

**TESIS CON  
FALLAS DE ORIGEN**

158



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS  
ARCILLOSOS UTILIZANDO CAL**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
*INGENIERO CIVIL***

**P R E S E N T A:  
EDUARDO MANUEL PUENTE TAMAYO**

**MEXICO, D. F.**

**1986**



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

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

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

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

# ESTUDIO DE LA ESTABILIZACION DE SUELOS

## ARCILLOSOS UTILIZANDO CAL

	PAG.
I).- GENERALIDADES.	1
II).- CLASIFICACION DE ARCILLAS.	8
a) Introducción.	8
b) Uso del Microscopio Electrónico.	15
c) Difracción de Rayos X.	20
d) Análisis Térmico Diferencial.	26
III).- ARCILLAS EXPANSIVAS.	35
a) Mineralogía.	35
b) Reacción de los Minerales Arcillosos en contacto con el agua.	45
c) Características Geotécnicas.	51
IV).- ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON CAL.	56
a) Tipos de Cales.	56
b) Reacciones Suelo-Cal.	61
c) Variación de las propiedades de una ar- cilla con la adición de cal.	71
d) Procedimiento de Construcción.	71
V).- SUELOS ESTUDIADOS.	78
VI).- TRABAJO REALIZADO.	87
a) Estudio Mineralógico.	87
- Microscopio Electrónico.	
- Difracción de Rayos X.	
b) Estudio Geotécnico.	95
- Evolución de la Resistencia.	
- Evolución de los límites de Consistencia.	
- Evolución del Valor relativo de soporte.	
- Evolución de la expansión.	
VII).- CONCLUSIONES.	112

## 1).- GENERALIDADES:

El problema de las arcillas expansivas, se ha manifestado como causante de fallas y problemas estructurales, que representan en todo el mundo un reto para la ingeniería. Los problemas causados por este tipo de suelos, están relacionados con cimentaciones, revestimientos de canales, obras hidráulicas, terraplenes de carreteras, etc.

Los daños que este tipo de suelos causan a estructuras desplantadas sobre ellos, ocasiona pérdidas materiales que en muchos casos son de mucha consideración. Pongamos como ejemplo de lo mencionado, una estadística dada por la American Society Of Civil Engineering en 1973 donde según su estudio, los daños causados por las arcillas expansivas en los Estados Unidos, fueron mayores que los daños causados por la acción de inundaciones, huracanes, sismos y tornados.

Para poder solucionar de una manera adecuada el problema de estos suelos, en los últimos 20 años se han realizado una mayor investigación orientada a comprender mejor la naturaleza de las arcillas expansivas. Las Instituciones Académicas, han sido las que en su mayoría han logrado los mayores avances en el estudio de las arcillas referidas principalmente a su mineralogía, estructura y modificación de estructura, buscando lograr un mejor comportamiento del suelo.

En lo que se refiere al problema de las arcillas expansivas en campo, se ha puesto más atención en el criterio de diseño y los procedimientos de construcción para ofrecer soluciones prácticas y económicas a los clientes, buscando que las estructuras estén libres de movimientos de falla.

En la República Mexicana, existen muchos suelos con características expansivas, que por lo tanto, no son adecuados para desplantarse sobre ellos una estructura. Por ello, el ingeniero deberá tomar una decisión que puede ser alguna de las siguientes:

- Utilizar el material como está, realizando un diseño de este acuerdo a las condiciones y restricciones de los materiales.
- Cambiar el suelo y desecharlo, sustituyéndolo por un suelo adecuado a las características que deba satisfacer.

- Alterar ó cambiar las propiedades del material existente de tal manera que se obtenga un material que reúna en mejor forma los requisitos impuestos, ó cuando menos que la calidad obtenida sea adecuada.

El objeto de este trabajo va encaminado a utilizar la tercera alternativa.

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

Para poder alterar las condiciones y características de una arcilla expansiva por medio de la adición de agentes estabilizadores, debemos tener en cuenta la gran variabilidad de los suelos, por lo cual, un método determinado de estabilización resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos.

Debemos recordar que la estabilización por algún método, nos ayuda a cambiar y mejorar algunas características de las arcillas, pero no forzosamente mejorará todas las características, por lo tanto, debemos tener muy presente las características del suelo que queremos cambiar, para seleccionar el tipo de estabilizante a utilizar.

Entre las características del suelo que deben interesar a un ingeniero para evaluarlo, tenemos las siguientes:

- 1.-Resistencia Mecánica.
- 2.-Estabilidad Volumétrica.
- 3.-Durabilidad.
- 4.-Comprensibilidad.
- 5.-Permeabilidad.

Como se verá más adelante, la estabilización de suelos con la adición de cal puede mejorar varias de estas propiedades en forma simultánea.

Mencionaremos las principales características de cada propiedad anunciadas anteriormente.

### Resistencia Mecánica:

Se sabe generalmente que la resistencia de los suelos, salvo en algunas excepciones, es generalmente más baja -- cuando estos se encuentran en estado húmedo. Los suelos arcillosos al secarse alcanzan grandes resistencias, teniendo incluso su condición de resistencia más alta -- cuando se calienta a temperaturas muy altas como sucede -- con los tabiques y ladrillos.

Como se mencionó anteriormente, existen casos donde -- la pérdida de humedad de un suelo le trae como consecuencia una disminución de sus resistencias, provocando con ésto que el comportamiento del material sea el de un suelo friccionante que tiene menos resistencia que un suelo cohesivo que será éste, si la humedad fuera mayor.

De lo anterior se concluye, que al decidir sobre el -- uso de algún agente estabilizante, debe tenerse muy en -- cuenta el fin que se busca, y las condiciones en las cuales el suelo se encuentra.

Debe sin embargo, tenerse muy en cuenta, que en general el agua ablanda los suelos cohesivos, razón que obliga a que cuando se quiera tener una resistencia que permanezca con el tiempo en el suelo arcilloso, se propicie el adecuado drenaje.

Los agentes estabilizantes que sirven para transformar un suelo fino en una masa rígida ó granular, nos permiten con ésto, mejorar la resistencia de estos suelos finos. -- Estos agentes pueden ser químicos ó térmicos, teniendo entre los primeros el Cemento Portland y la Cal como los -- más comunes.

### Estabilidad Volumétrica:

La mayoría de los suelos sufren contracciones y expansiones, debido a cambios de humedad que se pueden presentar en forma rápida ó acompañados de las variaciones sufridas por los cambios de estación.

Si las presiones de expansión se desarrollan debido a -- un incremento en la humedad, esta expansión no se podrá -- controlar en forma alguna, y por consecuencia levantarán pavimentos, inclinarán postes, fracturarán muros, romperán tubos de drenaje, etc. Por ésto, es importante saber como reaccionará un suelo para que, con la ayuda de algún -- tratamiento se pueda evitar lo anterior.

Actualmente las formas para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos, consisten en: introducir al suelo - en forma periódica humedad, aplicando cargas que equilibren la presión de expansión, utilizar membranas impermeables y/o apoyar la estructura a profundidades tales, que no se registre variación de la humedad con los cambios de estación. Otra forma de evitar los problemas de la expansibilidad de las arcillas, consiste en cambiar dicha arcilla en una masa rígida ó granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión de expansión interna, lo cual puede lograrse por medio de la estabilización química ó térmica, una de las cuales puede ser la estabilización con cal del suelo.

En los casos en los cuales se decida la estabilización con cal y la capa que se estabilice sea pequeña, deberá tenerse en cuenta que el suelo subyacente es aún susceptible de expansión, pero estos movimientos serían permisibles cuando la capa estabilizada se moviera en forma uniforme.

#### Durabilidad:

Se puede definir la durabilidad como la resistencia de un suelo a los procesos de intemperización, erosión y abrasión. Esta característica es la deseada para cualquier suelo.

En los suelos estabilizados la durabilidad baja, se debe en general a un diseño inadecuado que puede tener su origen en la elección del estabilizante empleado, por ejemplo, cuando se utiliza cal como agente estabilizador de una arcilla con la cual no reacciona favorablemente, también puede deberse a una resistencia inadecuada contra los ataques de agua, o agentes químicos, ó una cantidad insuficiente de estabilizante.

Uno de los problemas que tienen los estudios de la estabilización de suelos, es la carencia de pruebas, que certifiquen la durabilidad del proceso de estabilización.

La durabilidad es pues, uno de los aspectos más difíciles de cuantificar y la tendencia general ha sido la de sobre diseñar, lo cual en ocasiones puede ser incorrecto.

La resistencia a los efectos del tránsito, pueden mejorarse mucho mediante la estabilización, pero existen problemas, como por ejemplo la formación de polvo suelto en caminos revestidos, en donde es difícil tener una solución económica.

### Comprensibilidad:

Los cambios en volumen ó comprensibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades ingenieriles de los suelos, pues modifican la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes sobre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo cual tiene una gran importancia debido a que modifica la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos.

Se ha encontrado también que la humedad de compactación tiene una gran importancia en la comprensibilidad de los suelos compactados, pues si se compactan dos especímenes al mismo peso volumétrico, pero uno de ellos del lado seco de la curva de peso volumétrico contra humedad y el otro del lado húmedo, se tendrá que para presiones de consolidación bajas, el espécimen compactado del lado húmedo será más comprensible, debido a que la estructura se encuentra más dispersa, pero para grandes presiones se tienen colapsos y reorientaciones en la estructura del espécimen que se encuentra del lado seco, lo cual provoca que ahora sea éste el más comprensible.

### Permeabilidad:

El flujo de agua através del suelo y la disipación de las presiones de poro, son los dos problemas básicos que se plantean en terminos generales al hablar en relación a la permeabilidad de un suelo.

El tener un flujo de agua estable en el suelo, puede provocar tubificaciones y arrastres, mientras que el tener presiones de poro excesivas, puede originar deslizamientos en terracería.

Si se compacta una arcilla con humedad muy baja, ó prácticamente seca se obtendrá finalmente una alta permeabilidad en el suelo, debido a que los grumos no se disgregan, permitiendo así que se formen una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la humedad en un suelo arcilloso, la compactación producirá menores permeabilidades al suelo compactado, ya que éste tiene mayor oportunidad de deformarse, eliminándose así grandes vacíos, como se puede ver en la figura 1.1.

En esta figura, se puede observar que a medida que la humedad de un suelo arcilloso se acerca a la humedad óptima, la permeabilidad de dicho suelo es menor.

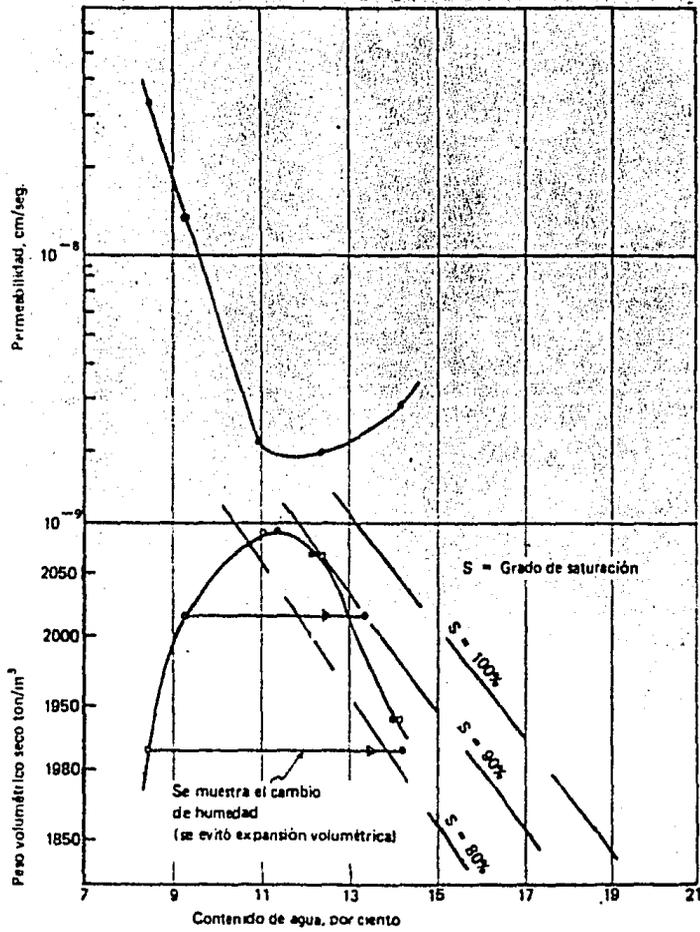


Figura I.1. PRUEBAS DE COMPACTACION Y PERMEABILIDAD EN ARCILLA.

Al excederse la humedad del valor óptimo, comienza a ser mayor su permeabilidad, ésto se debe a que al compactar al suelo con mayor humedad de la óptima, el agua de compactación llena espacios que ocupan las partículas de suelo cuando la humedad es cercana pero inferior a la óptima, aún cuando se encuentren orientadas sus partículas.

Los métodos de estabilización para modificar la permeabilidad de un suelo, no necesariamente mejoran su estabilidad volumétrica ó resistencia mecánica y en algunos casos puede inclusive resultar contraproducentes en estos aspectos. Por lo cual, se debe tener muy en cuenta al seleccionar el método ó agente de estabilización que este mejore las características del suelo en los aspectos que nos interesan.

Concluyendo, el diseño de la estabilización con agentes estabilizadores, consiste en primer término, en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo con base en lo cual se determina el tipo y cantidad de agente estabilizante, así como su procedimiento para efectuar dicha estabilización.

El método de diseño depende del uso que se pretende dar al suelo estabilizado.

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 a sus conocimientos técnicos y prácticos, llevando a cabo un estudio racional y detallado de la variación de las características del suelo, con la aplicación de la estabilización propuesta.

## II).- CLASIFICACION DE ARCILLAS:

### a) INTRODUCCION:

Aunque los suelos están compuestos de partículas individuales y grupos de partículas, una masa de suelo casi siempre es tratada con una continuidad para propósitos de análisis y diseño. Esto no es sorprendente, porque adecuar teorías de mecanismos particulares, no es posible, debido a la directa caracterización de propiedades como: esfuerzo, permeabilidad, complejibilidad y módulo de deformación. Sin embargo, el valor de las propiedades que son escogidas para el uso de teorías de continuidad de mecanismo de suelo, son controladas directamente por las características de la partícula, sus arreglos y sus fuerzas entre ellas.

Así para entender las propiedades de un suelo, se requiere la consideración de estos factores.

Los arreglos de las partículas en los suelos, permanecieron desconocidas hasta el desarrollo de técnicas adecuadas ópticas, la difracción de rayos X y técnicas de microscopia electrónica, hicieron posible la observación directa a mediados de los 50.

Después el interés se centró principalmente en el arreglo de las partículas de arcilla, y las relaciones de sus propiedades mecánicas. A fines de los años 60, la investigación se aceleró significativamente, impulsada por la utilización de preparación de muestras y estudio, con una mayor contribución surgida del desarrollo del "microscopio electrónico explorador".

El extenso número de estudios de textura en los años recientes, la variedad y complejidad de suelos (texturas) que se han observado, ha tenido como consecuencia una proliferación de términos para la descripción de textura y características de textura. Es conveniente describir las características de textura en términos de la forma y función de las unidades.

La asociación de partículas en suspensiones de arcilla son descritas como sigue:

- 1) Dispersas. No asociación cara a cara de las partículas de arcilla.
- 2) Agregado. Asociación cara a cara de varias partículas de arcilla.

- 3) Floculado. Asociación corte a corte ó corte a cara de agregados.
- 4) Defloculada. No asociación entre agregados.

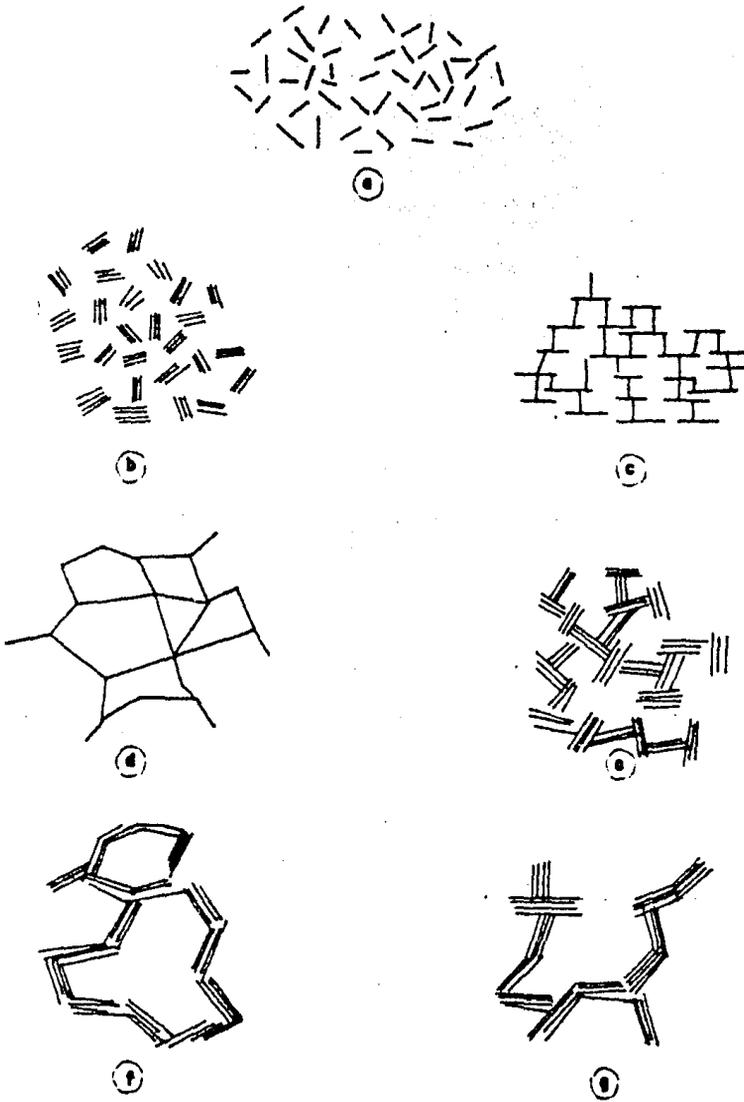
La Asociación de Partículas en sedimentos, suelos residuales y arcillas compactadas, asume una variedad de -- formas, pero la mayoría de ellas están relacionadas con la configuración mostrada en la Figura II.a. 1. y refleja la diferencia de contenido de agua entre una suspensión y una masa de suelo más densa. Tres grandes grupos pueden ser identificados:

- 1) Arreglos elementales de partículas. Formas sencillas de interacción de partículas al nivel de arcillas individuales, sedimento ó partículas de arena.
- 2) Ensamblaje de Partículas. Organización de unidades de partículas teniendo límites definibles y una función mecánica específica, la cual consiste en una ó más formas de arreglos elementales de partículas ó ensamblajes de partículas más pequeñas.
- 3) Espacios - Poros. Las representaciones esquemáticas de la composición de los suelos en cada uno de estos tres casos son mostrados en las Figuras II.a.2., -- II. a 3., II. a. 4.

Las características mostradas en las figuras anteriormente mencionadas, deben ser suficientes para describir la mayoría de las texturas.

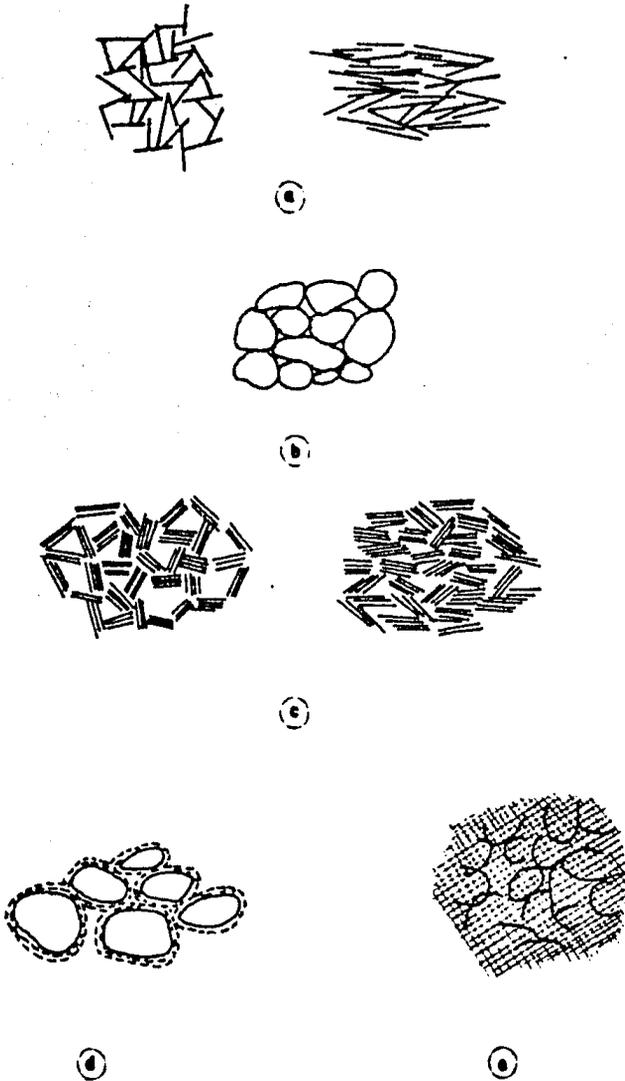
Una gran variedad de métodos, ya sean directos ó indirectos, han sido utilizados para estudiar las estructuras y las características de las estructuras en los suelos. La figura II. a. 5. es un diagrama esquemático ilustrativo, el cual resume los métodos para el análisis de la composición y estructura de suelos, el cual utiliza varias partes del espectro electromagnético.

Los métodos de la microscopía electrónica y óptica, di fracción de rayos X, y el análisis térmico diferencial, -- ofrecen las ventajas de proveer datos directos y no ambiguos en características de estructuras específicas, suponiendo que las muestras estudiadas son representativas y que el método de preparación de la muestra no ha destruído la estructura original. Estas técnicas están limitadas



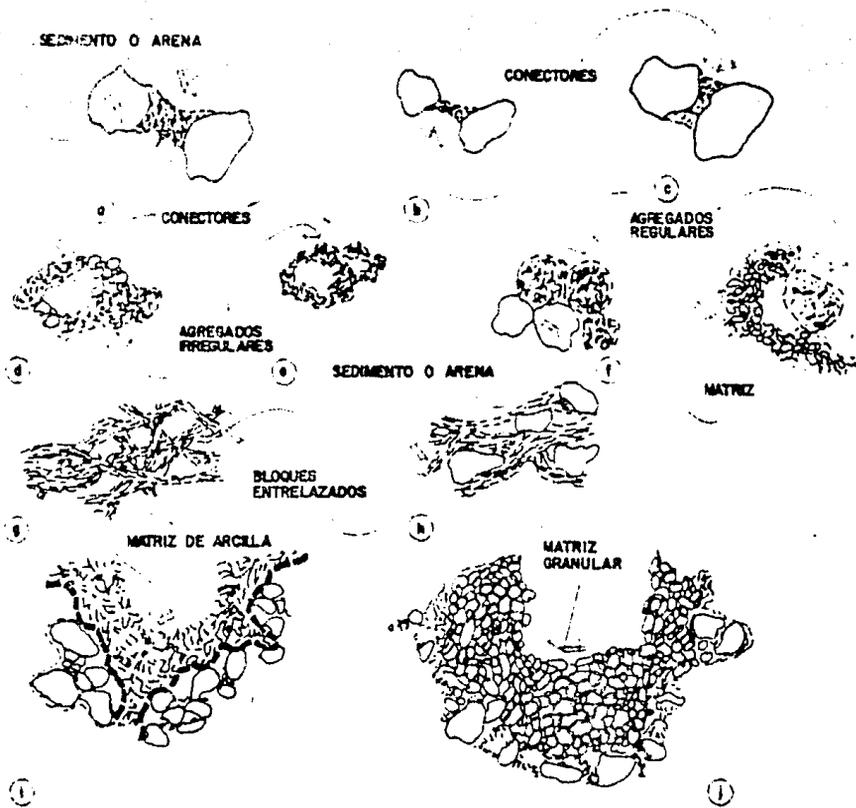
**FIG. II. A. I. MODOS DE ASOCIACION DE PARTICULAS EN SUSPENSIONES DE ARCILLA.**

- a) Dispersa y Defloculada.
- b) Agregada pero defloculada.
- c) Corte a Corte, pero dispersa.
- d) Corte a Corte flocculada pero dispersa.
- e) Corte a Cara flocculada y agregada.
- f) Corte a Corte flocculada y agregada.
- g) Corte a Cara y corte flocculada y agregada.



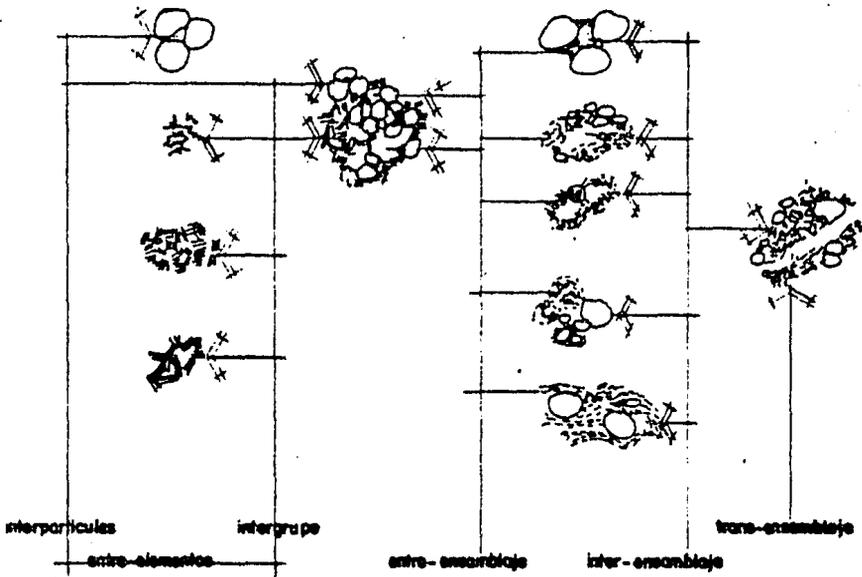
**FIG. 11.A.2. REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DE ARREGLOS ELEMENTALES DE PARTICULAS.**

- a) Interacción en láminas de arcillas individuales.
- b) Sedimento individual ó interacción de partículas de Arena.
- c) Interacción de grupo de arcillas laminadas.
- d) Sedimento cubierto ó interacción de partículas de Arena.
- e) Interacción de partículas parcialmente discernibles.



**FIG. 11.A.3. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE ENSAMBLAJES DE PARTICULAS.**

- a) Conectores.
- b) Conectores.
- c) Conectores.
- d) Agregados irregulares por ensamblajes de conectores.
- e) Agregados irregulares en un panel.
- f) Agregado regular interactuado. con matriz de partículas.
- g) Entrelazamiento de bloques de arcilla.
- h) Entrelazamientos de bloques de arcilla con incursiones de sedimentos.
- i) Matriz de partículas arcillosas.
- j) Matriz de partículas granulares.



