

53  
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ACATLAN

"ESTABILIZACION MEDIANTE EL USO  
DE SUELO-CEMENTO"

T E S I S  
PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
TORRES SOBERANES EDNA YRELA



ASESOR: ING. CELSO BARRERA CHAVEZ

NAUCALPAN, EDO DE MEXICO

FEBRERO DE 1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

**SRITA. EDNA YRELA TORRES SOBERANES**

ALUMNA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

**P R E S E N T E .**

De acuerdo a su solicitud presentada con fecha 10 de Junio de 1994, me complace notificarle que esta Jefatura de Programa tuvo a bien asignarle el siguiente tema de tesis titulado "ESTABILIZACION MEDIANTE EL USO DE SUELO-CEMENTO", el cual se desarrollará como sigue:

**INTRODUCCION**

- I. PROPIEDADES DEL SUELO
- II. TIPOS DE ESTABILIZANTES
- III. PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA SUELO - CEMENTO
- IV. EJECUCION DE OBRAS CON SUELO - CEMENTO

**CONCLUSIONES**

Así mismo fue designado como asesor de tesis al ING. CELSO BARRERA CHAVEZ Ruego a usted, tomar nota en cumplimiento de lo especificado en la Ley de profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado. Esta comunicación deberá imprimirse en el interior de la tesis.

**ATENTAMENTE.**  
" POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU "  
Acatlán Edo. de México a 29 de Enero de 1997

  
Ing. Carlos Rosales Aguilar.  
Jefe del Programa de Ingeniería Civil



**ENEP-ACATLAN  
JEFATURA DEL  
PROGRAMA DE INGENIERIA**

**¿ QUE ES LO QUE DIFERENCIA  
A LOS HOMBRES DE LOS ANIMALES ?**

**LA GRACIA DE SOÑAR**

**¿ Y QUE ES LO QUE NOS DIFERENCIA  
DE LOS DEMAS HOMBRES ?**

**LA CAPACIDAD DE REALIZAR  
SUS SUEÑOS.**

# **ESTABILIZACION MEDIANTE EL USO DEL SUELO CEMENTO.**

**EDNA YRELA TORRES SOBERANES.**

## **CONTENIDO.**

**INTRODUCCION.**

**CAPITULO UNO:**

**PROPIEDADES DEL SUELO.**

**CAPITULO DOS:**

**TIPOS DE ESTABILIZANTES.**

**CAPITULO TRES:**

**PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA SUELO-CEMENTO.**

**CAPITULO CUATRO:**

**EJECUCION DE OBRAS CON SUELO-CEMENTO.**

**CONCLUSIONES.**

**BIBLIOGRAFIA.**

## INDICE.

<b>INTRODUCCION.</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO UNO PROPIEDADES DEL SUELO.</b>	
<b>GENERALIDADES.</b>	<b>3</b>
1.1 PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO.	3
1.2 PROPIEDADES MECANICAS DEL SUELO.	16
1.3 PROPIEDADES QUIMICAS DEL SUELO.	22
<b>CAPITULO DOS TIPOS DE ESTABILIZANTES.</b>	
<b>GENERALIDADES.</b>	<b>25</b>
2.1 ESTABILIZACION POR MEDIOS MECANICOS.	27
2.1.1 COMPACTACION.	28
2.1.2 MEZCLA SUELO-SUELO.	28
2.2 ESTABILIZACION POR MEDIOS QUIMICOS.	30
2.2.1 ESTABILIZACION CON CEMENTO.	30
2.2.2 ESTABILIZACION CON CAL.	34
2.2.3 ESTABILIZACION CON ASFALTOS.	37
2.2.4 ESTABILIZACION CON SALES.	38
2.2.5 ESTABILIZACION CON RESINAL Y POLIMEROS.	40
<b>CAPITULO TRES PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA SUELO-CEMENTO.</b>	
<b>GENERALIDADES.</b>	<b>43</b>
3.1 CEMENTO.	43
3.2 AGUA.	49
3.3 ADITIVOS.	49

3.4 PROPIEDADES DEL SUELO-CEMENTO.	49
3.5 MODIFICACION DEL SUELO-CEMENTO.	51
3.6 PRUEBAS DE LABORATORIO.	52
<b>CAPITULO CUATRO EJECUCION DE OBRAS CON SUELO-CEMENTO.</b>	
GENERALIDADES.	67
4.1 MURO DE RETENCION.	67
4.1.1 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO.	67
4.1.2 CARACTERISTICAS DEL SITIO.	69
4.1.3 ANALISIS DE MURO DE SUELO-CEMENTO.	70
4.1.4 PROCESO CONSTRUCTIVO.	75
4.1.5 CONCLUSIONES.	76
4.2 CIMENTACION SOBRE UN RELLENO MEDIANTE UNA LOSA DE SUELO CEMENTO.	76
4.2.1 CARACTERISTICAS DEL SITIO.	76
4.2.2 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO.	82
4.2.3 ANALISIS DE CIMENTACION.	82
4.2.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CIMENTACION.	87
4.2.5 CONCLUSIONES.	88
<b>CONCLUSIONES.</b>	89
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	90

## **INTRODUCCION.**

Desde la antigüedad el hombre ha tratado de mejorar el comportamiento mecánico del suelo (Resistencia, permeabilidad, desgaste a la erosión, así como otras propiedades), debido a que este no se podía utilizar para un determinado fin, por lo que se vio en la necesidad de modificar sus propiedades (mecánicas), para cumplir con mejores requerimientos, a esta técnica se le llama estabilización de suelos.

Fue entonces que a partir de este siglo se iniciaron las investigaciones acerca de esta técnica.

La estabilización ayuda a que el suelo sea más resistente a ciertos esfuerzos así como de reducir la susceptibilidad a la erosión para poder llevar a cabo una buena estabilización es necesario conocer las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo. Con las propiedades físicas se conoce al suelo de una manera cualitativa por su forma, estructura, plasticidad, tamaño, color, olor, etc. De acuerdo con estas características el suelo se clasifica en: gravas, arenas, limos y arcillas. Las propiedades mecánicas describen el comportamiento del suelo bajo ciertas condiciones de esfuerzos como son las pruebas de compresión y de consolidación y por último las propiedades químicas describen la mineralogía del suelo y el intercambio catiónico, conociendo lo anterior se pueden determinar las reacciones del suelo cuando se mezcla con un producto químico que puede mejorar o empeorar el comportamiento mecánico de este, el mejoramiento del suelo es de gran utilidad para el constructor porque genera ahorros importantes en la obra.

Cuando el ingeniero no encuentra adecuado el suelo para cualquier tipo de construcción se llevan a cabo ensayos de laboratorio, y de acuerdo con los resultados se puede determinar que tipo de estabilización se puede realizar, ya sea mecánica ( compactación y mezcla suelo-suelo) y o química ( cemento, cal, asfalto, sales y polímeros).

A principios de este siglo y después de la segunda guerra mundial se desarrollo un material de construcción que se llama suelo-cemento, que es una mezcla de suelo pulverizado, cemento portland y agua en proporciones específicas y bajo determinadas condiciones, el suelo adquiere propiedades favorables que se deben a la hidratación del cemento y a la energía de compactación. La cantidad del suelo es aproximadamente del 90 % de la mezcla seca, la cantidad de cemento se obtiene por medio de gráficas y tablas que diseño la Portland Cement Association (PCA) para caminos, pero con base a la experiencia y realizando cálculos para otro tipo de obra (muro de retención, diques, cortinas etc.) , también se puede obtener el contenido de cemento que es aproximadamente del 10 % peso seco de la mezcla, para conocer la cantidad de agua que comprende entre el 10% y 20% aproximadamente del peso total de la muestra se realiza la prueba próctor estándar, el agua no debe de contener sustancias nocivas (materia orgánica, y sulfatos) que puedan perjudicar a la mezcla, es importante que la mezcla de suelo-cemento no contenga materia orgánica porque puede perjudicar a la acción aglutinante del suelo y a la resistencia del suelo.

A la mezcla de suelo-cemento también se le pueden agregar aditivos (cal hidratada, cenizas, y sales ) con la anterior se pueden mejorar o modificar las propiedades del suelo-cemento siempre y cuando no perjudique su principal función que es la de dar resistencia y durabilidad al suelo.

La resistencia del suelo-cemento se puede conocer mediante la prueba de compresión y para conocer que tan susceptible es la mezcla a la erosión se realizan la pruebas de humedecimiento-secado y de congelamiento-deshielo.

En esta tesis se verán dos aplicaciones con la mezcla de suelo-cemento que son: un muro de retención y a una cimentación que esta desplantada sobre una losa de suelo-cemento, ambas construcciones se encuentran al SE de la ciudad de México, para elegir estas alternativas de construcción se llevaron a cabo estudios geotécnicos y de acuerdo con los resultados se observo que el suelo donde se desplanta la construcción se podría utilizar para la mezcla de suelo-cemento disminuyendo así los costos en obra, además se estudio su comportamiento mecánico de la mezcla que resulto favorable para llevar a cabo una buena toma de decisiones.

# **Capitulo Uno.**

## **Propiedades del Suelo.**

### **Generalidades.**

Un suelo se puede conocer por sus características físicas y comportamiento mecánico, por medio de las propiedades del suelo las que se dividen en: Físicas, Químicas y Mecánicas; el suelo bajo ciertas condiciones se puede mejorar adicionándole estabilizantes.

### **Suelo.**

Es cualquier material no consolidado compuesto de distintas partículas sólidas con gases y líquidos incluidos, producto de la desintegración mecánica y descomposición química de las rocas.

Mediante estos procesos las rocas llegan a formar gravas, arenas, limos y arcillas.

Los minerales al ser depositados forman estructuras dejando vacíos, los cuales pueden estar secos, parcialmente o totalmente llenos de agua.

Los agentes que atacan a las rocas en la naturaleza son: El aire, agua, los cambios de temperatura, plantas y microorganismos.

De acuerdo a su origen geológico los suelos se clasifican en:

### **SUELOS RESIDUALES.**

Estos suelos son producto de ataque de los agentes del intemperismo, que al ser formados se depositan cerca o directamente en el lugar de la roca que les dio origen.

### **SUELOS TRANSPORTADOS.**

El suelo producto de la roca es removido del lugar de origen, por los agentes de transporte que son: Glaciares, Corrientes de agua superficial, viento y fuerzas de gravedad, estos factores actúan a menudo solos o combinándose.

### **1.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO.**

Las propiedades físicas sirven para conocer las características del suelo, de una manera cualitativa, ya sea por el color, forma, olor así como otras que se verán a continuación.

### 1.1.1 FORMA

La forma de las partículas minerales del suelo es de gran importancia en el comportamiento mecánico.

La forma característica de los suelos gruesos es la equidimensional en las tres dimensiones de las partículas produciendo formas redondeadas, subredondeadas, subangulosas y angulosas.

La forma redondeada es la esférica mientras que la angulosa presenta aristas, cuando las aristas están redondeadas, por el efecto de rodamiento y la abrasión mecánica, entonces se tiene la forma subangulosa; cuando existe un efecto mas abrasivo de erosión la forma resultante es la subredondeada.

En los suelos finos la forma de las partículas tiende a ser aplastada, por lo que los minerales arcillosos adoptan en forma general la forma laminar, en que dos de sus dimensiones son incomparablemente más grandes que la tercera, algunos minerales de arcilla poseen una forma acicular, en que una dimensión es más grande que las otras dos.

### 1.1.2 RELACIONES VOLUMÉTRICAS DE LOS SUELOS.

En el suelo se distinguen tres fases que lo constituyen:

La fase solida que esta formada por partículas minerales del suelo.

La fase liquida que se forma por el agua que se encuentra en el suelo aunque pueden existir otros líquidos.

La fase gaseosa comprende todo el aire o pueden existir otros gases.

Cuando un suelo esta saturado cuenta solo de dos fases la sólida y líquida, a continuación se muestra el esquema representativo de las fases del suelo.

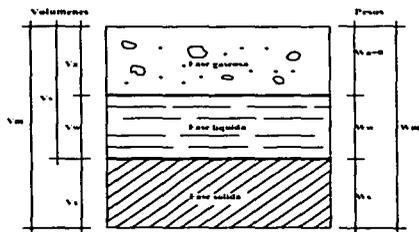


Fig. 1.1 Esquema de las fases del suelo.

## **SIMBOLOGIA.**

$V_m$  = Volumen total de la muestra de suelo.

$V_s$  = Volumen de la fase solida de la muestra.

$V_v$  = Volumen de los vacios de la muestra de suelo.

$V_w$  = Volumen de la fase liquida contenida en la muestra.

$V_a$  = Volumen de la fase gaseosa de la muestra.

$W_m$  = Peso total de la muestra del suelo.

$W_s$  = Peso de la fase solida de la muestra de suelo.

$W_w$  = Peso de la fase liquida de la muestra.

$W_a$  = Peso de la fase gaseosa de la muestra.

$\gamma_o$  = Peso específico del agua, a 4° C de temperatura y con una presión atmosférica correspondiente a la del nivel del mar.

$\gamma_o = 1000 \text{ Kg /m}^3, 1 \text{ g /cm}^3$

$\gamma_m$  = Peso específico de la masa del suelo.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_m}$$

$\gamma_s$  = Peso específico de la fase sólida del suelo.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

$\gamma_w$  = Peso específico del agua en condiciones reales de trabajo su valor difiere muy poco con respecto a  $\gamma_o$  muchas veces ambos se toman iguales.

### 1.1.2.1 PESO ESPECIFICO RELATIVO

"El peso específico relativo es la relación existente entre el peso específico de una sustancia comparado a través de un cociente con el peso específico del agua a cuatro grados centígrados, destilada sujeta a un Atm de presión".

Al peso específico relativo de la fase sólida del suelo se llama densidad de sólidos (  $S_s$  ).

