuyo comportamiento no está bien definido en los tratamientos con cemento o cal, reacciona de una manera perfecta con el ácido fosfórico; y la segunda ventaja, se

refiere a la ruptura de la estructura inicial por el ion fosfato al actuar sobre la arcilla, lo cual permite obtener una mayor densificación en el suelo, resultando una mayor resistencia mecánica. De aquí resulta que el ácido fosfórico tenga el mérito muy particular para estabilizar suelos localizados en regiones de naturaleza volcánica en donde sea abundante la clorita.

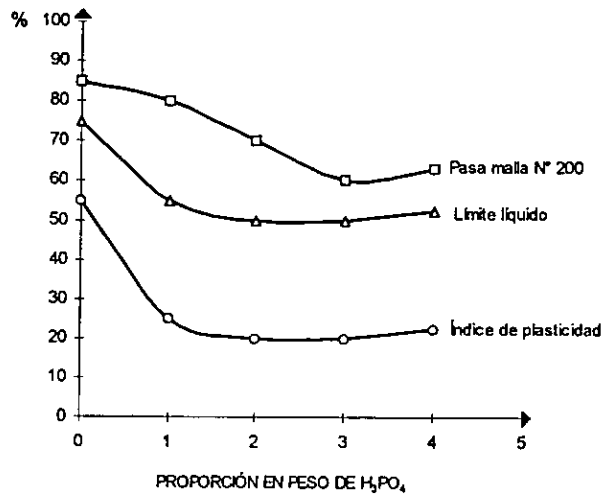
Aparentemente los cambios producidos por el ácido fosfórico en las propiedades de los suelos arcillosos, se deben a que éste reacciona directamente con la estructura interna de la arcilla. Investigadores americanos efectuaron estudios en los cuales compararon espectros obtenidos por difracción de rayos X, de minerales arcillosos antes y después de ser sometidos a tratamientos con ácido fosfórico. Del análisis de dichos espectros se infirió claramente que ocurrió un rompimiento o división de los cristales de arcilla debido al tratamiento con ácido fosfórico, y se determinó una reacción química entre éste ácido y los minerales de la arcilla, en la que se producen fosfatos de aluminio y agua, originando un compuesto soluble que es el elemento cementante que actuó durante el tratamiento.

Al hacer un análisis de los datos de resistencia de suelos estabilizados con éste procedimiento, se han obtenido las siguientes conclusiones: la reacción observada entre la clorita y el ácido fosfórico es rápida y completa; la reacción con la montmorillonita es rápida pero incompleta; y con la caolinita y vermiculita es lenta y continua. Sin embargo, estas conclusiones dan lugar a ciertas dudas debido a que los suelos casi siempre se encuentran en la naturaleza formados por una gran variedad de minerales arcillosos, entre los cuales casi siempre se encuentra un elemento arcilloso predominante y varios colaterales cuya influencia se considera secundaria.

En la siguiente figura se muestra la evolución de la resistencia a la compresión sin confinar de probetas preparadas con diferentes proporciones de ácido fosfórico (H_3PO_4) en un material arcilloso-limoso. En esta gráfica se observa un comportamiento proporcional de la resistencia con el aumento de las cantidades incorporadas a la arcilla hasta un valor de 4% aproximadamente; más allá de este punto, la curva tiende a ser asintótica.



En la gráfica que se presenta a continuación, se tienen los efectos producidos en la granulometría, límite líquido e índice de plasticidad de una arcilla limosa tratada con diferentes contenidos de ácido fosfórico, para el efecto se prepararon probetas que se curaron en ambiente húmedo durante cinco días. Se observa una reducción muy semejante en cuanto a los límites de plasticidad, para cualquier porcentaje de ácido fosfórico y, en cuanto al material que pasa la malla No. 200, se reduce a medida que aumenta el porcentaje de ácido fosfórico. Esto es porque el ácido fosfórico induce la formación de grumos entre los suelos finos.



Los efectos producidos por el ácido fosfórico en la compactación, también son de cierta significación. El peso volumétrico seco máximo aumenta de 1510 Kg/m³ del suelo sin tratar, hasta 1670 Kg/m³ para el caso en que se adicionó al suelo 4% de H₃PO₄. También se observa una reducción de la humedad óptima hacia valores menores a medida que se aumenta al material el porcentaje de ácido fosfórico.

De las observaciones hechas a través de la experimentación, se puede decir que el ácido fosfórico es un estabilizador efectivo para una amplia variedad de materiales que contienen arcilla, pues el mejoramiento de las propiedades que interesan a la ingeniería es muy marcado en casi todos los casos. Por ejemplo, en lo que se refiere a las subrasantes, se puede ver que los suelos arcillosos estabilizados con ácido fosfórico mejoran notablemente sus resistencias a la compresión simple a un grado tal que, en ciertos pavimentos, estos materiales se pueden utilizar en las capas de base.

Estabilización con Acido Fluorhídrico.

La investigación ha demostrado que este estabilizador es muy efectivo, de rápida reacción en todas las arcillas con excepción de aquellas que tienen ricos contenidos de aluminio (caolín, bauxita). La reacción, ya sea en arenas o arcillas, consiste en producir en los componentes de sílice modificaciones de tipo químico para formar fluoruros de silicato insoluble, de alta resistencia. No ha evolucionado el tratamiento de suelos utilizando este ácido, debido principalmente a su alto costo y también a que su manejo requiere cuidados muy especiales por ser de acción extremadamente corrosiva.

C.- Tratamiento con resinas y polímeros.

El uso de estos materiales en la estabilización de suelos ha tenido por objeto principal, formar una estructura impermeable al agua; ciertas resinas sintéticas tales como las del sistema anilina y furfural de naturaleza orgánica, aumentan la resistencia mecánica del suelo mejorando su cohesión.

La anilina, un derivado líquido del alquitrán de hulla, y el furfural, un producto orgánico líquido producido en la refinación de los derivados del maíz, mezclados en la proporción de dos partes a una, reaccionan formando una resina viscosa de color rojo oscuro que se endurece en forma lenta hasta alcanzar su completa solidificación. El mecanismo de preparación es el siguiente: primero se mezcla uno de los líquidos con el suelo y después el otro, y luego se compacta. En general la cantidad de resina utilizada puede ser del 2% en peso como valor óptimo, y parece probable que solamente los suelos de naturaleza ácida responden bien al tratamiento.

Se han empleado diferentes resinas del tipo comercial entre las cuales la más conocida en Europa es el "Vinsol". Las resinas naturales tienen la desventaja de ser susceptibles a las bacterias y a otro tipo de degradaciones, lo que limita su vida útil; sin embargo, éste es un problema que es común virtualmente a todos los agentes estabilizantes constituidos por un componente orgánico. La mezcla de resinas sintéticas de anilina con furfural se debe utilizar tomando ciertas precauciones debido a la toxicidad de la anilina.

Los polímeros son cuerpos que constan de elementos de la misma especie y en la misma proporción, pero en número tal que las moléculas de unos son múltiples de los otros, siendo sus pesos también múltiples; por ejemplo son polímeros del etino (C_2H_2), el butanotrieno (C_4H_4) y el benceno (C_6H_6). Ahora bien, mediante una reacción o serie de reacciones, numerosas moléculas de este tipo (monómeros) son soldadas para formar moléculas gigantes a las que se designan como polímeros, siendo clasificados en 3 grupos principales: catiónicos, aniónicos y no-iónicos. Los polímeros de tipo catiónico tienen cargas positivas que forman ligaduras electrostáticas muy fuertes en las superficies, con cargas negativas de los minerales de arcilla y de arena fina, dando origen a una floculación que reestructura el suelo y que permite mejorar su resistencia al esfuerzo cortante. Debe tenerse cuidado al compactar un suelo estabilizado con polímeros, en virtud de que la resistencia del suelo estabilizado puede ser afectada por la energía de compactación al destruir la estructura recién ligada con polímeros, obteniéndose además pesos volumétricos más bajos.

Los polímeros catiónicos típicos son los poli - acrilamidas y otros productos comerciales como el Armeen, Arquad, etc. Su uso a gran escala es muy limitado debido a factores como el costo, la delicada operación de mezclado, su variabilidad, etc.

Los estabilizantes del tipo no - iónico, entre los cuales los más representativos son el alcohol polivinílico y la celulosa carbometilica, deben sus efectos al refuerzo de las ligaduras hidroxílicas que se forman con grupos OH^- entre las cadenas de polímeros y las superficies oxigenadas de los minerales de arcillas.

Entre los polímeros del tipo aniónico se encuentran como más importantes los sulfonatos y lignosulfonatos. Debido a que la carga de sus grupos constituyentes es igual a la que existe en la superficie de los minerales de arcilla, la resistencia al esfuerzo cortante se reduce, en tanto que la compactación se mejora en forma notable; es así como a estos materiales se les conoce más como "agentes que mejoran la compactación" que como estabilizantes. Un gran número de productos comerciales cae dentro de esta categoría y su efectividad es muy variable, dependiendo del tipo de suelo y los elementos constituyentes del aditivo.

EMPLEO COMBINADO DE ADITIVOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.

Los modernos avances en la tecnología de los suelos y de la química, han permitido que en la actualidad se apliquen en la estabilización de suelos, diversos aditivos en forma simultánea o sucesiva, siempre y cuando ello se realice dentro de marcos económicos y prácticos. Ya no es remoto, por ejemplo, el caso en que se aplique a un suelo un cierto aditivo para hacerlo más disgregable, con el objeto de facilitar la incorporación de otro aditivo y su mezclado, lo cual mejora las características del suelo compactado. A continuación se presentan algunos aspectos generales del empleo combinado de los aditivos que con mayor frecuencia son utilizados en la práctica, como son:

- 1) Puzolanas con cemento Portland o cal.
- 2) Cemento Portland con productos químicos diversos.
- 3) Cales con productos químicos.

1) Empleo de Puzolanas con cemento Portland o cal.

Desde hace tiempo se encontró que algunos materiales silíceos al ser mezclados con cal formaban compuestos cementantes. Uno de los primeros materiales a los que se les observó tal propiedad, fue una ceniza volcánica consolidada encontrada cerca de Pozzuoli, Italia, debido a lo cual éste suelo se designó como Puzolana, termino que se generalizó para suelos similares encontrados en otras partes. Se puede definir a las puzolanas como materiales silíceos o silicoaluminosos (con bajo contenido de cal) que en sí mismos no poseen propiedades cementantes, pero al encontrarse finamente divididos y en presencia del agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, a las temperaturas normales, para formar compuestos insolubles con propiedades cementantes.

Como se mencionó al tratar la estabilización de suelos con cemento Portland, al hidratarse éste, se libera cal (hidróxido de calcio), la cual se carbonata en forma progresiva y puede ser lavada, o bien se combina con los sulfatos de las aguas que los contengan para ocasionar expansiones. Por razones como ésta, se ha considerado a la cal producida al hidratarse el cemento como un compuesto indeseable.

Sin embargo, al agregar puzolana al cemento y mezclarlos perfectamente antes de adicionar el agua, la sílice y la alúmina reaccionan con el óxido de calcio (cal) del cemento, evitando la formación del hidróxido de calcio: Ca(OH)_2 , dando con esto lugar a silicatos y aluminatos de calcio hidratados, lo que hace que el suelo estabilizado (o el concreto que es donde más se le emplea) sea, entre otras cosas, más impermeable y resistente al ataque de los sulfatos.

No existe un proporcionamiento óptimo en la relación cal - puzolana que se pueda establecer como norma general, pues ésta depende del tipo de puzolana, suelo y cal empleados. En los suelos arcillosos la proporción adecuada de cal varía de 5 a 9% y de 10 a 25% la puzolana.

El cemento Portland solo, produce una alta resistencia en forma rápida en todos los suelos, mientras que la mezcla de cal con puzolana, produce un aumento lento de la resistencia. Sin embargo, se piensa que a los 28 días de curado se pueden establecer comparaciones en la resistencia.

El empleo de puzolana y cal en arcillas resultó muy efectivo, pero compite económicamente con el cemento solo o la cal sola.

2) Cemento Portland con productos químicos diversos.

Es frecuente el caso en el que el empleo de cemento Portland solo en la estabilización de suelos, deba ser utilizado en altos porcentajes para lograr las características deseadas. En esta forma el costo de la estabilización puede resultar prohibitivo, razón por la que se ha acudido al empleo de aditivos que deben ser analizados, tanto desde el punto de vista de reacciones químicas, como desde el punto de vista geotécnico. Procediendo de esta manera se han logrado considerables economías. En algunas ocasiones, la función del aditivo es la de sustituir una parte considerable de cemento, impartiendo al suelo la misma resistencia o aún mayor, que la que impartiría el cemento sustituido; en otras ocasiones lo que se ha buscado obtener con el aditivo es retardar el fraguado o acelerarlo, e inclusive es frecuente el caso en que se emplea un aditivo (por ejemplo la cal en las arcillas), para hacer al suelo más trabajable y facilitar la adición del cemento.

El cloruro de sodio y el cloruro de calcio han sido ampliamente utilizados como aditivos para mejorar las mezclas de suelo-cemento. Lambe y Moh llevaron a cabo en el Massachusetts Institute of Technology una amplia investigación sobre el efecto de aditivos, empleando el cemento como estabilizante de 3 suelos: 2 limos y 1 loess; fueron 29 los aditivos empleados, entre los que destacaron: el cloruro de calcio (CaCl_2), cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$); se incluyeron además algunos dispersantes, resinas sintéticas y agentes hidrófobos. Estos aditivos presentaron efectos de poca importancia en el loess, pero el carbonato de sodio y el dicromato de potasio, incrementaron la resistencia de ambos limos hasta en 150%. Se notó que al aumentar la resistencia, no se incrementó el peso volumétrico, lo que sugirió la formación de partículas cementantes.