**FIG. II.A.4. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE TIPOS DE ESPACIOS ENTRE POROS.**

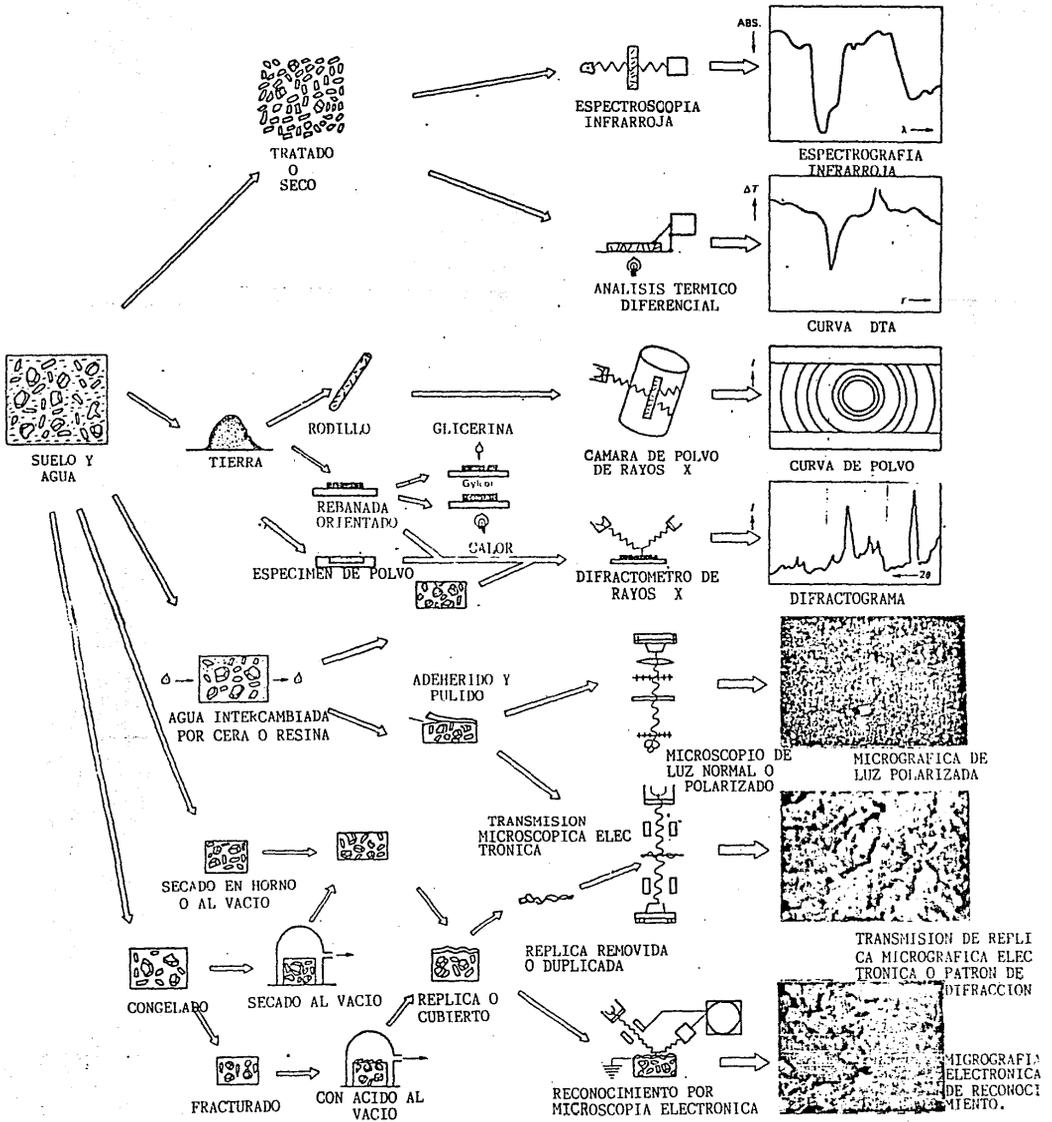


FIGURA II.a.5 Método para examinar la mineralogía y estructura de suelo, utilizando parte del espectro electromagnético.

al estudio de muestras pequeñas, y destruyen las muestras examinadas. Mientras que las técnicas tradicionales no son destructivas y pueden, al menos en un principio, ser utilizadas para el estudio de estructuras de suelos in-situ ó para el estudio de cambios de estructuras en muestra sujeta a corte, consolidación, etc. Sin embargo, la interpretación de los datos es poco directa ó conclusiva. - En la mayoría de los estudios, solo se ha utilizado un método sencillo para la determinación de la estructura. -- Puede ser útil usar algunos métodos juntos en algunos estudios, porque no sólo será posible obtener información a distintos niveles de detalle, sino que también la comparación de resultados puede permitir la estimación de un valor de la confiabilidad de los datos en cada uno.

#### b.- USO DEL MICROSCOPIO ELECTRONICO:

Dentro de la técnica disponible, la microscopía electrónica, es la única que puede revelar las partículas y sus arreglos directamente. Para lo cual se utiliza el microscopio electrónico que puede ser de transmisión electrónica ó de reconocimiento electrónico.

Los microscopios electrónicos son instrumentos que producen imágenes muy amplificadas de objetos microscópicos, utilizando radiaciones electro-magnéticas. Existe un límite teórico para el poder resolutivo del microscopio, debido a la presencia de refracción. El empleo de haces de partículas veloces cargadas y de campos eléctricos y magnéticos permitió resolver el problema.

Los microscopios electrónicos, se dividen en dos categorías, según un tipo de lentes electrónicos que utilizan: Microscopios Electrotásticos y Microscopios Magnéticos. - Estos dos tipos de microscopios no difieren sensiblemente en cuanto a esquema básico y se asemejan a un microscopio óptico de proyección; también aquí se tiene una fuente de iluminación, constituida por un cañón electrónico, una lente (condensador), que concreta el haz de electrones sobre el objeto, un objeto, un sistema de proyección y una pantalla, que en el caso del microscopio electrónico se trata de una pantalla fluorescente ó de una placa fotográfica; todos ellos están encerrados en un contenedor en el que se hace el vacío por medio de bombas. El poder resolutivo efectivo de un microscopio electrónico, está limitado por una serie de aberraciones cuya eliminación es muy difícil, mucho más que para el microscopio óptico.

Las principales aberraciones son: a) la aberración de esfericidad; b) la aberración cromática producida por variaciones de velocidades de los electrones emitidos por el cátodo y por las fluctuaciones de la tensión de aceleración; c) el desenfoque, debido al ensanchamiento del haz electrónico por la repulsión mutua entre los electrones.

Mientras que en el microscopio óptico el contraste de la imagen, es debido a la diferencia de absorción de la luz en las diferentes partes de la preparación, en el microscopio electrónico, el contraste se produce por la diferencia en la difusión de los electrones. Un haz colimado de electrones que atraviesa una lámina material, experimenta una difusión y, a la salida, los electrones tienen una determinada distribución angular, que depende de su energía y de las características del material que atraviesan.

En general, no todos los electrones que difunde una pequeña región de la preparación, se focalizan en la correspondiente región de la imagen, sino que sólo lo hacen los que salen con una desviación angular comprendida entre ciertos límites, que dependen de la lente electrónica objetiva empleada. Es evidente, pues, que si dos zonas de la preparación difunden los electrones de forma diferente también el número de los que contribuyen a la formación de la imagen será distinta y la zona menos difusora aparece más clara que la otra, ya que un mayor número de los electrones incidentes experimentará una reflexión inferior al límite y será enfocada sobre la imagen.

El poder difusor depende de la densidad superficial de masa (masa por unidad de superficie) y, por tanto, en la imagen obtenida con un microscopio electrónico las partes más oscuras pueden corresponder, bien a zonas de mayor espesor en la preparación ó bien a zonas constituidas por un material de mayor densidad.

Las preparaciones a observar con el microscopio electrónico, han de tener un espesor suficientemente pequeño como para que los electrones no pierdan una parte sensible de su energía al atravesarlas. En caso contrario, los electrones salientes, en lugar de tener la misma velocidad, tendrá velocidades distintas y ya no serán enfocadas todas sobre el plano de la imagen. Se produciría así algo parecido a la aberración cromática de las lentes ópticas, que origina una reducción del poder resolutivo y

un empeoramiento de la imange. Además, si la preparación absorbe energía del haz electrónico, se calienta, y el aumento de temperatura puede producir profundos cambios de estructura.

Puesto que el contraste depende exclusivamente de la diferencia de las propiedades difusoras de los diferentes puntos del objeto, es indispensable que la técnica de preparación de la muestra a examinar sea tal que no disminuya estas diferencias. Así, el espesor y el tipo de soporte han de elegirse teniendo en cuenta las características del objeto a observar.

La observación con el microscopio electrónico es posible en general, únicamente para preparaciones secas ya -- que, trabajando en el vacío, es indispensable que la preparación no contenga líquidos volátiles ni agua. Como soporte se usan en general películas muy delgadas de formar ó colodión, extendidas sobre una finísima redcilla metálica que aumenta la resistencia mecánica de las películas. A menudo no se observa directamente la preparación, sino una réplica, es decir, una copia obtenida extendiendo sobre el objeto una disolución de colodión y dejando evaporar el disolvente. Esta copia negativa se recubre a continuación con una capa de sílice, por evaporación en el vacío. Si luego se vuelve a disolver el colodión, queda la copia positiva de sílice que reproduce fielmente la forma de la preparación. Si se trata de una capa homogénea, las diferencias de ennegrecimiento en la imagen, corresponden a diferencias de espesor de la copia.

Esta técnica, sus variantes y en general todos los métodos de producción de preparaciones son extremadamente delicados.

La interpretación de las imágenes no siempre es fácil con relación a las que proporciona un microscopio óptico, ya que la analogía con éstas, solo subsiste parcialmente.

De todas formas el microscopio electrónico es el único medio de disposición del investigador para obtener información morfológica en un intervalo dimensional comprendido entre una micra y una milésima de micra.

A pesar de que el campo de visión en ampliaciones muy altas es limitado, se pueden preparar mosaicos de fotografías microscópicas que muestran características de estructuras mayores. Esto se muestra en la Figura II.b.1., la cual muestra la zona de falla en un espécimen de prueba de compresión triaxial de caolinita.

Desarrollos recientes en la microscopía electrónica - incluyen observaciones cátodo-luminiscentes, utilizando - el microscopio de reconocimiento electrónico para proveer información cristalográfica interna en granos arenosos. - Esta información se puede relacionar a la historia de tensión del material. El microscopio de reconocimiento electrónico puede ser utilizado en un modo de transmisión de reconocimiento. Esto parece tener ventajas sobre el microscopio de transmisión electrónica convencional en el sentido de que secciones más gruesas pueden ser estudiadas y los contrastes se pueden mejorar. La operación del MRE en el modo rayos X, puede tener aplicaciones para la detección de detalles mineralógicos.

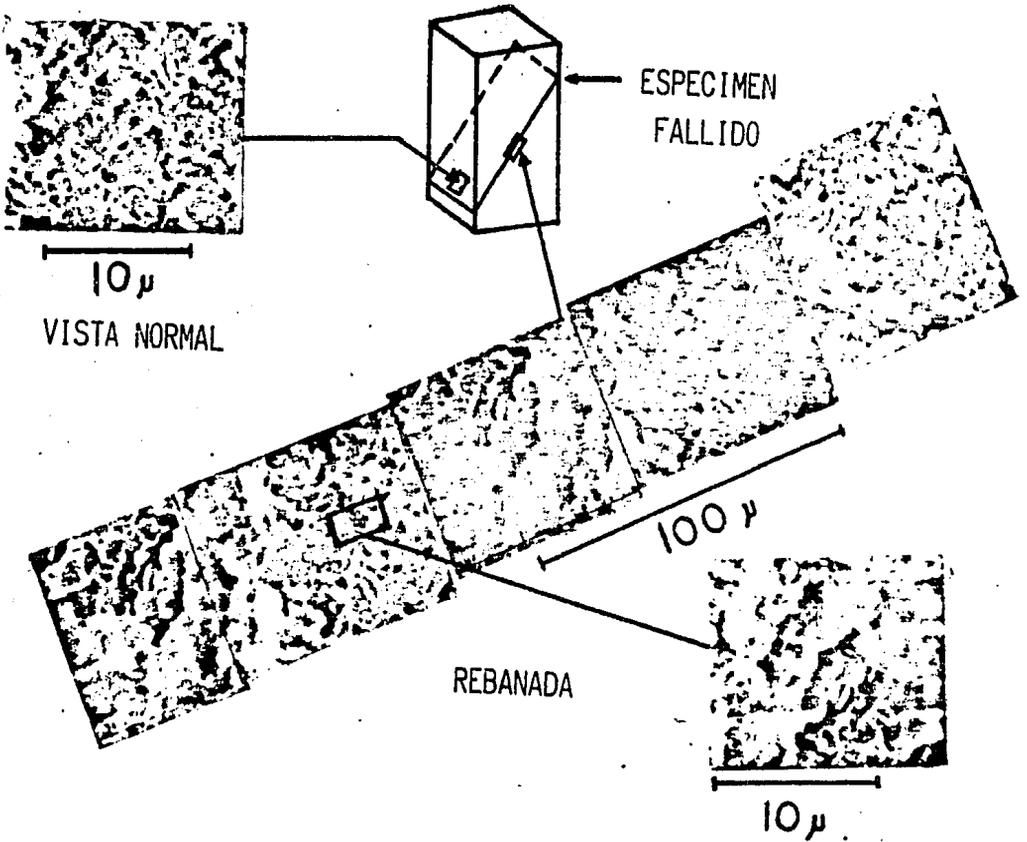
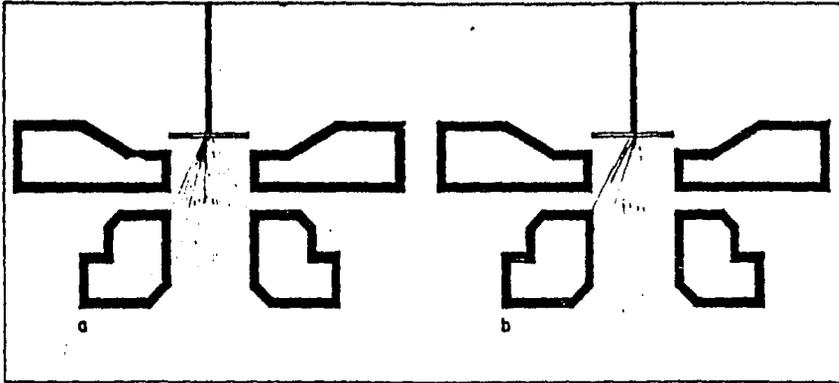


FIGURA II.b.1. Zona de corte en un caolín. La zona de corte de este espécimen de prueba triaxial compactado mecánicamente, consiste de planos suaves de partículas bien orientadas dentro de una zona de corte, con un ancho de 40 a 80 micrómetros. Se puede observar algunos planos -- conjuntos locales (micrográficas con analizador electrónico).



### MICROSCOPIO ELECTRONICO

- 3)- Formación de las imágenes en un microscopio electrónico: en (a) la sección de la preparación sobre la que inciden los electrones es muy difusora y únicamente una pequeña fracción de los electrones incidentes es enfocada sobre la imagen. - En la (b) la zona alcanzada es poco difusora y gran parte de los electrones llegan a la imagen. En (a) la imagen es, - por tanto, más segura que en (b).

#### c)- DIFRACCION DE RAYOS X:

El análisis mineralógico por el método de difracción, está basado en el hecho de que toda sustancia cristalina produce un patrón de difracción característico, ya sea que se presente sola ó en combinación con otras. Así, si se requiere conocer el componente ó componentes de alguna muestra en particular, basta con identificar éstos en el patrón de difracción de la muestra.

La ventaja principal que se obtiene de usar este método, es que se pueden identificar compuestos, fases y formas alotrópicas, tal y como están presentes en la muestra. Esta ventaja es particularmente útil en la identificación de materiales arcillosos, ya que se puede conocer su composición mineralógica que es tan importante en relación con sus propiedades y usos.

La instrumentación que se requiere para la difracción de rayos X, está constituida en un aparato llamado difractor de rayos X, que consiste de tres partes básicas:

- Una Fuente de Radiación, que consiste de un tubo de rayos X y un generador de alto voltaje.
- Un Difractómetro.
- Un Detector y el Equipo de Conteo.

En la Figura 11.c.1. se muestra un equipo de rayos X, con difractómetro.

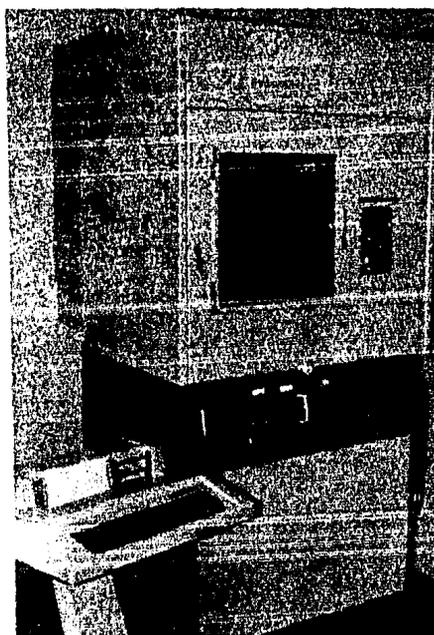


Figura 11.c.1.  
Equipo de Rayos X con Difractómetro.

- Generador y tubo de rayos X.

La función del generador y del tubo de rayos X, es la de suministrar una fuente estable de radiación. El generador suministra el alto voltaje y la corriente del filamento al tubo de rayos X.

En la figura II.c.2. se muestra la estructura interna de un tubo de rayos X típico. Un tubo de rayos X consiste esencialmente de un filamento de Tungsteno (cátodo) y un ánodo. Al pasar corriente por el espiral de Tungsteno le hace emitir electrones. Estos electrones son acelerados hacia el ánodo ó blanco, por medio de un potencial muy alto, del orden de 30 a 60 KV. El filamento se localiza dentro de un cilindro de Wehnelt, para asegurar la obtención de un haz de electrones finamente enfocados.

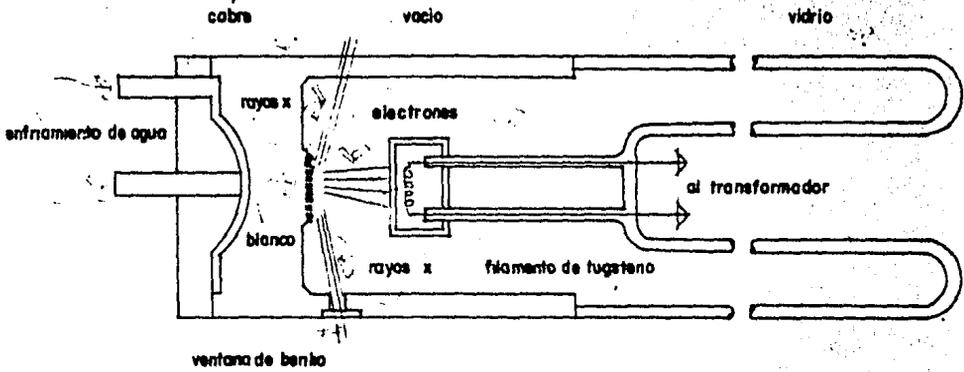
### Difractómetro:

La Figura II.c.3. muestra la geometría de un difractómetro. Esta geometría es conocida como geometría de enfoque Bragg-Bretano, que consiste en un haz divergente proveniente de una fuente lineal que llega a la muestra, se difracta y pasa a través de una ranura receptora al detector. Las ranuras de divergencia en combinación con la ranura receptora reducen la divergencia. La divergencia la controla con dos conjuntos de colimadores de placas paralelas (ranuras de Söller), colocadas una entre la fuente y la muestra, y otra entre la muestra y las ranuras de divergencia.

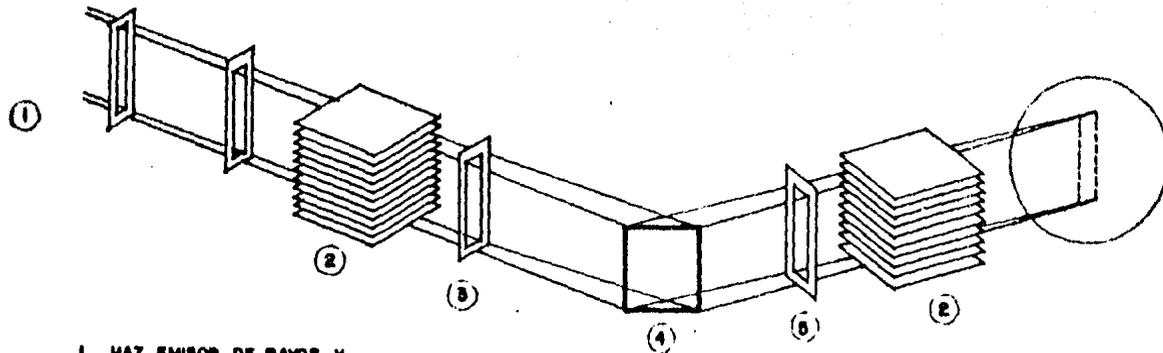
### El Detector y el Equipo de Conteo:

La función del detector es la de convertir los fotones de rayos X en pulsos de voltaje. Estos pulsos después son contados por el equipo de conteo proporcionando alguna forma de indicación visual de la intensidad de los rayos X. En la figura II.c.4. se muestra el esquema de un contador proporcional que consiste en un tubo cilíndrico de metal (cátodo), lleno con un gas (en este caso Argón) y que lleva un alambre delgado (ánodo) a lo largo del eje radial. Los rayos X, entran al contador a través de las ventanas de Berilio, y así los fotones de dichos rayos chocan con las moléculas de gas, produciendo fotoelectrones, los cuales son acelerados hacia el ánodo.

Si los electrones generados en el evento ionizante general, son acelerados suficientemente, puede colisionar con una ó más moléculas de gas produciendo pares de iones adicionales, y estos electrones secundarios a su vez adquieren generalmente, suficiente energía cinética para ionizar otras moléculas. El resultado neto es una descarga acumulativa de electrones hacia el alambre central también conocido como amplificación de gas, causando un pulso de corriente fácilmente detectable en el circuito externo.



**FIG. II.C.2. SECCION DE UN TUBO DE RAYOS X TIPO SELLADO.**



- 1 HAZ EMISOR DE RAYOS X
- 2 SISTEMA DE RANURAS PARALELAS (SOLLER)
- 3 RANURA DE DIVERGENCIA
- 4 MUESTRA
- 5 RANURA RECEPTORA

FIG. II.C.3. GEOMETRIA DEL DIFRACTOMETRO.

Si la amplificación de gas no es demasiado grande, el pulso de voltaje producido es directamente proporcional a la energía del fotón de rayos X incidente, de aquí proviene el nombre de contador proporcional.

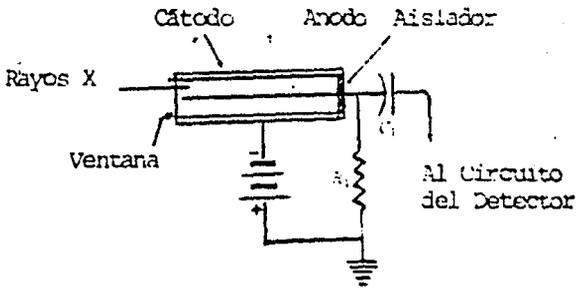


Fig. II.c.4. Esquema de un contador proporcional.

Insertando circuitos especiales entre el contador proporcional y el instrumento de medición, es posible aprovechar el hecho de que el tamaño de los pulsos producidos es directamente proporcional a la energía del fotón de Rayos X incidente. Uno de los circuitos es el llamado selector de altura de pulsos; éste admite pasar solo pulsos más grandes de un cierto valor seleccionado. Usando dos circuitos de este tipo, se puede operar el detector esencialmente bajo condiciones monocromáticas.

El equipo de conteo, es un dispositivo cuyo circuito tiene la función de convertir la sucesión de pulsos espaciados al azar que le llegan del contador, en una corriente estacionaria cuya magnitud será proporcional a la velocidad promedio de producción de pulsos en el contador. Esta corriente, por lo tanto, nos indicará la intensidad de los rayos X. Este circuito además contiene un registrador con el cual se obtiene un registro continuo de la intensidad.

Los patrones de difracción que se obtienen, representan una gráfica de intensidades contra ángulos; cada pico representa la intensidad de difracción que se produjo a un ángulo determinado y como estamos utilizando una longitud de onda constante de los rayos X que se van a difractar, el espacio de las placas difractoras se obtendrá a partir de la Ley de Bragg.

Para facilitar el cálculo de  $d$  (espacio de las placas difractoras), se usan tablas de valores de espaciamento interplanares contra el doble del ángulo y con longitud de onda fija.

Los valores de  $d$  obtenidos, se tabulan en orden decreciente junto con sus intensidades relativas; dándole el valor de 100 al pico más alto (más intenso). En seguida se procede a la identificación, haciendo uso del fichero de datos de difracción compilado, el cual contiene alrededor de 30,000 compuestos inorgánicos diferentes.

### Análisis Térmico Diferencial:

El análisis térmico diferencial, es una técnica en la cual se hace un registro de la diferencia de temperatura (AT) existente entre una muestra problema y un material de referencia. Esta diferencia de temperaturas se grafi-

ca contra la temperatura (T) de un programa deseado ó --- bien contra el tiempo (t), conforme ambas muestras se someten a regímenes idénticos de temperatura en un medio -- calentado ó enfriado a una velocidad controlada.

El procedimiento experimental consiste en calentar y - en enfriar tanto la muestra como el material de referen-- cia bajo condiciones idénticas de temperaturas entre los\_ dos materiales.

La posición del cambio resultante de la temperatura en el eje T, es característico de cada sustancia investigada, bajo las condiciones experimentales dadas y se puede em- plear para la identificación de esa sustancia; mientras - que el área bajo la curva es indicativa de los cambios de energía que tiene lugar en la muestra problema.

El método registra todos los cambios caloríficos que - ocurren en la muestra, por ejemplo, transiciones de fase (cambio de estructura cristalina, ebullición, sublimación, posición, deshidratación, disociación). Una diferencia - básica entre el análisis térmico diferencial y muchos -- otros métodos termoanalíticos, es la importancia de la di- ferencia de temperaturas, ya que cada reacción química ó cambio físico libera ó absorbe calor, generándose así di- cha diferencia de temperaturas (AT).

Los componentes básicos de un aparato para Análisis -- Térmico Diferencial, comprenden los siguientes módulos:

- Una Fuente Calorífica.
- Un Programador de Temperatura.
- Un sistema de Amplificación.
- Un Instrumento Registrador.

#### La Fuente Calorífica:

Este módulo consiste de un horno, el cual tiene como - función la de proporcionar la energía calorífica necesaria, uniforme y gradual, que de origen a las reacciones - y cambios correspondientes dentro de la muestra.

#### El Programador de Temperaturas:

Aquí, mediante controles de programas tipo automático,

se obtiene una velocidad de calentamiento uniforme, se -- usa un autotransformador impulsado por un motor, de tal -- manera que un aumento en el voltaje produce una elevación en la temperatura uniforme y gradual; aquí también se con-- trola el rango de temperatura a que se desea trabajar.

Con este módulo, es posible trabajar de tres maneras:-

- a) Calentamiento Programado Sostenido.
- b) Enfriamiento Programado Sostenido
- c) Control Isotérmico.

Se pueden seleccionar velocidades de calentamiento (ó de enfriamiento) entre  $1^{\circ}\text{C}$  y  $10^{\circ}\text{C}$  por minuto. El programa se puede invalidar en cualquier instante, así por ejemplo, se puede variar la velocidad del programa, ó se puede cambiar de un ciclo de calentamiento a uno de enfriamiento ó viceversa.

#### El amplificador:

En este módulo, la señal de temperatura proveniente -- del horno, vía los termopares, se puede amplificar de una manera esencialmente estable. La técnica consiste en hacer pasar dicha señal a través de diversos componentes -- electrónicos para luego enviarla hacia el registro al que le mantiene una señal de 10 milivoltios.

Este módulo cuenta con la selección de varios rangos -- de amplificación, según se requieran las amplitudes de -- los picos, en operación normal se seleccionan los rangos -- de 20, 50 y 100 microvoltios.

#### El Registrador:

En este módulo se obtienen los resultados en forma de -- gráficas ó curvas térmico diferenciales; esto es, el re-- gistro de la diferencia de temperaturas entre la muestra -- y el material en función de la temperatura del material -- de referencia ó bien contra el tiempo. Este registrador, es un graficador con dos canales (uno para graficar la -- temperatura del programa y otro para la diferencia de tem-- peraturas); consta además con un selector de escala de -- alimentación de la señal alimentada, y con un selector -- de velocidades de papel de registro. Las temperaturas -- aparecen en el papel como milivoltios.

Una vez analizadas las funciones de los diversos componentes del instrumento para análisis térmico diferencial, podemos esquematizar de una manera general su interrelación como se muestra en la Figura 11.d.1.

La identificación de minerales, se basa principalmente en las observaciones de las temperaturas de los picos -- (máximos ó mínimos), de la curva térmico-diferencial.

La medición de los rasgos sobresalientes de la curva - térmico-diferencial para un mineral que se va a caracterizar, se puede usar como una "huella digital" para identificar el mineral por comparación con curvas patrón. Esta comparación comprende la determinación de:

- a) Número de Parámetros (endotermas y exotermas) y las -- temperaturas a las cuales se presentan.
- b) El área de cada parámetro.
- c) El tipo de reacciones principales.