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$$

### 1.1.2.2 RELACIONES FUNDAMENTALES

- Relación de Vacíos es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de un suelo.

$$e = V_v/V_s$$

- Porosidad es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de masa de la muestra. (porcentaje)

$$n = V_v/W_m$$

- Grado de saturación es la relación que hay entre el volumen de agua y el volumen de vacíos. (porcentaje)

$$G_w = V_w/V_v$$

- Contenido de humedad es la relación entre el peso de agua contenida en el mismo y el peso de la fase sólida en porcentaje.

$$w\% = W_w/W_s \times 100$$

- Grado de saturación de aire es la relación entre el volumen de la fase gaseosa y el volumen de vacíos.

$$G_a = V_a/V_v$$

### 1.1.3 ESTRUCTURACIÓN DE LOS SUELOS

Es la disposición que adoptan las partículas minerales del suelo en forma organizada. La estructuración de un suelo juega un papel fundamental en el comportamiento, especialmente en la resistencia, compresibilidad y permeabilidad.

#### 1.1.3.1 ESTRUCTURA SIMPLE

Es aquella producida cuando las fuerzas debidas al campo gravitacional son predominantes en la disposición de las partículas y es por lo tanto típica de los suelos gruesos (gravas y arenas). En la presente estructura las partículas se apoyan unas sobre otras, las cuales poseen varios tipos de apoyo.

El comportamiento mecánico de un suelo esta dado por la compacidad. La compacidad es el grado de acomodo de las partículas gruesas de un suelo.

Cuando el acomodo se presenta como en la figura 1.2a, la compacidad es baja o muy baja, esto quiere decir que existen huecos entre las partículas. En la fig. 1.2b; la compacidad es alta y esto se debe a que existen pocos huecos entre las partículas como se puede apreciar en esta figura.

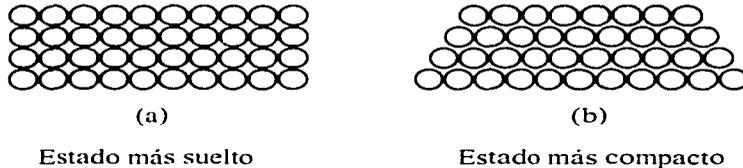


Fig. 1.2 Compacidad de las partículas.

#### 1.1.3.2 ESTRUCTURA PANALOIDE

Estructura típica de suelos con pequeños granos (0.02 mm.) que se depositan en un medio continuo por efecto de la gravedad.

Cuando las partículas son suficientemente pequeñas existen otros efectos, tales como el efecto Browniano, que contribuye a minimizar el efecto de la gravedad terrestre, esto se presenta en las siguientes estructuras

Entre las partículas quedan espacios que pueden estar llenos de agua o aire.

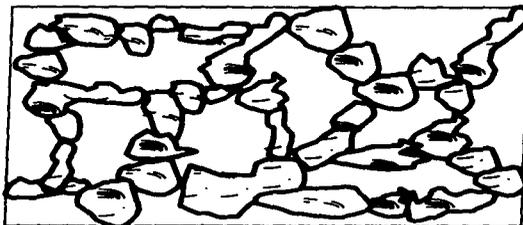


Fig. 1.3 Estructura Panaloide.

#### 1.1.3.3 ESTRUCTURA FLOCULENTA

Cuando dos partículas de grano fino llegan a tocarse se adhieren con fuerza y se sedimentan juntas; estas partículas por si solas se mueven al azar en un movimiento que se llama Browniano. Se supone que estas partículas pueden unirse formando un grumo como la estructura de un panal, y/o cuando tienen el peso suficiente para depositarse se obtiene un estructura de panales que a la vez se juntan con otros panales, esta estructura recibe el nombre de floculante panaloide de orden superior.

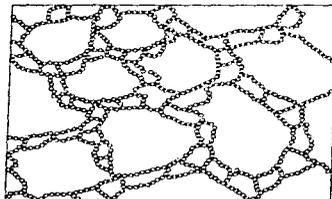


Fig. 1.4 Estructura Floculenta.

#### 1.1.3.4 ESTRUCTURA COMPUESTA

Un suelo en estado natural esta estructurado con dos o mas de las características antes mencionadas, por lo que se le denomina estructura compuesta.

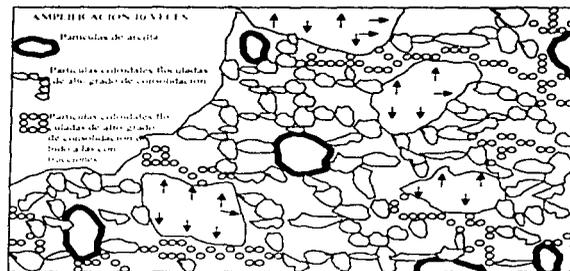
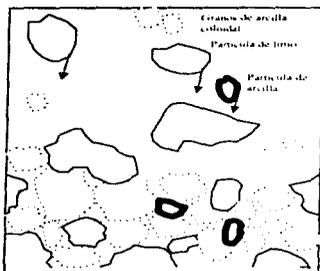


Fig. 1.5 Estructura compuesta.

### 1.1.3.5 ESTRUCTURA EN "CASTILLOS DE NAIPES"

Es debido a la flocculación de las partículas y el resultado es la unión a través de las aristas, las partículas del suelo poseen una carga negativa y como parece cierto que en las aristas existe una concentración de carga positiva, esto hace que se atraiga con la superficie de otra partícula.

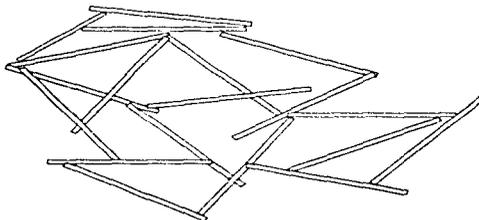


Fig.1.6 Estructura de castillos de naipes.

### 1.1.3.6 ESTRUCTURA DISPERSA

Cualquier perturbación en las fuerzas osmóticas de la estructura anterior tiende a disminuir los ángulos entre las laminas provocando mayor espaciamiento y formando así la estructura dispersa.

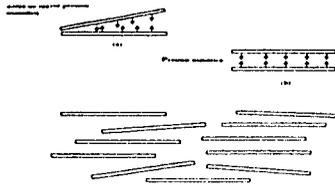


Fig. 1.7 Estructura dispersa

### 1.1.4 PROPIEDADES TIXOTROPICAS DE LAS ARCILLAS

Entre las partículas de las arcillas se ejercen fuerzas debidas a las ligaduras físico - químicas, que se manifiestan en sus respectivas películas envolventes de agua y cationes absorbidas. Un amasado enérgico de las arcillas puede llegar a romper esas ligaduras por un solo momento ya que la mayoría de las arcillas vuelven a sus propiedades originales; este fenómeno se llama tixotropía.

### 1.1.5 GRANULOMETRIA

La granulometría consiste en clasificar al suelo en sus diferentes fracciones que son seleccionados de acuerdo al tamaño de las partículas.

El análisis granulométrico en suelos gruesos se hace por medio de mallas, y en los suelos finos se realiza mediante un dispositivo de laboratorio llamado hidrómetro.

A continuación se presentan algunas tablas de los suelos de acuerdo a su tamaño.

A) Clasificación Internacional. (Las unidades están en mm.)

2.0 Arena Gruesa	0.2 Arena Fina	0.02 Limo	0.002 Arcilla	0.0002 Ultra arcilla (Cotoide)
------------------	----------------	-----------	---------------	--------------------------------

B) Clasificación M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology)

	Gruesa	0.2		Grueso	0.06		Gruesa	0.002
<b>Arena</b>	Mediana	0.6	Limo	Mediano	0.02	Arcilla	Mediana	0.0006
	Fina	0.02		Fino	0.006		Fina	0.0003

C) Esta clasificación se utiliza a partir de 1936 en Alemania y esta basada en una proposición original de Kopecky.

MATERIAL	CARACTERÍSTICA	TAMAÑO EN mm.
Piedra		mayor de 70mm
Grava	Gruesa	30 a 30
	Media	5 a 30
	Fina	2 a 5
Arena	Gruesa	1 a 2
	Mediana	0.2 a 1
	Fina	0.1 a 0.2
Polvo	Grueso	0.05 a 0.1
	Fino	0.02 a 0.05
Limo	Grueso	0.006 a 0.02
	Fino	0.002 a 0.006
Arcilla	Gruesa	0.0006 a 0.002
	Fina	0.0002 a 0.0006
Ultra-Arcilla		0.00002 a 0.0002

### 1.1.6 PLASTICIDAD

Es la propiedad más importante en los suelos finos (Limos y Arcillas). Siendo más notorio en los suelos arcillosos.

Esta propiedad consiste en que los suelos finos son capaces de soportar deformaciones rápidas sin rebote elástico, sin variaciones volumétricas apreciables, sin deformaciones y sin agrietamientos.

La propiedad no es permanente debido a que depende del contenido de humedad del suelo.

#### 1.1.6.1 ESTADOS DE CONSISTENCIA Y LIMITES DE PLASTICIDAD

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios, el que se utiliza hoy en día es el de Atterberg.

Este criterio establece que de acuerdo con el contenido de humedad, un suelo puede ser susceptible de ser plástico y puede estar en cualquiera de los siguientes estados.

- 1.- Estado Líquido, el suelo cuenta con propiedades y apariencia de suspensión.
- 2.- Estado Semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- 3.- Estado Plástico, su aspecto y su comportamiento soporta deformaciones rápidas sin variaciones volumétricas apreciables y no se desmorona ni se agrieta.

4.- Estado Semisólido, en el que el suelo tiene apariencia de un sólido, pero aun disminuye el volumen al estar sujeto al secado.

5.- Estado Sólido, el volumen no varía al secarlo.

Cada límite se define por la humedad que produce una consistencia determinada, la diferencia entre los límites representa la variación en el contenido de agua dentro de la cual el suelo se mantiene en un cierto estado.

- Límite Líquido (L.L.): Se define por la humedad que tiene el suelo amasado, contenido en la copa de Casagrande este tiene una ranura trapecial que cuando se le dan 25 golpes ligeros contra una placa de goma dura, el suelo se cierra.

- Límite Plástico (L.P): Se define por la humedad del suelo cuando se amasa en rollitos de 3 mm., y este empieza a desmoronarse y separarse.

- Límite de retracción. (L.R): Se define por la humedad que contiene el suelo amasado cuando este alcanza su volumen teórico al secarse.

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico se llama Índice Plástico (I.P) y representa la variación en humedad que puede tener un suelo que se conserva en estado plástico.

### **1.1.7 CLASIFICACIÓN DE SUELOS**

La clasificación se utiliza para ubicar un suelo dentro de algún grupo que tiene características comunes, con el propósito de dar facilidades para estimar las propiedades o aptitudes de un suelo para facilitar al ingeniero un método preciso para la descripción del suelo.

#### **1.1.7.1 CARTA DE PLASTICIDAD**

Es una gráfica que ayuda a situar a los suelos finos de acuerdo con sus propiedades mecánicas e hidráulicas, así como sus características de plasticidad.

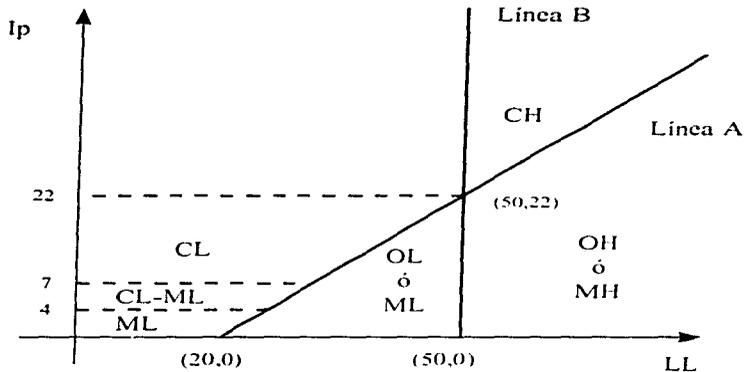


Fig.1.8 Carta de Plasticidad.

Dentro de la carta de plasticidad la línea A que inicia en las coordenadas (20,0) es la frontera entre un suelo de alta plasticidad y uno de poca plasticidad o un suelo orgánico.

La nomenclatura utilizada en la carta corresponde al SUCS y es la siguiente:

C (Clay) Arcilla

M (Mjala) Limos

O (Organic) Orgánica

H (High) Alta Compresibilidad

L (Low) Baja Compresibilidad

I,P Índice Plástico

L,L Limite Líquido

**La línea vertical B que se observa en esta misma carta Cuyas coordenadas iniciales son (50,0), delimita un suelo de alta compresibilidad con uno de baja compresibilidad.**

La intersección A y la línea B que se sitúa en el punto (50,22) divide a la carta en cuatro zonas son las que se utilizan actualmente dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

### 1.1.7.2 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es una consecuencia el Sistema de Clasificación para Aeropistas desarrollado por A. Casagrande como un método rápido para identificar y agrupar a los suelos.

Este sistema es el más usado en la actualidad y consiste en lo siguiente:

	<b>Gravas</b>	<b>Gravel</b>	<b>G</b>
<b>Gruesos</b>	<b>Arenas</b>	<b>Sand</b>	<b>S</b>
	<b>Limos</b>	<b>Mjala</b>	<b>M</b>
<b>Finos</b>	<b>Areilla</b>	<b>Clay</b>	<b>C</b>
	<b>Orgánicos</b>	<b>Organics</b>	<b>O</b>

Si más del 50% del material componente del suelo se retiene en la malla No. 200 es un suelo grueso.

Si más del 50% pasa la malla No. 200 es fino.

#### SUELO PREDOMINANTEMENTE GRUESO.

a) Material con menos del 5% de finos y si cumple con los siguientes requisitos de graduación.

$Cu > 4; 1 \leq Cc \leq 3 \Rightarrow$  GW 50% se retiene en No. 4

$Cu > 6; 1 \leq Cc \leq 3 \Rightarrow$  SW 50% pasa en No. 4

b) Material con menos del 5% de finos y no cumplen con los requisitos de graduación antes mencionados tienen por símbolo: GP y SP

c) Material con más del 12% de finos poco o nada plásticos, con la fracción fina No. 40 ubicado abajo de la línea A o  $I_p < 4\%$ .

GM, SM

d) Material con más del 12% de finos ubicados arriba de la línea A y con  $I_p > 7\%$ .