Si se hace una revisión a la literatura existente respecto al empleo de aditivos en mezcla de suelo con cemento, se podrá comprobar que invariablemente los efectos obtenidos dependen, en primer lugar, del tipo de minerales que contenga el suelo y, en segundo lugar, de su textura y acidez.

Al adicionar el cemento y el agua a un suelo, se producen cal, silicatos de calcio y aluminatos de calcio. Sin embargo, la reacción de la cal con la sílice y la alúmina reactivas presentes en el suelo, provocan la formación de silicatos y aluminatos de calcio adicionales y la reducción del pH. La reacción última del suelo y el cemento se traduce en un gel de silicatos y aluminatos hidratados. Ahora bien, debido a que la cal reacciona en forma rápida con la alúmina y sílice solubles para formar compuestos insolubles, y también debido a que el cemento se encuentra distribuido aleatoriamente en las partículas de suelo, la formación del gel cementante queda confinada a una delgada capa alrededor de cada partícula de cemento. Solamente cuando se adiciona cemento en grandes cantidades, se logra que las zonas de gel se traslapen y se logre una estabilización efectiva.

3) Empleo de cal con productos químicos diversos.

El hidróxido de sodio (NaOH) ha causado a veces resultados sorprendentes; como por ejemplo, se menciona en la literatura que el empleo de 1% a 3% de éste químico, duplica la resistencia de arcillas montmorilloníticas mezcladas con cal. Sin embargo se obtienen resultados muy inciertos al emplear carbonato de sodio

y, al emplear fosfato de sodio en mezclas de arcillas montmorilloníticas con cal, la resistencia disminuye en forma notable.

Otros autores (como Davidson D.T. y Mateos M.) ponen de relieve la gran importancia que en un momento dado puede revestir la temperatura de curado, pues al emplear una mezcla de arena de duna con cal, cenizas volantes e hidróxido de sodio como aditivo, la resistencia obtenida a 28 días con una temperatura de curado de 6°C, fue de 21 Kg/cm²; mientras que al curar a 23°C, dicha resistencia fue de 105 Kg/cm².

Otro de los aditivos para estabilizaciones con cal ampliamente estudiado, es el silicato de sodio (Na₂SiO₃) cuyo mecanismo de reacción consiste en que, al alto valor del pH provocado al adicionar cal y agua a un suelo, disuelve parte de los silicatos y aluminatos y silico - aluminatos de calcio hidratados. Obviamente el silicato de sodio provee silicatos adicionales para formar más cementantes, pero adicionalmente se acelera el proceso referido.

Otros autores estudiaron también el efecto del silicato de sodio en una mezcla de cal con arcilla en condiciones de alta expansividad, tomando en cuenta características de resistencia, peso volumétrico, expansión y capacidad de absorción de agua. La resistencia se determinó a 7, 14 y 28 días obteniendo los valores más altos con 8% de cal. Empleando proporciones de cal inferiores a 8% y con la adición de 0.5% a 1% de silicato de sodio (Na₂SiO₃), con períodos de curado de 7 días, se obtuvo que la resistencia se duplicó en comparación con el sólo empleo de cal. También se redujo la capacidad de absorción, pero los efectos en la expansión no fueron consistentes. Por otro lado, para períodos de curado de 28 días no se obtuvieron variaciones significativas en la resistencia, al comparar los resultados obtenidos en mezclas de suelo con cal con o sin la adición de silicato de sodio.

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EMPLEANDO ENZIMAS ORGÁNICAS.³

La utilización de éstos productos, en la actualidad ha sido muy reducido debido a los dudosos resultados que se obtienen en el transcurso del tiempo y a la dificultad de conseguirlos.

Las enzimas orgánicas son producidas por bacterias, pero no son un producto vivo. Las enzimas son moléculas que contienen partes activas, mismas que les permiten ser catalizadores** en las reacciones químicas en las cuales participan, es decir, aumentan o retardan la velocidad con que se produce la reacción química.

Originalmente estos productos se diseñaron como aditivos de construcción pero, a la fecha, su mayor aplicación ha sido como estabilizador de partículas plásticas, presentes generalmente en los materiales con los cuales se construyen los caminos.

Se piensa que la acción catalizadora de las enzimas provoca una acción aglutinante en los materiales finos plásticos e incrementa notablemente el proceso humectante del agua, lo que hace que disminuya la relación de vacíos y logra también que las partículas del terreno puedan ser más densamente compactadas. La acción cohesiva de éste proceso, origina una fuerte actividad cementante que forma finalmente un sólido de permanente estrato, el cual resiste mejor la penetración del agua, así como la acción destructiva del clima (erosión) y del uso constante del camino.

Se considera que el estabilizador actúa directamente sobre las partículas con características plásticas que pasan la malla No.200, por lo que cuando existe un mínimo del 20% de éstas, las enzimas actúan sobre la parte iónica de las partículas plásticas y provocan que ésta cantidad de finos aglutine los materiales de mayor densidad, formando una capa prácticamente impermeable y con mayor capacidad de carga.

Por lo anterior, se hace necesario que, para suelos con un porcentaje de finos

³ Memorias del 1^{er} Congreso Internacional de Vías Terrestres; Chih., Méx., pp. 347-352; 1997.

** Catalizador: sustancia que modifica la velocidad de la reacción: es positivo si aumenta la velocidad, es negativo si la retarda.

mucho mayor a 20, se busque el mejoramiento de las condiciones granulométricas hasta donde económicamente sea posible, ya que se obtendrán resultados más óptimos.

Este estabilizador se dosifica a razón de un litro por cada 33 m³ de material compacto y se mezcla en el agua necesaria para obtener la humedad óptima para compactar. La dosificación está calculada para llevar a cabo la acción catalizadora aglutinadora con las arcillas presentes, considerando un mínimo del 20% del material plástico. En el caso de que después de incorporar la mezcla (agua más aditivo) hiciera falta más humedad, se deberá aplicar más agua ya sin producto; si por el contrario se encuentra excedido, sólo deberá "orearse" hasta obtener la adecuada y después tenderlo para proceder a compactar.

El efecto de las enzimas orgánicas sobre el agua, es el de abatir la tensión superficial, con ello se logra una más fácil penetración y dispersión en el material. Los distribuidores señalan que, ya sea utilizando material de banco o escarificando el existente, es necesario el uso de equipo para disgregar al tamaño de partícula ideal para mejorar el proceso de humectación. El uso de las enzimas, dicen los distribuidores, lo mejora substancialmente pues se puede aplicar antes de escarificar induciendo una mayor penetración de la humedad logrando con esto, aflojar el material más fácilmente, disminuyendo el esfuerzo de la maquinaria a la vez que reduce el proceso de homogeneización al mezclar la humedad desde este paso.

El uso de enzimas orgánicas no requiere de manejo o protección especial durante su uso y aplicación, ya que no es tóxico, no es flamable ni produce vapores, por lo que puede ser almacenado en lugares con poca ventilación. Su alta concentración y su presentación en cubetas de 19 litros permiten su fácil transportación y manejo.

En el Estado de Chihuahua⁴ se realizó la aplicación de éstas bioenzimas en muestras alteradas representativas de una zona arcillosa con problemas de estabilización, localizada en el km 7+500 con desviación derecha de 350 m. del Periférico de la Juventud en la Ciudad de Chihuahua, con origen en el entronque a Cuauhtémoc. De acuerdo al potencial de expansión y al Bureau of Reclamation, se clasificó el material como una arcilla illita con 88.83 de suelos finos (40.83% de limo y 48% de arcilla), con una tendencia a la expansión de alta a muy alta, ya que

⁴ Campa Rodríguez, Antonio y otros. "Estabilización Química de Arcillas (Bioenzimas). 1996. Memorias del 1^{er} Congreso Internacional de Vías Terrestres, Chihuahua, Chih.; pp. 379-384.

tiene una expansión libre del 112.98%, índice plástico de 34.18% y porcentaje de partículas menores de 0.001 en un 48%.

Para verificar los cambios en el comportamiento mecánico de éste suelo, se realizaron varias pruebas con la arcilla en el estado natural y mezclándola en una grava con el fin de obtener una mezcla de suelo con un retenido en la malla No. 4 del 40%, ya que este tipo de suelo fue el que tuvo mejor comportamiento en los tramos de prueba. Las muestras fueron tratadas con 3 cantidades diferentes de bioenzimas: 1l/15 m³, 1l/30 m³, y 1l/45 m³.

Debido a que el desarrollo total del estabilizante bioenzimático se alcanza en un lapso de 72 hrs., es necesario adecuar las pruebas que se pretenden efectuar a los suelos permitiendo que la bioenzima reaccione en el tiempo mencionado.

De los ensayos de laboratorio, las conclusiones a que se llegó sobre el efecto de las bioenzimas son las siguientes.

- a) La enzima no modificó los límites de consistencia, es decir, no redujo la plasticidad.
- b) Los parámetros de compactación no se vieron influidos.
- c) La resistencia a la compresión simple se incrementó, alcanzando una resistencia mayor en el suelo compuesto por arcilla y grava incrementándose un 40% más que la arcilla con la humedad óptima. La proporción que mejor se comportó para éste ensayo fue de 1 lt. de enzima para 15m³.
- d) La expansión no sufrió alteración alguna.
- e) El valor relativo de soporte sufrió un incremento que numéricamente es considerable, pero analizándolo conforme a las normas de construcción, este parámetro solo alcanza valores mínimos deseables, alcanzando su valor máximo para 1 lt. de enzima por cada 15m³. Al saturar las muestras estabilizadas con enzima, éstas vuelven a reactivarse, perdiendo las propiedades ganadas, en un espesor de alrededor de una pulgada. Es decir la

enzima solo endurece a la arcilla e incrementa la resistencia, pero al saturar las muestras, se reactivan nuevamente.

- f) A nivel microscópico se pudo observar que la enzima incrementó la rugosidad de la superficie de la arcilla.

Para éste suelo en particular, se puede concluir que la enzima no afectó las propiedades de estabilidad como los proveedores del producto lo afirmaban, por lo que se recomienda el uso de un aditivo complementario además de que, el procedimiento constructivo utilizado para la enzima, es el que tradicionalmente se usa para las Vías Terrestres, con un costo rentable por debajo de los estabilizantes comunes, dejando un colchón para poder considerar el incremento de un aditivo complementario.

III. ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS CON CLORURO DE CALCIO (CaCl_2)

Se han efectuado algunas investigaciones sobre la estabilización de arcillas activas con cloruro de calcio, pero antes de analizar los resultados obtenidos, señalaremos ciertas propiedades y características de esta sal.

El Cloruro de calcio (CaCl_2) se encuentra en el agua de casi todas las fuentes y ríos y, por consiguiente, forma parte de las sales disueltas en el agua del mar. Se puede obtener haciendo pasar una corriente de cloro sobre el óxido cálcico calentado al rojo, o bien disolviendo la cal, la creta o el mármol en ácido clorhídrico y evaporando. Si se necesita obtener la sal pura, es necesario añadir agua de cloro a la solución en ácido clorhídrico, a fin de oxidar el hierro que contiene y que se pueda precipitar luego con una lechada de cal, y separar por filtración. El líquido filtrado, ligeramente alcalino se acidula con ácido clorhídrico y se evapora hasta la concentración necesaria para que cristalice.

El cloruro de calcio se obtiene también en grandes cantidades como producto secundario de varios procesos industriales, especialmente de la fabricación del clorato potásico y de la del carbonato sódico por el procedimiento de Solvay.

El cloruro de calcio anhidro es un cuerpo blanco, poroso, que funde al rojo, al enfriarse la sal se solidifica en una masa transparente de estructura cristalina con un peso específico de 2.295. Al fundirla en contacto del aire, experimenta una ligera descomposición, formándose algo de carbonato y de óxido. Por esto el cloruro poroso obtenido desecando los cristales a 200°C es mejor como deshidratante, especialmente para absorber el agua en el análisis orgánico elemental. Si la masa fundida se expone a los rayos solares, se vuelve fosforescente en la oscuridad.

El cloruro de calcio anhidro es muy delicuescente, es decir, tiene la propiedad de absorber vapor de agua del aire y disolverse en él, y también higroscópica (propiedad para absorber y exhalar humedad). Disolviendo en agua cloruro cálcico anhidro, se libera calor mientras que, al contrario, disolviendo la sal cristalizada se

absorbe calor del ambiente. El cloruro cálcico es también soluble en alcoholes y acetona.

La solubilidad del cloruro de calcio es de 60g. aproximadamente por cada 100 c.c. de agua destilada a 0° C, dando una solución de densidad de 1.357. En la siguiente tabla están consignados los pesos específicos de las soluciones a diferentes concentraciones.

CANTIDADES EN 100 PARTES DE AGUA	PESO ESP. DE LAS SOLUCIONES A 19.5°
6.97	1.0545
12.58	1.0954
23.33	1.1681
50.67	1.3234
62.90	1.3806

Una solución de 50 partes de cloruro de calcio anhidro en 100 partes de agua hierve a 112° C y, disolviendo de 350 a 400 gramos de la sal cristalizada en 50 cm³ de agua caliente, se obtiene una solución sobresaturada. Aunque el cloruro de calcio no impide en forma apreciable la evaporación, sí repone en forma relativamente rápida el agua evaporada al encontrarse ésta presente en la humedad ambiente. La presencia de la sal como solución en el agua, disminuye la evaporación de ésta, aunque con menos intensidad que en el caso del cloruro de sodio. Asimismo el cloruro de calcio hace que se incremente la tensión superficial en el agua, lo cual reduce un poco la evaporación. Por cada 10% de la sal adicionado al agua, se reduce el punto de congelación de ésta en 6° C.