Los parámetros de las curvas se inician en el punto -- donde termina la línea base correspondiente al material - de referencia, este punto representa más exactamente la - temperatura a la cual se inicia la reacción, mientras que el máximo ó mínimo del pico corresponden a la temperatura donde termina la reacción.

En reacciones que ocurren bruscamente, la temperatura a la cual se inicia la reacción queda bien definida, como lo muestra el punto A de la figura 11.d.2., en tanto que -- cuando la reacción se realiza lentamente, el punto al --- cual la recta empieza a ser curva, queda indefinida e --- inestable. En estos casos el punto reproducible se obtiene trazando dos líneas tangentes, una a la línea base y - otra a la inflexión de la curva. La intersección de estas líneas (punto c) Figura 11.d.2.) es el punto corres-- pondiente a la temperatura de la reacción.

Las temperaturas graficadas en el eje horizontal de la curva térmico - diferencial obtenida, corresponden a las -- temperaturas del material de referencia, y por lo tanto, -- la temperatura del pico derivado de esta manera, no co--- rresponde a la temperatura real de la muestra bajo ensayo, la cual es mayor ó menor que la temperatrúa del material -- de referencia, dependiendo del tipo de reacción que se es -- té llevando a cabo (exotérmica ó endotérmica).

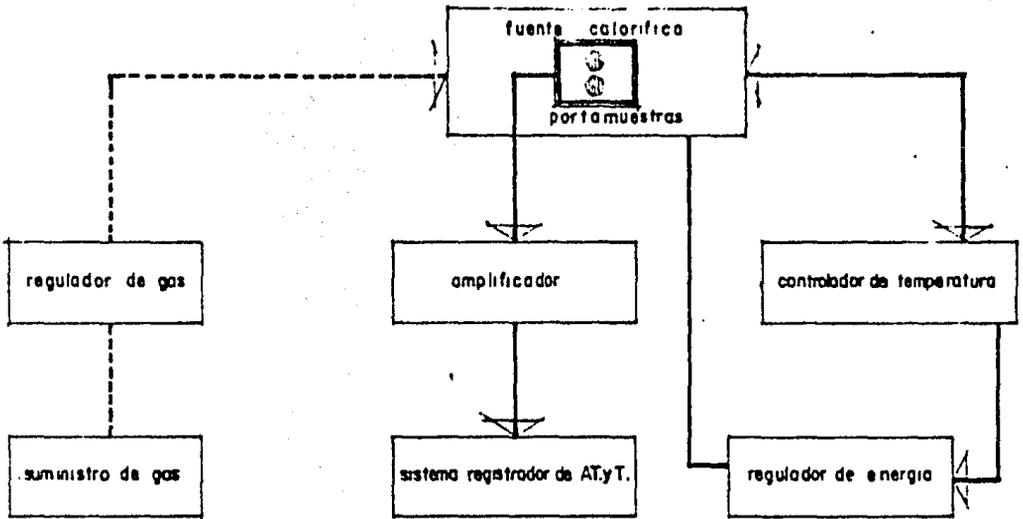


FIG. II. D. I.

Diagrama de bloques que muestran los componentes básicos de un aparato A.T.D.; las líneas gruesas representan suministro de energía; las líneas delgadas corresponden a los circuitos de los termopares; y las líneas punteadas, nos indican suministro de gases.

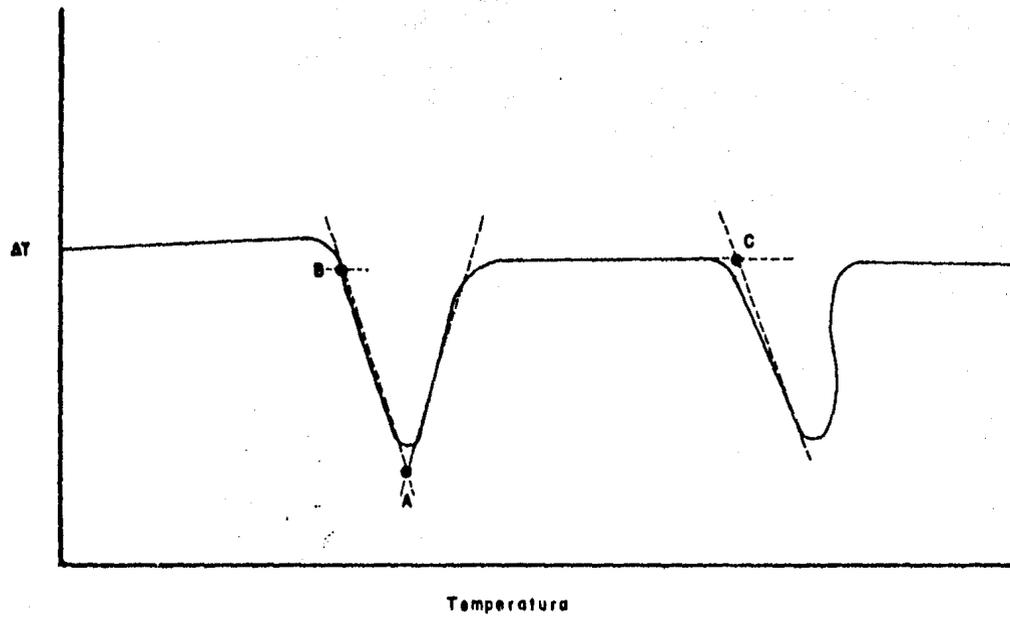


FIG. II.D.2. REPRESENTACION DE LAS TEMPERATURAS INICIAL Y FINAL DE REACCION.

Los picos de las curvas térmico-diferenciales, representan cambios caloríficos asociados con reacciones específicas. En el caso de las arcillas y materiales afines, los siguientes efectos pueden dar resultados característicos, constituyendo una guía para su identificación.

- Pérdida de agua libre adsorbida, ó absorbida. Los picos endotérmicos en la región de temperatura de 100-150°C, usualmente se deben a estas causas. El rompimiento del agua ligera puede no lograrse hasta que se alcanzan temperaturas entre 200 y 1200°C.

- Los rompimientos de los hidratos, hidróxidos y otros minerales que contienen agua de red, producen un efecto endotérmico que con frecuencia caracteriza a minerales específicos. Los cambios pueden tener lugar entre 200 y 800°C, dependiendo del tipo de mineral.

- El rompimiento de otros oxi-sales, tales como carbonatos, sulfatos, etc. también producen cambios endotérmicos y puede ocurrir entre 500 y 1200°C.

- Las reacciones de oxidación, involucran cambios exotérmicos e incluyen la conversión de sulfuros a sulfatos ó a óxidos, y la calcinación del material carbonáceo.

- Las reacciones de recristalización de las fases amorfas ó desordenadas, con frecuencia resultan en un cambio exotérmico total, un ejemplo característico, lo constituyen los minerales de silicatos hidratados.

- Los cambios de estado, ya sea de sólido a líquido ó de líquido a gas, exhiben efectos endotérmicos a temperaturas fijas.

- Los cambios de fases, tales como los de los minerales de la sílice (SiO<sub>2</sub>), pueden ser picos endotérmicos ó exotérmicos, pero regularmente son de pequeña magnitud. Con frecuencia son reversibles y también se pueden medir durante el ciclo de enfriamiento.

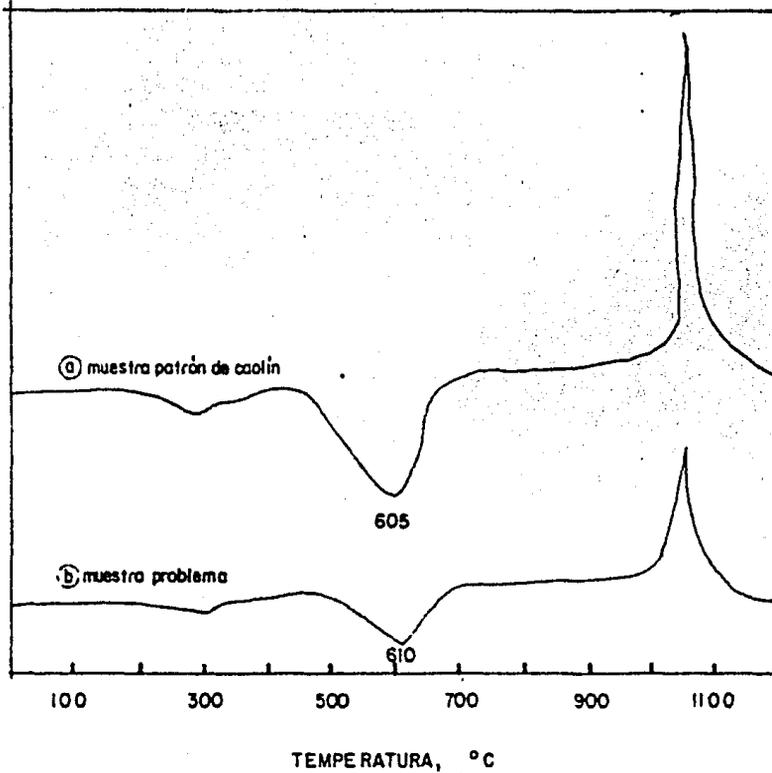
Los resultados del Análisis Térmico Diferencial, se grafican e interpretan en base a la comparación con gráficas patrón logradas con minerales en estado casi puro.

En esta etapa de identificación, el estudio preliminar sobre las propiedades físicas de las muestras es de gran ayuda.

La técnica seguida para esta experimentación, se resume a continuación:

- a) La muestra preparada molida, tamizada y pesada se seca a  $110^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante.
- b) Se pesan 100 mg, tanto de muestra como del material de referencia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  calcinada) y se apisonan ligeramente en los crisoles.
- c) Se colocan los crisoles en las cavidades del portamuestras, teniendo cuidado de que las uniones de los termopares queden bien centradas.
- d) Se seleccionan las condiciones de operación, como son velocidad de calentamiento, rango de temperatura, rango de amplificación, rango de registro y velocidad del papel de registro.
- e) Se maneja el equipo siguiendo las instrucciones del fabricante.

Los resultados obtenidos mediante el análisis térmico diferencial, se encuentran registrados como picos sobresalientes, endotérmicos y/o exotérmicos, encontrándonos para cada una de las muestras que se analicen, así mismo, se tabulan los nombres de los principales minerales tentativos, deduciendo mediante comparación de los picos mencionados con los picos de diversos minerales reportados en la literatura. Un ejemplo de lo anterior lo podemos ver en la Figura II.d.3.



### FIG. II.D.3. ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL

- a) Muestra Patrón de Caolín.
- b) Muestra Problema.

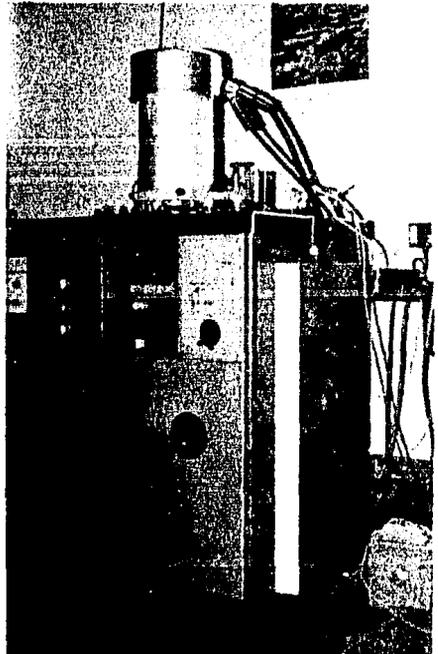
La muestra problema fué identificada como un mineral del grupo caolín, ya que, como se puede observar en la Figura II.d.3., la curva b) térmico diferencial es muy semejante a la originada por un caolín en estado puro, donde los picos detectados corresponden a: El pico pequeño endotérmico alrededor de los 300°C se debe a la pérdida de humedad del mineral. El pico endotérmico si métrico a 610°C, es causado por la deshidroxilación del mineral. Y el pico exotérmico, alrededor de los 1000°C, corresponde a un cambio estructural que sufre el mineral.



a) MICROSCOPIO ELECTRONICO



b) DIFRACTOR DE RAYOS X.



c) TERMO-ANALIZADOR.

### III).- ARCILLAS EXPANSIVAS:

Una de las finalidades principales de la estabilización de arcillas con la adición de cal, es la de reducir al máximo posible la expansibilidad de dicho material, con la finalidad de que las estructuras de dicho suelo presenten menores problemas de asentamientos (en edificios y casas), ó agrietamientos (en carreteras, vertederos, pavimentos urbanos, etc).

Para comprender mejor el comportamiento de las arcillas expansivas, es conveniente estudiar sus características principales más detenidamente. Comenzaremos con la definición de un suelo expansivo. (Nos referimos con este término a los suelos compuestos con arcillas expansivas).

El concepto de suelo expansivo, se refiere a un suelo compuesto por partículas finas, (más de la mitad del material pasa la malla No. 200), cuyo comportamiento se rige principalmente por reacciones químicas, más que reacciones físicas.

Es decir, que está constituido por partículas minerales pequeñas, las cuales en presencia del agua experimentan propiedades plásticas.

Por lo tanto, podemos definir a una arcilla expansiva de la siguiente manera: "Una arcilla expansiva es un suelo fino con composición mineralógica tal, que lo hace susceptible a sufrir apreciables cambios de volumen como consecuencia de cambios en el contenido de agua".

#### a)- MINERALOGIA DE LAS ARCILLAS:

Debido a la gran variedad de compuestos minerales de los suelos expansivos, se encuentra una gran variedad de comportamientos de dichos suelos, con la adición ó pérdida de agua, sin embargo, para entender mejor estos comportamientos, mencionaremos sus aspectos físicos-químicos más importantes:

- Se considera en general, que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de 2 micras ó menores, presentando una gran actividad eléctrica.

- Los minerales arcillosos son silicatos de aluminio hidratados, aunque en algunos minerales arcillosos, el magnesio ó el fierro sustituyen totalmente ó en parte al aluminio.

- También los alcalíes ó suelos alcalinos se presentan como constituyentes esenciales en algunos de ellos.

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

Al referirnos a las características químicas como las de mayor determinación en el comportamiento de las arcillas expansivas, debemos mencionar como se realizan las uniones, ligas ó eslabonamientos de las partículas arcillosas que forman suelos expansivos.

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

A continuación mencionaremos las principales uniones ó ligas que se presentan en los materiales arcillosos. -  
Ligas Primarias:

- Fuerza de valencia primaria:

Esta unión se presenta debido a que los átomos se comportan ó intercambian los electrones de sus órbitas exteriores, provocando una unión lo suficientemente fuerte para no ser rota con la aplicación de esfuerzos usuales en ingeniería.

Si dos átomos se unen compartiendo uno ó más pares de electrones, su liga es llamada covalente.

Si un átomo se une con otro átomo por la adición de electrones a su órbita exterior ó por pérdidas de ellos para llegar a una configuración estable, es llamada iónica.

Estos dos tipos de uniones son muy estables y fuertes.

La unión hidrógeno se tiene cuando un átomo es igualmente atraído a otros dos átomos, formando un puente entre ellos como ocurre cuando se combinan un átomo de oxígeno con un átomo de hidrógeno, dando como resultado un ión de hidróxido, el cual puede unirse con el ión de oxígeno por medio de una liga débil con el catión de hidrógeno.

La unión catiónica se presenta cuando un catión es igualmente atraído a dos moléculas cargadas negativamente. Esta unión es similar a la unión hidrógeno, excepto que es mucho más débil e inestable.

#### Ligas Secundarias:

Cuando se unen los átomos de una molécula a los átomos de otra molécula, se tienen los que se conoce como unión de valencia secundaria. Estas uniones dan como resultado los movimientos de los electrones en las últimas órbitas de los átomos de una molécula, por lo cual, cualquier molécula tiene asociado un campo eléctrico capaz de interactuar con el campo eléctrico de las moléculas vecinas. Esto da como resultado una fuerza de atracción entre las moléculas llamadas de Van Der Waals.

Estas fuerzas actúan con una intensidad de 1/100 de la correspondiente a las fuerzas de ligas primarias ó de valencia primaria.

Las fuerzas de atracción de Van Der Waals que actúan sobre dos partículas de mineral arcilloso, separados por agua dependerá esencialmente de la estructura cristalina de los minerales, de la distancia que los separa y de la orientación entre dichas partículas.

#### Ligas Eléctricas:

En algunas moléculas electricamente neutras (por ejemplo la molécula de agua) los centros de polaridad, positivos y negativos no coinciden, consecuentemente, las moléculas pueden comportarse como imanes ó dipolos. Por lo tanto, cualquier polo puede ser atraído por una molécula cargada ó superficies formadas por iones de signo opuesto.

Por lo cual, aunque una partícula arcillosa puede en conjunto ser eléctricamente neutra, los iones de una polaridad (generalmente negativa), pueden ocupar las posiciones superficiales en la estructura cristalina. Esta polaridad superficial forma una película que cubre las cargas positivas internas y las moléculas polares ó iones positivos pueden ser atraídos a la superficie.

En los suelos finos, predominan las fuerzas eléctricas, estos suelos compuestos predominantemente por minerales cristalinos, algunos de los cuales, tienen actividades -- superficiales muy bajas, por lo cual no contribuyen a los efectos conocidos como plasticidad y cohesión: A estos minerales se les conoce como minerales no arcillosos, y entre ellos se encuentra el cuarzo y la calcita. El tamaño de estos minerales no arcillosos es por lo general mayor de 2 micras.

Los minerales cristalinos cuya actividad superficial es tal que se presenta cohesión y plasticidad, podemos definirlos como arcillosos. Se conocen aproximadamente 15 minerales principales de este tipo (Tabla III.a.1), pero podría decirse que de acuerdo al arreglo de sus cristales, se encuentran divididos en 3 grupos dominantes: Caolinita, Montmorilinita e Illita.

Se ha encontrado que los minerales arcillosos pertenecientes a un mismo grupo, tienen propiedades ingenieriles similares. Por esta razón, desde el punto de vista ingenieril, conviene examinar la estructura cristalina de los minerales arcillosos, para conocer su comportamiento básico.

Existen dos bloques fundamentales en las estructuras de los minerales arcillosos, una de ellas constituye la llamada unidad tetraédrica y el otro a la unidad octaédrica.

Un tetraedro de silicio, consiste de un átomo central de silicio rodeado por cuatro átomos de oxígeno dispuestos en los vértices de triángulos equiláteros, como se puede ver en la figura III.a.1.

Las unidades tetraédricas, se pueden combinar para integrar la lámina conocida como sílica, ver Figura III.a.2.

## MINERALES DE ARCILLA

## I. GRUPO CAOLIN

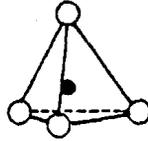
- |  |                                    |       |
|--|------------------------------------|-------|
| 1.- Caolinita  | $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$             |       |
| 2.- Dickita  | $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$             | Raros |
| 3.- Nacrita  | $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$             |       |
| 4.- Haloisita, conocido también como Metahaloisita, o Haloisita (2H <sub>2</sub> O) no plástica:                 | $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$             |       |
| 5.- Endclita, conocido también como Haloisita, Haloisita Hidratada, o Haloisita (4H <sub>2</sub> O) no plástica: | $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot 4H_2O$ |       |
- Nota: La Haloisita (4H<sub>2</sub>O) pierde agua entre el sitio y el laboratorio a temperaturas moderadas, para formar la metahaloisita (2H<sub>2</sub>O) con diferentes propiedades ingenieriles.
- 6.- Alofano — Mezcla amorfa de silicio y aluminio.
- 7.- Anauxita

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

- |                           |   |                  |
|---------------------------|---|------------------|
| 1.- Montmorilonita        | $(Al_{1.67}Mg_{0.33}Si_4O_{10}(OH)_2)$      | $Na_{0.33}$<br>↑ |
| 2.- Beidellita            | $(Al_{2.17}Al_{0.63}Si_3.17O_{10}(OH)_2)$   | $Na_{0.33}$<br>↑ |
| 3.- Beidellita            | $(Al_2.22Si_3O_{10}(OH)_2)$                 | $Na_{0.33}$<br>↑ |
| 4.- Nontronita            | $(Fe_{2.00}Al_{0.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2)$ | $Na_{0.33}$<br>↑ |
| 5.- Nontronita            | $(Fe_{2.17}Al_{0.83}Si_{3.17}O_{10}(OH)_2)$ | $Na_{0.33}$<br>↑ |
| 6.- Nontronita (Aluminio) | $(Al_{2.22}Si_3O_{10}(OH)_2)$               | $Na_{0.33}$<br>↑ |

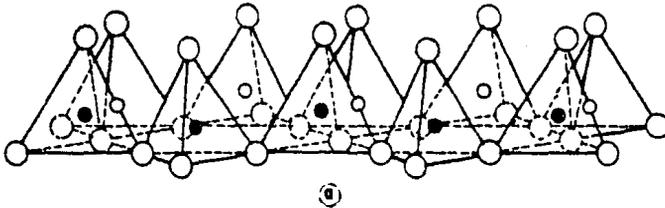
TABLA III. 1.

7.-	Hectorita	$\begin{array}{c} \text{Na } 0.33 \\ \uparrow \\ (\text{Mg}_{2.67} \text{Li}_{0.33}) \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{F}, \text{OH})_2 \end{array}$
8.-	Saponita	$\begin{array}{c} \text{Na } 0.33 \\ \uparrow \\ \text{Mg}_3 (\text{Al}_{0.33} \text{Si}_{3.67}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{array}$
9.-	Saponita (Aluminio)	$\begin{array}{c} \text{Na } 0.33 \\ \uparrow \\ (\text{Mg}_{2.67} \text{Al}_{0.33}) (\text{Al}_{0.67} \text{Si}_{3.33}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{array}$
10.-	Sauconita	$\begin{array}{c} \text{Na } 0.33 \\ \uparrow \\ (\text{Si}_{3.47} \text{Al}_{0.53}) \text{Al}_{0.22} \text{Fe}_{0.17} \text{Mg}_{0.18} \text{Zn}_{2.40} \\ \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{array}$
11.-	Talquita	$\text{Mg}_3 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
12.-	Pirropilita	$\text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
III	GRUPO ILITA ( La cantidad de K presente varia)	
		$\text{K}_y (\text{Al}_4 \text{Fe}_4 \text{Mg}_4 \text{Mg}_6) (\text{Si}_8 - y \text{Al}_y) \text{O}_{20} (\text{OH})_4$
IV	MINERALES DIVERSOS	
1.-	Atapulgita	$\text{Mg}_5 \text{Si}_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
2.-	Sepiolita (Magnetita)	$\text{H}_4 \text{Mg}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10}$
3.-	Sericita	
4.-	Vermiculita	
5.-	Glauconita	
6.-	Clorita	
7.-	Diáspora	

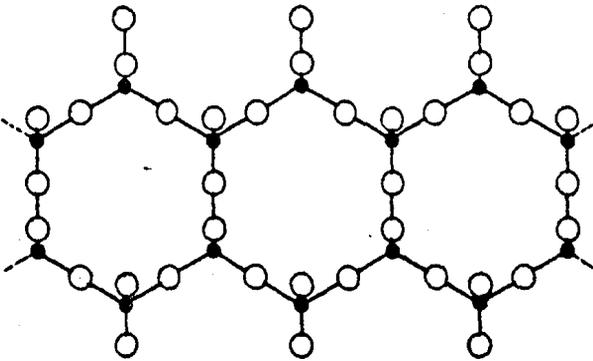


○ y ○ = oxígeno, ○● = silicio

ESQUEMA QUE MUESTRA UN TETRAEDRO DE SILICE.



PERSPECTIVA



PLANO DE LA BASE

FIG. III.A.1. ESQUEMA DE CADENAS DOBLES DE TETRAEDROS DE SILICE.

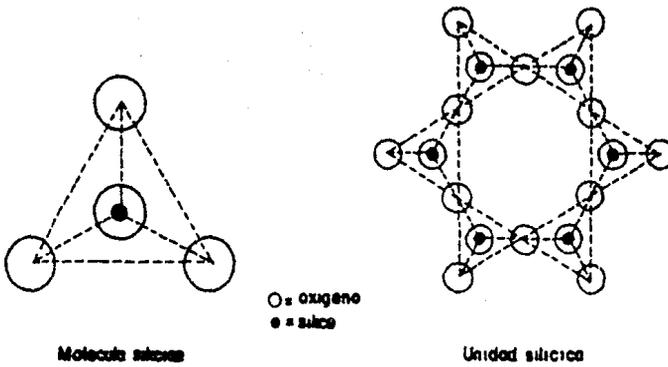


FIG. III.A.2. UNIDAD TETRAEDRICA Y LAMINA SILICICA.

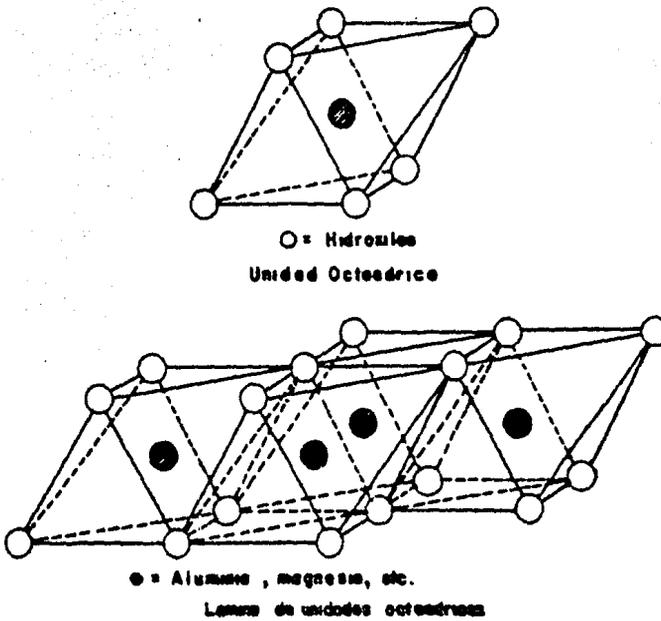


FIG. III.A.3. UNIDAD OCTAEDRICA Y LAMINA OCTAEDRICA.

La unidad octaédrica está constituida por seis hidróxidos, rodeando a un átomo que puede ser de aluminio ó magnesio, como se puede ver en la Figura III.a.3.

En la unidad octaédrica, el átomo de aluminio ocupa el centro de la estructura, abajo y arriba del cual los iones de oxígeno e hidróxidos se distribuyen.

Mencionaremos las características generales de estos tres grandes grupos en los que se encuentran la mayoría de las arcillas.

#### CAOLINITA:

Debido a las fuerzas de las valencias no satisfechas en los átomos de oxígeno de la lámina de sílica, así como a los espaciamientos que guardan entre sí dichos oxígenos, es posible para una placa de gibsita, estableciéndose una liga, tanto de tipo iónica como de valencia, la cual es demasiado fuerte.

La lámina formada por la adición de la placa de gibsita y sílica, es electricamente neutra y se le conoce como caolín.

Se pueden unir láminas de caolín una sobre la otra para formar cristales de caolín conocidos como caolinita, siendo las fuerzas que unen a estas láminas del tipo hidrógeno y desarrolladas entre los iones oxígeno y los hidróxido, ver Figura III.a.4. Esta unión es relativamente fuerte. Si se tienen diferentes estructuras entre las láminas, se obtienen diferentes materiales arcillosos con la misma composición del caolín.

Las fuerzas de tipo hidrógeno que unen a las láminas de caolín para formar la caolinita son 10 veces menores que las fuerzas que unen las láminas de gibsita y sílice que son del tipo de valencia, sin embargo, son lo suficientemente fuertes para mantener estables los cristales de caolinita en presencia del agua, impidiendo que penetre entre las láminas de caolín separando estas.

### MONTMORILONITAS:

Cuando existen uniones isomorfas, en las unidades tetraédricas y octaédricas, (lo cual es muy común), es decir que un átomo es sustituido por otro, logrando con ésto que la estructura que se encontraba en equilibrio, como sucede con la lámina de gibsita que de una unión equilibrada con un ión de aluminio se intercambia por unión isomorfa por un ión de hierro ó magnesio, lo cual convierte a la lámina en una estructura con carga residual negativa y se convierte en una estructura con carga residual. Esta carga si el agua contiene cationes tales como el Sodio ( $\text{Na}^{+1}$ ), calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), potasio ( $\text{K}^{+1}$ ) ó similares, provocarán que las láminas para satisfacer su carga residual negativa atraerán al agua. Estas láminas formadas por este tipo de estructuras son llamadas montmorilonitas.