GC-SC

e) Material con finos comprendidos entre 5% y 12% tienen símbolos dobles.

GW-GM;	GP-GM,	SW-SM;	SP-SM
GW-SC;	GP-GC,	SW-SC;	SP-SC

f) Si hay más del 12% de finos y los límites están comprendidos entre 4% y 7%.

GM-GC y SM-SC

g) Si están comprendidos entre 5-12% de finos y los límites están entre 4 y 7% Ip.

GW-(GM-GC) ó GP-(GM-GC)  
SW-(SM-SC) ó SP-(SM-SC)

### **1.1.7.3 IDENTIFICACION DE SUELOS EN CAMPO**

La identificación permite conocer en una forma cualitativa las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo.

Las principales bases de criterio para identificar suelos finos en el campo son la investigación de las características de dilatancia, tenacidad y resistencia en estado seco.

Por otro lado el calor y el olor del suelo pueden ayudar en suelos orgánicos.

#### **1.1.7.3.1 DILATANCIA (MOVILIDAD DEL AGUA)**

El método para realizar esta prueba es la siguiente:

- Se prepara una pastilla de suelo que sea manejable y que no sea pegajosa.
- Se coloca en la palma de la mano y con la otra se golpea si el agua aparece rápidamente en la superficie del suelo, se trata de una arena fina, no plástica, y en algunos casos resulta ser orgánica o limo de baja plasticidad, y si el agua no aparece, el suelo puede ser arcilloso de baja o alta compresibilidad.

#### **1.1.7.3.2 TENACIDAD**

La tenacidad es la resistencia que opone un suelo a deformarse.

La prueba se realiza sobre un espécimen de consistencia suave.

- Se forman cilindros de 3 mm. de diámetro utilizando las palmas de las manos.
- Se amasan y se rolan a medida de que se acerca al límite plástico. Sobrepasando el límite plástico los fragmentos que se rompen se juntan de nuevo y se amasan ligeramente entre los dedos, hasta el desmoronamiento final.

- Si la tenacidad es baja, el suelo es un limo de baja compresibilidad (ML); si la tenacidad es ligera, el suelo es orgánico de baja compresibilidad (CL); si la tenacidad es media es característico de un MH u OH; si la tenacidad es alta el suelo es arcilloso (CL ó CH).

#### **1.1.7.3.3 RESISTENCIA EN ESTADO SECO**

La resistencia de una muestra de suelo cuando se seca previamente y se rompe bajo las presiones ejercidas por los dedos, muestra que la resistencia se relaciona con la fracción coloidal.

- Los suelos de tipo CH tienen una muy alta resistencia.
- Los suelos de tipo CL tienen de media a alta resistencia.
- Los suelos de tipo OH y MH tienen una resistencia media.
- Los suelos de tipo OL tienen una resistencia ligera.
- Los suelos del tipo ML tienen una resistencia nula.

#### **1.1.7.3.4 COLOR**

Cuando se hacen exploraciones de campo el color del suelo es útil para diferenciar los estratos presentes, algunos criterios relativos al color son el oscuro (suelo orgánico), gris o café oscuro (arcillas).

#### **1.1.7.3.5 OLOR**

Los suelos orgánicos (OH y OL) tienen un olor característico que se usa para su identificación, el olor es muy particular cuando el suelo está húmedo o cuando se calienta la muestra.

### **1.2 PROPIEDADES MECANICAS DEL SUELO**

Cuando el suelo es sometido a esfuerzos sufre deformaciones. La naturaleza de la deformación depende de la resistencia del material y de la combinación de los esfuerzos. Si se van aumentando los esfuerzos se alcanzará un punto en el cual el material falla al no poder resistir un nuevo aumento del esfuerzo.

**La deformación no es siempre proporcional al esfuerzo sino que cambia con el tiempo y con el medio, como por ejemplo:** el esfuerzo a la compresión, deformación y consolidación..

- **ELASTICIDAD:** Es la relación entre el incremento de esfuerzo ( $\sigma$ ) y el incremento de la deformación  $\Delta h$ .

- **MODULO DE POISSON.** Es el incremento de esfuerzos  $\Delta\sigma_2$ , también produce una deformación en las dimensiones laterales  $\Delta B$  y  $\Delta L$ .

-**COMPRESIBILIDAD.** Es el proceso por el cual la masa del suelo cambia su volumen manteniendo su forma, todo esto sucede como si estuviese cambiando la escala del espacio tridimensional. La distancia entre los puntos cambia pero se mantiene su posición relativa (prueba de compresión).

- **RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE.** Es cuando el suelo esta sometido a un esfuerzo normal y cortante. Si aumenta el esfuerzo cortante las partículas reaccionan de la siguiente manera.

- \* Se deforma más o menos elásticamente.
- \* Se producen aplastamiento locales en los puntos de contacto.
- \* La distorsión como el aplastamiento producen ligeras traslaciones y rotaciones aumentando el tamaño de algunos poros y reduciendo otros.

Si el esfuerzo cortante aumenta dos reacciones adicionales se hacen evidentes.

- \* Las partículas tienden a rodar unas sobre otras. La resistencia depende del ángulo de contacto entre las partículas.
- \* Las partículas tienden a deslizarse de un grano sobre otro. La resistencia al deslizamiento es esencialmente de rozamiento.

- **CONSOLIDACION.** El proceso de consolidación de los suelos consiste en una disminución de volumen durante un lapso de tiempo provocado por un aumento de las cargas que se le aplican al suelo.

Cuando la posición relativa de las partículas sólidas sobre un mismo plano horizontal permanece constante, el movimiento de las partículas de un suelo puede ocurrir en una sola dirección que es vertical, el volumen de la masa del suelo disminuye, pero los desplazamientos horizontales de las partículas son nulas, esta es la consolidación unidimensional o unidireccional.

La aplicación de las teorías de la mecánica de suelos llevadas a la práctica supone que las constantes de consolidación son las mismas en el proceso rápido en el laboratorio, que en el proceso lento que tiene lugar en la naturaleza.

Existen varios ensayos que permiten definir la resistencia de un suelo a compresión así como su deformabilidad bajo el efecto de cargas.

### 1.2.1 COMPRESION TRIAXIAL.

Es la prueba mas utilizada en la actualidad y sirve para determinar las características de esfuerzo-deformación y de resistencia de los suelos.

En esta prueba se puede variar a voluntad las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales sobre un espécimen de suelo. las muestras son cilindricas y están sujetas a presiones laterales de un líquido (agua). esta protege a su vez de una membrana impermeable para determinar el debido confinamiento. la muestra se coloca en el interior de una cámara cilíndrica y con bases metálicas con cierre hermético. (ver fig. 9).

En la base se colocan piedras porosas, estas se comunican con una bureta exterior. el agua de la cámara puede adquirir cualquier presión que se desee por la acción del compresor comunicado con ella. la carga axial se transmite a la muestra por medio de un vástago, el cual esta en la base superior de la cámara.

La presión hidrostática que se genera dentro de la cámara y produce esfuerzos principales sobre la muestra, son iguales en todas direcciones. en la base de la muestra actuaara, el esfuerzo transmitido por el vástago de la cámara desde el exterior.

Existen dos tipos de pruebas que son a compresión y de extensión.

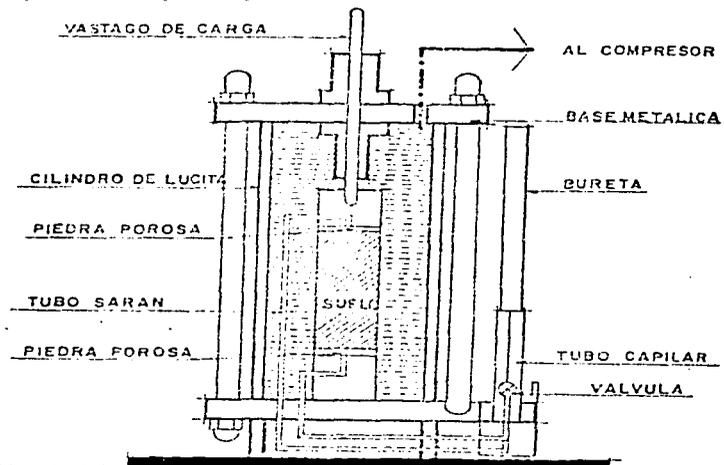


Fig. 1.9 Cámara de compresión triaxial.

### **1.2.1.1 PRUEBAS DE COMPRESION**

Es aquella en que la dimensión axial de la muestra disminuye.

La dimensión axial de la muestra se puede hacer disminuir aumentando el esfuerzo axial, esto se hace aumentando la carga que se transmite por medio del vástago y se mantiene constante el esfuerzo dado por el agua de confinamiento.

### **1.2.1.2 PRUEBA DE EXTENSION**

Es aquella en que la dimensión axial aumenta durante la prueba.

La dimensión axial de la muestra se hace aumentar dejando constante la presión lateral, y haciendo que el vástago ejerza una tracción sobre la muestra.

### **1.2.1.3 PRUEBA LENTA**

Lo principal de esta prueba, los esfuerzos que se aplican a la muestra, son efectivos. Primero se aplica al suelo una presión hidrostática teniendo abierta la válvula de comunicación de la bureta dejando transcurrir cierto tiempo para que haya una consolidación completa. Cuando el equilibrio interior de la muestra es estático, todas las fuerzas exteriores actúan en el suelo y producen esfuerzos efectivos, en tanto que los neutrales en el agua corresponden a la condición hidrostática. A esa muestra se le aplica una carga axial en pequeños incrementos que la presión del agua reduzca a cero.

### **1.2.1.4 PRUEBA RAPIDA CONSOLIDADA.**

Primero se consolida la muestra bajo la presión hidrostática, al igual que la prueba lenta, se hace que esta falle por medio de un incremento de la carga axial de tal modo de que no se permita una variación de volumen, lo importante de esta prueba es de que no permita ninguna consolidación adicional durante el periodo de falla de aplicación de la carga axial.

### **1.2.1.5 PRUEBA RAPIDA.**

Esta prueba no permite ninguna etapa de consolidación, la válvula que se comunica con la muestra y la bureta, esta permanece cerrada impidiendo el drenaje, primero se le aplica a la muestra una presión hidrostática y después se aplica rápidamente la carga axial y hace que falle el suelo.

## 1.2.2 PRUEBA DE CONSOLIDACION.

La prueba de consolidación unidimensional se realiza sobre una muestra labrada en forma de cilindro aplastado. La muestra se coloca en el interior del anillo que es de bronce y que le proporciona un completo confinamiento lateral. El anillo se coloca entre dos piedras porosas, las piedras son de sección circular y de diámetro ligeramente menor que el diámetro interior del anillo.

Se aplican cargas a la muestra, repartiéndolas uniformemente en toda su área con el dispositivo formado por la esfera y la placa colocada sobre la piedra superior, un extensómetro apoyado en el marco de la carga móvil y ligado a la cazuela fija, permite llevar un registro de las deformaciones en el suelo. Las cargas se aplican en incrementos, permitiendo que cada incremento por un período de tiempo suficiente para que la velocidad de deformación se reduzca a cero.

En cada incremento se hacen lecturas en el extensómetro para conocer la deformación en diferentes tiempos.

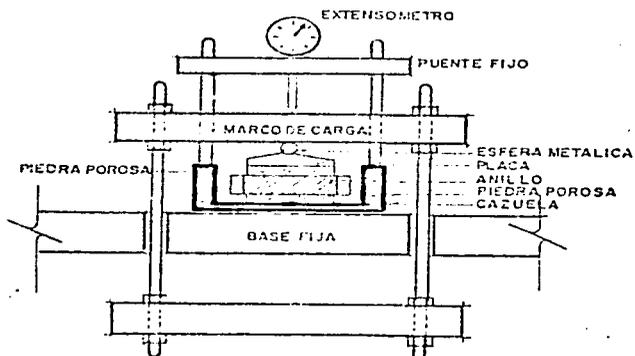


Fig. 1.10 Consolidómetro de anillo flotante.

### 1.2.3 PRUEBA DE CORTE DIRECTO.

La prueba de corte directo es usada para la determinación de la resistencia de los suelos.

El aparato que se utiliza para medir la resistencia del suelo consta de dos marcos uno fijo y otro móvil que contiene la muestra del suelo.

Dos piedras porosas una superior y otra en la parte inferior, proporcionan drenaje libre a la muestra saturada y cuando se desee se sustituye simplemente por placas de confinamiento, lo cual estas se utilizan cuando se ensayan las muestras secas.

La parte móvil tiene un aditamento al cual es posible aplicar una fuerza cortante, que provoca la falla del espécimen a lo largo de un plano sobre la cara superior del conjunto se aplican cargas que proporcionan una presión normal al plano de falla. La deformación de la muestra es medida con extensómetros, tanto en dirección horizontal como vertical.

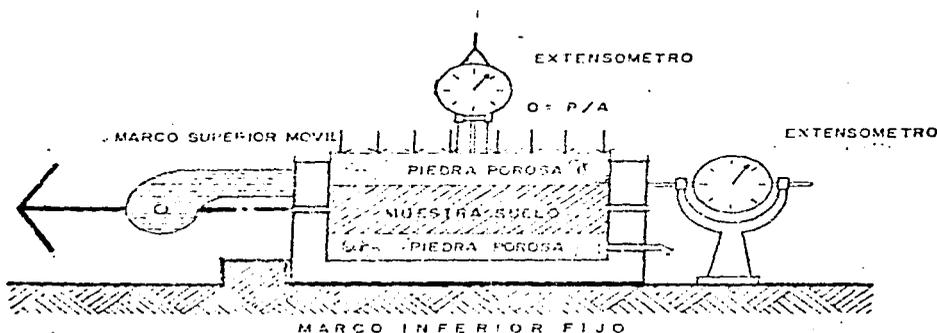


Fig. 1.11. Aparato de Resistencia al esfuerzo cortante.