Las soluciones de cloruro de calcio se usan mucho como líquidos para ejercer presión, como anticongelante, para fijar el polvo, como agente de

acondicionamiento del aire y como soluciones frigoríficas. Los puntos de congelación de tales soluciones son:

% CaCl ₂	1	10	15	20	25	35	40	50
Temperatura de solidificación	-0.46	-5.89	-10.96	-18.57	-29.9	-16.25	+10.88	+29.34

Mezclando 1 mol CaCl₂·6H₂O con 8.5 mol. de nieve (1g sal + 0.7g nieve), se puede alcanzar la temperatura de -54.9°, frío mas que necesario para congelar el mercurio.

El cloruro de calcio CaCl₂ se expende en forma de hojuelas, en forma de partículas redondeadas o en polvo, con diferentes grados de pureza.

En forma de escamas u hojuelas alcanza una pureza entre el 77 y 80% y puede guardarse en los sacos corrientes de 50Kg en las condiciones ordinarias de almacenamiento. En estado líquido baja la pureza a un 40% y se transporta caliente en vagones tanque térmicamente aislados para impedir la congelación.

“Por su deliquesencia, el cloruro de calcio fija el polvo en los caminos de terracería, mantiene húmedos los caminos de tierra estabilizada y hace que el material quede más compacto y se aglomere en masas más densas. También se emplea para controlar el hielo en las carreteras. La solución de CaCl₂ reviste las partículas abrasivas de arena y carbonilla, forma una película que funde el hielo alrededor de la superficie de la partícula y permite que una parte de ella se hunda en el hielo. La disolución de la película por el hielo fundido, eleva la temperatura y las partículas abrasivas se incluyen firmemente formando en la carretera una superficie antiderrapante.

Otro uso importante es el evitar la congelación de materiales transportados a granel, como el carbón, mineral de hierro y otros minerales. El cloruro de calcio impide las pérdidas de carbón durante el transporte a causa del viento, y fija el polvo en las minas de carbón.

La adición de cloruro cálcico al concreto (de 1 al 2% del cemento), aumenta la rapidez con que éste adquiere resistencia y también aumenta la resistencia final. Durante la época de frío, el cloruro de calcio disminuye el tiempo durante el cual es necesario proteger al hormigón contra la congelación. Como el cloruro de calcio disminuye la pérdida de humedad por evaporación, permite así que continúe la hidratación del cemento y facilita el curado de las losas de concreto cuando se extiende uniformemente sobre la superficie en la mañana que sigue a la colada.⁵

Llenando los neumáticos de los tractores con solución de cloruro de calcio en lugar de aire, se aumenta la eficiencia del tractor y se evita que patinen las ruedas. Otro uso es en los cubos y en las barricas para combatir los incendios y en ciertos tipos de extintores que tienen que ser protegidos contra la congelación. Se usa también como agente desecante de gases en los laboratorios y en la industria, y para reducir el contenido de humedad de los granos para siembra. Se emplea para evitar la humedad excesiva en los sótanos y los almacenes.

En el caso de la estabilización con cloruro de calcio se presenta el intercambio catiónico cuando se trata de arcillas, lo cual se puede evidenciar mediante mediciones del pH, que se abate al presentarse dicho intercambio. La adición de cloruro de calcio disminuye las fuerzas de repulsión entre las arcillas, pero hay quienes aseguran que la película de agua que rodea a las partículas se ve eléctricamente reforzada con la adición del cloruro de calcio a tal grado que se incrementa notablemente la cohesión aparente. Como en el intercambio catiónico se sustituye un ion Ca^{++} por dos iones Na^+ , la doble capa se ve reducida en su espesor, lo que ocasiona que disminuya el potencial eléctrico y en consecuencia se reduzcan las fuerzas de repulsión entre las partículas. Por otro lado, si durante la reacción del cloruro de calcio con la arcilla se produce ácido clorhídrico (HCl), entonces puede suceder que los iones de calcio Ca^{++} reemplacen a iones aluminio Al^{+++} lo que disminuye aún a las fuerzas de repulsión provocando con ello mejores ligas entre las partículas. Estudios realizados al respecto, han indicado un incremento en los pesos volumétricos hasta del 11% con la adición de 0.5 a 3% de cloruro de calcio, según el tipo de suelo; sin embargo, también se han obtenido disminuciones en el peso volumétrico con respecto a un suelo arcilloso que no contenga el cloruro de calcio.

Es decisivo el conocimiento de los minerales existentes en el suelo y su proporción en la estabilización; por ejemplo, en algunos casos, se tiene que un

⁵ Public Road Administration. The use of Calcium Chloride in the construction and Maintenance of Roads. Reprint No.181, Calcium Chloride Assn., Washington, D.C.

pequeño porcentaje de cloruro de calcio (como el 1%) incrementa en forma muy notable el peso volumétrico, pero un incremento leve mayor a éste porcentaje, por ejemplo 0.5%, produce efectos contrarios. Una explicación a éste fenómeno es que, la adición pequeña de cloruro de calcio, une las partículas al contrarrestar las repulsiones negativas, así como formarse uniones tipo valencia; sin embargo, si se añade el cloruro de calcio en exceso, se rodean todas las partículas de cargas positivas presentándose una fuerza de repulsión que los separa.

El cloruro de calcio ayuda a mantener constante la humedad en un suelo pero es una sal muy fácilmente lavable. Se reduce la evaporación y es capaz, el cloruro de calcio de absorber hasta 10 veces su propio peso cuando las condiciones de humedad son altas en el medio ambiente, pudiéndose mantener dicha humedad en sus dos terceras partes durante un día de calor seco, lo que hace de ésta sal un producto muy eficaz cuando se trata de evitar la formación de polvo en terracerías si las condiciones climáticas son favorables.

Se ha empleado la prueba de CBR para evaluar la estabilización con ésta sal, y para bajas energías de compactación, el aumento en el valor de CBR ha sido muy notable, no así cuando la energía de compactación es alta, sobre todo en gravas con pocos finos.

En lo que respecta a la plasticidad de los suelos, los estudios que se han realizado indican una gran variedad de respuestas, pero en general, se reporta que los cambios son muy pequeños si no despreciables.

Se ha encontrado que un 1% de sal adicionada a la arcilla, abate en forma muy considerable la acción del congelamiento. Sin embargo, la literatura existente no indica la forma de determinar con precisión la cantidad de cloruro de calcio (CaCl_2) necesaria para estabilizar un suelo y menos aún para predecir el período en que dicha estabilización sea efectiva, debido a que ésta sal es fácilmente lavable. A pesar de esto, en períodos de evaporación dicha sal tiende a ser arrastrada a la superficie y nuevamente produce los efectos ya referidos.

En lo que respecta a los procedimientos de construcción, se aplican los mencionados para el caso del cloruro de sodio, es decir, se puede aplicar desde la sofisticada mezcla en planta con alto grado de control, hasta la simple mezcla en el lugar realizado con el equipo tradicional en la construcción de pavimentos. Si se desea utilizar el equipo tradicional, los pasos a seguir son:

- Escarificación, hasta que por lo menos el 80% del material pase la malla No. 4 (4.75mm).
- Disgregación.
- Adición del cloruro de calcio.
- Adición del agua.
- Mezclado con motoconformadora.
- Tendido y compactación.

Cuando el mezclado se hace en planta, ha sido práctica común adicionar la sal en forma de solución, lo cual no es conveniente al no tenerse un control preciso de la proporción del cloruro de calcio, pues ésta está determinada a partir del peso seco suelto del material. Los puntos que requieren de mayor atención, son la correcta dosificación, el mezclado total y la compactación adecuada, pudiéndose lograr una gran efectividad en ésta última operación con el empleo de rodillos neumáticos, seguidos por una compactación de cerrado empleando rodillos lisos.

Pero es importante que se consideren las siguientes limitaciones para el empleo del cloruro de calcio:

- Que en el medio ambiente se tenga una humedad relativa superior al 30%.
- Que se tengan minerales que pasen la malla 200 y que éstos reaccionen favorablemente con la sal.
- Que el nivel freático no se encuentre a distancias que provoquen la emigración de la sal.

IV PRUEBAS DE LABORATORIO

Antes de señalar el procedimiento y desarrollo de las pruebas que se llevaron a cabo para analizar el comportamiento de una arcilla expansiva con el cloruro de calcio, se hará mención de algunos estudios y características que se obtuvieron de la región y de las arcillas constitutivas en los alrededores de la ciudad de Querétaro.

"La ciudad de Querétaro está enclavada en la zona central de la República Mexicana a 1834 m. de altitud sobre el nivel del mar. El clima predominante está clasificado como subtropical de altura, con lluvias durante el verano y temperatura media anual de 19°C.

El valle en que se asienta la ciudad, pertenece a la provincia fisiográfica de las Fosas Tectónicas, que se caracteriza por la presencia de derrames basálticos, volcanes y lagos cuya morfología sugiere la idea de estar situados en fosas tectónicas. Las riolitas, andesitas y traquitas cubiertas por basalto, forman las montañas, mientras que los valles en un principio fueron cuencas lacustres profundas que se rellenaron de material fluvial derivado de las montañas y cenizas volcánicas más recientes (Ver fig. No.4)

Tales formaciones se generan en la época del pleistoceno, caracterizada por la deyección explosiva de tipo ácido, cuya salida a presión dio por resultado rocas piroclásticas y, principalmente arenas y cenizas volcánicas que al depositarse en un medio lacustre, originan tobas volcánicas. Casi al final del pleistoceno, en la cuenca se formó un medio palustre propiciando la aparición de una capa arcillosa orgánica con espesores de 0.50 m a 20.0 m.

Cabe mencionar que en la zona urbana existen tres afloramientos de basalto (ver la misma figura anterior).

De acuerdo con la topografía de la ciudad de Querétaro, ésta ofrece una orografía semimontañosa identificándose una zona plana que forman las cuencas lacustres que están en la parte oeste de la ciudad, donde se asienta la zona industrial y parte de la zona urbana, el resto de ésta se ubica en la zona montañosa.

FORMACIONES GEOLOGICAS

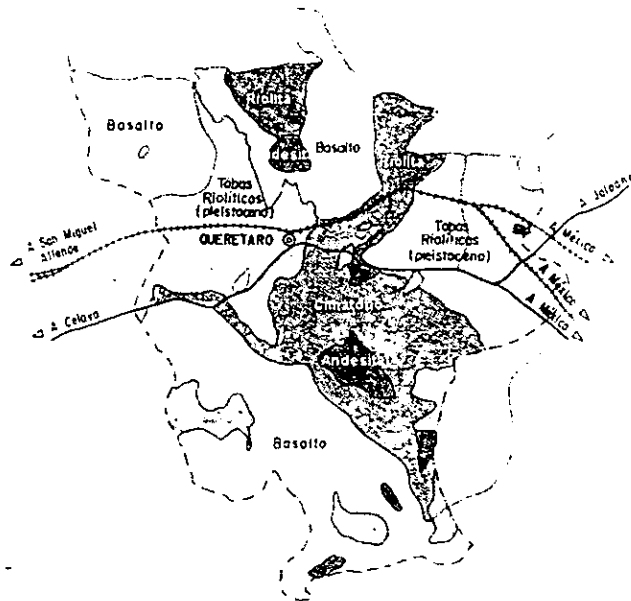


FIGURA No. 4

La hidrografía la constituye el río Querétaro, el cual forma parte de la cuenca del río Lerma. El río drena el valle hacia el poniente y desemboca en el río Apaseo, en Guanajuato.

Se sabe que las arcillas expansivas normalmente son montmorilloníticas, y que su formación se propicia por las siguientes condiciones externas: la desintegración, la hidratación interna y pocas filtraciones. Se requiere entonces que las filtraciones sean limitadas, de tal manera que los cationes de magnesio, calcio, sodio y hierro puedan acumularse en la estructura del suelo. De esta forma los minerales montmorilloníticos se ven favorecidos en su formación por un medio ambiente alcalino, por la presencia de iones de magnesio y por la escasez de filtraciones. Tales condiciones se presentan en regiones semiáridas, con relativamente baja precipitación o precipitaciones moderadas y, particularmente, donde la evaporación potencial excede la precipitación. Bajo estas condiciones se dispone del agua suficiente para el proceso de alteración, pero los cationes acumulados no se remueven por la presencia de la misma.

Con ésta idea, y consultando el Atlas del Agua del Instituto de Geografía y Geofísica de la UNAM, se obtuvieron los datos de precipitación media anual y evaporación potencial media de algunos de los lugares de nuestra República, donde se ha detectado la existencia de arcillas expansivas.

Así se tiene:

LUGAR	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)	EVAPORACIÓN POTENCIAL MEDIA (mm)
Chilpancingo	1000	1800
Culiacán	671	2154
Hermosillo	246	2200 - 2600
Mexicali	68	2200
Morelia	772	1950
Soto La Marina	736	1800 - 2200
Villahermosa	2219	1516
Querétaro	555	2000

En todos ellos, con excepción de Villahermosa, se corrobora que efectivamente la precipitación media anual es menor a la evaporación potencial media. Otro hecho que se encontró es que la oscilación de temperaturas extremas promedio en los mismos sitios, es semejante, del orden de los $15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$ ⁶

La arcilla objeto del presente estudio, es procedente de la zona suroeste de la

⁶ Memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos; Guanajuato, Gto.; 1976. Tomo III, pp. 21-25.

ciudad de Querétaro, a la salida hacia a Celaya y ya ha sido objeto de investigación por el distinguido Ingeniero Gabriel Moreno Pecero, quien en la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos celebrada en la ciudad de Guanajuato, presenta el análisis químico y de difracción de rayos X, para determinar la composición mineralógica de éste suelo, obteniendo una franca preponderancia de la montmorillonita.