La lámina montmorilonitas tienen un espesor de aproximadamente 10 Angstroms, y se colocan una sobre la otra, como las hojas de un libro, teniendo como liga entre las uniones, a las atracciones mutuas de dos láminas hacia los cationes intercambiables anteriormente retenidos.

La unión entre las láminas de montmorilonita, depende de la unión catiónica, cualquiera que sea su tipo, pero en general es débil, comparada con la unión que mantiene unidas a las láminas de caolín, por esta razón, el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de la montmorilonita, ocasionando que las láminas se separen entre sí fácilmente. Como resultado de esta facilidad del agua a entrar en la estructura de la montmorilonita, los suelos con cantidades considerables de montmorilonita, tienen características de expansión muy considerables.

### ILITA:

Otro grupo mineral importante dentro de las arcillas, es el formado por las illitas, cuya unidad estructural es muy parecida a la de la montmorilonita, distinguiéndose una de la otra porque, en la illita se presenta una sustitución isomorfa de átomos de sílice ( $\text{Si}^{+4}$ ) por átomos de aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) quedando con una carga residual negativa más alta que las Montmorilonitas. Una parte importante de esta carga se equilibra con los cationes del potasio ( $\text{K}^{+1}$ ) no intercambiables, lo que da como resultado una liga fuerte entre las láminas que forman la illita.

Esto da como resultado que la Ilita es -- mucho menos susceptible al agrietamiento que la montmorilonita.

Concluyendo podemos decir, que las ligas mediante los cationes no intercambiables ( $K^{+1}$ ) de la Ilita, son más débiles que las ligas hidrógeno que unen a las unidades estructurales de la caolinita, pero son mucho más fuertes - que las ligas de los cationes intercambiables que forman los cristales de la montmorilonita.

Por esta razón, la Ilita no se expande tanto en presencia de agua como lo hace la Montmorilonita, pero se expande de más que la caolinita.

Las partículas de Ilita tienen un diámetro aproximado de 0.05 micrones y su relación aproximada de diámetro a espesor de 50:1. En la Figura III.a.5. se puede observar la estructura de la Ilita.

Resulta evidente que las ligas entre las partículas de suelo compuestas por minerales arcillosos dependerán en gran parte de la magnitud de la carga residual, debido a la sustitución isomorfa, y al tipo, concentración y distribución de los cationes disponibles para equilibrar a dicha carga.

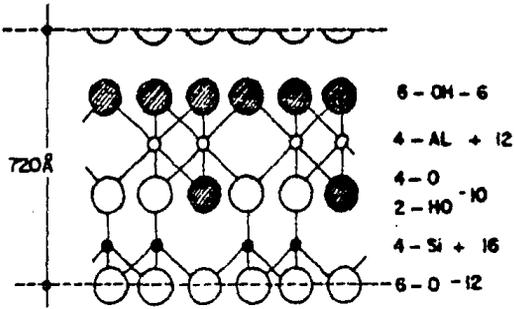
La Montmorilonita es el mineral de arcilla que presenta las características de expansión más severas.

Este mineral arcilloso se origina de las rocas, principalmente por la alteración de cenizas volcánicas cristalinas depositadas ya sea en el océano ó en el fondo de los lagos, aunque pueden también bajo condiciones climatológicas especiales formarse en la superficie de la tierra.

#### b) REACCION DE LOS MINERALES ARCILLOSOS EN CONTACTO CON EL AGUA:

Las modificaciones experimentadas por los minerales arcillosos al entrar en contacto con el agua, son la causa de la expansión sufrida en los suelos arcillosos.

Para explicarlo, tenemos por ejemplo el que partículas arcillosas se pusieron en contacto con el agua destilada.

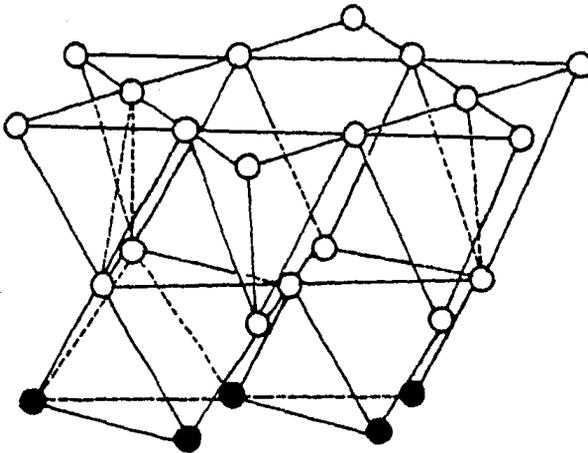


REPRESENTACION ESQUEMATICA...



REPRESENTACION SIMBOLICA...

FIG. III.A.4. CAOLINITA, REPRESENTACION.



○ OXIGENO  
● HIDROXILOS

FIG. III.A.5. REPRESENTACION EN 3 DIMENSIONES DE LA CAOLINITA.

Para é $\dot{u}$ llo observemos la Figura III.b.1., el tama $\dot{u}$ no de una cierta l $\acute{a}$ mina de mineral arcilloso, ya sea caolinita  $\delta$  -- montmorillonita, as $\acute{i}$  como la posici $\acute{o}$ n de sus iones intercambiables de sodio.

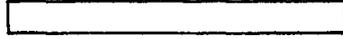
Al entrar en contacto con el agua tanto la superficie\_ como los iones intercambiables, toman agua. Al tener agua y por lo tanto hidratarse, el i $\acute{o}$ n sodio crece como se puede ver en la Figura III.b.1. Por esta raz $\acute{o}$ n, y como consecuencia de este crecimiento tan grande del i $\acute{o}$ n hidratado (hasta 7 veces su tama $\dot{u}$ no crece), este no puede permanecer en la superficie del mineral arcilloso, lo que sucede entonces es que los iones hidratados intercambiables se alejan de la superficie del mineral, pero al mismo tiempo, -- contin $\acute{u}$ an siendo atra $\acute{i}$ dos hacia la superficie de  $\acute{e}$ ste, para satisfacer la carga negativa existente, en la superficie de la part $\acute{i}$ cula.

Estos dos efectos hacen que se establezca un equili--- brio entre los iones hidratados y la superficie del mineral arcilloso, de tal manera que estas se ubican en una cierta posici $\acute{o}$ n. A  $\acute{e}$ sto se debe que cuando una part $\acute{i}$ cula arcillosa se cae al agua, se forma lo que se denomina como la doble capa.

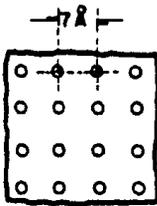
En la Figura III.b.2., se puede apreciar la doble capa, totalmente desarrollada en los dos principales minerales\_ arcillosos.

En la figura III.b.3., se pueden ver los 3 minerales - arcillosos en sus 3 dimensiones, teniendo una idea del espaciamiento aproximado de los iones formando la doble capa.

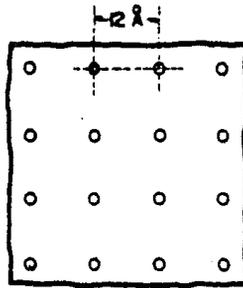
Podemos entonces decir que la doble capa es la distancia requerida, a partir de la superficie del mineral arcilloso, para neutralizar la carga neta sobre la part $\acute{i}$ cula\_ es decir, la distancia dentro de la cual se tiene potencial el $\acute{e}$ ctrico. El agua en la doble capa, se encuentra - bajo una fuerza de atracci $\acute{o}$ n hacia la part $\acute{i}$ cula de suelo, debido a que dicha agua se encuentra unida a iones intercambiables de agua que a su vez se encuentran atra $\acute{i}$ dos -- hacia la superficie de la part $\acute{i}$ cula.



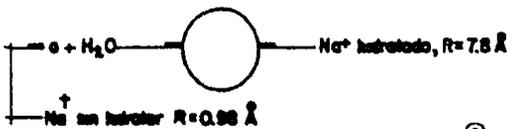
CAOLINITA DE 10000 Å x 1000 Å DE ESPESOR ...



(a)



(b)



(c)

FIG. 11.1.1. SUPERFICIE DE SUELO MOSTRANDO LOS IONES INTERCAMBIABLES.

- (a) Superficie de caolinita seca + iones de sodio.
- (b) Superficie de montmorillonita seca + iones de Na.
- (c) Hidratación de ion de sodio.



FIG. III.B.2. PARTICULAS DE SUELO CON AGUA Y IONES.

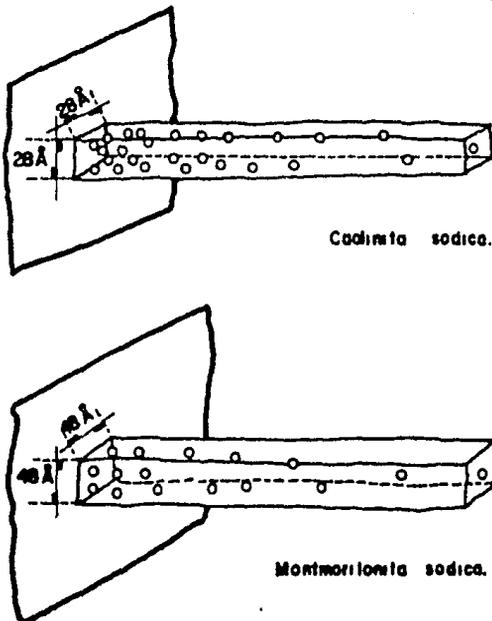


FIG. III. B.3. SUPERFICIES DE LAS PARTICULAS CON AGUA Y IONES.

Se reconoce cuando menos que las primeras capas moleculares de agua que se encuentran formando la doble capa, se encuentran fuertemente atraídos hacia la superficie -- del agregado.

Para ver la importancia del agua adsorbida, veamos la siguiente tabla:

TABLA III.b.1. CONTENIDOS DE AGUA.

PARTICULA,	AREA ESPECIFICA	CONTENIDO DE AGUA
	cm <sup>2</sup> /gr.	en una capa de 5 A ( % )
Arena 0.1 mm.	0.03	1.5 x 10 <sup>-4</sup>
Caolinita	10	0.5
Ilita	100	5.0
Montmorilonita	1000	50.0

En la tabla se observa de una manera aproximada, la -- gran importancia que tiene el tamaño de las partículas de arcilla en la cantidad de agua, que puede absorber dicha -- partícula.

Un ejemplo de ésta es la arcilla llamada halloisita, -- la cual teniendo una estructura similar a la de la caolinita, puede absorber una gran cantidad de agua, debido a -- que tiene una estructura con unidades de diferente forma -- y más aleatoriamente empacadas, por lo cual pueden ser se -- paradas por una sola capa molecular de agua, una caracte -- rística de esta partícula arcillosa, es que presenta una -- forma tubular en comparación con la caolinita que presen -- ta una forma plana, este material debido a sus caracterís -- ticas, presenta contenidos de agua muy elevados y pesos -- volumétricos bajos.

En la Figura III.b.4., se puede apreciar que los iones -- adsorbidos por el suelo, pueden ser intercambiables. Po -- niendo como ejemplo la reacción ilustrada en la Figura -- III.b.4., se puede observar que la adición de cloruro de --

calcio al sistema suelo-agua, da como resultado un cambio de iones pasando por ser partícula arcillosa con iones de sodio a una partícula de arcilla con iones de calcio. Debido a la gran importancia que tiene el ión intercambiable que se encuentra sobre la partícula de suelo en cuanto a su comportamiento, la reacción anterior por ejemplo, da como resultado la depresión de la doble capa de agua, lo cual afecta a las propiedades de la masa constituida por las partículas. Existen principios generales que controlan a la velocidad y dirección de las reacciones de intercambio; dichos principios involucran a la valencia de los cationes intercambiados, concentración de cationes, etc.

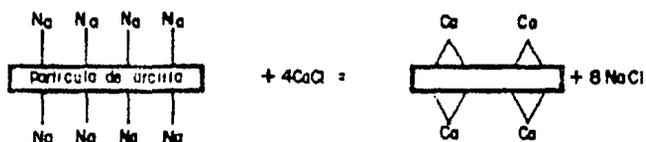
Podemos apreciar también en la figura III.b.5. los arreglos en las partículas de suelo sedimentado, y debemos mencionar que la diferencia observada, se debe a que las partículas que contienen sal, se presenta un grado de paralelismo entre las partículas adyacentes, debido a que se presenta una atracción de tipo valencia secundaria. Cuando se carece de sal en la partícula, se presenta el contacto de bordes con caras, tendiendo las partículas a ser perpendiculares entre sí, esto se debe a que las atracciones son de tipo electrostático. La partícula presenta un arreglo de partículas paralelas.

Es conveniente mencionar que los compuestos de suelos contienen frecuentemente compuestos minerales amorfos (Silice y Aluminio Amorfos) que son fácilmente atacables por ciertas sustancias para producir cambios químicos.

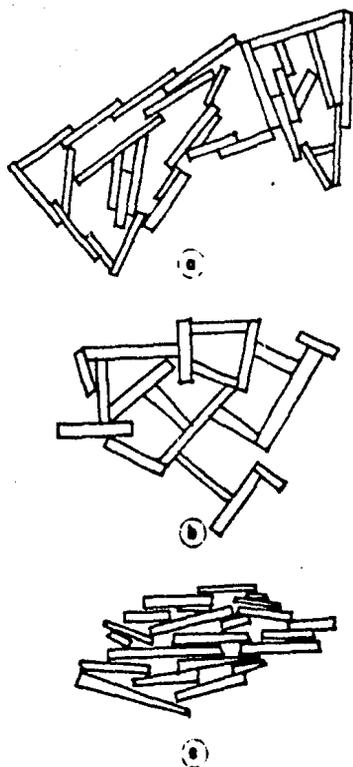
Si tales sustancias son contenidas, por ejemplo en el agua de mezclado de los suelos, tales cambios se producirán y es necesario que el proyectista de una estabilización conozca tales cambios para obtener un mayor éxito.

### c) CARACTERISTICAS GEOTECNICAS:

Hasta el momento se han tratado solamente los aspectos mineralógicos y físico-químico para tratar de comprender los efectos de expansión que experimentan las arcillas. Sin embargo, los factores físico-químicos y mineralógicos sólo pueden ser adecuados para explicar la expansión de algunos sistemas especiales arcilla-agua-electrolito, ya que la mayoría de los suelos expansivos que ocurren naturalmente, deben tomarse en consideración los factores mecánicos.



**FIG. III.B.4. SUSTITUCION DE IONES INTERCAMBIABLES.**



**FIG. III.B.5. ESTRUCTURAS DE SEDIMENTOS.**

- a) Floculación ordenada
- b) Floculación no ordenada
- c) Dispersión

Estos factores mecánicos son por ejemplo, su textura, los esfuerzos a los que está sometido, las formas de sus partículas y la forma en la cual se presenta la expansión.

En estudios efectuados por Terzaghi en 1931, establece que la causa fundamental de la expansión, es la deficiencia de las presiones del agua en el suelo a las cuales, él se refirió como presión capilar.

De acuerdo a su punto de vista, las reacciones físico-químicas que tienen lugar dentro de los sistemas, influyen en la expansión solo en cuanto a que ellas cambian las propiedades elásticas en el sistema, alterando la adhesión en los puntos de contacto, ó la rigidez de las ligas moleculares ó generando una tensión adicional en la fase líquida.

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

Como otro argumento de la importancia de las aportaciones mecánicas a la presión de expansión, Terzaghi señaló que dos muestras de la misma arcilla pueden estar en la misma concentración y una de ellas generará una gran presión de expansión y la otra casi ninguna. Esta reacción se ilustra en la Figura III.c.l., en la cual se puede observar que  $e_A = e_B$  pero  $P_A$  mucho mayor que  $P_B$ . Es importante concluir que la más importante razón para las diferencias entre  $P_A$  y  $P_B$  es el ordenamiento diferente de las partículas, para las dos condiciones. Puede haber también diferencias en las fuerzas físico-químicas de interacción resultante de estos diferentes arreglos.

Terzaghi en su estudio realizado en el año de 1931, concluye en la siguiente forma:

La energía de un sistema de dos fases de una concentración dada, está compuesta de dos partes, la energía mecánica y la energía físico-química. La primera representa el equivalente de la compresión mecánica previa de la fase sólida y puede ser comparada con la energía almacenada en un resorte comprimido, la otra es la energía equivalente de la interacción físico-química del sólido y la fase líquida.

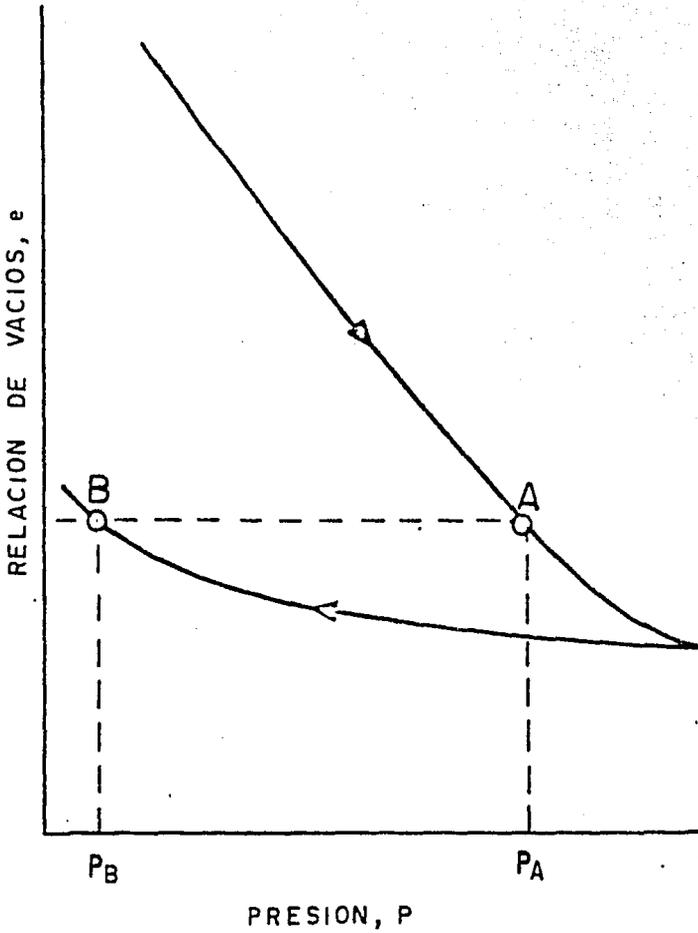


FIGURA III.c.1. Condición de 2 Muestras que para la misma relación de vacíos tienen diferentes presiones de expansión.

Concluyendo, después de lo expuesto en este capítulo se puede decir lo siguiente:

- 1) El tipo y la cantidad de mineral arcilloso son los factores más importantes que influyen la expansión y la presión de expansión, ya que ellos determinan el tamaño de las partículas, la forma de las partículas, las de la superficie y las ligas intercapas.
- 2) Aún cantidades muy pequeñas de hidróxidos intercapas, pueden restringir grandemente la expansión de minerales arcillosos expansivos, no obstante que estos hidróxidos intercapas puedan tener una influencia insignificante sobre el área superficial y la cantidad de intercambio. La presencia de los hidróxidos intercapas es común en suelos arcillosos que ocurren naturalmente.
- 3) Las repulsiones de la doble capa, pueden explicar razonablemente el comportamiento de la expansión de la montmorilonita sódica y posiblemente también la de la montmorilonita cálcica.
- 4) Los factores mecánicos no pueden ser pasados por alto como causa de la expansión. La expansión y la presión de expansión son generados por tensión en la fase líquida, la cual puede tener sus orígenes en los efectos físico-químicos y mecánicos.
- 5) Las contribuciones mecánicas a la expansión, surgen principalmente en respuesta a la energía almacenada en la forma de partículas cambiadas y distorsionadas.

Finalmente se puede esperar que un conocimiento profundo de lo expuesto, dará como resultado una mejor identificación de las arcillas expansivas, una mejor selección de métodos para predecir la cantidad de expansión y métodos más adecuados para minimizar los efectos perjudiciales de los suelos expansivos en el campo.

#### IV).- ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON CAL:

##### a) TIPOS DE CALES:

La utilización de la cal como estabilizante de suelos, se puede considerar como una novedad, pues en la antigüedad su uso era bien reconocido, fué utilizado en la construcción de la muralla china, así como en la construcción de caminos romanos durante el Imperio Romano. Sin embargo, el estudio de los mecanismos que dan lugar a la modificación del comportamiento de los suelos por la acción de la cal son muy recientes, se puede considerar que dichos estudios datan de apenas 30 años.

Con el objeto de comprender mejor los mecanismos -- que influyen para la modificación de los suelos estabilizados con cal, debemos mencionar algunos aspectos -- de la misma, que son importantes para comprender mejor -- el proceso de la estabilización.

Químicamente hablando, la cal es relacionada con el óxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ) y se obtiene como el producto de la calcinación de las piedras calizas, que pueden ser calizas calcífticas ó dolomíticas.

Las cales dolomíticas se obtienen de la calcinación de las calizas dolomíticas, las cuales están constituidas por un 30 a 40% de carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_2$ ), siendo el resto carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_2$ ). Para la obtención de la cal, la temperatura se eleva a  $730^\circ\text{C}$ , por lo que las calizas dolomíticas se descomponen para formar el óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_2$ ).

Posteriormente debe elevarse la temperatura hasta  $900^\circ\text{C}$  para lograr la descomposición del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y también bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Las cales calcífticas se obtienen de la calcinación de las rocas calcáreas (calcitas, calizas calcífticas, conchuelas, etc.) constituidas de entre un 95 y 99% de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Para la obtención de la cal, la temperatura debe elevarse a  $880$  ó  $900^\circ\text{C}$ , descomponiéndose el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

El proceso de calcinación de las calizas, se puede realizar en dos tipos de caleras. La calera cilíndrica vertical y la calera rotatoria.

La calera cilíndrica vertical, consiste en un cilindro metálico vertical recubierto con tabique refractario y -- con tolvas en la parte superior. El calor se aplica en -- la parte baja del cilindro, teniéndose que remover del -- fondo de la calera a intervalos de 8 hrs. aproximadamente al producto calcinado.

La calera rotatoria consiste también de un cilindro metálico recubierto con tabique refractario, el cual se encuentra en una posición casi horizontal, teniendo una inclinación respecto a la horizontal de 1.0 a 1.5%. Su longitud es muchas veces mayor que el cilindro de las caleras verticales. En estas caleras las calizas se trituran hasta obtener un tamaño máximo de 5 cm. Posteriormente -- las calizas se dividen en tamaños para poderlas introducir a la calera, ya que la velocidad de la calcinación de los mismos, depende de su tamaño. Esto se hace con la finalidad de obtener una calcinación uniforme, y el rango apropiado para cada grupo de partículas, debe ser tal que el diámetro de la partícula más grande sea el doble de la -- más pequeña, pues si el rango es muy amplio no se obtendrá una calcinación uniforme.

El objeto de la posición del cilindro y su rotación en las caleras rotatorias, es que las partículas se muevan -- en forma continua a través de los dispositivos de aplicación del calor, hasta que son descargados en el extremo -- más bajo de la calera.

El producto de la calcinación se enfría para su posterior procesamiento.

El producto de las caleras verticales puede distinguirse del de las caleras rotatorias, porque en el caso de la primera, este producto queda anguloso, mientras en las -- otras el producto queda redondeado.

Debido a que el producto que nos interesa es la cal hidratada, pues es ésta la que se utiliza en la estabilización, el proceso de elaboración de la cal en cal hidratada.

da continúa de la siguiente manera: A la cal viva (producto obtenido de la calcinación), se le aplica agua suficiente para saturarse químicamente bajo condiciones de hidratación. La cal obtenida de calizas calcínicas, tiene como ya se vió un alto contenido de óxido de calcio ó cal viva, la cual reacciona rápidamente con el agua para producir cal hidratada, debido a que todo el óxido de calcio  $\text{CaO}$  se transforma con la adición de agua en hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , ó cal hidratada.

La cal obtenida de las calizas dolomíticas, es decir - las que contienen óxido de magnesio  $\text{MgO}$ , debido a que es menos reactivo, no se hidrata tan rápidamente en los equipos normales de procesamiento. Las cales dolomíticas, hidratadas con equipo operados a presión atmosférica y con tiempos de hidratación bajos, se obtiene esencialmente hidróxido de calcio y óxido de magnesio  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$ , y se les conoce como cales monohidratadas.

También las cales dolomíticas se puede obtener las cales dolomíticas dihidratadas ó cales hidratadas especiales, las cuales contienen hidróxido de calcio y de magnesio  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$ .

Este tipo de cales se obtiene mediante la hidratación del óxido de magnesio  $\text{MgO}$  de una cal dolomítica monohidratada, lo cual se logra por medio del uso de equipos especiales y tiempos de hidratación largos ó bien bajo temperaturas y presiones elevadas.

Debido a que al hidratarse la cal se produce un incremento de volumen, los grumos de cal se transforman en polvo durante este proceso. Debido a ésto, se pueden separar con facilidad el producto no hidratado, con tan solo cribar el producto a través de la malla # 30 ó bien utilizando un sistema de separación mediante la aplicación de aire. Después del apagado que se realiza, debido a que la hidratación es un proceso exotérmico, el producto se almacena durante 48 horas en un tanque especial, para permitir la evaporación de la humedad excesiva.

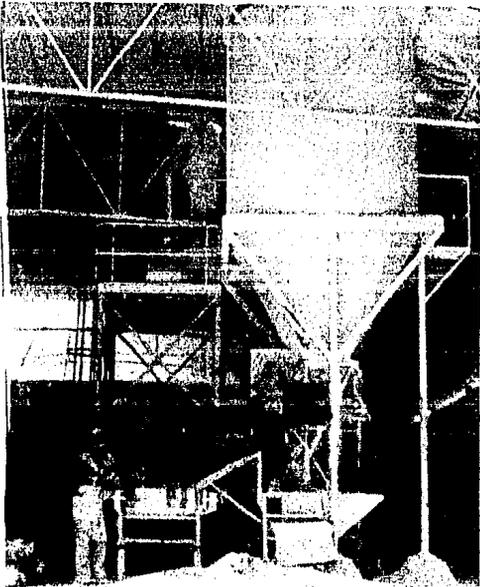
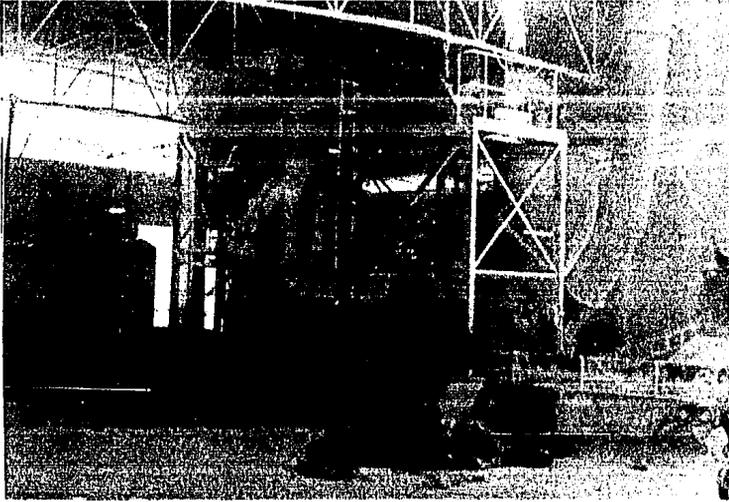
Existen varios detalles los cuales se deben tener en cuenta para poder elegir con mayor seguridad el tipo de cal que se va a utilizar. Los efectos de los tamaños de

las partículas a calcinar, temperaturas y tiempo de la calcinación son importantes. La máxima temperatura a que se sujetan las rocas calizas durante la calcinación, afecta grandemente a las propiedades de los óxidos obtenidos. El tiempo de duración de la calcinación es también importante (a este tiempo lo designamos como tiempo de retención). Sin embargo, muchos investigadores han encontrado que el tiempo de retención produce efectos mucho menores que la temperatura de calcinación cuando es excesiva, en las propiedades de los óxidos obtenidos.