### **1.2.4 PERMEABILIDAD.**

La permeabilidad de un suelo es la velocidad con la que el agua pasa a través del mismo esto es, cuando esta sujeto a un gradiente hidráulico unitario. La permeabilidad depende de ciertas propiedades físicas del suelo y también de factores tales como los que se enuncian a continuación:

- a) Relación de vacíos del suelo.
- b) Temperatura del agua.
- c) La estructura y estratificación.
- d) La existencia de agujeros y fisuras en el suelo.

### **1.3 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO.**

Las propiedades químicas del suelo interesan más al agricultor que al constructor, pero dependiendo de las características del mismo se puede favorecer o perjudicar el elemento que se vaya a construir.

Se debe de tener un conocimiento acerca de la química del suelo con el fin de poder determinar las relaciones que se generen al mezclarlo con productos que le den un mejor comportamiento mecánico; esta mejoría en las propiedades es de gran utilidad al constructor ya que suelen generar ahorros importantes en una obra.

#### **1.3.1 IDENTIFICACION DE MINERALES.**

La composición química del suelo varía en forma considerable pero los elementos que más abundan son: Sílice, Aluminio, Oxígeno, Hidrógeno, Hierro, Calcio, Magnesio y Potasio.

Cuando el suelo se somete a altas temperaturas (arriba de los 150 grados centígrados) da como producto un mineral compuesto como son: los silicatos, óxidos, carbonatos y sulfatos.

#### **1.3.2 INTERCAMBIO CATIONICO.**

Este intercambio se da por las sustancias ácidas que se encuentran en el suelo y tienen contacto con el agua que liberan iones de hidrógeno de carga eléctrica positiva, lo que ocurre es un intercambio catiónico entre el agua y las películas adsorbidas de las partículas minerales que algunas veces son de reacción rápida, los cationes intercambiables más usuales son: Na, K, Ca, Mg, H y (NH<sub>4</sub>).

La cantidad de átomos de hidrógeno presentes en el suelo indican la acidez de este, a la concentración de cationes de hidrógeno (H) se le llama potencial de hidrogeno (pH).

La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir es mayor el intercambio cuando el pH del suelo es menor, cuando el pH tiene valores entre 0 y 7 son sustancias ácidas y entre 7 y 14 son sustancias básicas.

## REFERENCIAS.

- 1.- Juárez Badillo-Rico Rodríguez "Mecánica de suelos" Tomo 1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos. pág.. 53
- 2.- Juárez Badillo-Rico Rodríguez "Mecánica de suelos" Tomo 1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos. pág.. 250

# **CAPITULO DOS**

## **TIPOS DE ESTABILIZANTES.**

### **GENERALIDADES.**

Es frecuente que el ingeniero no encuentre adecuado el suelo que va a utilizar para un determinado fin ya que existen muchos tipos de suelos en estado natural que no son adecuados para cualquier tipo de construcción, por lo que, dependiendo del tipo de obra a ejecutar, el ingeniero deberá de optar por las siguientes posibilidades:

- Aceptar el material tal como se encuentra, y realizar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por la calidad del material.
- Eliminar el material tal como se encuentra, y sustituirlo por otro de características adecuadas.
- Modificar las propiedades del material existente (permeabilidad, resistencia a la compresión así como otras) para hacerlo capaz de cumplir con mejores requerimientos.

La última alternativa da lugar a lo que se conoce como estabilización de suelos.

Los procedimientos que pueden lograr una mejoría de las propiedades de los suelos, para algún uso específico, es la estabilización mecánica y química.

La estabilización no es solamente una medida correctiva, sino que también es una medida preventiva o de seguridad contra condiciones adversas que pueden desarrollarse durante la construcción o durante la vida de la estructura.

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en los problemas de estabilización son:

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

- 1.- Estabilidad Volumétrica.

La mayoría de los suelos se expanden o se contraen, esto se debe a los cambios de humedad que se pueden presentar en forma rápida acompañando a las variaciones estacionales. Las presiones de expansión se desarrollan debido a un incremento en la humedad que no se puede controlar.

estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje o desestabilizar grandes estructuras. Por lo que es muy importante detectar a los suelos expansivos, su comportamiento y que tipo de tratamiento es más adecuado para evitar dichas presiones.

## 2.- Resistencia.

La resistencia de los suelos, salvo en algunas excepciones, es baja cuando tienen un alto contenido de agua y de materia orgánica, tal como se puede apreciar en la tabla 2.1; el aumento de la resistencia de este tipo de suelos se logra generalmente añadiendo cemento o cal .

Tipo de suelo	Prof. m	Contenido de materia orgánica %	Resistencia a la compresión simple.		
			sin estabilizar	10% de cemento	10% de cal
Tierra vegetal	0.45	2.65	3.80	15.50	4.90
Tierra vegetal	1.60	0.22	3.80	36.00	47.00
Arcilla orgánica	0.10	13.60	1.05	1.83	2.25
Arcilla orgánica	0.60	2.50	6.30	20.00	1.83
Arcilla orgánica	0.10	11.60	3.15	7.00	5.60
Arcilla orgánica	0.45	2.00	5.00	20.00	16.20
Arcilla orgánica	0.10	10.30	3.90	4.20	4.90
Arcilla orgánica	0.80	2.10	5.00	41.00	26.80
Tierra superficial	0.10	3.10	3.90	30.00	11.20
Tierra superficial	0.45	1.10	5.00	42.00	22.50

Tabla 2.1 Efectos de la materia orgánica.

Algunas de las formas de estabilización más usuales para elevar la resistencia son las siguientes:

- Compactación.
- Vibroflotación
- Precarga.
- Drenaje.
- Estabilización con mezclas de otros suelos.
- Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos.

### 3.- Permeabilidad.

En los suelos la permeabilidad se plantea por medio de dos problemas básicos, que son la disipación de las presiones de poro y el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en terracerías y el flujo del agua puede originar tubificaciones o arrastres.

La permeabilidad no es muy difícil de modificar por medio de la compactación o inyección, en materiales arcillosos el uso de flocculantes (polifosfatos) pueden sellar perfectamente a un suelo y el uso del hidróxido de cal o yeso reduce la permeabilidad.

Hoy en día existen emulsiones y aditivos líquidos que al introducirlos en el suelo se adhieren a las paredes de los conductos capilares haciendo que el suelo sea parcialmente hidrofóbico, pero hay que tener en cuenta que este tipo de productos hacen que reduzca la cohesión del suelo parcial o totalmente.

Los métodos de estabilización para modificar la permeabilidad de un suelo, no necesariamente mejoraran su estabilidad volumétrica o resistencia mecánica y en algunos casos pueden inclusive resultar contraproducentes en estos aspectos.

### 4.- Compresibilidad.

Como se dijo anteriormente en el capítulo uno, la compresibilidad es el proceso por el cual el suelo disminuye su volumen manteniendo su forma, esto depende de las cargas o fuerzas que están actuando sobre el suelo esto puede ser una estructura, este fenómeno está relacionado con las propiedades físico-químicas y estructura del suelo.

### 5.- Durabilidad.

La durabilidad es la resistencia que tiene un material a los procesos de intemperismo, erosión y abrasión.

Si se hace una mala elección del agente estabilizante puede afectar la durabilidad del suelo.

La durabilidad es uno de los aspectos más difíciles de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobre diseñar, lo cual no es correcto.

## **2.1 ESTABILIZACION POR MEDIOS MECANICOS.**

Los métodos fundamentales para la estabilización mecánica son: La compactación y la mezcla suelo-suelo.

### **2.1.1 COMPACTACION.**

Se le llama compactación al proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y el esfuerzo de deformación del suelo mediante la reducción de vacíos por la expulsión del aire y el agua que esta contenida en el suelo.

El objetivo principal de la compactación es obtener un suelo de tal manera que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra. Las propiedades varían de caso en caso, pero la resistencia, compresibilidad, y una adecuada relación de esfuerzo de deformación figuran entre aquellas cuyo mejoramiento se busca siempre, es menos frecuente aunque a veces no menos importante que también se compacte para obtener características idóneas de permeabilidad y flexibilidad.

La técnica de compactación se lleva a cabo en cortinas de tierra, diques, terraplenes, caminos de ferrocarril, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc.

Los métodos de compactación dependen del tipo de material con el que se va a trabajar, los materiales como la arena se compactan por métodos vibratorios, mientras que los suelos plásticos se compactan por procedimientos de carga estática. Los equipos para realizar este tipo de trabajo son: plataformas vibratorias, rodillos lisos, rodillos neumáticos, y rodillos pata de cabra.

Los factores que influyen en la compactación son la energía específica y la cantidad de agua a emplearse. Se entiende por energía específica a la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen.

Los rodillos pata de cabra compactan el suelo de abajo hacia arriba ejerciendo un efecto de amasado en el mismo; mientras que los rodillos y los equipos vibratorios compactan el suelo de la superficie hacia abajo ejerciendo presiones sobre el suelo de 10 a 40 kg/cm<sup>2</sup> dependiendo del equipo a utilizar.

### **2.1.2 MEZCLA SUELO-SUELO.**

La estabilización por mezcla suelo-suelo se remonta a la segunda década de este siglo, este proceso se realizó en los EE.UU.

Este proceso de mejoramiento de suelos consiste en mezclar dos o más suelos naturales, para mejorar con ellos determinadas propiedades deseables de acuerdo con el tipo de construcción que se desee realizar.

La propiedad más importante de un suelo es la resistencia, en el que la distribución **granulométrica** es uno de los factores más importantes. La resistencia del suelo se ve entonces **influenciada por el proporcionamiento de los agregados gruesos y finos**, un ejemplo de esto se puede ver en la fig. siguiente.

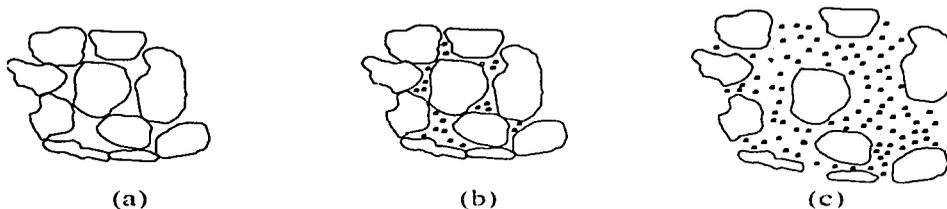


Fig. 2.1 Estado Físico de agregados mixtos.

Un suelo como se puede apreciar en la figura 2.1a que contiene pocos o ningún fino y que presenta una buena sucesión de tamaños, además de que obtiene una estabilidad gracias a un contacto directo entre las partículas. Este suelo es permeable y no es susceptible a la acción de las heladas. El suelo de la figura 2.1b que contienen los finos suficientes para llenar los vacíos entre las partículas gruesas obtendrá su resistencia del contacto directo de las partículas, con la presencia de finos hará que obtenga una buena distribución de esfuerzos en comparación con un suelo sin finos; el peso volumétrico es alto, su permeabilidad es baja y puede ser susceptible a la acción de las heladas, este material presenta problemas de compactación, pero desde el punto de vista de la estabilidad es ideal por que tiene una alta resistencia al esfuerzo cortante.

El suelo de la figura 2.1c que contiene una gran cantidad de finos, la transmisión de esfuerzos no se efectúa a través del contacto entre las partículas gruesas, ya que estas están prácticamente flotando en el suelo fino, por lo que en su comportamiento general del suelo corresponderá al de las partículas finas, el peso volumétrico de este suelo es generalmente bajo, es impermeable y es susceptible a la acción de las heladas. La estabilidad de este suelo se ve afectada por los cambios de humedad.

Cuando el peso volumétrico y el Valor Relativo de Soporte resultan mayores, es por que la granulometría es más gruesa, y el contenido de finos decrece, esto significa que si el material es más grueso, el contenido de finos es menor, pero si se incrementa éste partiendo de contenidos bajos, se incrementa el peso volumétrico y el Valor Relativo de Soporte, y si se sigue aumentando el contenido de finos se alcanzan condiciones óptimas, a partir de las cuales un incremento adicional provocaría una disminución del Valor Relativo de Soporte.

En la práctica los agregados no se acomodan perfectamente ya que tiende a formar enhuacalamientos, es por eso que es necesario realizar un ajuste en la granulometría, el cual consiste en incrementar el contenido de finos, para lograr un máximo peso volumétrico. Pero debe tenerse en cuenta la dosificación de acuerdo con la resistencia mecánica del suelo.

La presencia de finos puede admitirse en bajos porcentajes debido a que puede producir saturamiento del material, lubricación o expansión o lo que es más grave reducciones importantes en la resistencia, razones por lo que deberá evitarse la inclusión de suelos de alta plasticidad.

El problema de la mezcla suelo-suelo se plantea a partir de dos propiedades a mejorar, primero la granulometría de la fracción gruesa, y segundo la plasticidad de la fracción fina, estos dos aspectos se toman en cuenta para el diseño de una estabilización, pero es responsabilidad del proyectista verificar mediante pruebas de laboratorio; que la calidad del suelo diseñado con base en la granulometría y la plasticidad, sea requerida para los fines que se deseen, sobre todo en lo concerniente a la resistencia del suelo..

## **2.2 ESTABILIZACION POR MEDIOS QUIMICOS.**

Las estabilizaciones más utilizadas en la practica son el empleo de cemento portland, asfalto y cal, los cual al añadirsele al suelo, provocan reacciones químicas que hacen que se modifiquen satisfactoriamente las propiedades de resistencia y deformación.

### **2.2.1 ESTABILIZACION CON CEMENTO PORTLAND.**

La estabilización con cemento portland empezó a utilizarse en 1917 cuando Amies patento el primer procedimiento de mejoramiento de suelos a base de proporciones variables de cemento portland. El suelo-cemento es un material producto de la mezcla de suelo con cemento y agua en proporciones adecuadas, con el fin de mejorar las propiedades del suelo en estado natural, aumentando su resistencia mecánica y disminuyendo su susceptibilidad a la erosión. Este material se puede utilizar en la construcción de bases, subbases, acotamiento, taludes de pavimentos para caminos y calles, en cortinas, diques y vasos de presas, en elementos estructurales, etc.

El contacto de cemento y agua forman el hidrato de calcio, si el suelo con materia orgánica al ser mezclado con el cemento produce ácidos orgánicos que liberan iones de calcio con gran rapidez, dificultan la acción aglutinante del cemento. Las especificaciones de la mezcla suelo-cemento recomiendan que el contenido de materia orgánica no exceda 1-2% en peso , pero lo más conveniente no debe de tener materia orgánica..