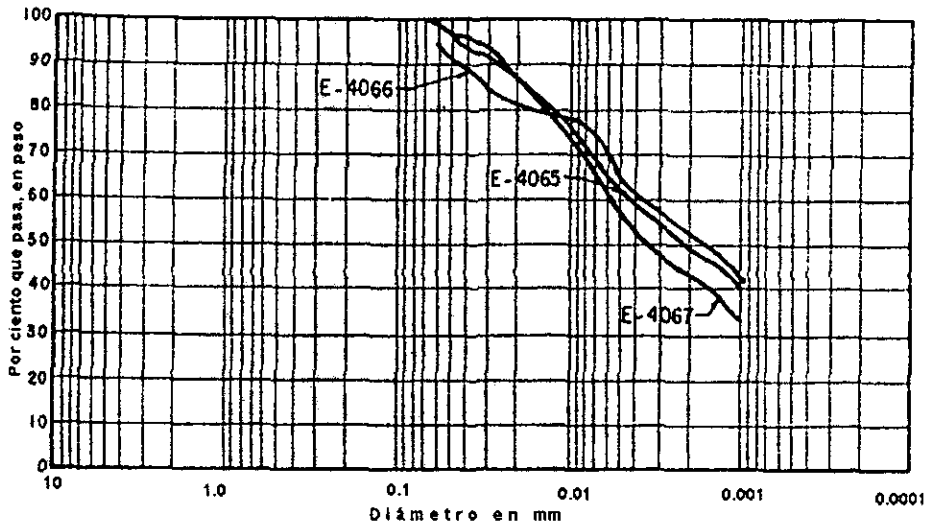
MINERAL	%
Montmorillonita	39.0
Anortita	28.3
Cristobalita + cuarzo	17.3
Hematita	4.3
Microclina	2.1
Albita	0.5
Otros	8.5

También se determinó con hidrómetro el porcentaje de partículas sólidas menores de 0.002 mm y de 0.001 m, de donde se obtuvo:

Partículas menores de 0.002 mm: 50%

Partículas menores de 0.001 mm: 40%

Las curvas granulométricas obtenidas con éste método, son las siguientes:



CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LA ARCILLA DE QUERÉTARO

Para conocer el comportamiento de ésta arcilla con el cloruro de calcio a corto plazo, se obtuvo una muestra alterada, pero representativa, de la zona suroeste de la ciudad de Querétaro, en la salida hacia la ciudad de Celaya.

Por lo que respecta a la sal, es decir el cloruro de calcio, se empleó con su presentación en polvo, la cual facilita su utilización, y con una pureza del 99%.

Todas las pruebas que se desarrollaron, se hicieron conforme a las Normas para Muestreo y Pruebas de Materiales, Equipos y Sistemas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes estipuladas en su libro 6, editado en 1991.

Para conocer mediante resultados concretos si ésta sal modifica las características y propiedades de la arcilla activa seleccionada, se realizaron las pruebas de laboratorio representativas siguientes.

1.- Pruebas Índice.

- Granulometría.
- Límites de consistencia o plasticidad.
- Clasificación SUCS

2.- Pruebas de Resistencia:

- Prueba Próctor Estándar.
- Valor Relativo de Soporte (VRS).
- Compresión simple.

3.- Pruebas de Deformación:

- Expansión libre.
- Expansión bajo carga.

Las pruebas se realizaron en la arcilla sin sal y con contenidos de cloruro de calcio de 2,4,6,8 y 10% con respecto al peso del material seco y suelto.

Los especímenes para las pruebas de compresión simple y de deformación se buscaron compactar al 95% de su peso volumétrico seco máximo, ya que de obtenerse buenos resultados al mezclar la arcilla con el cloruro de calcio, esta arcilla estabilizada podría emplearse como capa subrasante, la cual regularmente se compacta al 95% de su peso volumétrico seco máximo.

El procedimiento de preparación que se llevó a cabo para analizar el comportamiento de la arcilla activa con el cloruro de calcio, fue secar toda la arcilla

en el horno a 60 °C revolviendo el material periódicamente, para lograr un secado más rápido y uniforme, hasta reducir su humedad a un grado tal que permitiera su fácil disgregación. El secado no debe efectuarse a temperatura más elevada porque puede llegar a quemar la materia orgánica.

El desarrollo de las pruebas se realizó como se indica a continuación:

1.- GRANULOMETRÍA.

Disgregado el material mediante maceo y cribado por la malla No. 4 (4.75 mm), se procedió a efectuar la prueba de granulometría en 200 gr. de muestra del suelo, de donde se obtuvo que el 89.10% pasaba la malla No. 200, quedando el resto retenido entre las mallas No. 4 y la No. 200, por lo que se trata de un suelo esencialmente fino.

2.- PRUEBA AASHTO O PRÓCTOR ESTÁNDAR.

Para determinar la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo de la arcilla sin el cloruro de calcio, se efectuó la prueba Próctor Estándar de la manera siguiente

2. a) Una vez seco el material, se disgregó y cribó para obtener material que pasara la malla No. 4 (4.75 mm).

2. b) Se obtuvieron 4 Kg. del material y se le agregó agua en una cantidad tal que la mezcla adquiriera una consistencia en la que al comprimir una porción de la muestra en la palma de la mano, no dejara partículas adheridas en ésta, ni la humedeciera y que a la vez, el material comprimido se tomara con dos dedos sin que se desmorone.

Realizado lo anterior, se dejó la mezcla en bolsas de plástico cerradas durante 24 horas para que se homogeneizara la humedad.

2.c) Pasado ese tiempo y disgregados los grumos formados por la incorporación del agua, se compactó la arcilla en el molde Próctor, en 3 capas dando 25 golpes por capa.

2.d) Se procedió a pesar el molde (al cual previamente se le determinó su volumen), con la arcilla y se obtuvo una porción del suelo para valuar el contenido de humedad.

2.e) Se incorpora el material nuevamente con el sobrante que no se ocupó al llenar el molde y se disgregan los grumos, para proceder a agregar dos por ciento más de agua con respecto al peso inicial de la muestra, y se repiten los pasos señalados en los incisos c) y d) anteriores.

2.f) Con la misma muestra de prueba, se repite el proceso hasta en 4 o 5 ocasiones.

La prueba Próctor con los diferentes porcentajes del cloruro de calcio, se realizó de la manera siguiente:

2.1) Se disgregó la arcilla para obtener material que pasara la malla No. 4 (4.76 mm).

2.2) Se separaron cinco porciones de la arcilla de 4 kilogramos cada una, y a cada porción se le añadió el porcentaje de cloruro de calcio en polvo correspondiente, mezclándolo en seco.

2.3) Se incorporó el agua, 20% por debajo del contenido óptimo de humedad establecido para la arcilla sin la sal, y se colocó el material en bolsas de plástico cerradas durante 3 días, a fin de que se homogeneizara la humedad y para que la sal y la arcilla reaccionaran.

2.4) Transcurrido el tiempo, se compactaron las muestras siguiendo el procedimiento de prueba establecido para la prueba Próctor estándar.

3.- LÍMITES DE CONSISTENCIA O LÍMITES DE PLASTICIDAD.

Para definir el tipo de suelo fino con el que estamos trabajando, se determinaron los límites de plasticidad (Límite Líquido y Límite Plástico) del suelo, sin el cloruro de calcio y con el cloruro de calcio.

Para el caso sin cloruro de calcio, se efectuó la prueba conforme a lo señalado en las Normas de la SCT, es decir utilizando el material que pasa la malla No. 40. Cuando se empleó la sal, la preparación de las muestras se efectuó de la manera siguiente:

3.a) El material que pasó la malla No. 40, se mezcló en seco con los diferentes porcentajes del cloruro de calcio, cuya presentación en polvo (tamaño inferior al de la malla No. 40), facilitó el mezclado.

3.b) Homogeneizada la mezcla en seco, se le agregó el contenido de agua óptima obtenido en la prueba Próctor y se dejó la mezcla en bolsas de plástico cerradas en un sitio fresco, durante 72 horas para que la sal y la arcilla reaccionaran.

3.c) Después de las 72 horas, se determinaron los valores del Límite Líquido y del Índice Plástico.

Además, y siguiendo el mismo procedimiento, se determinó el Límite de Contracción con el material conteniendo la humedad correspondiente al límite líquido.

4.- VALOR RELATIVO DE SOPORTE.

Para conocer el efecto que el cloruro de calcio tiene en la resistencia de la arcilla activa, se realizó la prueba del VRS (Valor Relativo de Soporte). El procedimiento que se siguió tanto para la arcilla con la sal como sin ella, fue el siguiente:

4.a) Se disgregó la arcilla y se obtuvo material que pasara la malla No. 4.

4.b) Habiéndose obtenido la cantidad de suelo necesaria para cada molde,

se le agregó el correspondiente contenido de cloruro de calcio, mezclando en forma manual.

4.c) Después de obtener una mezcla homogénea, se le agregó la cantidad de agua requerida para conseguir el 95% de compactación, mezclando manualmente.

4.d) Con la finalidad de que se homogeneizara la humedad y para que el suelo reaccionara con la sal, se dejó el material en bolsas de plástico cerradas, o en un lugar fresco durante 72 horas.

4.e) Transcurrido el tiempo señalado, se compactó la mezcla arcilla-cloruro de calcio en el molde Porter, para dejarlo saturar durante 5 días y posteriormente efectuar la prueba.

5.- COMPRESIÓN SIMPLE.

El objetivo de esta prueba, es el conocer de que manera influye el cloruro de calcio en la resistencia a la compresión simple de la arcilla en estudio. Para ello, se cumplió el siguiente procedimiento.

5.1) Se disgregó la arcilla y se obtuvo material que pasó la malla No. 4 en cantidad suficiente para compactarla en el molde Próctor.

5.2) Se mezcló manualmente con el porcentaje de sal correspondiente.

5.3) Homogeneizada la mezcla, se le añadió la cantidad de agua necesaria para lograr el 95% de compactación y se mezcló en forma manual.

5.4) La mezcla así obtenida se dejó en bolsas de plástico para que se uniformizara la humedad y reaccionara la sal con la arcilla durante 72 horas.

5.5) Transcurrido ese tiempo, se compactó el material en el molde Próctor.

5.6) Mediante un émbolo hidráulico se sacó del molde Próctor el cilindro compactado de la arcilla con la sal y se labraron probetas cilíndricas de 8.55 cm de altura y 3.67 cm. de diámetro, con una relación de esbeltez de 2.33.

5.7) Labrada la probeta, se colocó en un marco de carga apropiado para realizar la prueba de compresión simple con el método de carga controlada.

5.8) De igual forma se labraron otras probetas para verificar los resultados, pero ahora se realizó con el método de deformación controlada, aplicando una velocidad de deformación de 0.72 mm/min.

6.- EXPANSIÓN LIBRE.

La arcilla en estudio posee características expansivas. Para investigar los efectos que tiene el cloruro de calcio en esta característica de la arcilla, se llevó a efecto la prueba de expansión libre con los diferentes contenidos de sal, de la manera siguiente:

6.1) Se realizaron los mismos pasos indicados en la prueba de compresión simple hasta el punto 5.5 inclusive.

6.2) Extraído del molde Próctor el cilindro compactado con la arcilla y el correspondiente porcentaje de cloruro de calcio, se labró una probeta dentro del anillo de consolidación.

6.3) Realizado lo anterior, se colocó dentro de una charola en medio de dos piedras porosas. En la parte superior se instaló un micrómetro a fin de medir las expansiones.

6.4) Colocado este aparato, se procedió a saturar el espécimen en agua, tomando lecturas en el micrómetro desde el primer segundo.

Este procedimiento se llevó a cabo tanto para la arcilla sin sal, como para la arcilla con los diferentes contenidos de cloruro de calcio.

7.- EXPANSIÓN BAJO CARGA.

Considerando que de resultar positiva la estabilización con cloruro de calcio, la arcilla se emplearía como capa subrasante, se llevó a cabo la prueba de expansión bajo una presión de 0.07 Kg/cm^2 , la cual es la presión que se considera transmiten las capas superiores del pavimento a la subrasante.

La realización de ésta prueba, se ejecuta de la misma manera que se procedió en la prueba de expansión libre, a excepción de que la prueba bajo carga se aplica en un consolidómetro, dando al espécimen una presión de 0.07 Kg/cm^2 . Esta presión se da mediante la colocación de pesas al consolidómetro previamente nivelado y tomando en cuenta el peso del balín y de la piedra porosa.

Colocada la presión de 0.07 Kg/cm^2 sobre la muestra, antes de comenzar a saturarla, se dejó que se consolidara el material por efecto de la carga, tomando lecturas desde el primer segundo después de iniciar la saturación.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

V.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

V.I.- PRUEBAS DE CALIDAD O PRUEBAS ÍNDICE

V.I.1.- GRANULOMETRÍA.

Como ya se mencionó anteriormente, del análisis granulométrico se obtuvo que el 89.10% del material sin el cloruro de calcio pasaba la malla No. 200, quedando el resto retenido entre las mallas No. 4 y la No. 200, por lo que se trata de un suelo esencialmente fino.

V.I.2.- LIMITES DE CONSISTENCIA.

Los resultados que arrojaron las pruebas de límites de consistencia, se muestran gráficamente en las figuras V.1 y V.2. Cuantitativamente se obtuvieron los siguientes valores.