Las cales obtenidas en un quemado fuerte, (temperatura de calcinación más alta) son más densas y menos efectivas que las cales obtenidas en quemados suaves (temperatura de calcinación menos alta), debido a la sinterización de los óxidos (unión de la superficie de las partículas de un polvo compacto cuando se calcina). En general mientras más alta sea la temperatura de calcinación, menos será la reactividad del producto.

Como ya se mencionó anteriormente, se deberá alcanzar por lo menos una temperatura de 900°C para descomponer totalmente a una caliza calcítica ó dolomítica, sin embargo en las calizas dolomíticas debido a que la temperatura es mayor que la necesaria para la formación del óxido de magnesio, éste sufre una sinterización muy severa, por lo cual su reactividad disminuye mucho.

También debemos tener en cuenta que debido a que en la calera vertical se usan partículas y tiempos de retención mayores, la calidad del producto calcinado es menos uniforme que en el caso de las caleras rotatorias, por lo que, es más probable que se sobrecalienten a las calizas en las caleras verticales, mientras que las caleras rotatorias tienen la ventaja de que se tiene un mayor control de la temperatura y del flujo de partículas lo que se traduce en una mejor calidad del producto calcinado.



ASPECTOS GENERALES DE UNA  
PLANTA HIDRATADORA DE CAL  
VIVA.

b)- REACCION SUELO - CAL:

Las arcillas expansivas son uno de los tipos de suelo, con los que más frecuentemente se tropieza un ingeniero, debido a sus características, dicho suelo es necesario estabilizarlo con el objeto de poder incrementar su resistencia y disminuir su sensibilidad a cambios volumétricos, debidos a cambios en el contenido de agua.

Para conocer mejor la acción de la cal en los suelos expansivos, nos enfocaremos a la acción de la cal sobre los tres principales minerales arcillosos, como son la montmorilonita, la caolinita y la illita.

La variación que experimentan los límites de consistencia de una arcilla para diferentes porcentajes de cal, dependen en gran parte del tipo de mineral arcilloso de que se trate, ya que por ejemplo, un mineral como la caolinita la adición de cal da como resultado una disminución ligera de su límite líquido, mientras que ese mismo proporcionamiento de cal en la montmorilonita, el límite líquido baja sustancialmente. Con respecto al límite plástico, la adición de cal da como resultado que para cualquier mineral arcilloso, este límite aumenta en forma sustancial con respecto al límite líquido, por lo tanto el suelo arcilloso experimenta una reducción en el índice de plasticidad con la adición de cualquier porcentaje de cal, sobre todo, en períodos largos. Un ejemplo de esto, se puede ver en la Tabla IV.b.1.

Otra variación importante es la que sufren los pesos volumétricos de los minerales arcillosos, como se puede ver en la figura IV.b.1. Con la adición de cal al suelo, se obtienen pesos volumétricos menores, pero mientras más alto sea el porcentaje de cal adicionada, el suelo se vuelve menos sensible al agua, es decir, que prácticamente el mismo peso volumétrico para variaciones amplias en la humedad.

La alteración de los minerales arcillosos mediante la adición de cal y la cristalización de nuevas especies, debido a la estabilización con cal, son el origen de las profundas diferencias en el comportamiento anteriormente mencionado.

Muestras tratadas con diferentes porcentajes.	—Límite líquido			Límite plástico			Índice plástico		
	24 h	28 d	90 d	24 h	28 d	90 d	24 h	28 d	90 d
	( en % )								
Arcilla Barremiana.	0	41		16			25		
	3	55	54	25	30		27	24	
	5	51	56	29	30		22	26	
	7	45	53	41	29	31	31	16	22
Arcilla Albina.	0	45		20			25		
	3	55	56	34	34		21	22	
	5	49	57	31	38		18	19	
	7	48	50	46	32	38	38	16	12
Arcilla de Valentigny.	0	46		23			23		
	3	53	49	30	32		23	17	
	5	51	55	29	35		22	20	
	7	50	50	46	32	34	35	18	16
Caolinita	0	71		36			35		
	20	87	82	10.5	47	52	8.5	40	30
Montmorillonita	0	185		42			123		
	20	87	90	--	72	<4	--	15	--
Bentonita	0	450		36			414		
	20	203	20.5	8	138	14	<4	65	6.5

TABLA IV.b.1. Límites obtenidos en muestras tratadas con diferentes porcentajes de cal después de 24 horas, 29 días y 90 días de contacto.

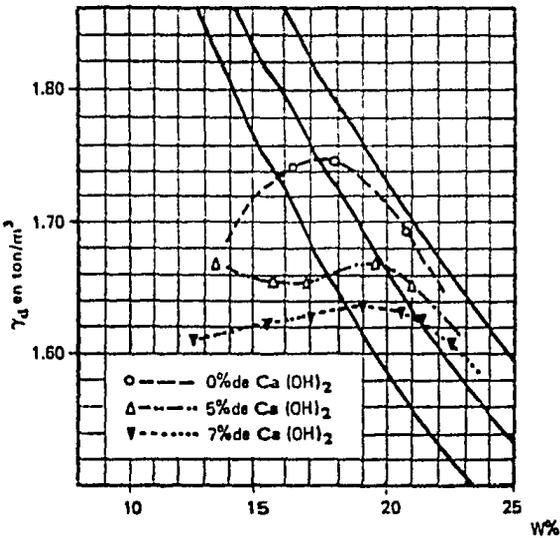
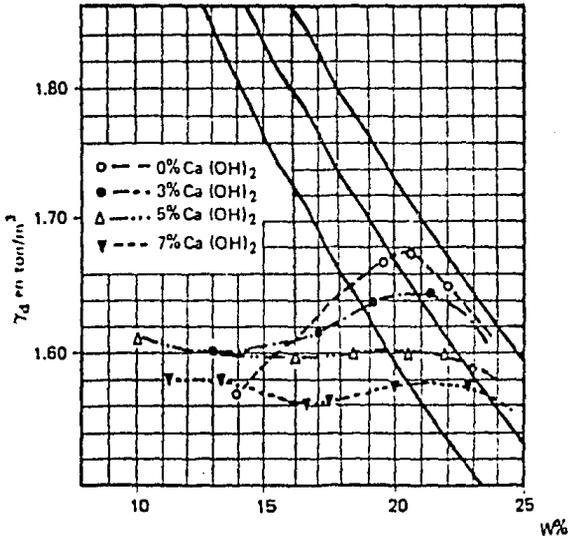


Figura IV.b.1. Evolución de las Curvas W - & , en materia les arcillosos con adición de diferentes porcentajes de cal.

La composición mineral de las arcillas son el más importante elemento que influye en su comportamiento con la adición de cal, como ahora veremos.

#### Montmorilonita:

Estos minerales arcillosos son fuertemente reactivos con la cal, experimentando modificaciones profundas al quedar en contacto con ella. Al sustituir un ión trivalente ( $Al^{+3}$ ) por un ión divalente ( $Mg^{+2}$ ), sustitución isomorfa se provoca una compensación mediante la entrada de iones positivos a las láminas, produciéndose entre estas láminas ligas relativamente débiles. La entrada de la solución de Cal Hidratada ( $Ca(OH)_2$ ) entre las láminas de arcilla, se lleva a cabo en forma rápida, por lo cual la superficie en contacto con la cal sufre cambios prácticamente inmediatos, del tipo de intercambio catiónico y una lenta acción puzolámica.

#### Caolinita:

Como anteriormente se había mencionado la unión entre las láminas de la caolinita son del tipo de hidrógeno, ó sea que el ión  $H^+$  sufre la atracción de los oxígenos de dos láminas. Por esta razón, la unión entre las láminas de la caolinita, es mucho más fuerte que en la montmorilonita, por lo cual la solución de cal hidratada se puede circular libremente por las láminas; por lo cual, la cal ataca a estos compuestos por los bordes y las caras expuestas.

#### Ilita:

En este mineral arcilloso se ha visto una cierta pasividad al contacto con la cal. Sin embargo, se ha demostrado que después de cierto tiempo (6 semanas ó más), se experimenta un aumento sensible en las resistencias a la compresión, debido tal vez a la formación de un cemento de silicatos y aluminatos de calcio hidratados. Esto se puede deber además de su estructura tan cerrada, a que la presencia de azufre reacciona en parte con la cal, formando sulfatos, los cuales hacen más difícil la posibilidad de reacción del mineral arcilloso con la cal.

Los efectos de la cal, sobre los compuestos arcillosos se pueden resumir de la siguiente forma:

- 1) En una primera etapa se tiene una reacción iónica. La adición de la cal a una arcilla corresponde a un aporte masivo de iones  $(OH)^-$  y  $Ca^{++}$ . Los cationes de calcio se unen a las superficies de las láminas arcillosas por los efectos de intercambio catiónico, desarrollando fuerzas eléctricas suficientes para contribuir a la formación de puentes que unen a las partículas -- arcillosas. Esta acción, ayuda en edades tempranas a modificar al material aumentado ó reduciendo el límite líquido y aumentando en mayor escala al límite plástico; lo que resulta prácticamente en una reducción en el índice plástico. Así mismo, el suelo se vuelve menos sensible al agua.
- 2) Una segunda etapa durante la cual las arcillas reaccionan en forma más ó menos vigorosa de acuerdo con la -- naturaleza del mineral arcilloso. Esta reacción se -- traduce por una degradación más ó menos acelerada del -- mineral arcilloso y la aparición de nuevas especies -- minerales responsables del aumento en la resistencia -- a la compresión simple (acción puzolámica).

La transformación de los minerales arcillosos por la cal, tienen como origen la solubilidad de sílice y del -- aluminio en un medio fuertemente básico.

Con PH mayores de 12, el sílice y el aluminio pasan a solución la transformación que se experimenta con la adición de cal en cualquier porcentaje, es que si en el momento de la adición, el sílice y aluminio se encuentran con valores de entre 12.5 y 13.0 de PH después de 48 --- horas de contacto, los valores bajarán hasta un 11 aproximadamente con una adición del 5% de cal. Después de un mes, se pueden tener valores de hasta 9 y 9.5. Por lo -- cual, se puede concluir en que la transformación en este -- aspecto es muy grande en los primeros momentos, prolongándose esta acción hasta un mes después. Paralelamente el -- sílice y el aluminio liberados se combinan con la cal para formar silicatos y aluminatos de calcio. Esta cristalización, es lenta al principio y se prolongará durante -- tiempos muy largos. Esto se ha podido comprobar con la -- utilización de la difracción de rayos X y pruebas de resistencia.

Concluyendo, después de analizar estos aspectos, podemos decir, que la caolinita se puede considerar como un mineral poco sensible a la cal, en comparación con la montmorilonita, necesitando para sufrir alguna modificación, tiempo de contacto largo.

La medición de la resistencia efectuada sobre la caolinita, muestra fuertes incrementos entre 0 y 7 días para un 5% de cal. Los silicatos que aparecen durante el tratamiento, constituyen un excelente cementante para las partículas.

Las montmorilonetas, son minerales arcillosos altamente reactivos con la cal. Esta reacción de la montmorilonita con la cal origina la formación de aluminatos. Estos nuevos minerales así formados, dan como resultado una modificación drástica a las características geotécnicas del suelo, formando además un cemento tan bueno como el formado por la adición de sal en la caolinita.

La illita es el mineral arcilloso que reacciona más difícilmente con la cal, pues debe recordarse que entre las láminas del mineral, se tienen iones de potasio no intercambiables que forman parte de puentes y mantienen unidas a las partículas, lo que hace que la cal presente una reactividad muy débil.

Los diferentes tipos de reacción de los minerales arcillosos, se pueden comprender mejor recordando su estructura básica. Es decir, en la fase primaria, la reacción que se verifica entre el material arcilloso y la cal, se debe al intercambio catiónico. Cambiando a los cationes alcalinos de sodio  $\text{Na}^+$ , por cationes de calcio  $\text{Ca}^{++}$ . Adicionalmente el aporte de iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{OH}^-$  dan como resultado que se desarrollen fuerzas eléctricas que flocculan la arcilla, aumentando la relación de vacíos. La diferencia entre la caolinita y la montmorilonita, es que la velocidad de ataque entre la cal y el mineral arcilloso, es diferente siendo mayor en la montmorilonita que en la caolinita, debido a que la liga entre las láminas de la montmorilonita es débil, lo que permite una rápida circulación de la solución de cal, aumento así la superficie de ataque, y permitiendo la formación de aluminatos, en contraste con lo que se experimenta en la caolinita, en la

cual las ligas entre sus láminas es más fuerte, reduciendo así la distancia entre sus láminas, por lo cual la solución de cal, no puede circular libremente entre dichas láminas atacando solamente la superficie correspondiente a las partículas exteriores.

Debe tenerse en cuenta que es indispensable la presencia de agua para tener éxito en el tratamiento, y que la presencia de carbonatos y material orgánico en el suelo, inhiben la acción de la cal. Es necesario para un buen resultado, utilizar cales de buena calidad, es decir, que contengan un alto porcentaje de cal libre, además la cal debe presentarse como un polvo muy fino y no carbonoso, para poder evitar una estabilización inútil.

En el diseño de la estabilización con cal, debe tenerse presente las características que se desean para el suelo estabilizado, para lo cual es indispensable el conocer las características de los minerales arcillosos que contenga el suelo, ya que con base a estas características, se puede saber de antemano los resultados que se obtendrán con el empleo de la cal.

Los factores que influyen para la elección del contenido óptimo de cal, son muy diversos, destacándose de entre ellos, el contenido de materia orgánica, porcentaje de los diferentes minerales arcillosos presentes en el suelo características que se desean modificar en el suelo, tipos de cal, porcentajes de finos y gruesos en el suelo a tratar, etc.

Cualquiera que sea el método para el diseño de la estabilización, conviene mencionar que existe un punto llamado de fijación en el contenido de cal, para la estabilización más allá del cual la cal prácticamente no produce mejoras notables en el material, al menos a corto plazo.

Esto significa que para el contenido de cal, se ha satisfecho la reactividad potencial de los minerales arcillosos, e inclusive la de la materia orgánica.

El punto de fijación se establece de acuerdo a pruebas geotécnicas según las características que deseamos modificar principalmente, así pues, se puede tener un suelo en el cual se utilice el límite plástico para obtener el punto de fijación. En la figura IV.b.1., se puede ver que para un contenido de 5% de cal, el suelo ya no aumenta su límite de plasticidad, considerándose para este caso el 5% como el punto de fijación, ya que es esta la propiedad que nos interesa modificar. Si también buscáramos obtener un aumento en la resistencia, veríamos los resultados tanto de los contenidos de cal, en el índice plástico como su comportamiento en cuanto a la resistencia, obtendríamos por ejemplo la gráfica de la Figura IV.b.2. En la cual se puede ver que para contenidos mayores del 4% de cal, el índice plástico no experimenta cambios notables, sino que permanece constante, mientras que la resistencia con contenidos de más de 4% se continúa aumentando, debido tal vez a la acción puzolámica de la cal con algunos minerales arcillosos ó bien al endurecimiento de la propia cal.

En la Figura IV.b.3., se puede observar la variación de las propiedades de un suelo a partir de los diferentes contenidos de cal. En este caso el suelo se compone de arcillas montmoriloníticas.

De lo anterior se puede concluir que es a final de cuentas la propiedad que reviste especial interés para el ingeniero, la que debe ser empleada para determinar el punto de fijación.

Los procedimientos para determinar la efectividad de la reacción suelo-cal, son también muy variadas, algunas de ellas requieren el empleo de técnicas muy especializadas como el empleo de la difracción de rayos X, espectrometría con rayos infrarrojos, microscopio electrónico y análisis químicos, hasta las relativamente sencillas, como son la determinación de las propiedades geotécnicas en el suelo estabilizado y sin estabilizar. En algunas ocasiones se determina también el valor de PH en la mezcla de suelo - cal, sobre todo, cuando el suelo contiene materia orgánica, con la finalidad de determinar la efectividad de la estabilización.

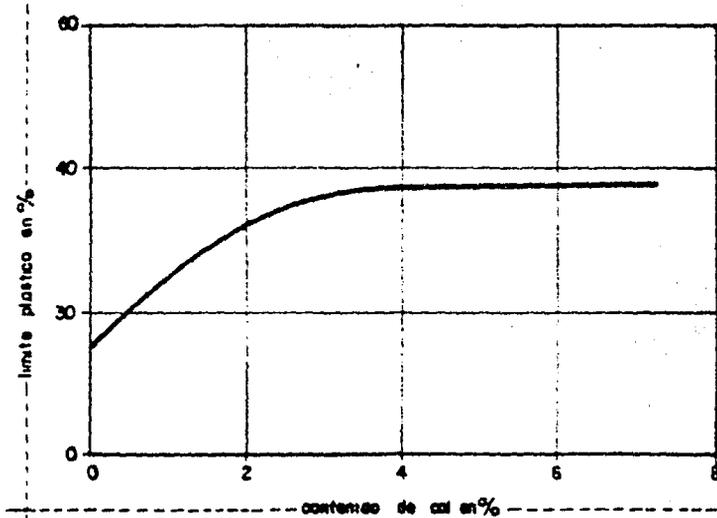


FIG. IV.B.1. ESTIMACION DEL PUNTO DE FIJACION CON BASE EN EL LIMITE PLASTICO.

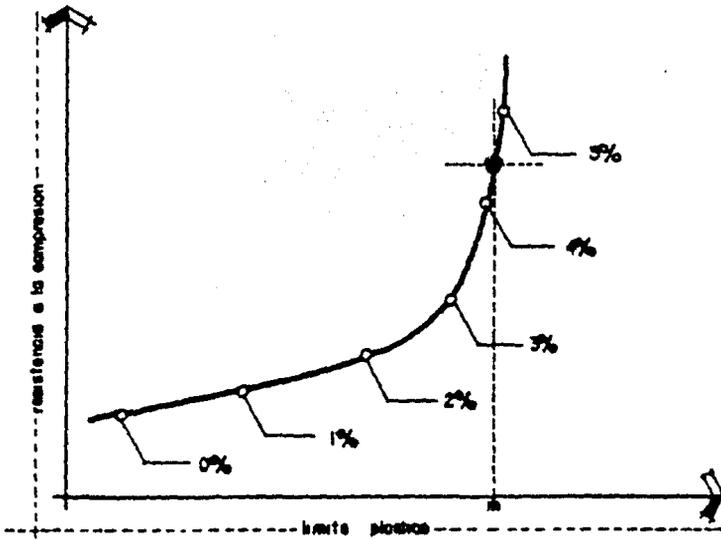


FIG. IV.B.2. ESTIMACION DEL PUNTO DE FIJACION CON BASE EN PRUEBAS DE COMPRESION SIMPLE Y LIMITE PLASTICO.

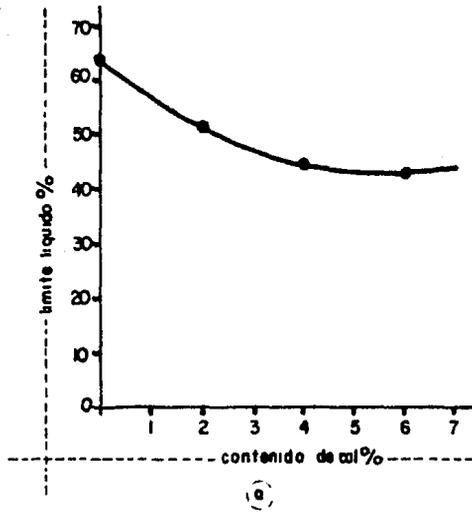


FIG. IV.B.3. VARIACION DE ALGUNAS PROPIEDADES DE UNA ARCILLA MONTMORILONITICA CON LA ADICION DE CAL.

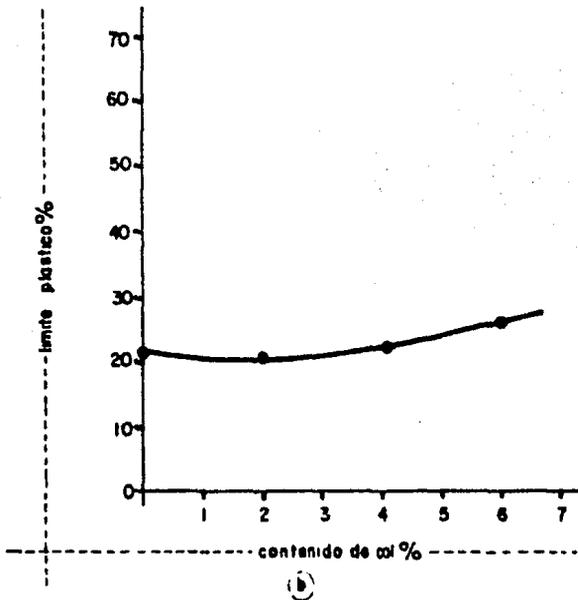


FIG. IV. B.3.

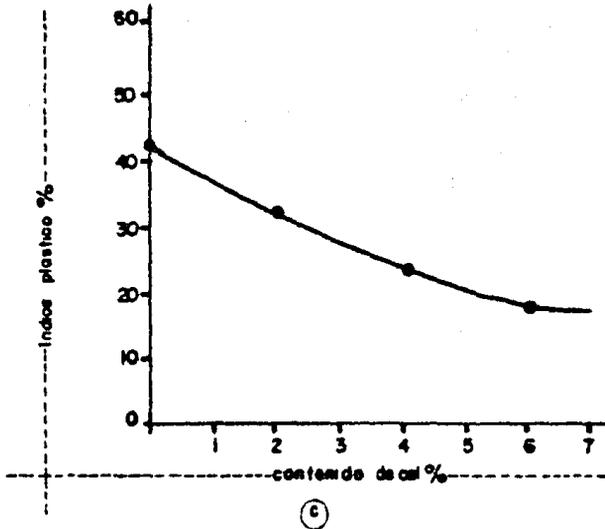


FIG. IV. B.3. CONTINUACION

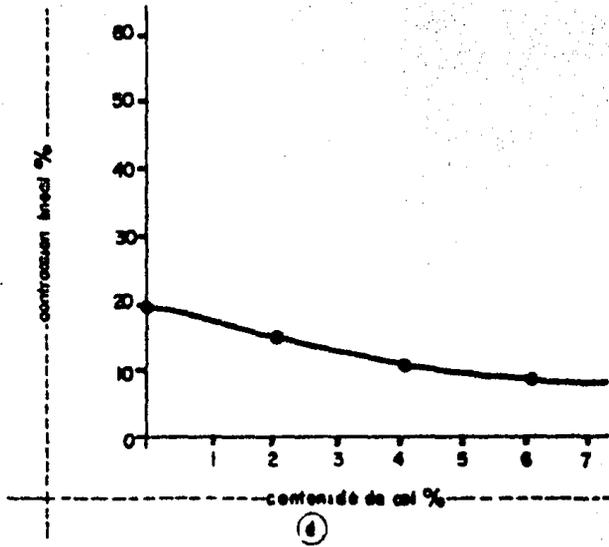


FIG. IV. B.3. CONTINUACION

c) - VARIACION DE LAS PROPIEDADES DE UNA ARCILLA CON LA ADICION DE CAL:

En algunos tipos de minerales arcillosos, la estabilidad con cal, no logra ninguna modificación de las características principales del suelo, por lo cual, también - en este aspecto debe tenerse mucho cuidado para reconocer las modificaciones ó carencias de estas, al estabilizar un suelo con minerales arcillosos.

El tratamiento de los suelos expansivos, mediante su estabilización con cal, puede lograr los siguientes - efectos:

La resistencia del suelo a la compresión se incrementa así mismo también el valor relativo de soporte se incrementa.

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

Las contracciones y expansiones, debido a cambios de humedad, se reducen considerablemente.

El agua y la cal colaboran para acelerar la disgregación de los grumos de arcilla durante la operación de - pulverización, lo cual facilita la trabajabilidad.

En áreas pantanosas ó 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.

Se reducen los efectos aglomerantes.

La capa estabilizada proporciona una excelente plataforma de trabajo para la construcción de las capas superiores de la sección estructural de un camino.

d) - PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA LA ESTABILIZACION DE TERRACERIAS:

Siguiendo los pasos indicados por la "National Lima - Association" de los Estados Unidos de Norteamérica, el - procedimiento constructivo de la estabilización es el - siguiente:

- La cal utilizada en la estabilización debe ser de buena calidad, para garantizar una buena reacción con el suelo arcilloso.
- La fracción arcillosa debe disgregarse para obtener una completa estabilidad, por lo cual, cuando se trate de arcillas francas, es necesario efectuar el mezclado de dos etapas, permitiendo entre cada etapa un tiempo de curado, debe añadirse en cada etapa, la mitad de la cal obtenida en el diseño. Esto permite que en la primera etapa, la cal disgrega la arcilla en pequeños grumos, los cuales son fácilmente pulverizados en la etapa final.
- La capa estabilizada no debe ser mayor de 15 cm. de espesor, realizar por capas, en el caso en que la capa sea mayor de 15 cm. de espesor.
- Una vez que se tiene el nivel al cual debe llegarse a la capa estabilizada, se escarifica y disgrega hasta la profundidad deseada y posteriormente se pulveriza en forma parcial.
- Deben tomarse las medidas necesarias para que no exista en la capa por estabilizar raíces, turbas, material orgánico ó agregados mayores de 7.5 cm. La escarificación del terreno se puede realizar con motoconformadoras, utilizando posteriormente un arado de discos, ó una mezcladora, para efectuar el disgregado de la capa.
- El siguiente paso es la adición de cal, la cual se dosifica con respecto a su peso volumétrico seco, aplicándose en forma uniforme ya sea en seco ó en forma de lechada. Si la aplicación se hace en seco, se utilizan las bolsas de cal colocándolas sobre el camino, la cual debe distribuirse con rastras antes de iniciar su mezclado. Es importante señalar que nunca debe utilizarse la motoconformadora para distribuir la cal.

Los sacos de cal, deberán colocarse en el sitio que se determine, para obtener una distribución uniforme. Con un cuchillo se rasgan y se vacían distribuyéndose por medios manuales como las rastras.

Si se utiliza el procedimiento de lechada, deberá ---  
 contarse con un agitador adaptado al camión, para evitar  
 el asentamiento de la cal. La lechada deberá prepararse  
 en un tanque central de mezclado provisto de un sistema  
 de agitación. Otra forma puede ser la adición de bacha--  
 dos de agua y cal al carro tanque, de tal manera que el  
 mezclado se realice con bomba de circulación durante el  
 traslado de la lechada.

La distribución puede realizarse con pipas normales,  
 distribuidores de asfalto con ó sin distribuidor de presi--  
 ón.

Mezclado y humedecido inicial. Es necesario efectuar  
 un mezclado preliminar para poder distribuír la cal en -  
 forma uniforme y completa en el suelo, así como para po-  
 der disgregarlo hasta tamaños menores de 5 cm. Durante  
 esta etapa deberá agregarse agua para elevar la humedad  
 de la mezcla de suelo cal hasta un 5% de la humedad ópti-  
 ma. También resulta deseable efectuar un mezclado me---  
 diante máquinas rotatorias. Después del mezclado ini---  
 cial, deberá conformarse a la capa tratada con cal hasta  
 tener aproximadamente la sección deseada y deberá asimis-  
 mo, efectuarse una ligera compactación antes del curado  
 inicial, con el objeto de minimizar las pérdidas por eva-  
 poración y carbonatación de la cal, ó bien prevenir un -  
 humedecimiento excesivo debido a probables lluvias.

El equipo necesario para esta operación puede consis--  
 tir en mezcladoras rotatorias ó arados de disco, un ca--  
 rro tanque, un rodillo neumático ligero.

Curado inicial. Para permitir que el agua y la cal -  
 rompan los grumos de arcilla, es necesario permitir un -  
 tiempo de curado de 1 a 48 horas, pero este tiempo puede  
 ser mayor dependiendo del juicio del ingeniero, ya que -  
 puede ser hasta de más de 7 días en el caso de suelos --  
 muy arcillosos.