La presencia de sulfatos de calcio, magnesio y otras sustancias, es nociva para la estabilidad del suelo, ya que impide que los aglomerantes realicen su función.

El primer efecto de la mezcla en la hidratación del cemento es la producción de aluminatos y de silicatos, hidratos de calcio, hidróxido de calcio e iones de calcio, que elevan la concentración de electrolitos del agua, aumentando el pH . El segundo efecto que produce la mezcla se divide en dos fases que son: Primero un intercambio de calcio con otros que son adsorbidos por ellos ya

que presentan una liga de cationes que contribuye en la formación de cementantes que realizan reacciones de carbonatación que se llevan a cabo en las superficies expuestas al aire e involucra la transformación de la cal a carbonato de calcio debido a la adsorción de bióxido de carbono y puzolanas, esto se define en los minerales silíceos o aluminosos finamente divididos y que en presencia de humedad reaccionan con el hidróxido de calcio para formar compuestos con propiedades cementantes.

En lo que se refiere al tipo de arcillas, las montmoriloníticas son más reactivas con el cemento, después le siguen las ilitas y las caolinitas.

Las arcillas que son muy plásticas, han sido tratadas con cemento teniendo resultados exitosos; después de un tratamiento de 2-3% en peso con cemento o cal hidratada se logra una muy buena trabajabilidad, abatiendo la plasticidad de las arcillas.

En la siguiente tabla se puede ver la variación de propiedades estáticas y dinámicas para las arenas y arcillas tratadas con diferentes porcentajes de cemento.

<b>Suelo</b>	<b>Contenido de cemento</b>	<b>Modulo de elasticidad</b>	<b>Modulo dinámico de resistencia al esfuerzo cortante</b>
	<b>%</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Arena</b>	<b>0</b>	<b>45</b>	<b>950</b>
	<b>2</b>	<b>144</b>	<b>1930</b>
	<b>4</b>	<b>165</b>	<b>2700</b>
	<b>6</b>	<b>480</b>	<b>4750</b>
<b>Arcilla</b>	<b>0</b>	<b>55</b>	<b>1260</b>
	<b>2</b>	<b>56</b>	<b>1300</b>
	<b>4</b>	<b>150</b>	<b>1830</b>
	<b>6</b>	<b>600</b>	<b>4900</b>

Tabla 2.2 Efecto del contenido de cemento en la propiedades estáticas y dinámicas de las arcillas y arenas.

Todos los tipos de cemento sirven para la estabilización de suelos y los que más se utilizan son los de fraguado y resistencias normales.

La mezcla suelo-cemento mejora el comportamiento mecánico del suelo, disminuyendo la porosidad y la plasticidad y aumentando la resistencia y la durabilidad.

En la siguiente gráfica se muestra la variación de la resistencia a la compresión simple de la mezcla suelo-cemento utilizando diferentes tipos de suelo.

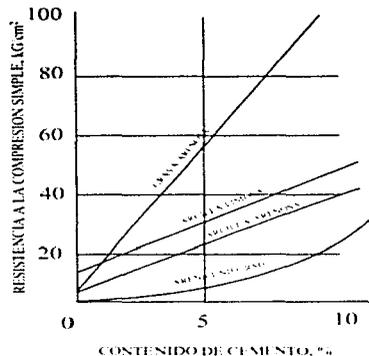


Fig. 2.2 Resistencia a la compresión.

En lo que se refiere a la utilización del agua en la mezcla de suelo-cemento no existe requisito alguno, pero se debe eliminar el agua que contenga una alta cantidad de sulfatos materia orgánica o cantidades excesivas de otras sales. La cantidad de agua depende de los requisitos de la compactación.

El tiempo de curado en obra para el tratamiento de la mezcla suelo-cemento es generalmente de un día como máximo, de lo contrario el proceso constructivo sería muy lento y muy costoso.

El contenido de cemento y el tiempo de vida de la mezcla suelo-cemento son factores que hacen crecer la resistencia a la tensión al igual que la resistencia a la compresión simple, un ejemplo de esto se puede observar en la siguiente gráfica.

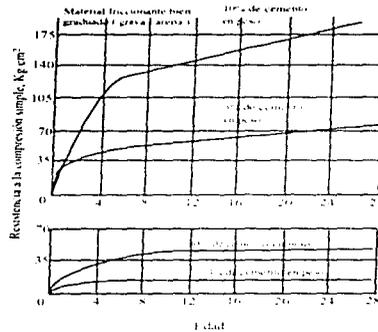


Fig. 2.3 Influencia del tiempo en la mezclas en la resistencia a la compresión simple.

Entre más homogénea sea la mezcla de suelo-cemento tendrá mayor resistencia, el tiempo de mezclado es un factor muy importante, ya que el mezclado íntimo, la homogeneidad y el tiempo de curado hacen que crezca la resistencia del material.

En la mezcla de suelo-cemento el criterio que se utiliza para su diseño es el de la Portland Cement Association (PCA), que además de combinarse con la experiencia y la economía

Los tres aspectos fundamentales para la mezcla suelo-cemento son:

- La cantidad necesaria de cemento para darle al suelo las características deseadas.
- El grado de compactación al cual deberá llevarse la mezcla, dependiendo del tipo de obra a construirse, ya sea en caminos, diques, muros de retención, etc.
- La cantidad de agua.

Existen muchos equipos para el tendido y mezclado del suelo-cemento.

En el caso de la mezcla en el lugar hay equipos que en forma automática recogen el material acamellonado (suelo con cemento) se mezcla en seco y se humedece mediante aspersores, se vuelve a mezclar y finalmente se depositan. Existen otros equipos que contienen sistemas múltiples de mezclado e incluso se cuenta con dispositivos de pulverización.

En esta etapa de mezclado se puede utilizar desde el arado de disco hasta plantas sofisticadas, esto depende de las necesidades de la obra, del tipo de suelo calidad deseada y factores económicos.

Para realizar la compactación de suelo-cemento a partir de la etapa final del mezclado hasta el inicio de la compactación no debe transcurrir un período no mayor de 30 minutos.

El rodillo pata de cabra resulta adecuado en el caso de suelos finos y generalmente se utiliza para lastrarlos para lograr una mayor eficiencia.

Se recomienda no compactar capas con espesores mayores de los 15 cm.

Los rodillos vibratorios se recomiendan para la compactación de materiales triturado o granulares. también se pueden utilizar los rodillos neumáticos. este tipo de rodillos se utilizan para mezclas de grava con arena y cemento o bien mezclas de arena con cemento y pocos finos.

Los rodillos lisos se utilizan para la compactación final, por proporcionan un buen acabado a la superficie del suelo, los rodillos que se emplean son de 6 ton.

Cualquiera que sea el rodillo es indispensable para la compactación, ésta no debe de transcurrir de un período mayor de dos horas. Si se prevé un tiempo mayor deberá de estudiarse en el laboratorio el empleo de retardadores.

Después de terminada la etapa de acabado se debe evitar que se evapore el agua necesaria para el fraguado, para lo cual se puede utilizar sobre la superficie un riego de producto asfáltico o bien utilizar riegos sucesivos de agua.

### **2.2.2 ESTABILIZACION CON CAL.**

La estabilización con cal empezó a utilizarse en la antigua Roma y en China, pero desde hace treinta años se empezaron hacer estudios de los mecanismos que causan la estabilización en forma.

Las técnicas de estabilización con cal son muy similares a las del cemento, con dos diferencias: primero, la cal tiene más aceptación en materiales arcillosos, y segundo la cal se utiliza sin satisfacer necesariamente todos los requisitos de una estabilización definitiva como la del cemento.

Cuando se realiza la estabilización con cal se realizan dos tipos de reacciones químicas: la primera consiste en una muy buena captación de iones de calcio por parte de partículas de suelo; la segunda reacción es la cementante, por la interrelación existente entre los iones de calcio de la cal y los componentes aluminicos y silicosos de los suelos; esta reacción depende del tipo de suelo que interviene en la estabilización con cal .

La cal que se utiliza en la estabilización es la hidratada; los estudios que se han realizado con respecto a la estabilización con cal indican que los carbonatos de calcio no tienen ningún efecto de estabilización. La cal viva se utiliza para pretratamiento de suelos húmedos.

La cal esta constituida por silicatos de calcio que se reproducen por la acción química de la misma sobre los materiales de arcilla, los cuales forman compuestos cementantes.

La mezcla de cal, como pretratamiento estabilizador para la mezcla de suelo-cemento se usa frecuentemente en suelos arcillosos plásticos, haciendo el material más trabajable y fácil de compactar.

Con respecto a la plasticidad, la cal disminuye el índice de plasticidad de los suelos que son muy plásticos, la cal tiene poco efecto con suelos de media plasticidad, ya que puede aumentar el índice plástico en los suelos finos que tienen poca plasticidad.

La cal tiene poco efecto en suelos muy orgánicos y suelos sin arcilla. Los suelos que contienen arcilla al mezclarse con la cal, adquieren mayor resistencia a la compresión simple, tal como se puede observar en la siguiente gráfica.

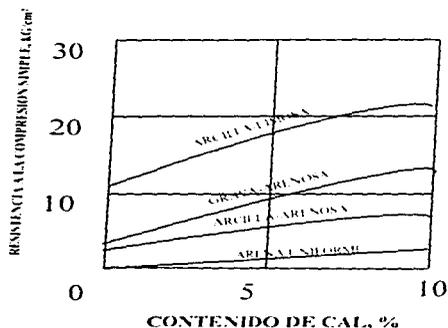


Fig. 2.4 Resistencia a la compresión simple de varios tipos de suelos estabilizados con cal hidratada a la edad de siete días.

También la resistencia depende de la edad de la mezcla suelo-cal, la cual se puede ver en la siguiente gráfica.

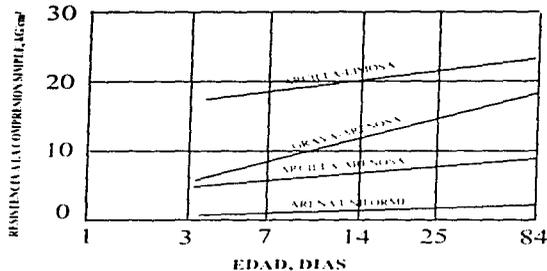


Fig. 2.5 Efecto de la edad de una mezcla de 5% de cal, en peso en diversos tipos de suelo.

Dependiendo del tipo de arcilla que se mezcla con la cal se producen diferentes reacciones, como por ejemplo:

- La arcilla Barremina, que esta formada principalmente por caolinitas, presentan alta resistencia a la compresión simple. Las mediciones de la resistencia efectuadas sobre las caolinitas muestran fuertes incrementos a edades entre 0-7 días con el 5% de cal en peso tal como se vieron en la gráficas anteriores.
- Las montmorillonitas son reactivas con la cal, ya que forman aluminatos, con una acción cementante parecida a la de las caolinitas.
- Las ilitas reaccionan difícilmente con la cal.

Los efectos que se obtienen con la mezcla suelo-cal son los siguientes:

- Reduce el índice plástico.
- Se acelera la disgregación de los grumos de arcilla.
- Reduce los efectos aglomerantes.
- En los suelos que tienen humedades superiores a la óptima, el disgregado y la adición de cal propician un secado rápido.
- Se reducen las contracciones y las expansiones.
- Aumenta la resistencia a la compresión, lo que a su vez aumenta el V.R.S.

El procedimiento constructivo de la mezcla suelo-cal es similar a la del suelo-cemento.

### **2.2.3 ESTABILIZACION CON ASFALTOS.**

El mejoramiento de las propiedades del suelo con productos asfálticos logran una muy buena estabilización , además de que es económica.

Los productos que son más usados para una estabilización son las emulsiones y los asfaltos rebajados, los asfaltos rebajados los que más se han utilizado son los de fraguado medio y lento, los cuales están condicionados a desaparecer por ser muy contaminantes y caros.

Al igual que en las estabilizaciones anteriores el suelo que se va a estabilizar no debe de contener materia orgánica, ya que aunque los asfaltos son resistentes a ciertos ácidos, pueden ser atacados por otros agentes, tales como las bacterias y la materia orgánica.

El asfalto es un material pegajoso, resistente a los ácidos, álcalis y sales, y al ser mezclado con el suelo proporcionan impermeabilidad y durabilidad.

Todos los tipos de suelos se pueden mezclar con el asfalto, incluyendo a las arcillas compresibles y activas, pero se sabe que los mejores resultados se obtienen cuando son mezclados con suelos gruesos, ya que cubre a las partículas y funciona como cementante e impermeabilizante.

Los efectos que produce una estabilización con asfalto, son dos: Primero, una ligadura entre las partículas (cohesión), y Segundo, protección contra la acción del agua. Se dice que el primer efecto es importante para suelos granulares y el segundo para suelos cohesivos.

Algunas veces se ha encontrado que el suelo no tiene afinidad con el asfalto, entonces lo que se hace es utilizar aditivos, ya que cambian las características eléctricas de la superficie de las partículas.

Los suelos que no requieren aditivos, en general son los que contienen cantidades excesivas de carbonatos y óxidos, los que requieren aditivos son los suelos que contienen sílice (Riolitas y Granitos).

En estabilizaciones con emulsiones asfálticas el contenido de agua es muy importante para la mezcla y la compactación, ya que el agua facilita la homogeneización e influye en forma decisiva en los pesos volumétricos. En este tipo de estabilización se ha encontrado que existe una relación muy estrecha entre el peso volumétrico, la estabilidad y la resistencia del suelo.

En estudios realizados en suelos estabilizados con asfaltos se ha comprobado que la mezcla tiene un comportamiento elástico - plástico, ya que cuando se aplican cargas, estas producen deformaciones permanentes por el desplazamiento de partículas que cambian de orientación.

La mezcla bajo carga constante puede comportarse elástica e inelásticamente. La deformación elástica es recuperable y esto se debe a la respuesta en el comportamiento de la estructura formado por el suelo y el asfalto endurecido; el inelástico se debe a la destrucción de la cohesión entre las partículas del suelos y de la película asfáltica.