VARIACIÓN DE LOS LIMITES DE CONSISTENCIA EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DEL CLORURO DE CALCIO.						
Cloruro de calcio (%)	Límite líquido (%)	Variación (%)	Límite plástico (%)	Variación (%)	Índice plástico (%)	Variación (%)
0	87	-	28	-	59	-
2	76	-12.6	31	+10.7	45	-23.7
4	73	-16.1	33	+17.8	40	-32.2
6	68	-21.8	31	-10.7	37	-37.2
8	58	-33.3	26	-7.1	32	-45.8
10	48	-44.8	26	-7.1	22	-62.7

VARIACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA ANTE EL
CLORURO DE CALCIO (CaCl_2)

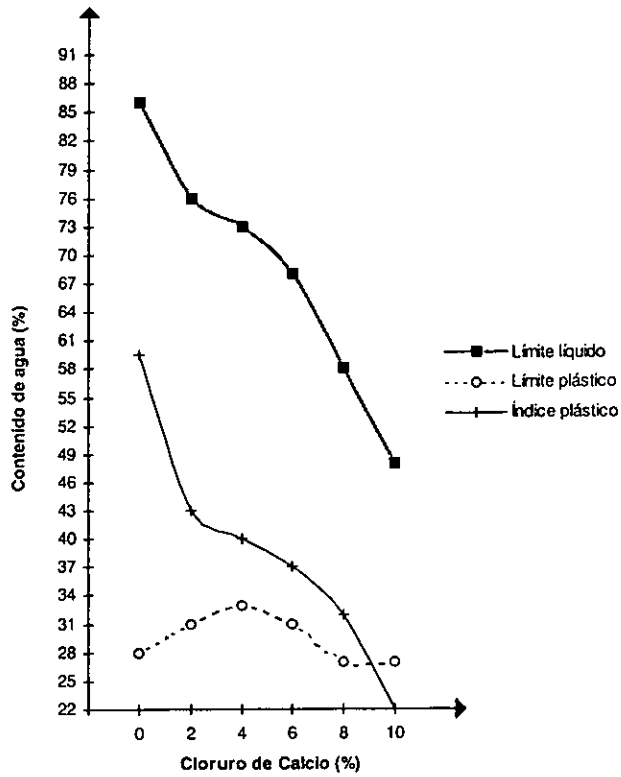


FIGURA V.1

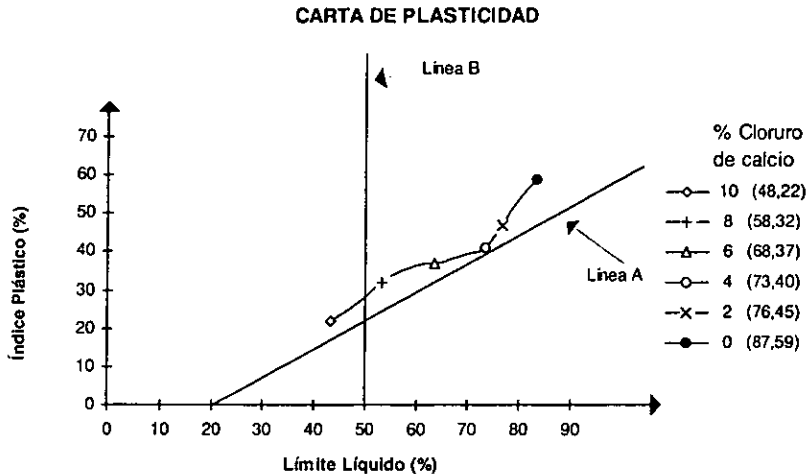


Figura V.2

Como se aprecia en la figura V.1, el límite líquido tiene una disminución significativa al incrementarse el contenido del cloruro de calcio, llegando casi a la mitad (44.8%) la reducción con respecto a la arcilla sin el aditivo, cuando se le agrega el 10% de cloruro de calcio, lo cual resulta muy importante pues se está abatiendo la plasticidad del suelo. Con el límite plástico sucede una situación un tanto distinta, pues no sólo es mínima la reducción de éste límite para la arcilla con el 8 y 10% del aditivo (apenas se redujo en un 7.1%), sino que para la mezcla de la arcilla con 2, 4 y 6% de cloruro de calcio, el valor del límite plástico se incrementa hasta en un 17.8% al pasar de 28, para el caso de la arcilla sola, a 33 en su mezcla con el 4% del cloruro de calcio

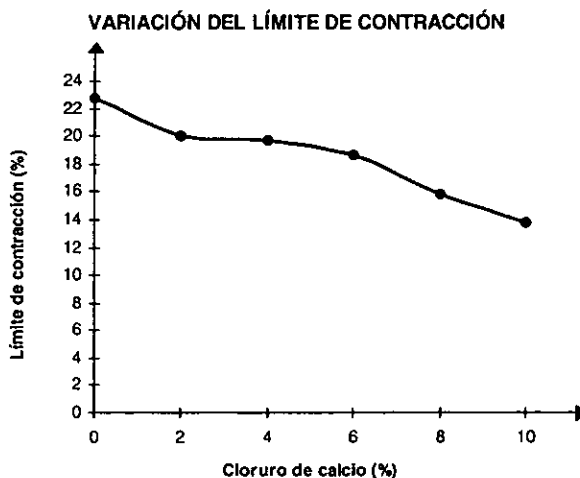
Como consecuencia de lo anterior, la variación del índice Plástico es similar a la del límite líquido, llegando a reducir su valor en más de la mitad (62.7%) para la mezcla del suelo con el 10% del cloruro de calcio.

Ahora bien, considerando todos los valores obtenidos y llevándolos a la carta de plasticidad, tal como se presenta en la figura V.2, se observa como a medida que se incrementa el contenido del cloruro de calcio, el suelo disminuye su plasticidad, llegando a obtenerse, para el suelo con el 10% del aditivo, que se pase del lado izquierdo de la línea B en la carta de plasticidad (zona de baja y mediana compresibilidad).

Sin embargo, en todos los casos, la mezcla del suelo con el cloruro de calcio, siempre se mantiene encima de la línea A de la carta de plasticidad (es decir permanece como una arcilla inorgánica).

Por lo que respecta al límite de contracción, los resultados se presentan a continuación:

VARIACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN						
Cloruro de Calcio (%)	0	2	4	6	8	10
Límite de Contracción	22.8	20.0	19.7	18.7	15.8	13.8
Variación (%)	-	-12.3	-13.6	-18.0	-30.7	-39.5



Esto nos indica que el cloruro de calcio, en este tipo de suelo, reduce la contracción del material.

V.II.- PRUEBAS DE RESISTENCIA

V.II.1 PRUEBA PRÓCTOR ESTÁNDAR.

El peso volumétrico seco máximo que se obtuvo en esta prueba para el caso de la arcilla sin mezclarla con el aditivo, fue de 1.31 Ton./m³, siendo el contenido de humedad óptimo del 33.5%. La curva de compactación resultante para este caso y el de todos aquellos donde se mezcló el suelo con el cloruro de calcio, se presenta en la figura No. V.3, de donde se tienen los siguientes valores:

VARIACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO Y DE LA HUMEDAD ÓPTIMA CON EL CONTENIDO DE CLORURO DE CALCIO.						
Cloruro de calcio (%)	0	2	4	6	8	10
Humedad óptima (%)	33.5	31.0	30.5	28.0	28.0	27.5
Variación (%)	-	-7.5	-9.0	-16.4	-16.4	-18.0
Peso volumétrico seco máximo (Ton./m³)	1.31	1.33	1.35	1.35	1.40	1.42
Variación (%)	-	1.5	3.0	3.0	6.9	8.4

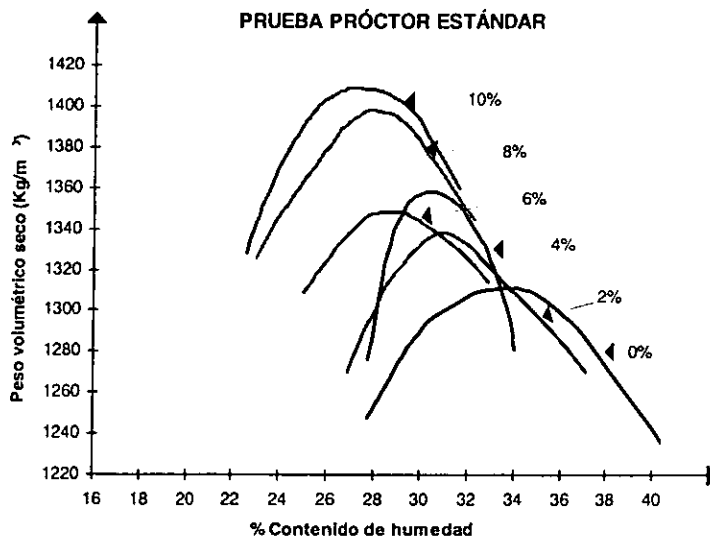


FIGURA V.3

En las figuras V.4 y V.5 se presenta la variación del peso volumétrico seco máximo y de la humedad óptima con el contenido del aditivo, donde se puede apreciar que después de una reducción apreciable en el contenido de humedad óptimo para 2,4 y 6% del suelo con el cloruro de calcio, para porcentajes mayores tiende a estabilizarse el contenido de humedad óptimo, en cambio, el peso volumétrico seco máximo, mantiene una tendencia ascendente conforme aumenta el contenido de la sal en el suelo.

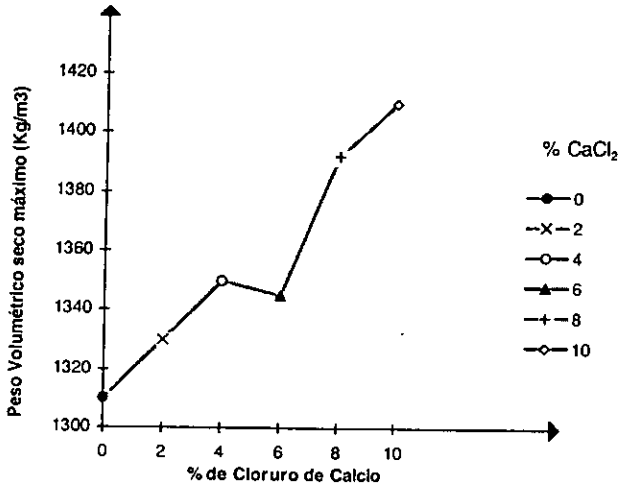


FIGURA V.4

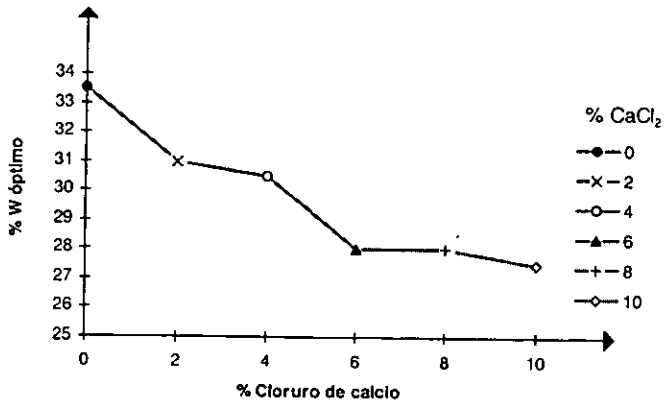


FIGURA V.5

V.II.2 VALOR RELATIVO DE SOPORTE (VRS)

Los resultados obtenidos en esta prueba, se presentan en la siguiente tabla y esquemáticamente se muestran en la figura No. V.6

VARIACIÓN DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE						
Cloruro de calcio (%)	0	2	4	6	8	10
Valor relativo de soporte saturado (%)	2.9	2.9	2.9	2.9	3.8	4.3
Variación (%)	-	0	0	0	+31	+48

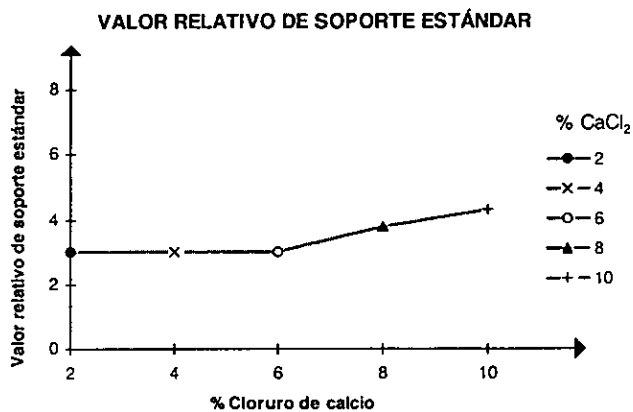


FIGURA V.6

Para bajos porcentajes de cloruro de calcio (hasta el 6%), el valor relativo de soporte saturado no varía, sin embargo, y a pesar de que con el 10% del aditivo se produce un incremento del VRS, próximo al 50%, para fines prácticos este aumento es poco significativo, lo que indica que la sal no ocasiona cementación en la arcilla.

V.II.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.