Mezclado final y disgregación. Deberá nuevamente --  
 efectuarse el mezclado y disgregación hasta que todos --  
 los grumos pasen por la malla de 1" y cuando menos el --  
 60% pase la malla No. 4 (excepto las partículas sólidas  
 de suelo). Puede requerirse la adición de agua para al-

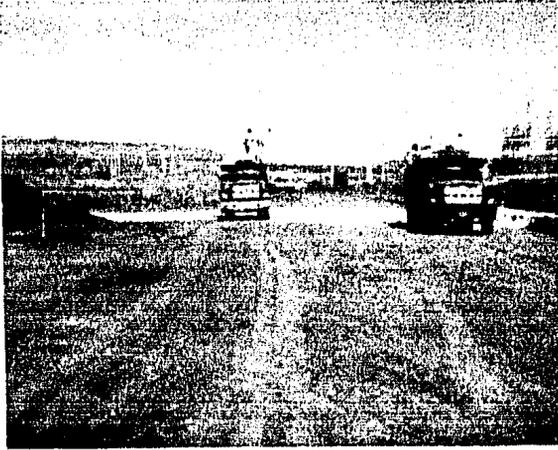
canzar la humedad óptima de compactación antes de compactar. En esta etapa resulta muy recomendable la utilización de mezcladores rotatorios.

**Compactación.** Deberá compactarse a la mezcla de suelo cal, de acuerdo a lo indicado en proyecto y tomando en cuenta los resultados del estudio de laboratorio. La compactación podría iniciarse inmediatamente después del mezclado final y en ningún caso deberá permitirse un retraso mayor de una semana.

La compactación deberá efectuarse en capas de espesor máximo de 15 cm. utilizando rodillo neumático pesado, ó rodillos vibratorios ó una combinación de rodillo pata de cabra y rodillo ligero. En ningún caso deberá permitirse la compactación con rodillo neumático ligero, de capas iguales ó mayores de 15 cm. En caso de que el equipo disponible consista de rodillo neumático ligero, el espesor de las capas deberá ser de 3 a 5 cm.

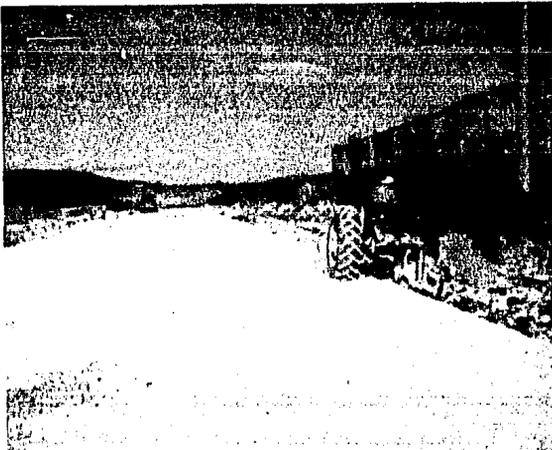
**Curado final.** De acuerdo con observaciones de campo y/o pruebas del laboratorio, se fijará el tiempo de curado para que la capa estabilizada adquiera las características deseadas antes de colocar las capas superiores. Este tiempo generalmente es de 3 a 7 días. El ingeniero residente deberá decidir este lapso de tiempo, pudiendo efectuar el curado en alguna de las siguientes formas:

- Curado con la adición de agua, que consiste en mantener húmeda a la superficie mediante ligeros rociados con agua en forma periódica y recompactada cuando es necesario.
- Impermeabilización de la superficie con la aplicación de un riego asfáltico ó similar.

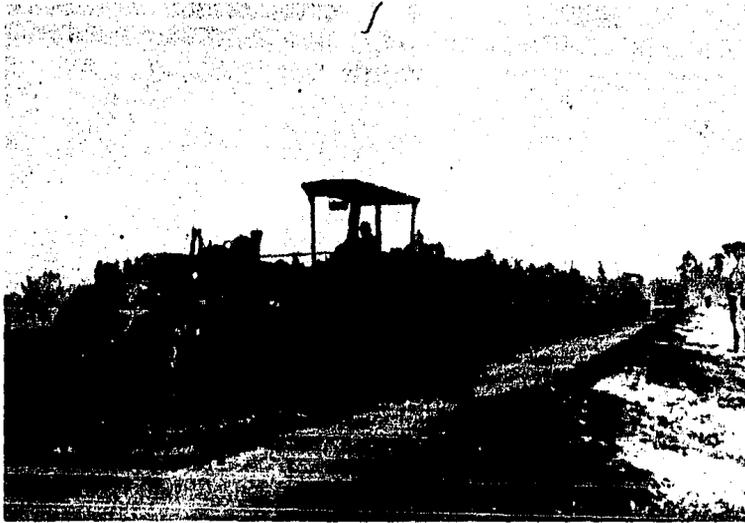


ADICION DE CAL AL SUELO POR MEDIO DE SACOS.

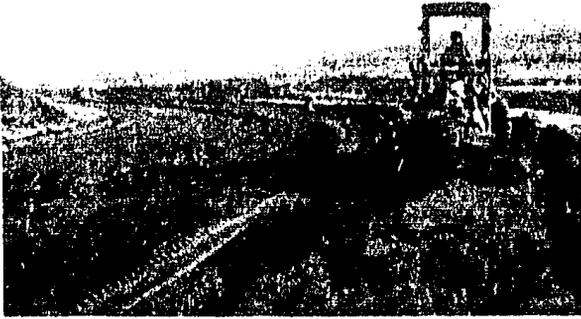
DISTRIBUCION DE LA CAL HIDRATADA



MEZCLADO INICIAL DE LA CAL POR MEDIO DE ARADO AGRICOLA.

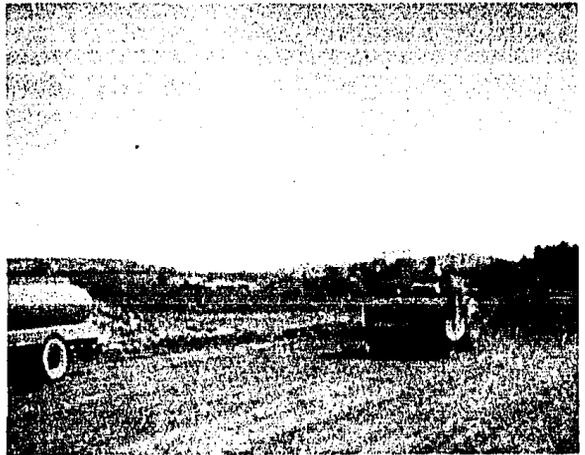


MEZCLADO FINAL Y DISGREGACION POR MEDIO DE MOTOCONFORMADORAS.



TENDIDO DE LA CAPA ESTABILIZADA.

COMPACTACION DE LA CAPA ESTABILIZADA.



CURADO FINAL A BASE DE VACIADO LIGERO CON AGUA.

V).- SUELOS ESTUDIADOS:

Los suelos estudiados se localizan en el estado de Guanajuato, el cual tiene los siguientes aspectos geográficos:

El Estado de Guanajuato está ubicado entre los  $19^{\circ} 55' 08''$  y los  $21^{\circ} 52' 09''$  de latitud norte y entre los  $99^{\circ} 39' 06''$  y los  $102^{\circ} 05' 07''$  de longitud oeste, colinda por el norte con los estados de Zacatecas y San Luis Potosí; por el sur con el estado de Michoacán; por el este con Querétaro, y por el oeste con Jalisco, cuenta con una superficie de  $30,471.06 \text{ km}^2$ , ocupando con éllo el vigésimo segundo lugar entre las entidades del país en cuanto a extensión territorial.

El paisaje de la entidad muestra situaciones de contraste, desde la presencia de serranías escarpadas, poco habitadas y con escasa comunicación (en la Sierra Madre Oriental), hasta poblaciones tan importantes como León e Irapuato, ciudades bien comunicadas, enclavadas en el Bajío. La ganadería, la minería y la prestación de servicios son, junto con la agricultura, las principales ramas de actividad del estado.

En cuanto al clima, la entidad presenta condiciones que van desde áreas semiáridas hasta zonas donde la precipitación es, si no la más alta del país, sí lo suficientemente abundante como para favorecer la presencia de bosques de clima templado.

En cuanto a las ciudades donde se realizó la investigación, tienen las siguientes características:

León:

Ciudad de más de un millón de habitantes, es la más importante del estado, en la cual se encuentran la mayoría de las industrias importantes de la entidad, entre las que destacan la del cuero, básica para la existencia y desarrollo de la Industria del Calzado.

# LOCALIZACION DEL ESTADO DE GUANAJUATO



Irapuato:

Ciudad con aproximadamente 380,000 habitantes, es un importante centro ferroviario, cuenta con comunicación por ferrocarril a Ciudad Juárez, Guadalajara y a la Ciudad de México; es punto de convergencia de carreteras procedentes de diferentes puntos cardinales. Constituye una de las zonas industriales más antiguas del estado, y sus actividades principales son el comercio y la agricultura.

Salamanca:

Ciudad de aproximadamente 310,000 habitantes, destaca por contar con la Industria Petroquímica. También tiene gran actividad agrícola y comercial.

Celaya:

Ciudad de más de 365,000 habitantes, en donde se ubica una parte importante de la Industria Alimenticia del estado, por lo cual, participa con gran porcentaje en el valor generado por esta rama.

León, Irapuato, Salamanca y Celaya, forman en el Estado la zona llamada "Eje Industrial del Bajío".

Los tipos de clima preponderantes en estas zonas, son los siguientes:

Clima Semiseco:

Se le denomina también seco estepario, y se caracteriza porque en él la evaporación excede a la precipitación; está asociado principalmente a comunidades vegetativas -- del tipo matorral desértico (nopales, cardonal, etc.).

Se localiza al norte y al este del estado, ocupando un 40% de su superficie, y se presenta con diferentes variaciones.

Clima Semicálido:

Es el más cálido de los presentes en el estado, sus rangos de temperatura oscilan entre los 18 y los 22°C, y se encuentra asociado con vegetación de matorrales subtropicales, chaparral y pastos. No es restrictivo en cuanto

a humedad, aunque si presenta períodos de sequía; ocupa el 40% de la superficie de la entidad, y está representado por tres subtipos, que se diferencian por precipitación invernal.

Las zonas en las cuales se sacaron muestras de material tienen las siguientes características:

Clima Semiseco Semicálido:

Este clima se localiza al norte de Dolores Hidalgo, en los alrededores de León y en las áreas circundantes a Celaya.

La lluvia media anual oscila entre los 600 y 700 mm, a la temperatura media anual le corresponde un valor entre 18° y 20°. La precipitación tiene su máxima incidencia en el mes de agosto, con un rango entre 150 y 160 mm. La precipitación mínima corresponde al mes de marzo con un índice menor de 10 mm. La máxima temperatura se registra en el mes de mayo con un valor entre 23° y 24°C. La mínima temperatura se presenta en los meses de enero y diciembre con un mismo rango que varía de 15 a 16°C.

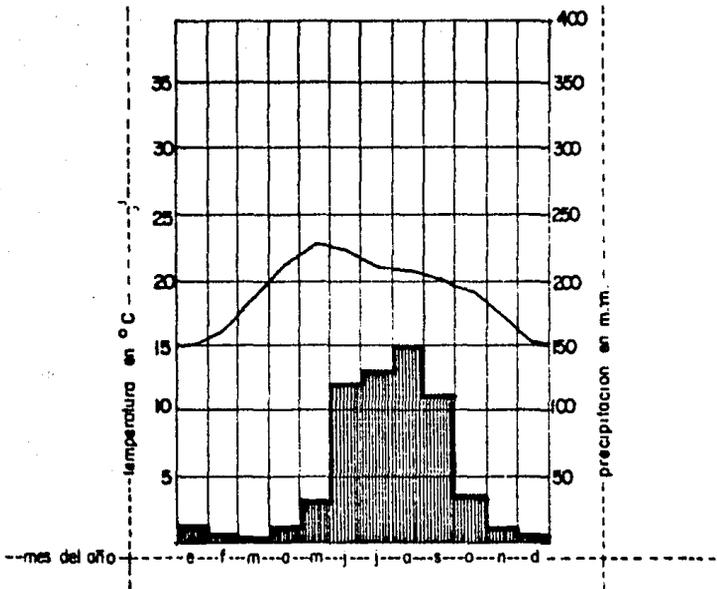
Clima Semicálido Subhúmedo: (menor humedad):

Es menos húmedo, con porcentaje de lluvia invernal menor de cinco, está ubicado en la parte centro y suroeste del Estado, en los municipios de Abasolo, Irapuato, Salamanca y Romita, parte sur del Municipio de Pénjamo y Valle de Santiago.

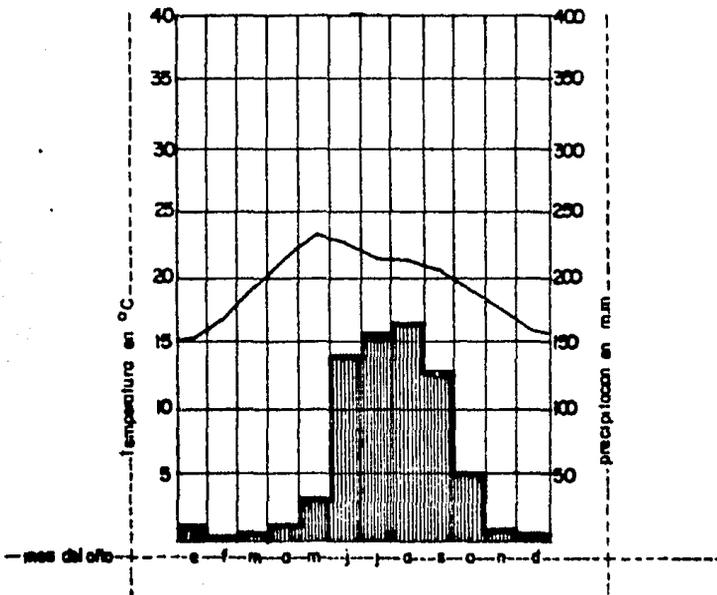
Los rangos de precipitación media anual están entre los 700 y 800 mm, la temperatura media anual va de los 18 a los 20°C. El mes de máxima lluvia es agosto, con valor entre los 160 y 170 mm, el mes de menos incidencia pluvial es febrero, con una precipitación menor de los 5 mm.

El mes más calido se registra en mayo, señalando una temperatura entre los 23 y 24°C, el más frío se presenta en enero con un valor de 15 a 16°C.

La topografía del Estado de Guanajuato no es sencilla ni uniforme: sierras, valles, lomeríos, mesetas y llanuras, formadas por rocas de origen volcánico, metamórfico,



**ESTACION CLIMATOLOGICA DE LEON, GUANAJUATO**



**ESTACION CLIMATOLOGICA DE SALAMANCA, GUANAJUATO.**

sedimentario y aluvial, conforman un paisaje accidentado, diverso y rico en el que, consecuentemente se presenta un complejo mosaico de climas, suelos y vegetación local.

En Guanajuato se localizan tres provincias fisiográficas: hacia el norte la Mesa Central y una pequeña porción de la Sierra Madre Oriental y, aproximadamente desde la zona media del Estado y ocupando toda su parte sur, el Eje Neovolcánico.

Dentro del Estado de Guanajuato y perteneciendo al Eje Neovolcánico, quedan representadas seis de sus sub-provincias: El Bajío Guanajuatense, parte de los Altos de Jalisco, las Sierras Volcánicas, El Bajío Michoacano, los Llanos de Querétaro y por último las Sierras y Lagos del Centro.

La zona donde se tomaron las muestras, corresponde a la sub-provincia del Bajío Guanajuatense, el cual es una gran llanura, interrumpida por relativamente pocas sierritas volcánicas, mesetas lávidas y lomerías, que incluye los Municipios de Abasolo, Huanímaro, Irapuato, Silao y Villagrán y partes de los de Apaseo el Grande, Celaya, Ciudad Manuel Doblado, Cortazar, Cuerámara, Guanajuato, Jaral del Progreso, León, Purísima del Rincón y Valle de Santiago.

A las Llanuras, Sierritas, Mesetas y Lomerías de la sub-provincia, se asocian siete sistemas de topoformas que son: llanura de aluviones profundos, llanura con tepetate a poca profundidad, sierras de laderas tendidas, sierra de cumbres escarpadas, mesetas con lomeríos, lomeríos asociados con mesetas y lomeríos aislados. En relación con la superficie total del estado, esta región representa el 22.97%.

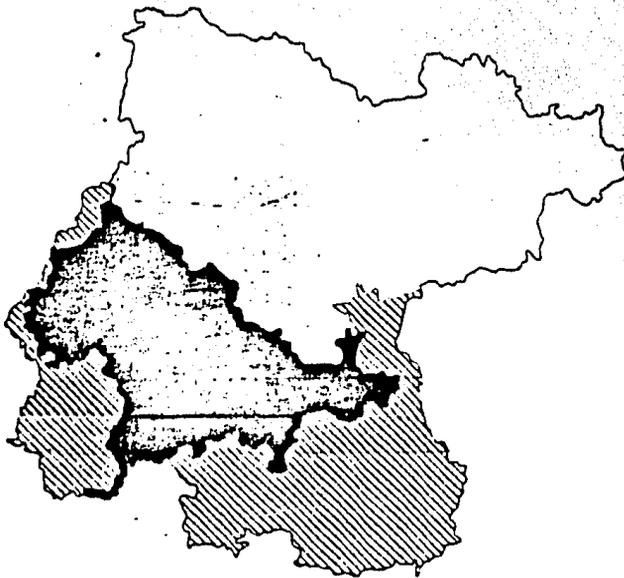
Los tipos de suelos de esta subprovincia, son por su origen de dos tipos: Los derivados de aluviones y los desarrollados a partir de la roca ó material que los sustenta.

De acuerdo a sus unidades de clasificación, identifica mos los siguientes:

**Vertisoles Pélicos:-** Son vertisoles negros ó gris oscuro.



PROVINCIAS GEOLOGICAS



-  PROVINCIA EJE NEOVOLCANICO
-  SUBPROVINCIA BAJIO GUANAJUATENSE

**Castañozem.** - Suelos que se caracterizan por tener una capa superior de color pardo ó rojizo oscuro, rico en materia orgánica y acumulación de caliche sueldo ó ligeramente cementado en el subsuelo.

**Castañozem Cálcidos.** - Caracterizado por tener acumulación de caliche sueldo en una capa de color claro, de más de 15 cm. de espesor.

**Feozem Calcáricos.** - Tienen como característica, la presencia de cal en todos sus horizontes. Son los Feozems más fértiles y productivos en la Agricultura ó Ganadería, cuando son profundos y planos. Su suscceptibilidad a la erosión es variable en función del tipo de terreno.

La distribución de estos tipos de suelos según el sistema de topofomas en que se localizan, es el siguiente:

**Vertisoles pélicos de llanuras de tepetate:** Profundidad 19-45 cm. color: gris oscuro en humedad. Separación: clara irregular. Textura: arcilla. Consistencia: dura en seco y friable en húmedo. Adherencia: Fuerte. Plasticidad: fuerte. Estructura: bloques irregulares. Congregaciones de tamaños: muy finas. Raíces escasas.

**Vertisoles Pélicos de llanuras de Aluviones Profundos:** Profundidad: 28-86Cm., Color: gris muy oscuro en humedad. Separación: clara y plana. Textura: arcilla. Consistencia: dura en seco y firme en húmedo. Adhesividad: moderada. Plasticidad: fuerte. Estructura de forma: bloques angulares. Raíces escasas: muy finas.

**Castañozem Lúvico:** Profundidad: 36-62 cm. Color: negro en húmedo. Separación: difusa-irregular. Textura: arenosa. Consistencia: ligeramente dura en seco y friable en húmedo. Adhesividad: moderada. Plasticidad: moderada. Forma: angulares y sub-angulares. Estructura de forma: bloques angulares. Raíces: muy finas y finas frecuentes.

**Feozem lúvico.** - Profundidad: 16-34 cm. Color: gris muy oscuro en húmedo separación: abrupta. Textura: arena-arcillosa. Consistencia: blanda en seco, friable en -

húmedo. Adhesividad: Fuerte. Plasticidad: fuerte. Alteración: Semialterada. Raíces muy finas, abundantes.

Se puede ver que debido a las características de las regiones estudiadas, desde el punto de vista climatológico, la cuenca geohidrológica en donde se encuentra situadas las ciudades del estudio tienen características típicas para la formación de minerales arcillosos con características expansivas.

VI).- TRABAJO REALIZADO:

a) ESTUDIO MINERALOGICO:

Existen hoy varios procedimientos al alcance del investigador a fin de identificar los minerales - - constituyentes de una arcilla, los métodos de difracción por rayos X y el conocido como análisis - - térmico diferencial son los más utilizados, el microscopio electrónico proporciona datos útiles sobre todo en lo referente a forma y tamaño de partículas minerales.

El estudio que se realizó para conocer la composición y estructura de las arcillas muestradas, se efectuó de la siguiente manera:

La microscopia electrónica, se realizó a las 5 - muestras tomadas, realizándose con muestras naturales y muestras a las cuales se les había estabilizado con cal-hidratada.

La difracción de rayos X, solo se realizó a la muestra de arcilla correspondiente a Salamanca.

La preparación de las muestras para su análisis en el microscopio electrónico, se realiza de la siguiente manera:

Se toma una porción de cada una de las muestras de suelo, se secan completamente para después desmenuarlas, obteniendo un tamaño el cual pasa por la malla # 200.

El material necesario para elaborar la probeta - que se introducirá al microscopio electrónico, debe estar completamente seca, por lo cual, se deja al material que pasa por la malla mencionada, secar en un horno todo el día. Después de este secado, se pesa el material hasta completar 5 gr., los cuales se introducen en una probeta de 500 ml de agua destilada y se deja sedimentar 24 horas, esto se hace para poder ver mejor los grumos de mineral, ya que si no se sedimenta el material, se ve rodeado de muchos cristales amorfos.

La pastilla que se introduce al microscopio, se elabora del producto que ha quedado suspendido en la probeta. Una vez que el agua destilada ha sido

evaporada en un horno, el material que permanece en el vidrio de reloj, nos sirve para elaborar la pastilla.

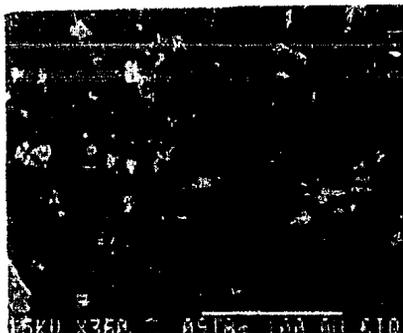
La probeta ya elaborada se introduce en el microscopio electrónico, éste mediante su funcionamiento interno nos da el acercamiento que deseamos de la muestra. Una vez fijo el acercamiento, se pueden tomar fotografías de este.

La información más importante que obtenemos del microscopio electrónico, es lo referente a la forma y tamaño de las partículas minerales.

Las fotografías tomadas con el microscopio electrónico se efectuaron tanto a material arcilloso natural, como a ese mismo material arcilloso, pero estabilizado con la adición de cal.

Las muestras de mineral arcilloso estabilizado con cal que se fotografiaron con el microscopio electrónico, --- tenían un tiempo de curado de 7 días, y un porcentaje de cal de 5% respecto al peso volumétrico seco del material arcilloso estabilizado.

En las fotografías que a continuación se ven, se puede apreciar las características de forma y tamaño de las partículas arcillosas correspondientes a la muestra sacada de los lugares de estudio.



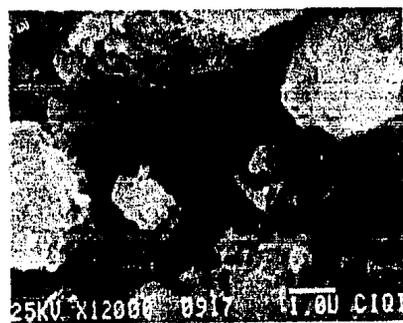
a)

b)

ESTRUCTURA MINERAL DEL MATERIAL TOMADO DE LA CIUDAD DE LEON, GTO.

a) Vista General de la Estructura Arcillosa.

b) Vista de Partículas sobre Conglomerados.



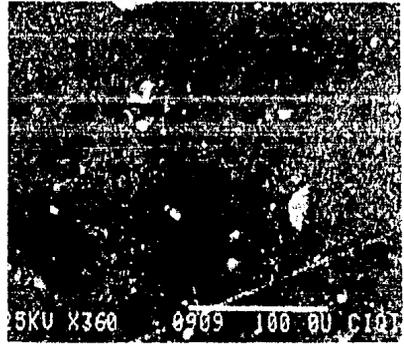
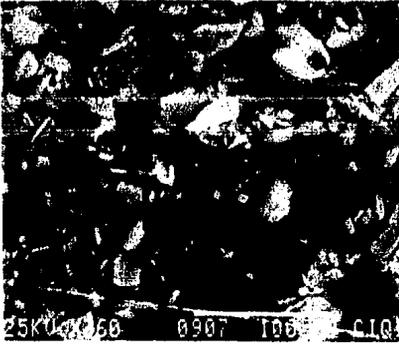
a')

b)

ESTRUCTURA MICROSCÓPICA DEL MATERIAL TOMADO DE LA CIUDAD DE SALAMANCA

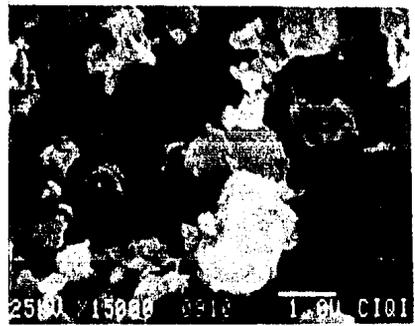
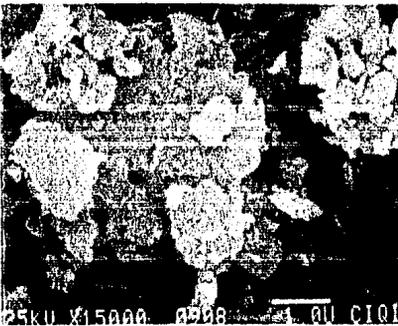
a) Detalle de la Estructura Arcillosa del Material en su Estado - Natural.

b) Detalle de la Estructura Arcillosa del Mineral Estabilizado -- con Cal.

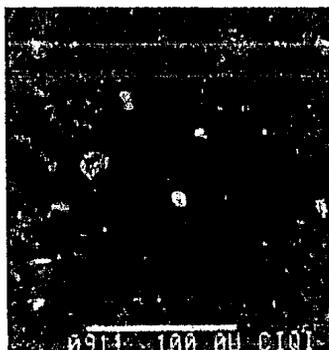


a) b)  
ESTRUCTURA MICROSCOPICA DEL MATERIAL TOMADO DE LA CIUDAD DE IRAPUATO  
EN LOS TERRENOS DE LA TIENDA DE AURRERA.

- a) Vista General del Material en su Estado Natural.
- b) Vista General del Material Estabilizado con Cal.



- c) Detalle del Material en Estado Natural.
- d) Detalle del Material Estabilizado con Cal.



a)



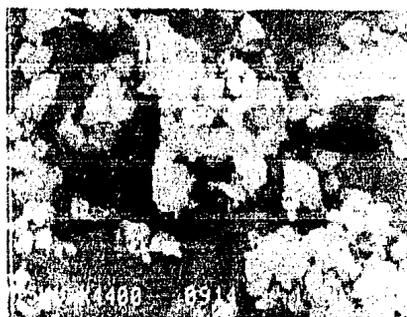
b)

ESTRUCTURA MICROSCOPIA DEL MATERIAL TOMADA DE LA CIUDAD DE IRAPUATO  
EN LOS TERRENOS DEL FRACCIONAMIENTO VILLAS DE IRAPUATO.

- a) Vista General del Material en su Estado Natural.  
b) Vista General de una Partícula Cristalina de gran tamaño en el Material Estabilizado con Cal.

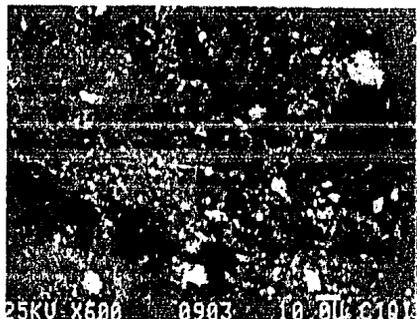
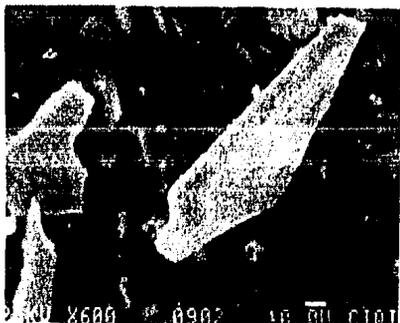


c)



d)

- c) Detalle de la Estructura Arcillosa del Material en Estado Natural.  
d) Detalle de la Estructura Arcillosa del Material Estabilizado con Cal.