En la siguiente gráfica se puede observar que la resistencia de la mezcla a la compresión simple, permanece constante al incrementarse el contenido de asfalto, así también se puede observar que cuando la mezcla es rehumedecida, la resistencia aumenta con el aumento de asfalto.

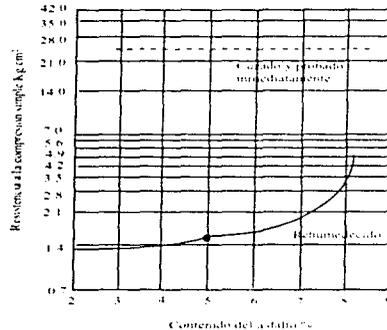


Fig. 2.6 Efecto del contenido de asfalto en la resistencia a la compresión simple.

## 2.2.4 ESTABILIZACION CON SALES.

" Los estabilizantes químicos pueden ser de naturaleza orgánica e inorgánica ; los estabilizantes inorgánicos a su vez se dividen en estabilizantes de tipo ácido, de tipo neutral, y de tipo alcalino. Los del tipo neutral alteran las propiedades físicas del suelo, como el peso volumétrico".

Las sales que más se usan para la estabilización de suelos son: el cloruro de sodio y el cloruro de calcio, estas sales se han usado en carreteras durante cuarenta años.

### 2.2.4.1 ESTABILIZACION CON CLORURO DE SODIO.

El cloruro de sodio se ha usado frecuentemente como estabilizante, pero no es durable, se puede mezclar con cualquier tipo de suelo, pero es menos efectivo en los suelos que contienen materia orgánica.

Cuando se realiza esta se produce un intercambio iónico, cuando el suelo contiene pequeñas cantidades de materia orgánica también se realiza un intercambio catiónico que es más alto, comparado con el de las arcillas. Se ha encontrado que los cationes orgánicos tienden a

reemplazar a los cationes inorgánicos presentes en la superficie de las partículas arcillosas y producen un efecto reductor de la capacidad de intercambio en la arcilla.

El cloruro de sodio actúa como floculante y ayuda a la compactación reduciendo la humedad. También hace que disminuya la permeabilidad cuando el límite líquido es alto, ya que disminuye la contracción volumétrica. Esto se explica porque la humedad mantiene unidas a las partículas no arcillosas, incrementa la resistencia del suelo y reduce el problema de congelamiento.

Una de las desventajas del cloruro de sodio es que es muy soluble y por lo tanto fácilmente lavable disminuyendo su durabilidad.

#### **2.2.4.2 ESTABILIZACION CON CLORURO DE CALCIO.**

La estabilización con cloruro de calcio es similar a la del cloruro de sodio.

El cloruro de calcio mantiene constante la humedad del suelo, reduce la evaporación y disminuye la permeabilidad; lamentablemente es muy lavable y ayuda muy poco cuando se realiza la compactación. El cloruro de calcio (yeso) se utiliza como aditivo de suelo-cemento ya que acelera el fraguado.

#### **2.2.4.3 ESTABILIZACION CON SILICATOS DE SODIO.**

La estabilización con silicatos de sodio se ha utilizado desde 1945 en suelos arenosos en climas moderados; a veces se utiliza solo y otras se utiliza con otros productos químicos.

Se ha usado como estabilizante debido a que contiene sales de calcio, diluidas en agua, y origina silicatos gelatinosos, los cuales, al tener contacto con el agua producen un cementante. Los efectos del silicato de calcio son:

- Aumenta la permanencia del agua en la compactación.
- Aumenta la resistencia al disgregado.
- Abate el índice plástico y de expansión.

La reacción que origina con el suelo es la de formar coraza de silicatos insolubles alrededor de las partículas del suelo lo que a su vez produce una ligadura muy fuerte entre las partículas del suelo.

Los suelos arenosos que se estabilizan con silicatos de sodio resisten la abrasión.

#### **2.2.4.4 ESTABILIZACION CON HIDROXIDO DE SODIO (SOSA CAUSTICA).**

De la estabilización con sosa se tiene poco conocimiento, esto se debe a que se ha utilizado muy poco y solo en suelos lateríticos con resultados favorables. Las desventajas de la sosa cáustica

son: que es muy costosa, muy peligrosa por su causticidad y se carbonata muy rápido en contacto aire.

La sosa se aplica con facilidad en suelos lateríticos.

En la siguiente gráfica se puede observar que la resistencia a la compresión simple, se va incrementando conforme pasa el tiempo.

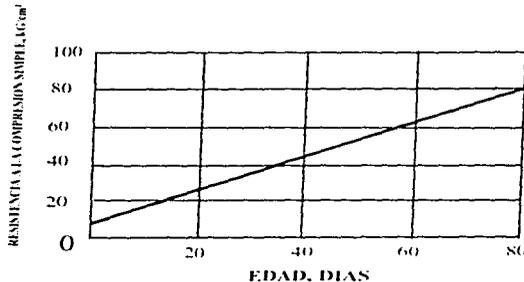


Fig. 2.7 Evolución de la resistencia de un caolín estabilizado con el 10% en peso de sosa cáustica.

### 2.2.5 ESTABILIZACION CON RESINAS Y POLIMEROS.

"Los polímeros son cadenas largas de moléculas formadas por la unión de componentes orgánicos llamados monómeros. Los polímeros se encuentran en la naturaleza en forma de resinas",<sub>3</sub>

El suelo al estabilizarse con resinas y polímeros forma una estructura impermeable.

Existen resinas que aumentan la resistencia mecánica del suelo mejorando la cohesión de este, estas resinas son naturales y se mencionan a continuación:

- La anilina es un líquido que se obtiene del alquitrán de Hulla y el Furfural; es de origen orgánico y se obtiene de la refinación de los derivados del maíz; con esta resina se puede **estabilizar** la arena suelta en forma rápida debido a que la resina se endurece en forma lenta hasta **alcanzar** su solidificación.

**Como esta resina es de origen natural** (componentes orgánicos) tienen la desventaja de que es **vulnerable a las bacterias** y limita su vida útil.

Las resinas contienen el ión cromo, que sirve como agente de refuerzo y ayuda a ligar a las partículas del suelo arcilloso y a su vez aumenta la resistencia.

Existen tres tipos de polímeros con los cuales se puede estabilizar el suelo:

- Los polímeros catiónicos.

Estos polímeros tienen carga positiva y crean nexos muy fuertes con las partículas de la arcilla y de arena que tienen una carga negativa, con esto permiten mejorar la resistencia al esfuerzo cortante.

Al compactarse el suelo con polímeros se debe tener cuidado ya que la resistencia se puede ver afectada por la energía de compactación, al romperse la estructura que se acaba de ligar; además se obtienen pesos volumétricos muy bajos.

Una de las desventajas de estos polímeros es el alto costo y el difícil mezclado.

- Polímeros Aniónicos.

Los más importantes son los sulfatos y lignosulfatos.

La carga de estos grupos es igual a la que existe en la superficie de los minerales de arcilla, se reduce la resistencia al esfuerzo cortante y favorece a la compactación; se utilizan más como agentes de compactación que como estabilizantes.

- Polímeros no iónicos.

Los polímeros más representativos de este tipo son:

- El alcohol polivinílico.
- Celulosa carbometilica.

A estos se deben los efectos al esfuerzo de las ligaduras hidroxílicas que se forman con grupos OH entre las cadenas de polímeros y las superficies oxigenadas de los minerales de arcilla.

## **Referencias.**

- 1.- Fdz Loaiza Carlos. " Mejoramiento y estabilización de suelos" Ed. Limusa pag. 73
- 2.- Rico Alfonso y Castillo del Hermilo La Ingeniería en Las Vías Terrestre tomo 2 pag. 544
- 3.- Rico Alfonso y Castillo del Hermilo La Ingeniería en Las Vías Terrestre tomo 2 pag. 546

# **CAPITULO TRES.**

## **PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA SUELO-CEMENTO.**

### **GENERALIDADES.**

El suelo-cemento es un material producto de la mezcla suelo, cemento y agua, esta mezcla tiene como objetivo mejorar las propiedades del suelo desde el punto de vista mecánico, aumentando la resistencia y disminuyendo la susceptibilidad a la erosión repercutiendo ambos en la economía. Este último punto es muy importante ya que se ha encontrado que con el empleo de algún aditivo, la mezcla de suelo-cemento puede mejorar las propiedades del suelo estabilizado.

La técnica de la mezcla suelo-cemento involucra una buena disgregación del suelo, adición del cemento en seco y la adición del agua necesaria para la compactación.

### **3.1 CEMENTO PORTLAND.**

El cemento es un material pulverizado de color gris compuesto de minerales cristalinos artificiales, siendo los más importantes los silicatos de calcio y aluminio, estos materiales al reaccionar con el agua producen propiedades semejantes a las de las rocas, una vez que se haya endurecido la mezcla de cemento y agua.

"El cemento es un material básico de la estabilización del suelo, el proporcionamiento del cemento comprende el 10% en peso de la mezcla seca. Se puede utilizar cualquier tipo de cemento siempre y cuando cumpla con las especificaciones ASTM C150, C175 ó C205 el cemento que más se utiliza es el cemento tipo I".

Para determinar la proporción óptima de cemento es importante que el ingeniero tome en cuenta los factores que más influyen en el suelo para su estabilización, como son la materia orgánica, la acidez del suelo, tipo de cemento y la granulometría del suelo.

Es muy importante que el ingeniero se base en un estudio del suelo que se vaya a estabilizar, estos estudios deben de ser realizados por un químico o un técnico que proporcione una idea de la posible respuesta del suelo a la estabilización. El estudio que se realiza de esta es muy importante, ya que se puede ahorrar muchos esfuerzos, dinero y tiempo.

Después de que se hacen los estudios pertinentes, se procede a la ejecución de pruebas de tipo geotécnico, las cuales son sencillas tales como las pruebas de compresión simple, intemperismo, desgaste, etc.

Anteriormente cuando se realizaban un proyecto de estabilización los porcentajes de cemento se fijaban con base al empirismo y a la experiencia.

En la actualidad se cuenta con varios procedimientos para la ejecución de pruebas de laboratorio siendo las más empleadas las propuestas por la PCA (Portland Cement Association), ASTM (American Association of State Highway and Materials) y la AASHTO ( American Association of State Highway Transportation Officials).

El método de la PCA se sintetiza en la siguiente figura. De acuerdo con ella es necesario estimar la importancia relativa de la obra, en lo que intervendrá el suelo con cemento y con base a ello seleccionar los métodos de muestreo, preparación y clasificación de los suelos y después se elige el tipo de pruebas para determinar la proporción de cemento más adecuada a continuación se explican cuatro procedimientos como se indica en la fig.

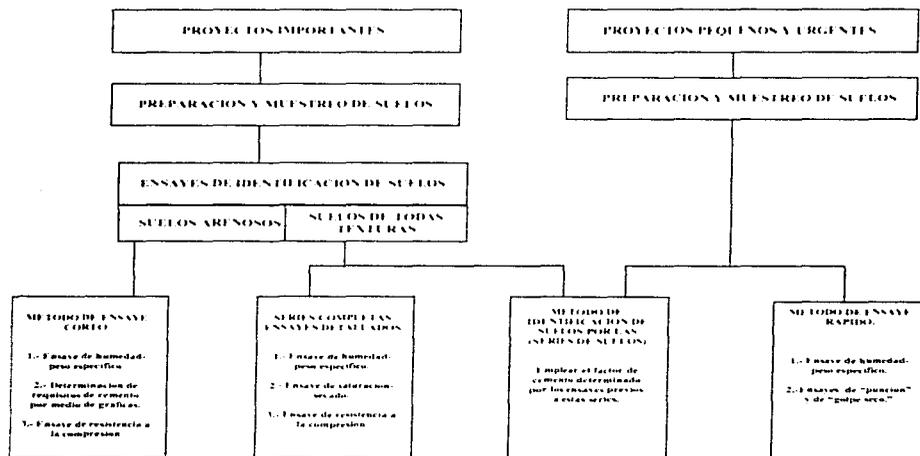


Fig. 3.1 Métodos a seguir de acuerdo con la PCA.

Existe un método llamado "corto" que determina el contenido de cemento adecuado para suelos arenosos. Este método se basa en la granulometría, compactación y resistencia a la compresión simple a la edad de siete días.

Este método se divide en dos, a continuación se verá el método "A" que consiste en determinar la granulometría y peso volumétrico seco máximo próctor estándar del suelo en estudio, ya obtenidos los resultados y con la ayuda de la siguiente tabla se estima el porcentaje de cemento que se va a añadir al suelo.

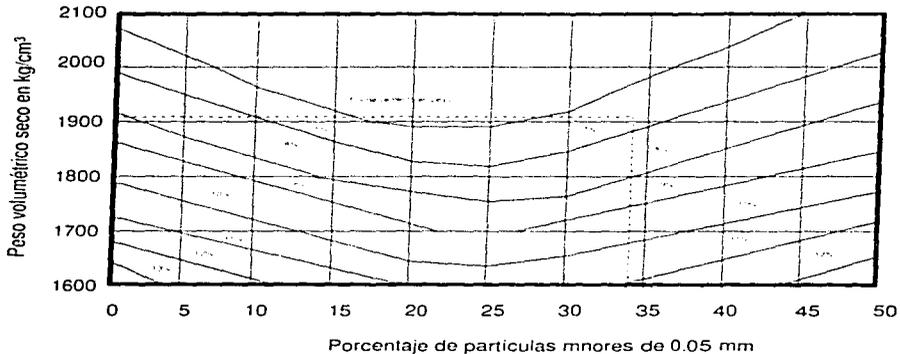


Fig. 3.2 Proporciones de cemento requeridos para estabilizaciones de suelos que no contienen partículas retenidas en la malla No. 4

Para la determinación del contenido adecuado de cemento se recomienda la elaboración de tres especímenes que se compactan al 100% próctor estándar y con la humedad óptima. Los especímenes reposan durante siete días y después se procede a determinar su resistencia a compresión simple, la cual debe de ser mayor a la obtenida en la figura siguiente y si la resistencia obtenida es menor a la indicada por la tabla anterior se recomienda hacer pruebas más detalladas de humedecimiento y secado, congelamiento y deshielo.