La representación gráfica de la variación de la resistencia a la compresión simple en la arcilla con el cloruro de calcio, se presenta en la figura V.7, siendo los valores obtenidos los que se señalan en la tabla siguiente:

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE				
CLORURO DE CALCIO (%)	RESISTENCIA CON CARGA CONTROLADA (Kg./cm ²)	COMPACTACIÓN (%)	RESISTENCIA CON DEFORMACIÓN CONTROLADA (Kg./cm ²)	COMPACTACIÓN (%)
0	0.77	88	0.95	88
2	-	-	-	-
4	0.92	90	0.89	90
6	0.87	92	0.80	93
8	1.19	101	1.23	102
10	0.34	87	0.44	91

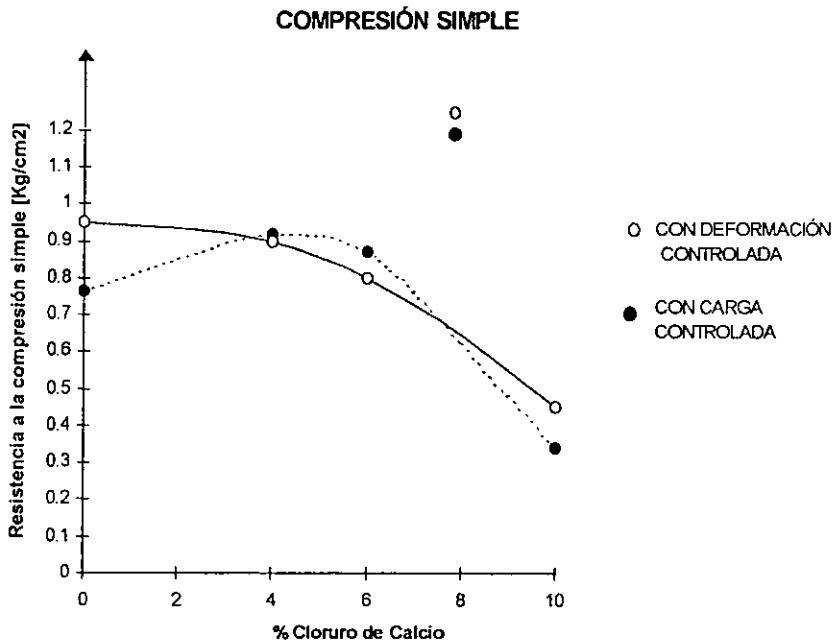


FIGURA V.7

Los resultados indican que a medida que se incrementa el contenido de la sal, la resistencia a la compresión simple disminuye, lo cual nos hace suponer que el cloruro de calcio contribuye a formar una estructura dispersa en la arcilla, pues es en esta constitución que la arcilla mantiene una baja resistencia a la compresión.

Cabe señalar que aunque no se logró la compactación deseada del 95%, los resultados se pueden considerar homogéneos (alrededor del 90%), salvo en el caso de la mezcla con el 8% del cloruro de calcio, donde se alcanzó más del 100% de compactación.

V.III. PRUEBAS DE DEFORMACIÓN

V.III.1 EXPANSIÓN LIBRE.

En la prueba de expansión sin carga, los resultados obtenidos aparecen a continuación, y en la figura V.8 se aprecia que la expansión aumenta para bajos contenidos de cloruro de calcio (4 y 6%) y se va reduciendo para porcentajes mayores de la mezcla de la arcilla con la sal. Esto puede explicarse en cierta forma, por la característica de deliquesencia que posee el cloruro de calcio, es decir, es capaz de absorber vapor de agua del aire lo que permitió que al haber realizado la mezcla y dejarla en bolsas de plástico durante 3 días, se homogeneizara esa humedad absorbida, reforzando la película de agua que rodea a las partículas, originando un incremento en la expansión, para porcentajes bajos de la mezcla. Para porcentajes del 8% o mayores mezclados con la arcilla, es probable que se formen masas más densas que reducen la penetración del agua y, con ello, la expansión del suelo. Es de hacerse notar que para los porcentajes de la mezcla con el 4 y 6% del cloruro de calcio, de los 8 a los 120 minutos iniciales, se alcanzó más del 60% de la expansión total que sufrió el espécimen.

EXPANSIÓN SIN CARGA		
% CLORURO DE CALCIO	(%) EXPANSIÓN	(%) VARIACIÓN
0	17.7	-
4	21.4	+21
6	24.1	+36
8	18.1	+2
10	14.3	-19

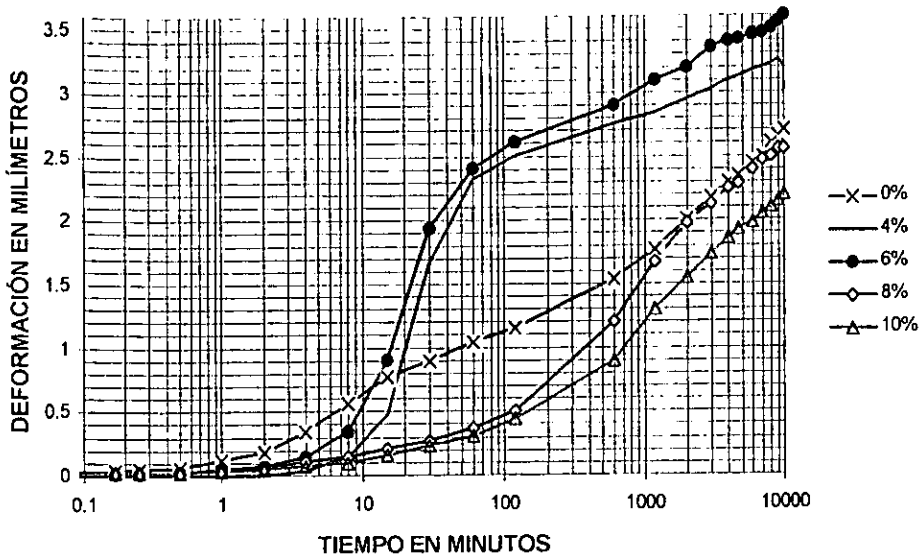


Figura V.8

V.III.2 EXPANSIÓN BAJO CARGA.

Como ya se mencionó, en este caso se coloca sobre la probeta una presión vertical de 0.07 Kg/cm^3 [1 lb/pulg^2], que equivale a la carga muerta que actúa sobre la capa subrasante del pavimento. Los resultados se muestran en la tabla siguiente y en la figura V.9, en donde se puede apreciar que la expansión disminuye únicamente en la mezcla del suelo con el 6% de cloruro de calcio, mientras que para el 4, 8 y 10%, la expansión se incrementa hasta un 30%. Cabe resaltar que ahora se da el caso de que, a partir de las dos horas siguientes al período en que se consideró se había consolidado la muestra por la colocación de la carga, se produce la expansión total del espécimen para las mezclas con el 8 y 10% del cloruro de calcio, es decir, se realiza de una manera más rápida que en los otros casos con menor porcentaje de la sal.

EXPANSIÓN CON CARGA		
% CLORURO DE CALCIO	(%) EXPANSIÓN	(%) VARIACIÓN
0	7.4	-
4	8.4	+13
6	6.8	-8
8	9.1	+23
10	9.6	+30

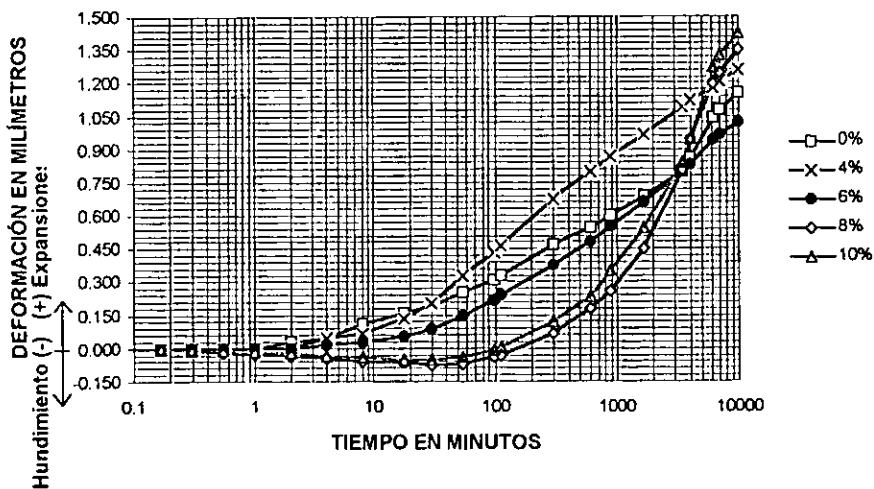


Figura V.9

CONCLUSIONES

El estudio desarrollado forma parte de una investigación dirigida por el M. en I. Gabriel García Altamirano, quien durante los últimos años, ha analizado el comportamiento manifestado por las arcillas activas de la ciudad de Querétaro, al mezclarla con diferentes compuestos químicos como el cemento Portland, cal, sal común, pretratamiento con cal y tratamiento con cemento Portland y, ahora, con el cloruro de calcio.

Es aconsejable que este tipo de investigaciones se sigan promoviendo pues, como se mencionó anteriormente, los resultados no pueden generalizarse para todos los tipos de suelos expansivos, sino que debe estudiarse el comportamiento de cada caso en particular y con variados aditivos y mezclas de ellos, ya que los productores de artículos estabilizantes no dan a conocer las desventajas que sus productos ocasionan al emplearse sobre este tipo de suelos.

De los resultados obtenidos, analicemos primero el tipo de material con el cual trabajamos. Así, se tiene de la prueba granulométrica que el 87% del material natural pasa la malla No. 200, lo cual indica la presencia de un suelo esencialmente fino.

Las demás características del suelo sin el cloruro de calcio, fueron las siguientes:

Límite líquido	87%
Límite Plástico	28%
Índice Plástico	59%
Límite de Contracción	22.8%
Peso Volumétrico Seco Máximo	1.31 Ton/m ³
Valor relativo de Soporte Saturado	2.9%
Expansión Libre	17.7%
Expansión bajo presión vertical de 0.07 Kg/cm ²	7.4%

Consultando la carta de Plasticidad y con los valores de los límites de consistencia, se determina que es un suelo clasificado según el SUCS, como una arcilla de alta compresibilidad (CH).

Para conocer el grado de expansividad de este material, aplicaremos los resultados obtenidos a los criterios establecidos por diferentes investigadores y que se mencionaron en el capítulo II de este trabajo, en la sección de identificación de suelos expansivos.

De acuerdo al criterio de Holtz, la arcilla en estudio tiene: un potencial de expansión muy alto, en función del índice plástico y del contenido de coloides (porcentaje de partículas menores a dos micras, información que se da por aceptada de la investigación realizada por el Ing. Gabriel Moreno Pecero); y baja conforme al límite de contracción y a la expansión producida con presión vertical de 0.07 Kg/cm^2 .

Tomando en cuenta la gráfica especificada por el Bureau of Reclamation a partir del peso volumétrico seco y el límite líquido, el suelo en estudio es del tipo expansivo; y consultando las gráficas señaladas en los criterios de Ghazzaly y Vijayvergiya, resulta que tenemos una arcilla con un grado de expansión alta en ambos juicios.

Por lo tanto, podemos concluir que trabajamos con un suelo del tipo expansivo y que, tomando en consideración el criterio fijado por Skempton, basado en la relación entre el índice de Plasticidad y el porcentaje de partículas menores de dos micras (donde nuevamente damos por ciertos los valores obtenidos en la investigación del Ing. Gabriel Moreno Pecero), se considera un suelo con una actividad intermedia entre la illita y la montmorillonita sódica.

Para reafirmar esta última identificación de minerales que constituyen la arcilla, se aplicó la metodología desarrollada por investigadores australianos, la cual permite inferir el tipo de mineral constitutivo del suelo en estudio, mediante la observación directa al sumergir en agua destilada o de lluvia un pequeño grumo de suelo secado al aire, tal y como se describió en el capítulo II de este trabajo, y que constituye un método de identificación muy rápido. Al efectuar la prueba, se apreció la desintegración del grumo formando "halos", lo cual confirma la metodología desarrollada por los australianos e identifica a los minerales constitutivos de la arcilla como del tipo montmorillonítico.

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

Ahora bien, los cambios que provoca la presencia del cloruro de calcio en las propiedades geotécnicas de este tipo de arcilla, son las siguientes:

- a) La variación del límite líquido es significativa, siendo desde un 12% la reducción en su valor al mezclarse con el 2% del cloruro de calcio, hasta llegar a disminuirse en un 45% con el 10% de la sal. En el límite plástico se da una situación diferente. Con reducidos porcentajes de la sal (2 y 4%), crece el valor de este límite hasta un 18%, pero para porcentajes mayores (8 y 10%), decrece en apenas un 7% su valor. Pero es con estos resultados que podemos concluir que la plasticidad del suelo se abate considerablemente, pues al llevar los valores obtenidos a la carta de Plasticidad, las propiedades del suelo se reducen llegando a alcanzar, para el caso de la mezcla de arcilla con el 10% del cloruro de calcio, que el material quede a la izquierda de la línea B de dicha carta, lo cual lo clasifica ahora como un suelo de mediana a baja compresibilidad y, al haberse disminuido su plasticidad, se tienen mejores condiciones que facilitan su compactación. Esta reducción en la plasticidad puede deberse a que, con el cloruro de calcio, se modifican los espesores de la película de agua adsorbida, y con ello las propiedades del suelo. El resultado no coincide con lo que la literatura existente al respecto establece de que no se abate la plasticidad, por lo que se recomienda no generalizar los resultados de una investigación en un tipo de suelo, sino hacerlo para cada tipo de material.
- b) El incremento en el peso volumétrico seco máximo es poco significativo con el cloruro de calcio (apenas del 8.4% con el 10% de la sal), así como también la disminución en el contenido de agua óptimo, que para éste mismo porcentaje de sal, se reduce del 33.5% al 27.5%. Es decir, no es aconsejable el uso del cloruro de calcio para incrementar la resistencia de la arcilla en estudio.
- c) El valor relativo de soporte saturado, no varía para porcentajes de hasta el 6% del cloruro de calcio y, con el 10% se incrementa el VRS hasta el 4.3%, lo que para fines prácticos (como su uso en la capa subrasante de un camino de primera importancia), resulta insuficiente.
- d) Por lo que respecta a las pruebas de compresión simple, la resistencia disminuye con el empleo de la sal, corroborando nuevamente que el cloruro de calcio no es recomendable para incrementar la resistencia de la arcilla expansiva procedente de Querétaro, debido esto, quizás, y como ya se mencionó anteriormente, a que el cloruro de calcio ocasiona en la arcilla, una estructuración de forma dispersa, lo que la hace menos resistente.