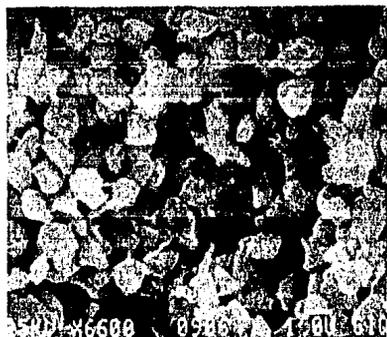
a)

b)

ESTRUCTURA MICROSCOPICA DEL MATERIAL TOMADO DE LA CIUDAD DE CELAYA.

a) Vista General del Material en su Estado Natural.

b) Vista General del Material Estabilizado con Cal.



c)

d)

c) Detalle de la Estructura del Material en Estado Natural.

d) Detalle de la Estructura del Material Estabilizado con Cal.

## DIFRACCION DE RAYOS X:

Como ya se mencionó la difracción de rayos X, consiste en analizar una muestra con el objeto de conocer sus principales componentes, ésto se logra gracias a que todo material cristalino produce un patrón de difracción característico, ya sea que esté combinado con otros compuestos ó no. De esta manera si se desea conocer sus componentes principales, basta identificar por comparación con el patrón de difracción de la muestra.

En el presente trabajo se realizó la difracción al material correspondiente a Salamanca, el cual consistió a grandes rasgos en lo siguiente:

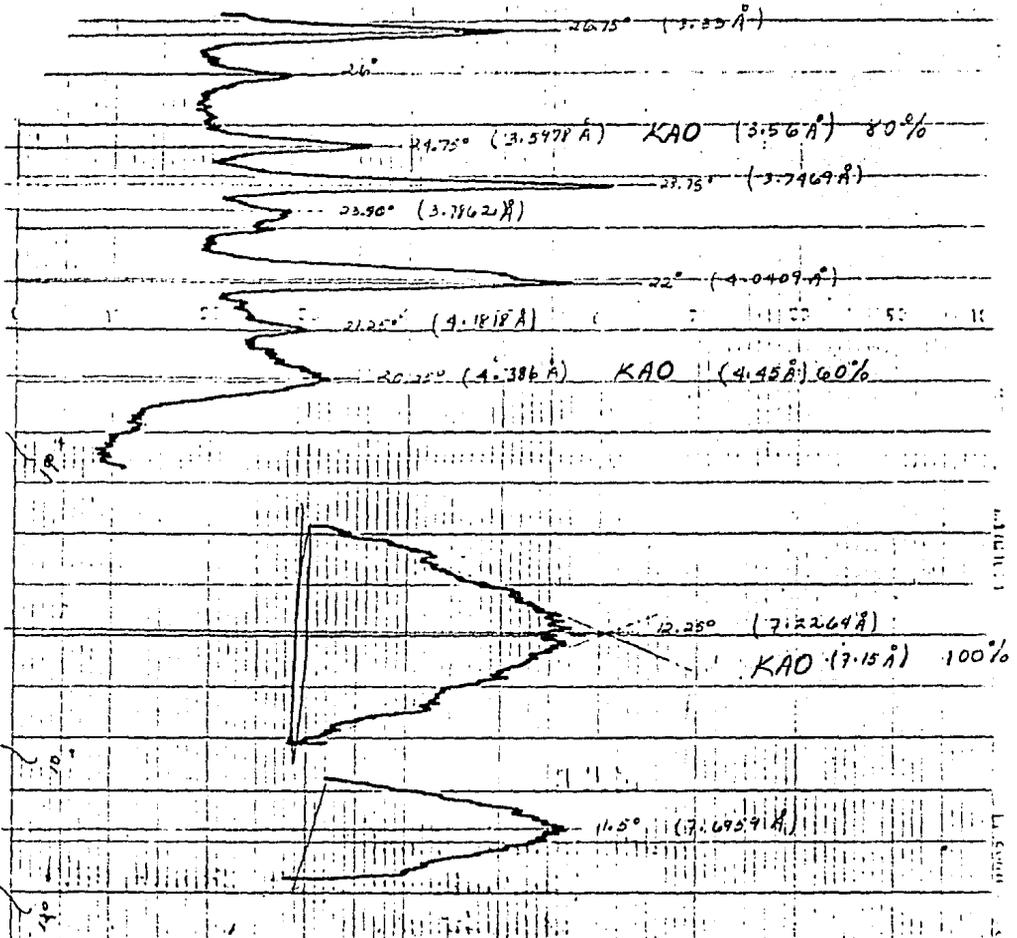
La preparación de la muestra, en este caso es muy similar a la que se realizó para la muestra del microscopio electrónico. Así pues, es necesario pasar la muestra por la malla # 200, después de ésto, el material está listo para entrar en el difractor, necesitándose solamente 5 gramos de material de cada muestra.

El difractor nos va dando una gráfica con una serie de picos, los cuales tienen una interpretación particular, que permite distinguir los minerales que forman el material.

El resultado obtenido al correr la muestra de arcilla en el difractor, se puede ver en la Figura VI.a.6.

En el espectro de difracción de la muestra (Figura VI. a.6.) aparece dos de las tres líneas principales de la Caolinita, encontrándose que el primero en importancia para la identificación definitiva, es una línea difusa que sugiere en realidad una mezcla de varias arcillas de la familia de la Caolinita. Lo cual no es de extrañar ya que los bancos geológicos de caolinita pura no son muy comunes.

Con este resultado se tiene más información para lograr un diseño de estabilización más eficiente para los objetivos que deseamos del material a estabilizar; en este caso particular, el que la muestra esté compuesta de Caolinita, nos permite concluir que la muestra al ser estabilizada con cal, tiene un mejor comportamiento al mismo tiempo que experimenta una acción puzolánica prolongada.



28 Agosto / 85

Muestra: Eduardo Puente (Constructores del Bayío)

KV = 35

S = 1 x 10<sup>3</sup>

TX

MA = 30

Slit = 40%

1° / 1° / Ni / 0.15

30

45

65

75

85

90

100

FIGURA VI.a.6.

b) ESTUDIOS GEOTECNICOS:

Los estudios geotécnicos que se realizaron a los suelos arcillosos antes y después de la estabilización, -- fueron los siguientes:

- 1) Evolución de la resistencia.
- 2) Evolución de los límites de consistencia.
- 3) Evolución de la Expansión.
- 4) Evolución del valor relativo de soporte.

Evolución de la resistencia:

Primeramente se determinó el contenido natural de agua de las muestras, ya que con este dato se determinó posteriormente el P.V.S.S. necesario para poder determinar la cantidad de cal que se debía añadir a la muestra para obtener el porcentaje de cal determinado. El resultado fué el siguiente:

Muestra	(Contenido de Cal)	P.V.S. (Kg/cm <sup>3</sup> )
León, Sn. M.	36.2	886.10
Irapuato, Fracc. Villas.	51.1	937.12
Irapuato, Terreno de -- Aurrerá.	30.8	950.00
Salamanca, Av. Faja de Oro.	31.0	849.90
Celaya, Boul. Téc.	24.5	900.86

El peso volumétrico seco suelto, nos permite establecer un patrón de referencia a partir del cual se establece la cantidad en peso de cal necesaria para dar al suelo un determinado porcentaje de este estabilizante.

La elaboración de las pastillas proctor, tienen el objeto de medir la resistencia a la compresión simple de la muestra hecha pastilla.

En el trabajo realizado, se elaboraron estas pastillas con diferentes porcentajes de cal para cada muestra, así como tiempos de curado diferentes, con el fin de poder determinar el comportamiento en cuanto a la resistencia de un determinado mineral arcilloso.

b) ESTUDIOS GEOTECNICOS:

Los estudios geotécnicos que se realizaron a los suelos arcillosos antes y después de la estabilización, -- fueron los siguientes:

- 1) Evolución de la resistencia.
- 2) Evolución de los límites de consistencia.
- 3) Evolución de la Expansión.
- 4) Evolución del valor relativo de soporte.

Evolución de la resistencia:

Primeramente se determinó el contenido natural de agua de las muestras, ya que con este dato se determinó posteriormente el P.V.S.S. necesario para poder determinar la cantidad de cal que se debía añadir a la muestra para obtener el porcentaje de cal determinado. El resultado fué el siguiente:

<u>Muestra</u>	<u>(Contenido de Cal)</u>	<u>P.V.S. (Kg/cm<sup>3</sup>)</u>
León, Sn. M.	36.2	886.10
Irapuato, Fracc. Villas.	51.1	937.12
Irapuato, Terreno de -- Aurrerá.	30.8	950.00
Salamanca, Av. Faja de Oro.	31.0	849.90
Celaya, Boul. Téc.	24.5	900.86

El peso volumétrico seco suelto, nos permite establecer un patrón de referencia a partir del cual se establece la cantidad en peso de cal necesaria para dar al suelo un determinado porcentaje de este estabilizante.

La elaboración de las pastillas proctor, tienen el objeto de medir la resistencia a la compresión simple de la muestra hecha pastilla.

En el trabajo realizado, se elaboraron estas pastillas con diferentes porcentajes de cal para cada muestra, así como tiempos de curado diferentes, con el fin de poder determinar el comportamiento en cuanto a la resistencia de un determinado mineral arcilloso.

Se elaboraron 3 pastillas para cada porcentaje de -- cal y para cada tiempo de curado, fijándose los contenidos de cal para este estudio de 4, 6 y 8% y los tiempos de curado de 7, 14 y 30 días.

Los resultados de los ensayos para cada porcentaje - y tiempo de curado se promediaron, obteniéndose los siguientes resultados:

Muestra	% de Cal	Resistencia a la Comp. Simple		
		7 días.	14 días.	30 días.
León	4	6.0	4.5	7.5
	6	7.83	7.0	9.0
	8	8.75	8.12	10.33
Irapuato, Fracc. Villas.	4	4.0	5.33	6.16
	6	5.83	6.00	6.25
	8	6.50	6.66	7.00
Irapuato, Terr. Aurrerá.	4.0	11.00	11.00	12.16
	6.0	11.5	11.83	12.33
	8.0	12.00	12.00	13.33
Salamanca, Av.- Faja de Oro.	4.0	6.00	10.00	10.16
	6.0	7.63	8.33	10.16
	8.0	9.38	11.50	11.66
Celaya Boulevard Tecnológico.	4.0	7.50	7.75	8.33
	6.0	8.00	8.17	8.50
	8.0	11.00	10.83	11.50

De estos datos podemos graficarlos de la forma que - se ve en la Figura VI.b.1.

De todos estos resultados podemos sacar varias conclusiones interesantes, sin embargo, esto lo analizaremos en el capítulo VII, en conjunto con las conclusiones que se obtengan de las pruebas que mencionaremos -- más adelante.

FIGURA VI. B.1.

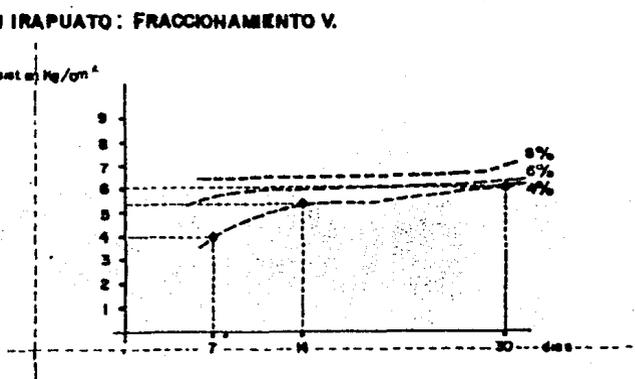
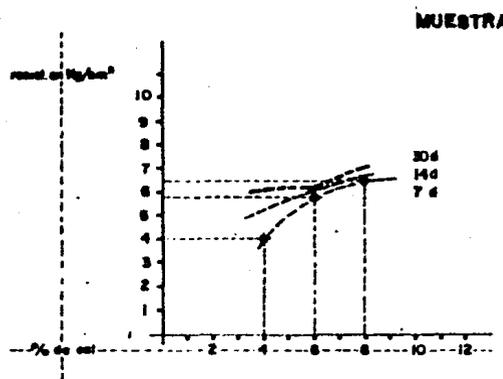
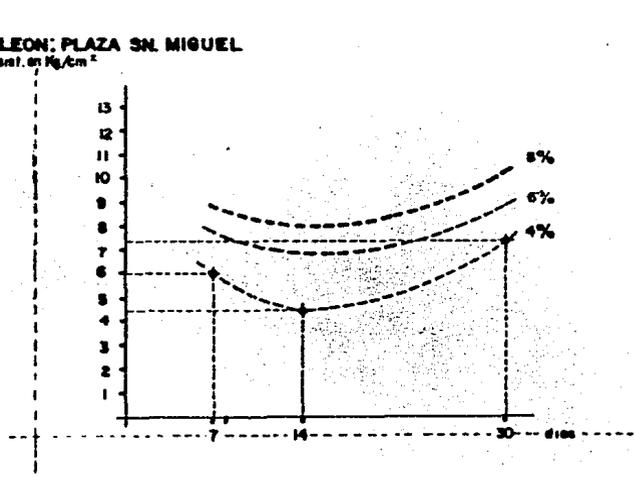
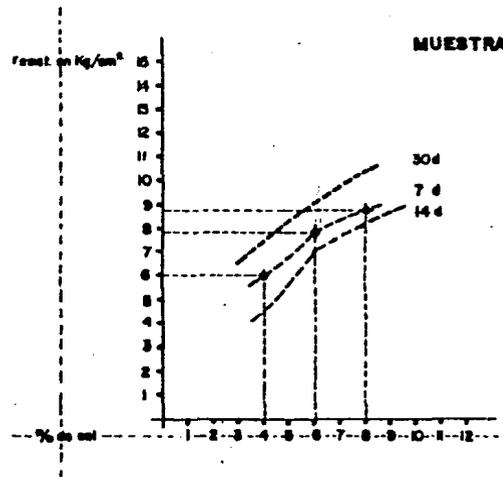
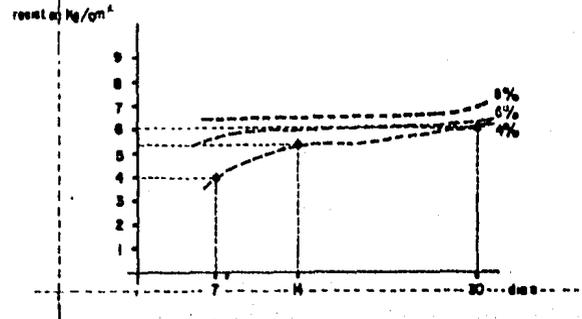
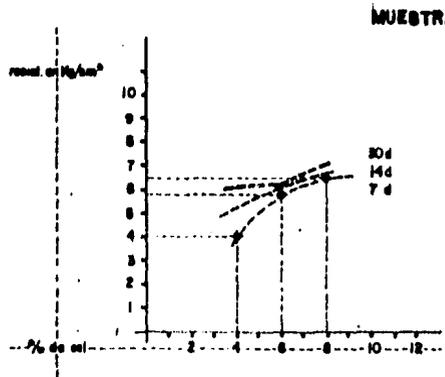
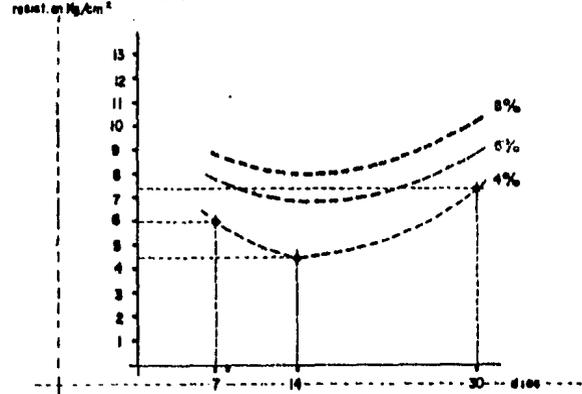
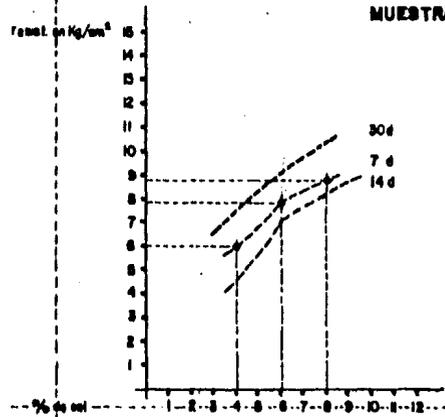


FIGURA VI. B.1.



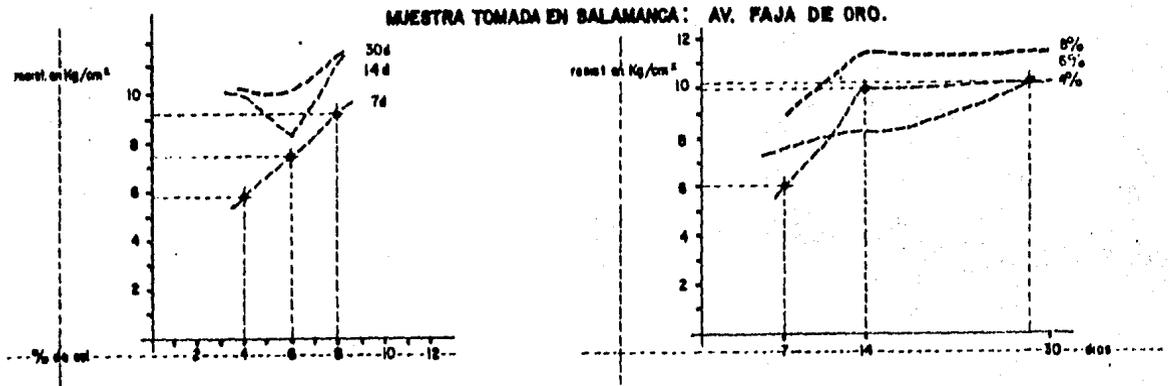
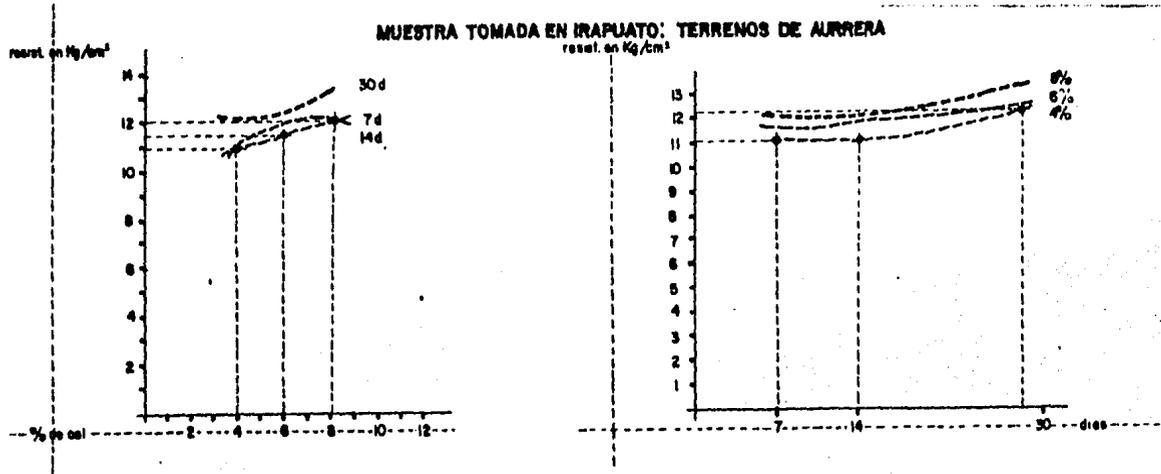
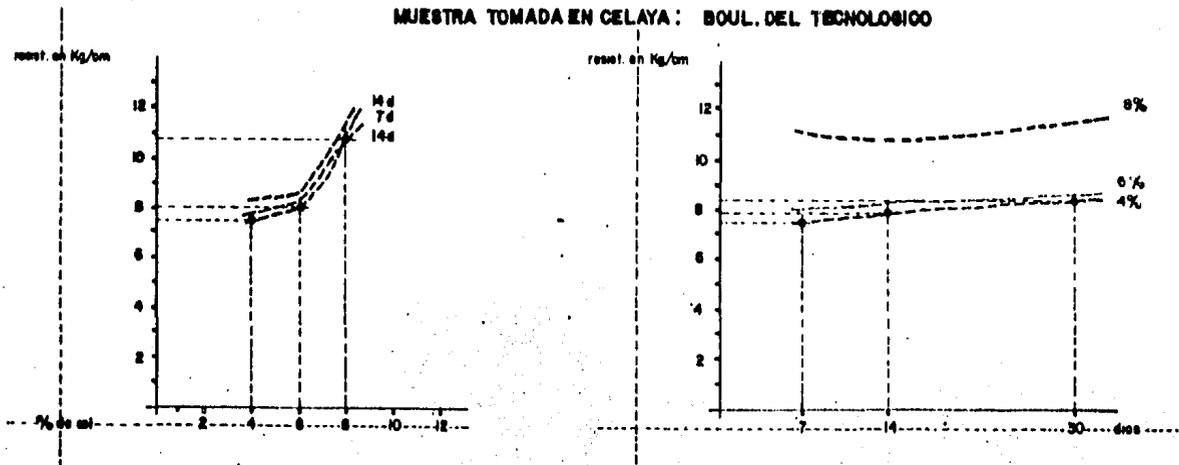


FIGURA VI. B. 1. (Continúa)



### Evolución e los límites de consistencia:

Para analizar la evolución de los límites de consistencia, se obtuvieron los valores de los límites líquido de las diferentes muestras, tanto para su estado natural como con la adición de cal, y cierto tiempo de curado, además se obtuvieron los valores del límite plástico y la --contracción lineal, para los mismos estados mencionados anteriormente.

Los resultados obtenidos de estas pruebas, fueron los que se pueden ver en las Tablas VI.b.1. y VI.b.2.

De los resultados obtenidos y registrados en las tablas anteriores, se puede observar que la tendencia a disminuir el índice de plasticidad es notable para cualquier tipo de mineral arcilloso, el análisis más detallado de los resultados obtenidos, los mencionaremos en el capítulo VII.

### Evolución de la Expansión:

El estudio realizado para la determinación de la expansión a través del tiempo y del contenido de cal, se realizó de la siguiente forma:

Se fijó para cada una de las muestras, contenidos de cal de 4,6 y 8%, de los cuales se obtuvo su expansión de la siguiente manera:

- 1) Se preparó la muestra según especificaciones y cribándola por la malla # 25.
- 2) Se le da a la muestra la humedad necesaria y se coloca en 3 capas dentro del molde porter, dándole a cada una de las capas 25 golpes con la varilla especificada.
- 3) La muestra ya en el molde, se coloca en la prensa de -compresión, aplicando en forma lenta y uniforme la carga hasta alcanzar en un lapso de 5 min. la presión de 140.6 Kg/cm<sup>2</sup> equivalente a 26.5 Ton., se mantiene la carga durante 1 minuto y se hace la descarga en el siguiente minuto. Se debe verificar en este momento que la humedad en este espécimen sea la óptima. En caso de que la humedad en la base sea demasiada ó al contrario esté seco, se tratará el material para lograr la humedad óptima.

EVOLUCION DE LOS LIMITES DE CONSISTENCIA

MUESTRA LEON PLAZA SAN MIGUEL:

PORCENTAJES DE CAL	7 DIAS			14 DIAS			30 DIAS		
	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
0 %	50.04	20.29	29.75	50.04	20.29	29.75	50.04	20.29	29.75
4 %	53.3	27.78	25.52	51.30	28.50	22.80	50.83	29.09	21.74
6 %	53.53	28.78	24.75	57.06	33.15	23.91	52.14	30.47	21.67
8 %	54.04	28.05	25.99	49.30	30.10	19.20	48.35	29.88	18.47

MUESTRA IRAPUATO - VILLAS:

PORCENTAJES DE CAL	7 DIAS			14 DIAS			30 DIAS		
	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
0 %	80.3	27.49	52.81	80.3	27.49	52.81	80.3	27.49	52.81
4 %	58.05	29.82	28.23	57.56	29.47	28.09	56.87	30.75	26.12
6 %	58.29	36.85	21.44	56.84	35.90	20.94	55.13	33.79	21.39
8 %	47.99	33.06	14.93	48.68	34.41	14.27	47.31	34.24	13.07

TABLA VI. b. 1.

MUESTRA: SALAMANCA FAJA DE ORO (4 de Octubre de 1984)

PORCENTAJE DE CAL	7 DIAS			14 DIAS			30 DIAS		
	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
0 %	46.10	32.77	13.33	46.10	32.77	13.33	46.10	32.77	13.33
4 %	53.01	29.64	23.37	48.78	32.93	15.85	47.93	33.06	14.87
6 %	53.00	31.61	21.40	47.59	32.71	14.88	47.34	34.30	13.04
8 %	50.32	32.54	17.78	45.53	32.03	13.50	44.64	32.67	11.97

MUESTRA: CELAYA BOULEVARD TECNOCOLICO (5 de Octubre de 1984)

PORCENTAJE DE CAL	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
0 %	71.64	22.00	49.64	7.64	22.00	49.64	71.64	22.00	49.69
4 %	83.07	42.53	40.54	56.94	33.41	23.53	54.98	32.84	22.14
6 %	70.73	40.98	29.75	57.06	33.15	23.91	55.53	34.63	20.90
8 %	56.40	42.23	14.12	59.75	39.90	19.85	53.14	34.06	19.08

TABLA VI. b. 1.

EVOLUCION DE LOS LIMITES DE CONSISTENCIA

MUESTRA IRAPUATO - AURRERA:

PORCENTAJES DE CAL	7 DIAS			14 DIAS			30 DIAS		
	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
0 %	61.33	21.16	40.17	61.33	21.16	40.17	61.33	21.16	40.17
4 %	56.04	28.45	27.59	49.94	25.04	24.90	97.87	24.21	23.66
6 %	56.07	24.02	32.05	49.87	32.43	17.44	41.81	23.08	18.73
8 %	49.76	30.90	18.86	50.90	34.42	16.48	41.81	26.12	15.69

TABLA VI.b.1.

EVOLUCION DE LA CONTRACCION LINEAL

MUESTRA	7 DIAS				14 DIAS				30 DIAS			
	CONTENIDO DE CAL (%)				CONTENIDO DE CAL (%)				CONTENIDO DE CAL (%)			
	0	4	6	8	0	4	6	8	0	4	6	8
Irapuato Aurrerá.	16.6	11.4	5.4	4.6	16.6	14.25	9.14	7.08	16.6	11.62	8.28	8.13
Salamanca Faja de Oro	14.13	9.93	9.25	7.78	14.13	11.30	8.86	8.75	14.13	9.37	7.83	7.51
León Plaza San Miguel	14.77	12.71	10.83	10.53	14.77	11.30	9.7	8.0	14.77	10.97	9.23	6.35
Celaya Blvd. Salida San Miguel	19.58	21.15	13.31	5.48	19.58	14.49	12.47	9.07	19.58	13.14	11.02	7.18
Irapuato Villas	22.34	19.06	17.28	10.07	22.34	17.3	14.01	11.91	22.34	16.88	13.29	11.33

TABLA VI. b. 2.

- 4) Terminada la compactación de la muestra, se determina la altura del espécimen ( $h_e$ ), permaneciendo este dentro del molde, ésto se hace restando a la altura del molde, la altura que hay entre la cara del espécimen y el borde superior del molde.
- 5) Después se introduce el espécimen en el tanque de saturación, para lo cual, se le colocan 1 ó 2 hojas de papel filtro de placa perforada y las 2 placas de carga.
- 6) Se toma la primera lectura ( $l_i$ ) que existe entre dos puntos determinados, uno fijo y el otro que depende de la posición de la base superior del espécimen. Se verifica esta lectura cada 24 horas, cuando se repite -- dos veces una misma lectura, en forma sucesiva, se anota su valor como el valor final de expansión ( $l_f$ ).
- 7) Se determina el valor de la expansión (E).

$$E = \frac{l_f - l_i}{h_e} \times 100$$

Los resultados obtenidos de la experimentación con las muestras en estudio fueron las que se pueden observar en la tabla VI.b.3.