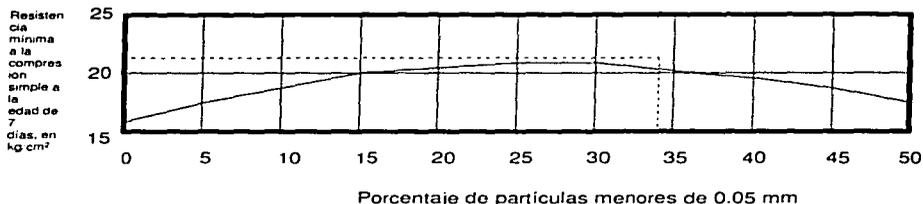


Fig. 3.3 Resistencia mínima a la compresión simple a la edad de siete días, requerida por las mezclas de suelo con cemento que no contengan partículas retenidas en la malla No.4.

En el método "B" al igual que el anterior se determina la granulometría y peso volumétrico seco máximo próctor estándar del suelo en estudio. Con los datos que se obtuvieron se procede a entrar con la siguiente gráfica 3.4. Después la determinación del contenido de cemento del cual se deberá emplearse en peso para la elaboración de tres especímenes compactados al 100% próctor estándar y con la húmeda óptima los especímenes se someten a siete días de curado en humedad, después de esto se prueban a compresión simple, mayor a la mínima estimada en la fig. 3.5. Si las resistencias son menores, se recomienda la ejecución de pruebas de ciclos de congelamiento y deshielo o humedecimiento y secado.

El método que se conoce como detallado, primero requiere determinar el peso volumétrico seco máximo próctor estándar y la humedad óptima en especímenes con diferentes contenidos de cemento, después de cierto tiempo de curado los especímenes son sometidos a ciclos de congelamiento-deshielo, humedecimiento-secado y resistencia a la compresión simple.

En la prueba de compresión simple es muy importante que se determine la variación de la resistencia con la edad, los períodos de curado que se emplean son de 2.7 y 28 días. "La velocidad de la carga de aplicación es de 1.4 kg/cm<sup>2</sup> por segundo".

**El método rápido** se ha utilizado con éxito para construcciones de emergencia y para proyectos pequeños. Primero se compacta el espécimen con la humedad óptima prueba próctor estándar y con un contenido de cemento entre 8-20% en peso. Después de dos días de curado se inspecciona los especímenes picándolos con un punzón o pica hielo y posteriormente golpeándolos sobre una superficie rígida. Si el pica hielo no penetra más de 0.6 cm. y si al golpearlo se produce un sonido claro y sólido, se considera que el contenido de cemento es adecuado

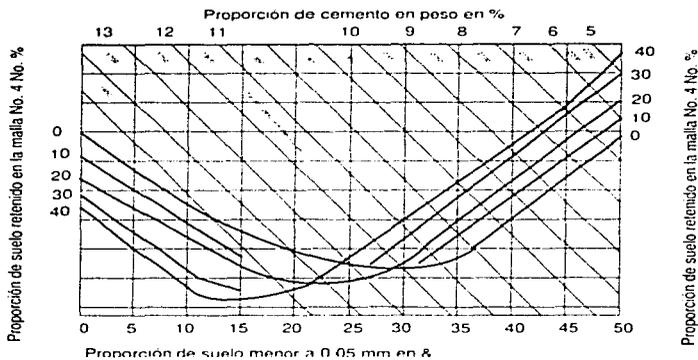


fig. 3.4 Contenidos de cemento indicados para las mezclas de suelo-cemento que contienen material retenido en la malla No. 4

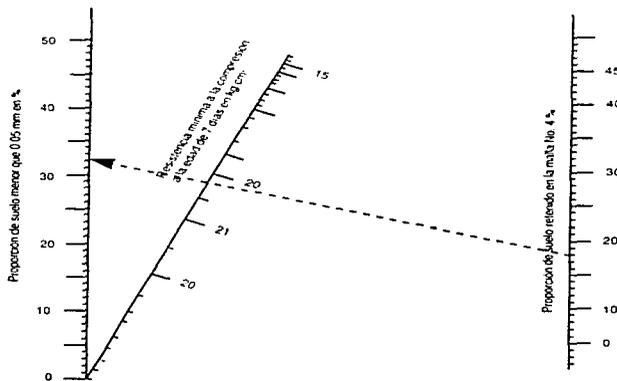


fig. 3.5 Resistencia mínima a la compresión simple a la edad de 7 días, requerida por las mezclas de suelo-cemento que contienen material retenido en la malla No. 4.

### 3.1.2 PRUEBA DE HUMEDECIMIENTO-SECADO.

Esta prueba consiste en someter al espécimen a 12 ciclos de saturación y secado con duración de 48 hrs cada uno, se trata de determinar el porcentaje de material que se desprende del espécimen debido a la acción abrasiva a que se somete el mismo, al ser raspado con un cepillo de alambre. Previamente a los ciclos de saturación y secado se colocan a los especímenes en un ambiente húmedo por siete días. El porcentaje de suelo-cemento perdido debido a la abrasión provocada con el cepillo se calcula con la siguiente fórmula.

$$p = (W_{si} - W_{sc}) \cdot W_{si} \times 100$$

Donde:

$W_{si}$  = Peso seco original del espécimen

$W_{sc}$  = Peso seco final corregido por agua de hidratación del cemento.

$p$  = Pérdida del suelo-cemento.

$$W_s = W_{sc} / (100 + W_r) \times 100$$

Donde:

$W_s$  = Peso seco del espécimen a 100° C

$W_r$  = Contenido promedio de humedad retenido por el suelo correspondiente (ver tabla 3.6)

Algunas veces es suficiente la humedad óptima del suelo compactado por la hidratación del cemento.

"Las partículas de cemento hidratado ligan a los granos adyacentes de suelo y forman un esqueleto más o menos continuo de un material duro y resistente, este esqueleto sella los vacíos del suelo con lo que hace más impermeable y resistente a los efectos propiciados por los cambios de humedad".

Las pruebas de durabilidad fueron desarrolladas para reproducir en el laboratorio los cambios de humedad en el suelo.

La prueba de humedecimiento y secado toma en cuenta las fuerzas de contracción y la de congelamiento fue diseñada para simular las fuerzas de expansión internas.

### 3.1.3 PRUEBA DE CONGELACION-DESHIELO.

Esta prueba se hace igual a la de humedecimiento-secado, pero el espécimen permanece siete días en el cuarto húmedo, se procede a colocarlos en un ambiente con una temperatura menor de -23 ° C por 24 hrs, después se colocan en un ambiente de 21° C por 23 hrs permitiéndoles que absorban agua; después de cada ciclo, se secan los especímenes superficialmente y se raspan de la misma manera que la prueba anterior hasta completar los 12 ciclos.

### **3.2 AGUA**

El agua es el tercer material básico de la mezcla suelo-cemento, la cantidad de agua para la mezcla se estima por medio de la prueba proctor estándar. Se puede utilizar cualquier tipo de agua siempre y cuando esta no contenga sustancias perjudiciales como álcalis, ácidos o materia orgánica, se puede utilizar agua potable, también se puede utilizar agua salada pero se debe tener cuidado que no contenga sustancias que perjudiquen a la mezcla. El agua ayuda a alcanzar el máximo peso específico, ayuda a lubricar las partículas del suelo e hidrata el cemento adecuadamente.

### **3.3 ADITIVOS.**

Los aditivos no son básicos para la preparación de la mezcla suelo-cemento, pero dependiendo del tipo de aditivo se puede mejorar ciertas propiedades deseadas del suelo-cemento, como la resistencia, la durabilidad, etc. Uno de los aditivos que se utiliza es la cal hidratada, ya que hace más trabajable la mezcla y es fácil de compactar, es por eso que se utiliza como pretratamiento, otra ventaja más de los aditivos es que minimiza costos en la mezcla de suelo-cemento.

### **3.4 PROPIEDADES DEL SUELO-CEMENTO.**

El suelo estabilizado con cemento, adquiere propiedades mecánicas adecuadas para la construcción de pavimentos, caminos, vasos de presas, diques, etc.

- Las propiedades del suelo-cemento dependen de la naturaleza del suelo y las cantidades de cemento y agua.
- De la hidratación del cemento mezclado, compactado, curado y acabado.

Las propiedades que se mejoran con la mezcla de suelo-cemento son las siguientes:

#### **a) Estructura interna del suelo-cemento.**

Al hidratarse el cemento se observa un efecto de coagulación del suelo, lo cual produce un aumento de fricción interna y una disminución en la cohesión y plasticidad del suelo, esto hace que la masa del suelo se vuelva sólida.

Cuando se endurece la mezcla de suelo-cemento, la estructura interna del suelo forma "cadenas rígidas", que son originadas por la cristalización de los granos del cemento y el aglutinamiento de las partículas del suelo, también se forman "cadenas plásticas" cuando los suelos son finos, y esto se debe a la cristalización de las partículas de arcilla que el cemento no alcanza, la estructura se puede observar por medio de estudios pectográficos.

#### **b) Permeabilidad.**

Cuando un suelo es estabilizado con cemento se reduce mucho la permeabilidad, un ejemplo de este es cuando se tiene un suelo calizo-limoso que tiene una permeabilidad de  $2 \times 10^{-3}$  cm/s y cuando se estabiliza con cemento la permeabilidad se reduce a  $5 \times 10^{-5}$  cm/s.

c) Resistencia a la compresión.

Esta depende de la edad y del contenido de cemento. Esta propiedad se ha tomado como criterio de estabilización, a través de los años. Para observar la resistencia a la compresión se tiene la siguiente gráfica.

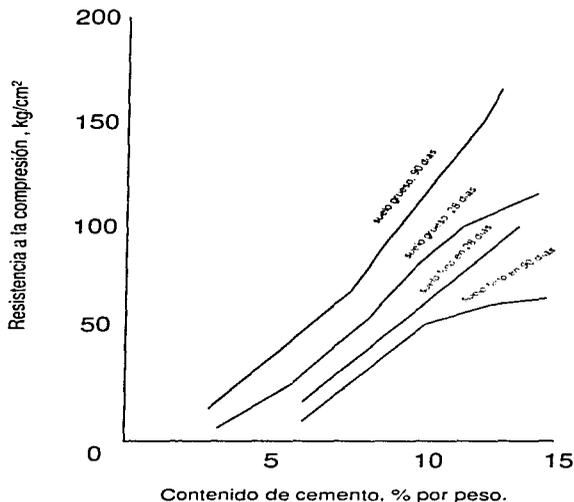


Fig. 3.6 Gráfica de la resistencia a la compresión simple de un suelo-cemento.

d) Módulo de rotura.

Esta propiedad al igual que la anterior depende de la edad y del contenido de cemento, y es mucho mayor en suelos gruesos que en los finos. La relación que hay entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión es de 0.18-0.45, que es mayor a la del concreto normal que fluctúa entre 0.10-0.15.

El 0.18 corresponde a los suelos de alta resistencia y los de 0.45 a los de baja.

e) Modulo de elasticidad.

" Esta propiedad varía con la edad y el contenido de cemento sus valores están comprendidos entre 30000 kg/cm<sup>2</sup> y 22500 kg/cm<sup>2</sup> . Los suelos finos tienen un modulo de elasticidad menor que los suelos gruesos al formar el suelo-cemento".<sup>4</sup>

f) Resistencia al desgaste.

La resistencia al desgaste del suelo-cemento es muy baja en comparación de otros suelos. Es por eso de que la superficie del suelo-cemento se debe de proteger con un revestimiento asfáltico o carpeta asfáltica en trabajos de cimentación.

g) Cambios volumétricos.

Estos dependen del tipo de suelo, cambios de humedad, contenidos de cemento y la temperatura.

Estos cambios volumétricos pueden ser de expansión, cuando aumenta el contenido de humedad, debido a que el agua interna del suelo se congele o cuando aumenta la temperatura ambiente son de contracción cuando disminuye el contenido de humedad.

### **3.5 MODIFICACIONES DEL SUELO-CEMENTO.**

El cemento al ser mezclado con el suelo transforma algunas características no deseadas (permeabilidad, baja resistencia así como otras características) y modifica al suelo en condiciones favorables para cualquier tipo de construcción que se desee realizar. El cemento se puede aplicar en suelos granulares y limoarcillosos.

#### **3.5.1 MODIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON CEMENTO.**

El cemento al mezclarse con un suelo granular mejora el comportamiento de este, aumentando el VRS, reduciendo su plasticidad y las variaciones volumétricas, impide la consolidación y produce una mejor trabajabilidad. Se han realizado investigaciones que indican que los bajos contenidos de cemento modifican notablemente las características antes mencionadas, pudiendo ser modificaciones permanentes.

### 3.5.2 MODIFICACIONES DE SUELOS ARCILLOSOS.

Los suelos limo arcillosos presentan problemas fuertes de cambios volumétricos y baja capacidad de carga, es por eso que se usan en terraplenes, pero no son recomendables para la construcción de caminos.

Las pruebas de laboratorio tanto como en el campo que se realizan a los suelos modificados con cemento involucran la determinación del cambio de propiedades, tales como la disminución de cambios volumétricos y aumenta la capacidad de carga.