Por lo tanto, y como conclusión a los resultados obtenidos en el laboratorio al mezclar la arcilla expansiva de la ciudad de Querétaro con el cloruro de calcio, no es recomendable utilizar esta sal como aditivo, pues no se alcanza la resistencia mínima deseada para su uso como capa subrasante, ya que se requiere un VRS mayor del 10% de acuerdo a las normas vigentes en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, y una expansión máxima del 3%, situación que no se dio para ninguno de los porcentajes empleados del cloruro de calcio. Sin embargo, y dado que sí se abate considerablemente la plasticidad, podría utilizarse como pretratamiento en combinación con otro estabilizante, como la cal o el cemento, que sí incrementan la resistencia, pero habría que observar el comportamiento en cuanto a la expansión y, sobre todo, la factibilidad económica.

Los factores ambientales pueden influenciar a la resistencia última del suelo estabilizado, tanto como la calidad de los materiales a emplear. Una cantidad excesiva de lluvia puede alterar la efectividad de una estabilización pues podría, por ejemplo, lavar y percolar la sal adicionada a un suelo, o bien la existencia de aguas ácidas puede anular los efectos estabilizantes de un aditivo alcalino al quedar ambos en contacto. Por otro lado la temperatura ejerce también influencia en la velocidad de las reacciones químicas, razón por la cual debe tomarse en cuenta al elegir los métodos de estabilización en ciertas épocas del año. El perfecto conocimiento del funcionamiento y limitaciones del equipo disponible es de suma importancia, pues esto permitirá que el ingeniero pueda, a priori, eliminar ciertos productos que no resulten de aplicación práctica, pues, por ejemplo no sería de esperar un buen trabajo de estabilización si se quiere mezclar una arcilla plástica muy húmeda con cemento Portland, si para ello se cuenta solamente con arados de disco y motoconformadoras, ya que en este caso sería indispensable contar con sistemas de secado y pulverización.

Una vez seleccionado el método de estabilización, deberán establecerse las premisas de comportamiento con las que el suelo deberá cumplir, dependiendo de las propiedades que se desee obtener en el suelo estabilizado, pues se pueden tener casos en los que se quiera evitar la aparición de canalizaciones por fallas plásticas, o bien evitar el desarrollo de cambios volumétricos por cambios de humedad o el aumento de resistencia al desgaste, etc.

Por otro lado, el empleo de porcentajes altos de aditivos puede conducir a resultados desalentadores, pues además del costo, deben tenerse en cuenta otros factores que son de suma importancia, como la corrosión del equipo de construcción, riesgos para el personal que obliguen al empleo de equipos de protección, la existencia de sustancias agresivas a la mezcla estabilizada, etc., factores estos que pueden alterar no solo los costos, sino también el resultado a largo plazo.

Un uso práctico que recientemente se le ha dado al cloruro de calcio en caminos⁷ ha sido en los modestos caminos revestidos de un solo carril con el propósito de comunicar pequeñas comunidades, cuya función socioeconómica es muy importante para el medio rural.

Siguiendo en la mayoría de los casos a lo largo del camino la configuración natural del terreno, y formando la sección transversal de las terracerías con el producto extraído lateralmente de la excavación de las cunetas, las terracerías finalmente se cubren con un revestimiento de 20.0 centímetros de espesor en estado suelto, y es la acción del tránsito y las lluvias que les proporciona algún acomodo y una relativa compactación.

Esta parte de la estructura es la más afectada, dado que cuando el tiempo es seco, el movimiento de los vehículos y los vientos, ocasionan que los finos sean removidos fuera del camino, dando como resultado que, a corto plazo, el revestimiento ya tenga una granulometría defectuosa y su estado suelto se torna incómodo al tránsito sobre el camino.

Cuando se presentan las lluvias, una parte de ese revestimiento suelto se encuentra en las cunetas, propiciando que el agua tenga que correr por la superficie de rodamiento, produciendo deslaves que estrechan la sección, todo lo cual origina daños considerables que requieren una inmediata reparación para hacerlo transitable nuevamente. Lo anterior ocasiona incrementos muy considerables en los presupuestos de conservación ya que actualmente se tienen 208,000 km. revestidos o brechas.⁸

En el estado de Nuevo León, una industria producía el cloruro de calcio en forma líquida con una concentración del 38%, y se decidió hacer aplicaciones experimentales en algunos caminos rurales que se construían en el Municipio de Mina, N. L.

Los trabajos se iniciaron haciendo aplicaciones por medio de riegos superficiales, utilizando auto-tanques, variando la dosificación por metro cuadrado.

⁷ Arroyo García Zenón. "Empleo del calcio en la consolidación de materiales". VII Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres; pp. 233 - 235.

⁸ Ortiz Ramírez, Omar. "La construcción de carreteras en México", XIII Reunión Nacional de Vías Terrestres, pag. 87.

Realizadas las aplicaciones, se observaron periódicamente los tramos tratados por espacio de 12 meses y los resultados indican que en la sección donde se dio el tratamiento con el cloruro de calcio, el terreno se encontró más cerrado y uniforme, hay una menor dispersión de los materiales en la prueba de sondeo, los trozos de material extraído del terreno son más grandes y densos, debido a la consistencia adquirida y ocasionada por la conservación de la humedad a raíz del uso del cloruro de calcio.

La ligera humedad que proporciona el cloruro de calcio al material fino, actúa como lubricante sobre las partículas y las hace adquirir posiciones más estables bajo la acción del tráfico; los suelos se van consolidando más a medida que el tiempo pasa, de esta forma el material fino, conservado por la humedad, actúa como cementante sobre los materiales gruesos evitando el desplazamiento de los mismos.

Para garantizar la efectividad del cloruro de calcio en este tipo de caminos, se requiere que los materiales contengan por lo menos 40% de partículas que pasan la malla de 4.76 milímetros, debido a que el cloruro de calcio actúa únicamente sobre éstas.

Esparcido el cloruro de calcio, empieza a tomar humedad de la atmósfera, iniciándose el proceso de licuación hasta quedar diluido totalmente a las cuatro o cinco horas después de la aplicación.

Al día siguiente el camino presenta un aspecto húmedo, disminuyendo la pérdida de finos y dispersión del revestimiento.

Para la conservación de un camino, el cloruro de calcio deberá aplicarse por lo menos una vez al año, disminuyendo la dosificación en cada aplicación.

Además de haberse utilizado en el estado de Nuevo León, este producto se ha aplicado en caminos rurales de los Estados de Coahuila, Tamaulipas, Michoacán y Zacatecas.

Finalmente, y a manera de resumen, se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio de la estabilización con cal, sal común, pretratamiento de cal y tratamiento con cemento Portland, de las arcillas activas de la ciudad de Querétaro que se realizaron mediante trabajos de tesis profesionales, conducidas por el M. en I. Gabriel García Altamirano. Para tener un punto de comparación, se incluyen los resultados registrados en este trabajo empleando el cloruro de calcio.

Realizadas las aplicaciones, se observaron periódicamente los tramos tratados por espacio de 12 meses y los resultados indican que en la sección donde se dio el tratamiento con el cloruro de calcio, el terreno se encontró más cerrado y uniforme, hay una menor dispersión de los materiales en la prueba de sondeo, los trozos de material extraído del terreno son más grandes y densos, debido a la consistencia adquirida y ocasionada por la conservación de la humedad a raíz del uso del cloruro de calcio.

La ligera humedad que proporciona el cloruro de calcio al material fino, actúa como lubricante sobre las partículas y las hace adquirir posiciones más estables bajo la acción del tráfico; los suelos se van consolidando más a medida que el tiempo pasa, de esta forma el material fino, conservado por la humedad, actúa como cementante sobre los materiales gruesos evitando el desplazamiento de los mismos.

Para garantizar la efectividad del cloruro de calcio en este tipo de caminos, se requiere que los materiales contengan por lo menos 40% de partículas que pasan la malla de 4.76 milímetros, debido a que el cloruro de calcio actúa únicamente sobre éstas.

Esparcido el cloruro de calcio, empieza a tomar humedad de la atmósfera, iniciándose el proceso de licuación hasta quedar diluido totalmente a las cuatro o cinco horas después de la aplicación.

Al día siguiente el camino presenta un aspecto húmedo, disminuyendo la pérdida de finos y dispersión del revestimiento.

Para la conservación de un camino, el cloruro de calcio deberá aplicarse por lo menos una vez al año, disminuyendo la dosificación en cada aplicación.

Además de haberse utilizado en el estado de Nuevo León, este producto se ha aplicado en caminos rurales de los Estados de Coahuila, Tamaulipas, Michoacán y Zacatecas.

Finalmente, y a manera de resumen, se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio de la estabilización con cal, sal común, pretratamiento de cal y tratamiento con cemento Portland, de las arcillas activas de la ciudad de Querétaro que se realizaron mediante trabajos de tesis profesionales, conducidas por el M. en I. Gabriel García Altamirano. Para tener un punto de comparación, se incluyen los resultados registrados en este trabajo empleando el cloruro de calcio.

En todos los casos se cuidó de no quemar la materia orgánica, por lo que la temperatura a las que se sometieron las muestras en el horno fue del orden de los 60°. Las pruebas cuya preparación varió entre 24 y 72 horas se denominarán en lo sucesivo a corto plazo.

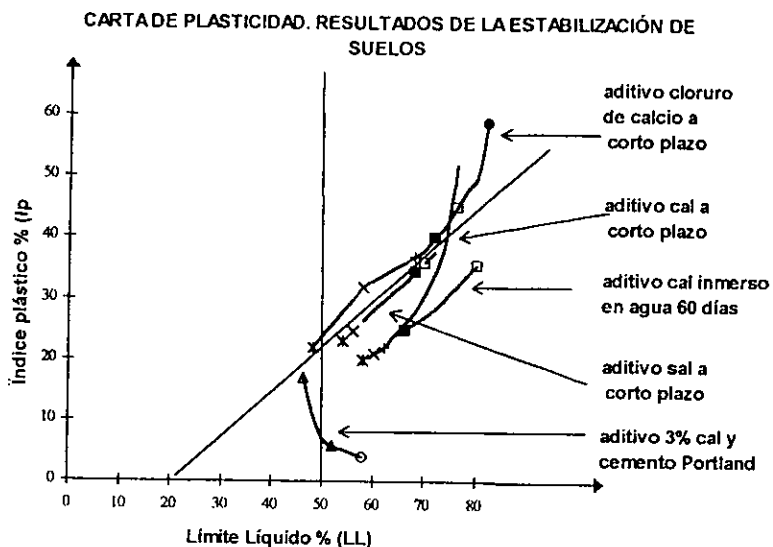
ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Propiedades índice

A.1 Granulometría.- El análisis granulométrico indicó que el 98.77% pasaba la Malla No. 200 (7.4×10^{-5} m), es decir, se trata de un suelo esencialmente fino.

A.2 Plasticidad.- Como se puede observar en la siguiente figura, al agregarle distintos aditivos el resultado fue el siguiente:

- El comportamiento suelo - cal a corto plazo indica que a mayor porcentaje de aditivo menor plasticidad, sin embargo, con el tiempo y sumergida la muestra en agua durante sesenta días, la plasticidad vuelve a incrementarse pero no en la misma magnitud que en estado natural, lo cual se puede interpretar como que se logró en algún porcentaje el intercambio iónico y al hacer la preparación para determinar los límites de consistencia se destruye la cementación que da la cal y se modifica la estructura.
- Por lo que respecta a la sal común se abate la plasticidad pero en forma moderada, pues el intercambio iónico fue muy pobre, pues en la mezcla así formada aparecían todavía cristales de sal.
- La mezcla hecha con el pretratamiento de 3% de cal y diferentes porcentajes de cemento Portland fue la que dio mejores resultados, y se puede afirmar que con un 3% de cemento Portland la plasticidad se abate considerablemente, pasando a ser un limo prácticamente de baja plasticidad.



B. Resistencia

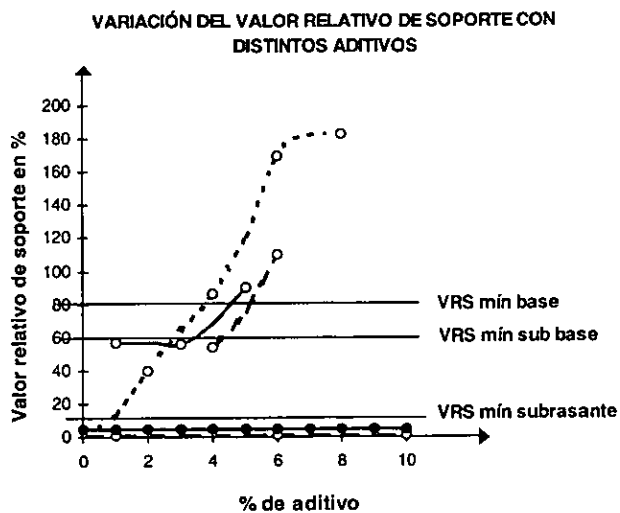
Para conocer la variación de la resistencia al esfuerzo cortante se analizaron varios parámetros como son:

B.1 Valor relativo de soporte estándar.- En la figura que se muestra a continuación, se puede observar que el valor relativo de soporte sin aditivos es del orden del 2%, sin embargo al agregárseles aditivos, se tienen las siguientes variaciones:

Al adicionar cal a corto plazo, este valor aumenta hasta 184% para un 8% de cal, pero al sumergirlo durante sesenta días disminuye su valor relativo de soporte; por ejemplo pasa de 176% a corto plazo a 114% después de sumergirlo en agua durante sesenta días con un 6% de cal, una cosa semejante sucede con el 4% de cal; sin embargo, se puede afirmar que la cal no se lavó y actuó como cementante, por ejemplo para un 4% de cal se puede usar como subrasante y/o sub-base y para un 6% de cal, se puede emplear hasta para base.