Podemos observar de los resultados registrados en la tabla VI.b.3. que todas las muestras tienen una gran tendencia a la expansión en presencia del agua, observándose también que la adición de cal modifica este comportamiento. El análisis de resultados lo veremos en conjunto con otras características modificadas por la estabilización con cal, en el capítulo VII.

#### Evolución del Valor Relativo de Soporte:

La obtención del valor relativo de soporte, es el complemento del proceso que se sigue para la determinación de la expansión, por esta razón, este valor se obtuvo también para los porcentajes de cal manejados de 4,6, y 8% de cal, así como para tiempo determinado de saturación del

EXPANSION DE LAS MUESTRAS DESPUES DE 14 DIAS DE SATURACION

MUESTRA	4% DE CAL				6% DE CAL				8% DE CAL			
	Li	Lf	He	E	Li	Lf	He	E	Li	Lf	He	E
León												
Pza. San Miguel	39.7	40.6	11.71	7.42	50.5	51.3	11.47	6.93	48.0	48.6	11.15	5.21
Salamanca												
Ave. Faja de Oro	60.6	60.1	10.95	4.56	55.5	54.80	10.83	6.46	69.5	68.9	11.28	5.32
Irapuato												
Fracc. Villas	55.5	53.9	10.03	15.91	57.5	58.9	10.53	13.41	70.9	72.10	10.43	11.32
Irapuato												
Tienda Aurrerá	46.2	45.6	11.20	5.36	48.8	47.7	11.24	9.78	52.0	51.4	11.17	5.37
Celaya												
Blvd. Tecnológ.	57.9	43.4	10.54	13.6	58.2	48.4	11.43	8.6	70.9	68.2	11.42	2.4

TABLA VI.b.3.

especímen que en este caso se fijó de 14 días. El proceso de realización de la prueba sigue los mismos pasos que en la determinación de la expansión, continuando con los siguientes pasos:

- 1) Después de cumplidos los días de saturación del especímen, se retira del tanque de saturación, dejándose escurrir y retirando también las placas y filtros.
- 2) El especímen en su molde, se coloca en la prensa, aplicándosele una carga de 10 Kg., ajustándose al extensímetro.
- 3) Se comienzan a aplicar la carga para penetrar el cilindro en el especímen a una velocidad de 1.27 mm/min, -- continuándose de la siguiente manera: Al penetrar 1.27 mm/min. se hace la primera lectura en el manómetro correspondiente, las lecturas sucesivas se hacen a los 2.54, 3.81, 5.08 y 7.62 mm a intervalos constantes de 1 minuto por cada 1.27 mm. de penetración.
- 4) Se representan los valores obtenidos, en una gráfica de penetración contra carga, la penetración en milímetros y la carga en kg/cm<sup>2</sup>, si la gráfica presenta una tendencia bien definida, se tomará el valor de la carga correspondiente a la penetración de 2.54 mm. para usarla en la fórmula del valor relativo de soporte -- (VRS).
- 5) Se determina el VRS, de la siguiente forma:

$$\text{VRS} = \frac{\text{Carga } 2.5 \text{ mm}}{1,360} \times 100$$

Del trabajo realizado se obtuvieron los resultados -- que se pueden ver en las tablas VI.b.4., VI.b.5. y VI.b.6. correspondientes a las cantidades de cal manejadas y tiempo de saturación de 14 días.

Los resultados registrados en las tablas anteriores, -- nos dan una idea de la modificación sufrida por el material arcilloso al estabilizarse con cal, estos resultados los analizaremos en el capítulo VII.

MUESTRA	CONTENIDO DE CAL 4%				CONTENIDO DE CAL 6%				CONTENIDO DE CAL 8%			
	LECT.	TIEM.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEM.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEM.	PENET.	CARGA
León (Pza. San Miguel)	1	1	1.27	200	1	1	1.27	225	1	1	1.27	589
	2	2	2.54	225	2	2	2.54	350	2	2	2.54	825
	3	3	3.81	264	3	3	3.81	525	3	3	3.81	900
	4	4	5.08	264	4	4	5.08	575	4	4	5.08	900
	5	5	7.62	300	5	5	7.62	625	5	5	7.62	925

MUESTRA	CONTENIDO DE CAL 4%				CONTENIDO DE CAL 6%				CONTENIDO DE CAL 8%			
	LECT.	TIEM.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEM.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEM.	PENET.	CARGA
Irapuato Villas de Irapuato	1	1	1.27	100	1	1	1.27	100	1	1	1.27	100
	2	2	2.54	150	2	2	2.54	175	2	2	2.54	175
	3	3	3.81	200	3	3	3.81	200	3	3	3.81	225
	4	4	5.08	300	4	4	5.08	300	4	4	5.08	264
	5	5	7.62	325	5	5	7.62	350	5	5	7.62	400

TABLA VI. b.4.

MUESTRA	CONTENIDO DE CAL 4%				CONTENIDO DE CAL 6%				CONTENIDO DE CAL 6%			
	LECT.	TIEMP.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEMP.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEMP.MIN.	PENET.	CARGA
Irapuato	1	1	1.27	322	1	1	1.27	475	1	1	1.27	589
Terrenos de Tienda Aurrerá	2	2	2.54	458	2	2	2.54	792	2	2	2.54	1056
	3	3	3.81	525	3	3	3.81	825	3	3	3.81	1244
	4	4	5.08	625	4	4	5.08	900	4	4	5.08	1332
	5	5	7.62	825	5	5	7.62	1200	5	5	7.62	1364

MUESTRA	CONTENIDO DE CAL 4%				CONTENIDO DE CAL 6%				CONTENIDO DE CAL 6%			
	LECT.	TIEMP.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEMP.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEMP.MIN.	PENE.	CARGA
Salamanca	1	1	1.27	232	1	1	1.27	264	1	1	1.27	264
Ave. Faja de Oro.	2	2	2.54	428	2	2	2.54	589	2	2	2.54	613
	3	3	3.81	527	3	3	3.81	833	3	3	3.81	925
	4	4	5.08	589	4	4	5.08	990	4	4	5.08	1025
	5	5	7.62	665	5	5	7.62	1211	5	5	7.62	1500

TABLA VI. b. 5.

MUESTRA	CONTENIDO DE CAL 4%				CONTENIDO DE CAL 6%				CONTENIDO DE CAL 8%			
	LECT.	TIEM.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEM.MIN.	PENETRAC.	CARGA	LECT.	TIEM.	PENET.	CARGA
Celaya Boulevard Tecnológico.	1	1	1.27	150	1	1	1.27	150	1	1	1.27	350
	2	2	2.54	200	2	2	2.54	275	2	2	2.54	500
	3	3	3.81	275	3	3	3.81	322	3	3	3.81	525
	4	4	5.08	300	4	4	5.08	400	4	4	5.08	625
	5	5	7.62	425	5	5	7.62	425	5	5	7.62	800

TABLA VI. b. 5.

M U. E S T R A	V R S		
	4% CAL	6% CAL	8% CAL
León (Plaza San Miguel)	16.54	25.73	60.66
Irapuato (Fracc.Villas Ira- puato).	11.03	12.86	12.86
Irapuato (Tiendas de Aurrerá)	33.67	58.23	77.60
Salamanca (Av.Faja de Oro)	31.47	43.3	46.54
Celaya (Blvd.Tecnológico)	14.70	20.22	36.76

TABLA VI. b.6.

## VII).- CONCLUSIONES :

Del estudio Geotécnico, al que fueron sometidas las muestras arcillosas de las diferentes partes de Guanajuato, podemos sacar algunas conclusiones interesantes también.

Analizaremos por separado los resultados de las pruebas realizadas para cada uno de los materiales estudiados.

Para el material de León (Plaza San Miguel) el análisis de la evolución de la resistencia a la compresión simple en la muestra, nos da los siguientes resultados: El material de León obtenido a 50 cms. de profundidad al ser estabilizado con un porcentaje de cal cualquiera, reacciona favorablemente, aumentando su resistencia, sin embargo, el tiempo de curado hace disminuir esta resistencia, aumentando nuevamente el período de curado mayores.

El estudio como se ha mencionado solo se realizó para porcentajes de cal de 4, 6 y 8%, sin embargo, en el material de León se puede observar una tendencia bien definida a continuar, aumentando su resistencia al aumentar el porcentaje de cal, así como el tiempo de curado como se puede ver en la Figura VI.b.1.

En este caso no se puede determinar el punto de fijación para esta característica, pues se requiere de mayor número de pruebas para poder determinarlo.

Podemos concluir que para este material la adición de cal proporciona un muy buen aumento en la resistencia a la compresión simple, mejorando esta resistencia al pasar el tiempo de la estabilización.

En cuanto al análisis de la evolución de los límites de consistencia, se observó que la adición de cal, modifica el índice de plasticidad, ya que aumenta levemente el límite líquido y aumenta con mayor intensidad el límite plástico, observándose una disminución en el índice de plasticidad, para cualquier porcentaje de cal y tiempo de curado. En la Tabla VI.b.1. para el material de León, se puede apreciar que la diferencia

entre el límite plástico del material sin cal y el del material con cal al 4% y tiempo de curado de 7 días, ha disminuido de 29.75 a 25.52 ó sea un 14%, esta tendencia se hace mayor si comparamos al material sin cal, ó sea con un índice de plasticidad de 29.75 y al material con el 8% de cal y tiempo de curado de 30 días cuyo índice de plasticidad es de 18.47, aquí la disminución es de un 38%.

De este resultado se puede apreciar que la modificación de los límites de consistencia del material de León, sufren modificaciones, pero estas no constituyen un mejoramiento sustancial en el comportamiento del suelo a estabilizar.

En cuanto a la contracción lineal, se puede observar que existe una modificación un poco más considerable, -- pues este valor pasa de 14.77 en estado natural a 10.53 con el 8% de cal a los 7 días de curado, ó sea, disminuye la contracción para este porcentaje y tiempo de curado en un 28%, la comparación se hace mayor si se compara el índice de contracción lineal para el material en estado natural, contra el índice de contracción lineal para el 8% de cal y tiempo de curado de 30 días, en este caso el índice disminuye de un 14.77 a un 6.35 ó sea un 57%.

De los resultados se puede concluir que el material, -- modifica su comportamiento plástico, con la adición de -- cal, haciéndose notar que se incrementa la modificación -- con el aumento de la proporción de cal, y tiempo de curado del mismo. La modificación que experimenta el material, -- consiste en una disminución en su plasticidad y también -- en su contracción lineal, dando como resultado un material de mejores características para usos ingenieriles.

Los resultados de las pruebas para la determinación de la expansión del material León y su modificación con la adición de cal se puede ver en la tabla VI.b.3. observándose también que a medida que se aumenta el porcentaje de cal a la muestra, ésta disminuye su valor de expansibilidad, lo cual indica un comportamiento mejor del material -- estabilizado con cal en comparación del material con menor porcentaje del estabilizante.

En cuanto a la evolución del valor relativo de soporte (VRS), se observa para la condición de saturación de 14 días, un mejoramiento muy favorable, ya que el valor obtenido con el 4% de cal, aumenta de un 16.54 a un 60.66, aumentando el porcentaje de cal al 8%, lo que indica que al aumentar el porcentaje de cal, el valor relativo de soporte para este material mejora sustancialmente, pasando de ser un material adecuado para subrasante de regular calidad, a un material adecuado para una base de regular calidad, sin embargo, se necesita analizar todas las características para llegar a una conclusión acertada de la modificación sufrida por la muestra con la adición de cal, y poder cuantificar con mayor seguridad la utilidad de este suelo estabilizado.

Con relación a la muestra obtenida en Irapuato, del fraccionamiento Villas de Irapuato, el estudio de su evolución con la estabilización nos dió los siguientes resultados.

Primeramente se obtuvo su clasificación en estado natural, por medio de su límite líquido y límite plástico, para poder ubicar el material dentro de la carta de plasticidad. El resultado de los límites de consistencia fué el siguiente: Límite Líquido de 80.3, límite plástico de 27.49 e índice plástico de 52.81. Ubicando los resultados en la carta de plasticidad, el material se clasificó como una arcilla inorgánica de alta plasticidad. Arcilla franca (CH) localizada en el grupo IV de la carta antes referida.

La primera característica que analizaremos, es la resistencia simple. Los resultados obtenidos indican que la estabilización con cal, aumenta la resistencia, sin embargo, se puede ver que esta no se incrementa en una forma considerable con respecto al incremento del porcentaje de cal, mientras el efecto es mucho mayor a medida que el tiempo de curado aumenta, estas tendencias las podemos observar en la Figura VI.b.1.

Podemos concluir en que el punto de fijación de este material y para esta característica está muy cerca de 6% de cal. Otra observación interesante, es la referente a que el material experimenta una acción puzolámica a través del tiempo.

En cuanto a la evolución de los límites de consistencia podemos observar en la tabla VI.b.1. una tendencia a disminuir en poco el límite líquido del material estabilizado, paralelamente a un incremento sustancial en el límite de plasticidad, lo cual resulta en una disminución considerable del índice de plasticidad. Por ejemplo, se puede ver que para el material en estado natural, el índice plástico es igual a 52.81, mientras que la misma muestra, pero estabilizada con el 8% de cal y tiempo de curado de 30 días este índice de plasticidad es igual a 13.07 ó sea se tiene una disminución del 75%.

Si este material se clasificara de nuevo, se obtendría como resultado que el material pasaría de una arcilla franca (CH) a una arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL). También se puede observar en la tabla VI.b.1. que la modificación de la arcilla en cuanto a su plasticidad, es inmediata disminuyendo esta plasticidad también a través del tiempo.

El índice de contracción lineal también se ve fuertemente modificado con la acción del estabilizante y el tiempo de curado del mismo, disminuyendo la contracción en forma inmediata a la estabilización.

Analicemos la Tabla VI.b.3. se observa que con respecto a la expansión del material, se tiene también un buen resultado de la estabilización con cal, observándose una tendencia uniforme a disminuir esta expansibilidad a medida que se incrementa el porcentaje de cal.

En cuanto a la evolución de la estabilización con respecto al VRS, se puede observar en la tabla VI.b.4. que los resultados obtenidos, no tienen una tendencia bien definida ya que el VRS parece permanecer constante al incrementar el porcentaje de cal, por lo que se puede concluir que este estabilizante no aumenta el VRS, conservando bajo su valor. Este material se considera como recomendable para subrasante de regular calidad en cuanto a esta característica.

Concluyendo, podemos decir que la estabilización de cal ayuda a modificar las características plásticas, tanto de contracción como de expansión del material, pero no ayudan a aumentar su capacidad de carga, ni tampoco ayuda

a modificar en un grado importante la resistencia a la pe  
netración ó sea a aumentar el valor relativo de soporte.

Continuando con el estudio de las pruebas realizadas, a los materiales de Irapuato, analizaremos ahora los resultados obtenidos para la muestra de los terrenos de la Tienda Aurrerá.

El resultado de la clasificación de este material, se obtuvo a partir de los límites de consistencia, ya que se trata de un material que por granulometría se clasifica como un material fino.

Los valores de los límites de consistencia, fueron los siguientes: límite líquido de 61.33, límite plástico de 21.16 e índice plástico de 40.17. A partir de estos datos, se ubica el material en la carta de plasticidad, dando como resultado lo siguiente: Arcilla Inorgánica de alta plasticidad es dentro del grupo IV.

Este material como ya se mencionó anteriormente, se estabilizó con porcentajes de cal de 4,6 y 8%, realizándose posteriormente pruebas geotécnicas para analizar su modificación con respecto al aumento del porcentaje de cal, y el tiempo de curado.

Con respecto a la modificación a la resistencia a la compresión simple, veamos los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

Observando la gráfica de la Figura VI.b.1. correspondiente a este material, se puede apreciar que la modificación en cuanto a resistencia no es significativa, ni se ve que pueda tener una acción puzolánica importante a través del tiempo de curado, sin embargo, la resistencia aumenta favorablemente.

La evolución de los límites de consistencia para este material, se puede ver en la Tabla VI.b.1. correspondiente a la muestra Aurrerá. En ésta se observa una tendencia a disminuir el límite líquido en forma similar al aumento del límite plástico, lo cual se ve favorecido a medida que aumenta el tiempo de curado, por ejemplo, se tiene un va-

lor inicial del índice plástico de 40.17 al incorporarle cal en un 4% y tiempo de curado de 7 días, este índice -- de plasticidad disminuye a 27.59 ó sea un 31%. Si el porcentaje de cal incorporado es de 8% y el tiempo de curado es de 30 días, el índice plástico disminuye hasta 15.69 ó sea un 61%. También se observa para la condición de estabilización con el 8% de cal y tiempo de curado de 30 días que el límite líquido disminuye de 61.33 a 41.81 ó sea en un 32%. Si se volviera a clasificar con estos nuevos valores, obtenidos de la estabilización al 8% de cal y tiempo de curado de 30 días, el material ya no se ubica en la zona IV de la carta de plasticidad sino en la zona I, cambiando su clasificación de una arcilla franca, a una arcilla ligeramente plástica ó sea de una CH a una CL.

En cuanto a la evolución de la contracción lineal, se puede observar en la tabla VI.b.2. una disminución considerable de esta contracción al incrementar el porcentaje de cal, sin embargo, se tiene una ligera tendencia a aumentar esta característica al ser mayor el tiempo de curado.

La evolución de la expansión para la muestra estabilizada no tiene un resultado favorable, ya que esta expansión no se ve disminuida al incrementar el porcentaje de cal hidratada, lo cual nos da como conclusión que el punto de fijación para esta característica debe estar cerca del 4% de cal ó tal vez un valor inferior.

Observando ahora la tabla VI.b.5. y VI.b.6. para la muestra de Irapuato Terrenos de Aurrerá, podemos apreciar una tendencia a aumentar el VRS al aumentar el porcentaje de cal hidratada a la muestra. Si comparamos la resistencia obtenida con el 4% de cal ó sea de 458 Kg/cm<sup>2</sup> y la obtenida con el 8% de cal ó sea de 1056 Kg/cm<sup>2</sup> se tiene un incremento del 57%, lo cual indica una tendencia muy favorable a aumentar la resistencia a la penetración ó sea el VRS como consecuencia, el material pasa de ser adecuado para una subrasante de regular calidad, a un material adecuado para una base de regular calidad.

Concluyendo, para el material de Irapuato Terrenos de la Tienda Aurrerá, la estabilización con cal no mejora mucho su resistencia a la compresión simple, pero en cambio transforma las características plásticas del material, --

convirtiéndolo en un material de baja plasticidad, la estabilización también nos da un buen aumento en la resistencia a la penetración, mejorando la calidad del material con respecto a esta característica.

Con respecto a los estudios realizados del material de Salamanca, Ave. Faja de Oro, comenzaremos diciendo que este material en su estado natural se le clasifica como un suelo fino, el cual tiene los límites de consistencia siguientes: límite líquido de 46.10, límite plástico de 32.80 e índice de plasticidad de 13.30 Por lo tanto, se localiza dentro de la carta de plasticidad en el grupo I. Considerándose como una arcilla ligeramente plástica (CL).

Analizando los resultados y la gráfica correspondiente al material en la Figura VI.b.1., podemos observar que la resistencia aumenta al aumentar el porcentaje de cal, pero sobre todo a edades tempranas de estabilización ya que a medida que el tiempo de curado aumenta el incremento de resistencia, se presenta pero en menor grado. Esto nos indica que el material tiene una reacción brusca al contacto con la cal, disminuyendo su efecto a medida que el tiempo aumenta.

Con respecto a la evolución de los límites de consistencia, podemos observar que la adición de cal da como resultado a temprana edad, un incremento en el índice plástico, debido a una combinación de aumento tanto en el límite líquido como en el límite plástico, sin embargo, esta tendencia cambia cuando los tiempos de curado son mayores, con porcentajes de cal también mayores. Podemos concluir que con respecto al mejoramiento de los límites de consistencia no se tienen resultados positivos con la adición de cal, debido tal vez a que el material es de por sí poco plástico.

En cuanto a la contracción lineal, se puede apreciar en la Tabla VI.b.2. que ésta tiene una disminución considerable con la adición de cal y que la modificación se presenta a edades tempranas, permaneciendo casi constante a través del tiempo de curado.

En cuanto a la expansión, se considera que este material no tiene problema ya que ésta es pequeña, por consecuencia el estabilizarla con cal para disminuir su expansibilidad, no debe ser justificable ya que con los porcen

tajes de cal manejados, se tiene un resultado casi constante de la expansibilidad, como puede verse en la Tabla VI.b.3., por esta razón, si se desea disminuir la expansibilidad de este material, no se puede recomendar a la cal hidratada.

En cuanto a la evolución a través de la estabilización con cal del valor relativo de soporte, el material tiene un comportamiento de poco incremento uniforme al aumentar el porcentaje de cal, sin embargo, el material obtiene un incremento favorable de resistencia a la penetración, lo cual lo hace un material adecuado para utilizarse como sub-base de buena calidad.

Concluyendo, podemos decir que el material de Salamanca es un material bueno en su estado natural, el cual se ve favorecido con la adición de cal al aumentar su resistencia a la compresión simple y a la penetración, sin embargo, no se tiene un buen resultado en cuanto a la disminución de su plasticidad.

El último de los materiales que se obtuvo para este estudio fué el de la Ciudad de Celaya, obteniéndose del Boulevard Tecnológico. Se le calificó como un material fino, el cual tiene las siguientes características: Su límite de consistencia en estado natural fué, límite líquido de 71.64, límite plástico de 22.0 e índice de plasticidad de 49.64. Con estos datos se obtuvo en la carta de plasticidad su ubicación, quedando dentro del grupo IV, correspondiente a arcillas inorgánicas de alta plasticidad (arcillas francas).

Analizando la primera característica, ó sea la evolución de la resistencia al estabilizarse el material con cal, y al transcurrir el tiempo de curado. Para ésto vemos la tabla del capítulo IV correspondiente, así como la gráfica de la Figura VI.b.1. Aquí se puede observar una tendencia bien definida a aumentar la resistencia, al aumentar el porcentaje de cal al material, por ejemplo, se puede ver que para el 4% de cal a los 7 días de curado, el valor de resistencia es de 7.5 Kg/cm<sup>2</sup>, mientras que para el 8% de cal es de 11.00 Kg/cm<sup>2</sup>, ó sea que se aumenta la resistencia en un 32%. También puede observarse que la tendencia a aumentar la resistencia al transcurrir el tiempo de curado, en este caso es muy pequeña, veamos por ejemplo para el 6% de cal, mientras que la resistencia es

de 8 Kg/cm<sup>2</sup> para un tiempo de curado de 7 días, para un tiempo de 30 días es apenas de 8.5 Kg/cm<sup>2</sup>, ó sea que aumenta tan solo un 6%, observando la gráfica de la Figura VI.b.1., podemos constatar que este aumento también es muy pequeño para los demás porcentajes de cal. De lo anterior podemos concluir en que la reacción que se verifica al estabilizar con cal a este material es muy brusca, teniendo una escasa acción puzolámica através del tiempo.

En cuanto a la evolución de los límites de consistencia para este material, se puede observar en la Tabla VI.b.1. correspondiente al material Celaya, que al aumentar el porcentaje de cal, el límite líquido disminuye, disminuyendo con mayor intensidad para tiempos de curado mayores.

Esto mismo sucede para el límite plástico, solo que en vez de disminuir aumenta, provocando con ésto una disminución del índice de plasticidad. Se puede ver en la Tabla VI.b.1. que el índice plástico correspondiente al material disminuye en un 61% al pasar de su estado natural a un estado de estabilización con el 8% de cal y tiempo de curado de 30 días.

Con respecto a la contracción lineal, podemos observar que a medida que se incrementa el porcentaje de cal, se disminuye la contracción lineal, observándose también que el tiempo de curado no afecta en mucho el comportamiento del material con respecto a esta característica.

Las pruebas efectuadas para analizar la expansión del material, dieron los resultados que se pueden ver en la Tabla VI.b.3., observándose una disminución sustancial de la expansibilidad para porcentajes de cal del 8%, ya que como se ve en la Tabla VI.b.3., ésta disminuye de 13.6 a 2.4 ó sea un 82% con respecto al material estabilizado con el 4% de cal.

En cuanto a la evolución del valor relativo de soporte de este material, con distintos porcentajes de cal, en la tabla VI.b.5. el VRS aumenta al incrementarse el porcentaje de cal, sin embargo, este aumento no es tan significativo. Podemos observar que mientras el VRS para el 4% de cal es de 14.70, ó sea el correspondiente a una sub-rasante de regular calidad, para el 8% el VRS es de 36.76 ó sea el correspondiente a una sub-base de buena calidad.

Podemos concluir con el análisis de las propiedades estudiadas del material obtenido de Celaya que la muestra tiene un incremento considerable de resistencia a la compresión simple, una excelente disminución de su expansibilidad, una disminución también considerable de su plasticidad y un incremento ligero de VRS, al ser estabilizada con cal.

De los estudios realizados con los materiales anteriormente mencionados, podemos concluir en forma general de la siguiente manera:

La estabilización de suelos arcillosos con calhidratada, proporciona un aumento general en la calidad del material, ya que modifica su comportamiento de la siguiente manera:

- 1) De los estudios microscópicos se observa que la estabilización transforma la estructura del mineral, favoreciendo que las partículas se aglomeren, lo cual reduce la entrada del agua al material, convirtiéndolo en más resistente y menos sensible a cambios de humedad.
- 2) El material aumenta su resistencia a la compresión simple, lo cual beneficia siempre, ya que al material arcilloso tiene muy poca resistencia.
- 3) En todos los casos disminuye el índice de plasticidad, lo cual transforma el material disminuyendo su sensibilidad a cambios volumétricos al sufrir cambios de humedad.
- 4) Se observa una disminución tanto en la expansión, como en la contracción del material estabilizado, transformándolo en un material menos sensible al agua.
- 5) El VRS se incrementa, mejorando considerablemente la calidad del suelo estabilizado.

El conocimiento de los mecanismos responsables de las modificaciones que se llevan a cabo durante la estabiliza

ción de una arcilla con cal es (como se puede observar) - muy importante. También es indispensable la previa deter-  
minación de los tipos de minerales arcillosos presentes en  
un suelo que se pretende estabilizar, para adoptar el trata-  
miento a efectuar, previendo los resultados que se van  
a tener con la estabilización, así como su evolució-  
n con el tiempo.

Finalmente, se vuelve a insistir en la gran importan-  
cia que tiene el conocer las condiciones del lugar, así -  
como todo lo relativo al procedimiento de construcción a u-  
tilizar, con la finalidad de no dejar ningún aspecto sin  
analizar, ya que de esto depende el éxito de la estabili-  
zación. Así mismo, deberá analizarse ó estimarse en algu-  
na forma la permanencia de la estabilización con el tiem-  
po y en las condiciones del lugar, ya que en algunos ca-  
sos, los cementantes formados pueden ser muy solubles en a-  
gua (caso de las sales) ó simplemente sufrir transforma-  
ciones desfavorables bajo el ataque de oxígeno ó bióxido  
de carbono de la atmósfera, lo cual podría manifestarse a  
largo plazo.

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

- \* MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACION DE SUELOS  
Carlos Fernández Loaiza.
  
- \* TESIS: "LAS ARCILLAS EXPANSIVAS DE LA CIUDAD DE QUERETARO".  
Fernando Humberto Juárez Rodríguez
  
- \* MECANICA DE SUELOS.  
Lambe T.W. Whitman R.V.
  
- \* FABRIC AND MINERAL ANALYSIS OF SAILS.  
Brewer R.
  
- \* MECANICA DE SUELOS  
Juárez Badillo.  
Rico Rodríguez.
  
- \* LIME STABILIZACION CONSTRUCTION MANUAL.  
Publicado por National Lime Association.
  
- \* INSTRUCTIVO PARA EL DECIMO CURSO DE LABORATORISTAS.  
S.O.P. (Septiembre de 1976).
  
- \* ENCICLOPEDIA BRITANICA.
  
- \* CARTAS DE DESARROLLO Y ESTUDIO DEL TERRITORIO NACIONAL.