Una cosa semejante sucede con la pre - estabilización con cal y estabilización con cemento Portland, en este caso la sal se usó para abatir la plasticidad y hacer más manuable el material, y el cemento se usó como tal; la trayectoria que se obtuvo indica que con un 3% de cal y porcentajes variables entre 1 y 5% de cemento Portland, se pueden usar estas mezclas para sub-bases y bases.

Por lo que respecta a la mezcla con sal, el valor relativo de soporte no registró cambio alguno.

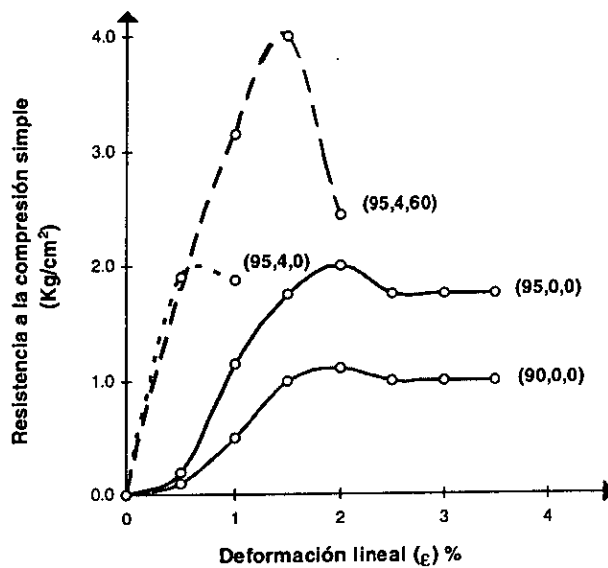


NOMENCLATURA

SIMBOLO	PRETRATAMIENTO	ADITIVO	INMERSIÓN EN AGUA
---○---	ninguno	cal	ninguna
—○—	3% cal	cemento Portland	ninguna
—○—	ninguno	cal	sesenta días
---○---	ninguno	sal común	ninguna
—●—	ninguno	cloruro de calcio	ninguna

B.2 Resistencia a la compresión simple.- En la siguiente figura se dan los resultados obtenidos. Se puede observar que el material sin aditivo, compactado al 90% ó al 95% de su peso volumétrico seco máximo en prueba Próctor, tuvo un comportamiento del tipo plástico; en cambio al agregarle cal, el comportamiento es del tipo frágil. Sin embargo, se puede afirmar, para este caso, que al estar sumergida la muestra en agua durante sesenta días con un 4% de cal, al labrar la muestra y probarla, la resistencia varía de 1.82 Kg/cm² en condiciones iniciales a 4.35 Kg/cm² en condiciones finales, es decir, se incrementa un 239% debido a que existe un curado de la muestra al estar sumergida en agua durante 60 días, aunque la estructura del material se vuelve rígida, por lo que en caso de emplear estos materiales para formar diferentes capas de pavimento se debe tener cuidado de que se apoyen sobre materiales que no tengan grandes deformaciones puesto que no pueden trabajar a la tensión y se agrietarían.

RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE
BAJO DIFERENTES CONDICIONES



NOMENCLATURA

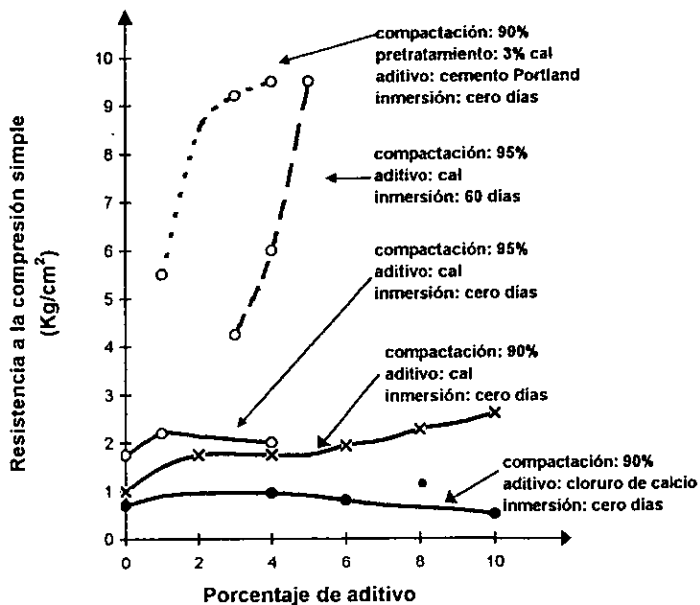
(a, b, c)

a - grado de compactación

b - % de cal

c - tiempo de inmersión en días

VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE CON DIFERENTES TIPOS DE ADITIVOS



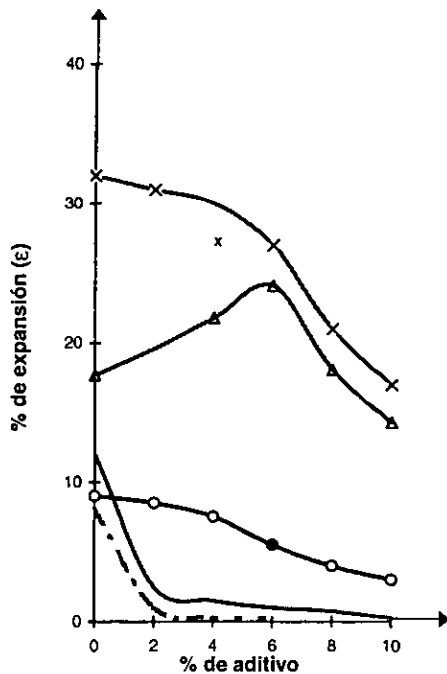
En la figura anterior, se encuentra la evolución de la resistencia a la compresión simple bajo diferentes condiciones y con distintos aditivos en la que se puede observar lo siguiente:

- Para condiciones a corto plazo con cal, se encuentra que a medida que se incrementa el porcentaje de ésta, aumenta la resistencia a la compresión simple.
- Para condiciones a mediano plazo, estando los especímenes sumergidos en agua, la muestra se cura y la resistencia a la compresión simple aumenta asintóticamente, al grado de que para un 6% de cal y 95% de compactación, alcanza un valor de 9.7 Kg/cm² que representa las condiciones a mediano plazo en las cuales puede estar sujeta en la realidad.
- Una cosa semejante sucede con el pretratamiento de cal y usando como aditivo cemento Portland a corto plazo, la muestra nuevamente se vuelve a curar, incrementando considerablemente su resistencia aún con pequeños porcentajes de cemento Portland.

C. Deformabilidad

Para determinar los cambios volumétricos, se hizo la prueba de expansión libre y de saturación bajo carga, con la humedad correspondiente al 90 ó 95% de compactación, respectivamente, y se le agregó agua hasta lograr la saturación del material, dejando la muestra el tiempo necesario hasta que ya no registrara deformaciones. Los resultados se muestran gráficamente en la siguiente figura.

RESULTADOS DE EXPANSIVIDAD BAJO DIFERENTES
CONDICIONES DE CARGA Y CON DISTINTOS
PORCENTAJES DE ADITIVOS



NOMENCLATURA				
SIMBOLO	PRETRATAMIENTO	GRADO DE COMPACTACIÓN	ADITIVO	OBSERVACIONES
————	ninguno	90%	cal	expansión libre
— · —	ninguno	95%	cal	presión de 0.1Kg/cm ²
—X—	ninguno	95%	sal	expansión libre
- - - -	3% cal	95%	cemento	no registró movimientos
—○—	ninguno	95%	sal	presión de 0.1Kg/cm ²
—△—	ninguno	90%	cloruro de calcio	expansión libre

De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Sin aditivo y sin carga a mayor grado de compactación mayor expansión, pues al 95% la expansión fue del 32.5% y al 90% registró un valor de 11.5%.
- Agregándole al suelo cal y compactándolo al 90% la expansión se abate considerablemente, los grados de saturación que se alcanzaron fueron del 100% y la mezcla se dejó en el consolidómetro hasta que no registrara cambios volumétricos.
- Si ahora al suelo se le agrega cal, se compacta al 95% pero se le pone una presión de 0.1 Kg/cm², y se deja saturar, la expansión es menor que en el caso anterior.
- La mezcla suelo sal común abate la expansión pero no en las condiciones deseadas, pues compactada al 95% sin sobrecarga, disminuye cuando mucho hasta el 16% y, con una presión de 0.07 Kg/cm², llega al 2%.
- Las pruebas que se hicieron con la mezcla suelo - cemento no registraron cambios volumétricos.

Las conclusiones a las que se llegó en toda esta investigación, son las siguientes:

1. El intercambio iónico no se logró en su totalidad porque no se disgregó el material hasta la Malla No. 200 ($7.4 \times 10^{-5}m$), pues resulta impráctico hacerlo en el campo con el equipo disponible, sólo se llegó a disgregar el material hasta la malla No. 4 ($4.76 \times 10^{-3}m$); sin embargo, para propiciar la reacción química se dejó reposar el material con la humedad necesaria entre uno y tres días, lo que se denominó a corto plazo, y se preparaban las muestras con cal y se sumergían en agua durante sesenta días para los ensayos denominados a mediano plazo.

2. En las mezclas suelo - cal se lograba un intercambio iónico y una cementación; en cambio para la mezcla suelo - sal común (cloruro de sodio) se propiciaba un intercambio iónico pobre.

3. Los aditivos usados abatieron la plasticidad de la arcilla expansiva. En el inciso A.2 se puede ver que la mezcla 3% de cal y 3% de cemento Portland fue la que dio mejores resultados, la cal también da buenos resultados encontrándose un óptimo entre 4% y 6%. La sal común (cloruro de sodio) fue la que dio los resultados más pobres.

4. Al sumergir la muestra compactada y estabilizada con cal en agua, durante sesenta días no se lavó la cal, sino que la muestra se curó, pudiéndose usar para subrasante, sub-base o base, dependiendo del porcentaje de cal.

La resistencia al esfuerzo cortante en compresión simple unidimensional tiende a incrementarse, siendo el porcentaje óptimo de cal el del 6%.

5. La mezcla suelo, 3% de cal y de 1% a 5% de cemento Portland, adquiere valores relativos de soporte adecuados para sub-base o base.

6. El comportamiento de los materiales estabilizados es del tipo de falla frágil a diferencia del comportamiento plástico que tiene el material sin aditivo.

7. Respecto a la expansión que se produce, al saturar la muestra con distintos aditivos, se puede afirmar que la cal la minimiza y que si se le aplica una presión de 0.1 Kg/cm^2 , se tienen expansiones todavía más pequeñas, la mezcla suelo - cal - cemento no tiene cambios volumétricos y la mezcla suelo -sal común no se recomienda para evitar la expansión.

8. Se puede concluir que los resultados obtenidos en el laboratorio, fundamentan el uso de arcillas expansivas con aditivos como la cal, y el cemento pues, para este caso, produce materiales de calidad y resistencia semejantes a los que tradicionalmente se usan para subrasantes, sub - bases y bases para pavimentos; respecto a la sal común (cloruro de sodio) y el cloruro de calcio, sólo se recomiendan para abatir la plasticidad. Por otra parte, con el fin de evitar los cambios de humedad se sugiere que la sección estructural siempre se arrope.

REFERENCIAS

- 1 Ingles O. G. Metcalf. "Soil Stabilization. Principles and Practice". Butterworths, Sidney, 1972.
- 2 Fernández Loaiza, Carlos. "Mejoramiento y Estabilización de Suelos", México. Limusa, 1982. 1ª Edición, 392 pág. ilus.
- 3 Universidad Autónoma de Chihuahua. "Memorias del Primer Congreso Internacional de Vías Terrestres". Chih., Méx., 1997. 1ª Edición, 393pág. ilus.
- 4 Public Road Administration. "The use of calcium chloride in the construction and maintenance of roads". Washington, D.C., Calcium Chloride Assn., Reprint No. 181.
- 5 Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. "Memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos" Tomo III. Guanajuato, Mèx., 1976. 1ª Edición, 153 pág. ilus.
- 6 Arroyo García, Zenón. "Empleo del calcio en la consolidación de materiales". Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, VII Reunión Nacional, 1974.
- 7 Ortiz Ramírez, Omar. "La Construcción de Carreteras en México". Asociación Mexicana de Vías Terrestres, XIII Reunión Nacional; Oaxtepec, Méx., 1998. 1ª Edición, 413 pág. ilus.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso. "Mecánica de Suelos", tomo I. México, Limusa, 1991. 5ª Edición. 642 pág. ilus.
2. L. Don Leet y Sheldon Judson. "Fundamentos de Geología Física". México, Limusa, 1975. 2ª Edición, 455 pág., ilus.
3. Terzaghi, Karl y Peck, Ralph. "Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica". España, El Ateneo, 1980. 2ª Edición, 722 pág., ilus.
4. Israel, Robert. "Estabilización de suelos y reutilización de mezcla en frío". U.S.A., Empresa Bomag, 1990. S.E, 79 pág., ilus.
5. Naytional Lime Association "Manual de construcción para estabilización con cal". U.S.A., s. edit., 1992. 7ª Ed. 46 pág., ilus.
6. Kirk, Raymond; otros. "Enciclopedia de Tecnología Química". Tomo III. México, UTHEA, 1961. 1047 pág. ilus.