Contenido de cemento % de Volumen	SUELO ARCILLOSO													
	Suelo sin preparación					Suelo Modificado con cemento		Suelo sin preparación			Suelo Modificado con cemento			
	0	4.0	6.1	8.1	10.1	0	1/2	1	2	3	4	5.1	8.1	
Límite Líquido	45.2	42.3	41.0	39.2	38.6	54	51	48	46	45	45	45	41	
Límite Plástico	21.1	26.2	26.8	28.4	28.3	24	24	24	25	27	28	34	33	
Índice plástico	24.1	16.1	14.2	10.8	10.3	30	27	24	21	18	17	11	8	
Humedad de campo equivalente (Vol. at S.E./Vol at F.N.E.)x100	28.6	31.6	31.2	32.3	33.7	31	31	31	33	32	31	37	34	
Límite de contracción	76.4	83.6	87.4	90.7	89.5	80.2	80.4	83.3	81.8	85.9	95.2	89.6	91.6	
Coefficiente de contracción	12.7	20.3	22.5	25.9	26.2	17	17	20	20	22	28	29	28	
(Vol. at S.E./Vol. at F.N.E.)x100	1.95	1.71	1.65	1.59	1.57	1.8	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	
(Vol. at S.E./Vol. at F.N.E.)x100	61.1	72.6	76.7	82.8	83.4	60.5	62.5	65.8	69	73.2	79.2	80.1	83.6	

Los efectos del cemento en suelos limo arcillosos se observan en la tabla 3.1

### 3.6 PRUEBAS DE LABORATORIO.

Uno de los requisitos para producir suelo-cemento con características satisfactorias, consiste en incorporar una cantidad de cemento portland, con suelo pulverizado, el segundo requisito, es la cantidad de agua apropiada para mezclar uniformemente la mezcla de suelo-cemento.

Para obtener la humedad de la mezcla de suelo-cemento es necesario compactar la muestra con una densidad apropiada antes que el cemento se hidrate.

Estos factores se pueden determinar por medio de ensayos de laboratorio ya que pueden dar al ingeniero una exactitud y control en la construcción de la obra realizada con suelo-cemento.

En este inciso se ven la principales pruebas que se realizan en el laboratorio para determinar un adecuado control sobre esta mezcla.

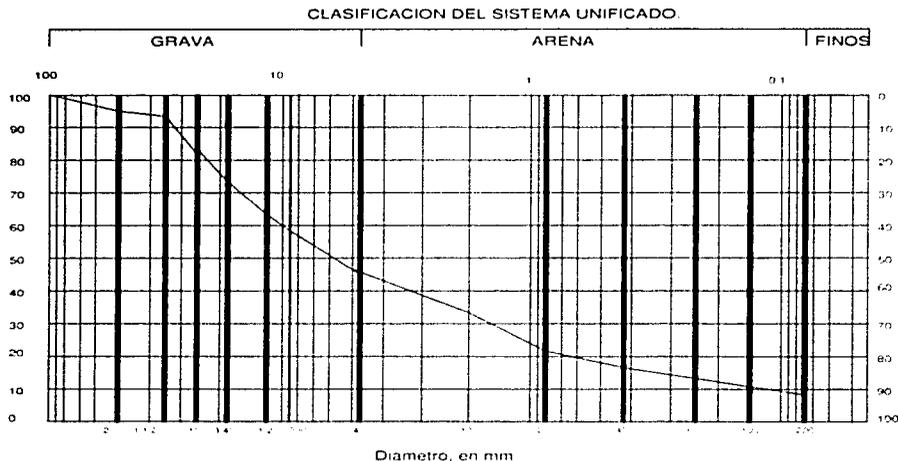
La cantidad de pruebas de laboratorio que se realizan depende de la importancia de la obra, el tipo de suelo y otros factores.

En todos los casos los ensayos determinan tres factores fundamentales que son:

- 1.- La cantidad de cemento necesario para endurecer adecuadamente el suelo.
- 2.- La cantidad de agua que se deberá agregar.
- 3.- El peso específico que deberá compactarse el suelo-cemento.

Para realizar un ensaye de laboratorio se debe de hacer una identificación del suelo que se va a utilizar en este caso será un análisis del suelo.

Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa	Malla	Abertura	Peso suelo retenido	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa
No.	gr.	gr.	%	%	No.	mm.	gr.	%	%
2"	50.80	251.98	4.32	95.68	10	2.000	905.46	15.51	31.57
1 1/2"	36.10	114.30	1.96	93.72	20	0.840	514.93	8.82	22.75
1"	25.40	721.40	12.36	81.36	40	0.420	352.18	6.03	16.72
3/4"	19.05	473.77	8.12	73.24	60	0.250	161.55	2.77	13.95
1/2"	12.70	531.9	9.11	64.13	100	0.149	151.53	2.60	11.35
3/8"	9.52	303.49	5.20	58.93	200	0.074	187.94	3.22	8.13
No. 4	4.75	691.44	11.85	47.08	pasa No.4		474.47	8.13	
<b>pasa No.4</b>									
<b>suma</b>									



$$D_{10} = 0.10$$

$$C_u = D_{60} / D_{10} = 101.00$$

$$D_{30} = 1.7$$

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) = 2.86$$

$$D_{60} = 10.1$$

$$\begin{aligned} \text{mayor } 3'' &= \\ G &= 52.92\% \\ S &= 38.95\% \\ F &= 8.13\% \end{aligned}$$

### CLASIFICACION SUCS GW-GM

fig. 3.7 Análisis granulométrico.

#### 3.6.1 SELECCION DE LA CANTIDAD DE CEMENTO.

Este inciso es de interés para el laboratorista, ya que determina el contenido de cemento adecuado para la mezcla de suelo-cemento.

" Si los especímenes se diseñan con un alto contenido de cemento pasaran los ensayos de humedad y secado y de congelamiento y deshielo, pero no se obtendrá el contenido mínimo de cemento, y si se diseñan con un bajo contenido de cemento no se cumplirá con los valores mínimos de resistencia requeridos.

Como método general se encontrara que el contenido de cemento para el aluvión y arcilla es alto, las gravas y arenas requieren un contenido de cemento más bajo.

En la tabla 3.2 se dan intervalos comunes del contenido de cemento para los suelos del horizonte B y C de acuerdo con la clasificación SUCS.

Grupo SUCS	Intervalos comunes del cemento requerido		Contenido de cemento estimado para emplearse en el ensaye de humedad-peso específico.	Contenido de cemento para los ensayos de durabilidad.
	% por vol.	% por peso	% peso	% peso
<b>GW, GP</b>	5-7	3-5	5	3-5-7
<b>GM, SW</b>	7-9	5-8	6	4-6-8
<b>SC</b>	7-10	5-9	7	5-7-9
<b>SP y SM</b>	8-12	7-11	9	7-9-11
<b>ML</b>	8-12	7-12	10	8-10-12
<b>CL, OL y MH</b>	8-12	8-13	10	8-10-12
<b>CH</b>	10-14	9-15	12	10-12-14
<b>OH y Pt</b>	10-14	10-16	13	11-13-15

Tabla 3.2 contenidos de cemento requeridos para los diferentes grupos de suelo (AASHO).

Los contenidos de cemento de esta tabla se emplean como estimaciones preliminares, la cual se verificará de acuerdo con la información que se haya obtenido.

- Primero se verifica el contenido de cemento de acuerdo a la clasificación del suelo.
- Después se realizan con el contenido de cemento obtenido ensayos de laboratorio de humedad-peso específico.
- Y por último se verifica el contenido de cemento por la tabla 3.3 si el suelo es arenoso, y si el suelo es limoso o arcilloso se verifica con la tabla 3.4.

En estas tablas se toma en cuenta el peso específico y otras propiedades del suelo.

A continuación se muestran las tablas antes mencionadas.

Material retenido en la malla No. ↓ %	Material menor que 0.05 mm. %	Contenido de cemento, % por peso máximo peso específico, kg/m <sup>3</sup>					
		1680-1750	1760-1830	1840-1910	1920-1990	2000-2070	2080 o mas
0-14	0-19	10	9	8	7	6	5
	20-39	9	8	7	7	5	5
	40-50	11	10	9	8	6	5
15-29	0-19	10	9	8	6	5	5
	20-39	9	8	7	6	6	5
	40-50	12	10	9	8	7	6
30-45	0-19	10	8	7	6	5	5
	20-39	11	9	8	7	6	5
	40-50	12	11	10	9	8	6

Tabla 3.3 contenidos de cemento promedio, estimados para suelos arenosos del horizonte "B" y "C".

Material entre 0.05mm y 0.005mm %	Contenido de cemento, % por peso máximo peso específico, kg/m <sup>3</sup>						
	1440-1510	1520-1590	1600-1670	1680-1750	1760-1830	1840-1910	1920 o mas
0-19	12	11	10	8	8	7	7
20-39	12	11	10	9	8	8	7
40-59	13	12	11	9	9	8	8
60 o mas	-	-	-	-	-	-	-
0-19	13	12	11	9	8	7	7
20-39	13	12	11	10	9	8	8
40-59	14	13	12	10	10	9	8
60 o mas	15	14	12	11	10	9	9
0-19	14	13	11	10	9	8	8
20-39	15	14	11	10	9	9	9
40-59	16	14	12	11	10	10	9
60 o mas	17	15	13	11	10	10	10
0-19	15	14	13	12	11	9	9
20-39	16	15	13	12	11	10	10
40-59	17	16	14	12	12	11	10
60 o mas	18	16	14	13	12	11	11
0-19	17	16	14	13	12	11	10
20-39	18	17	15	14	13	11	11
40-59	19	18	15	14	14	12	12
60 o mas	20	19	16	15	14	13	12

Tabla 3.4 Contenidos de cemento promedio estimados para los suelos limosos o arcillosos de los horizontes "B" y "C".

En la tabla 3.5 se presentan los contenidos de cemento en peso promedio de los distintos tipos de suelo

Suelos típicos o Materiales que lo forman	Contenidos de cemento estimado, para emplearse en el ensaye de humedad-peso específico		Contenido de cemento para el ensaye de durabilidad.
	% por volumen	% por peso	% por peso
Suelos de concha	8	7	5-7-9
Desperdicios de caliza	7	5	3-5-7
Arcilla expandida o desintegrada	11	10	8-10-12
Caliches	8	7	5-7-9
Carbones	8	8	6-8-10
Horzteno (variedad de cuarzo)	9	8	6-8-10
Margas	11	11	9-11-13
Escoria natural con material retenido en la malla No. 4	12	11	9-11-13
Escoria natural sin material retenido en la malla No. 4	8	7	5-7-9
Escoria de altos hornos enfriado con aire	9	7	5-7-9
Escoria de altos hornos enfriado con agua	10	12	10-12-14

Tabla 3.5 Contenidos de cemento, requeridos por algunos suelos típicos.

Estos porcentajes se utilizan para pavimentos o caminos, pero dependiendo del tipo de obra ya sea en cimentación, núcleos de presa, diques, muros de retención, etc. se debe de hacer un análisis de la resistencia, permeabilidad y de volteo, dependiendo de los resultados se obtiene el contenido de cemento adecuado.

### 3.6.2 ENSAYES DE HUMEDAD - PESO ESPECIFICO.

Este ensaye se realiza por medio de la prueba proctor, y con el se obtiene el peso específico máximo y la humedad óptima de la mezcla de suelo-cemento.

El tipo de suelo que se utilizó de acuerdo con la clasificación del SUCS fue GW-GM, para poder hacer este ensaye la muestra de suelo se pasa por la malla No.4, después por medio de una tara se toma una pequeña muestra de suelo, se pesa y se pone a secar para obtener la humedad natural del suelo.

Se pesa 2.2 Kg. de suelo después se mezcla con el 4% de cemento en peso, se coloca en una charola se mezcla perfectamente, luego se añaden 100 ml de agua, se procede a mezclarse hasta que se haga una mezcla homogénea.

Después se procede a realizar la prueba próctor, en el molde se pone una capa de suelo y se golpea 25 veces, se hace lo mismo con las dos capas restantes, y por último el material excedente del molde se elimina y se pesa la muestra.

Esto se realiza otras tres veces pero con contenidos de agua diferentes en este caso 200, 300 y 400 ml de agua con los valores del contenido de agua y el peso volumétrico se dibuja una gráfica para determinar el contenido óptimo del agua para la compactación, y el peso volumétrico seco máximo del material.

A continuación se presentan los resultados y la gráfica.

**Diámetro molde 10.145 cm.**

**Volumen molde 0.938 cm<sup>3</sup>**

**Tara molde 4.400 kg.**

**Peso del martillo 2.500 kg.**

**Diámetro del martillo 5.05 cm.**

**Altura de caída 30.50 cm.**

**No. de golpes/capa 25**

**No. capas 3**

**Energía de compactación**

**6096.75 kg-cm/cm<sup>3</sup>**

cápsula No.	CONTENIDO DE AGUA				DATOS MOLDE			
	tara cápsula gr.	peso suelo húmedo + cápsula gr.	peso suelo seco + cápsula gr.	contenido de agua %	peso suelo seco kg.	peso suelo húmedo kg.	peso suelo seco kg.	peso volumétrico seco kg/cm <sup>3</sup>
165	14.95	64.21	62.44	4.38	6.298	1.898	1.815	2.026
108	13.02	94.81	88.56	8.2	6.486	2.086	1.915	2.227
62	14.81	109.60	98.91	12	6.447	2.047	1.781	2.182
17	15.55	180.06	156.06	17	6.347	1.947	1.616	2.077

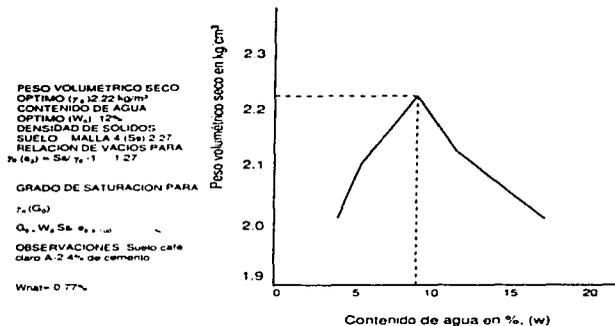


fig. 3.8 Prueba de Compactación.

### 3.6.3 ENSAYE DE HUMEDECIMIENTO-SECADO (DURABILIDAD).

Con este ensayo se obtiene la resistencia al intemperismo.

Primero se pesa el material a utilizar en este caso de 2.2 Kg. de suelo y con 2, 4, 6 y 8 % de cemento en peso. la humedad con la que se fabrican es la misma de la prueba proctor.

Se extrae cuidadosamente el material del molde. se mete en un ambiente húmedo para permitir la hidratación del cemento durante 7 días.

- 1.- Se sumerge el espécimen dentro del agua a una temperatura ambiente durante 5 horas.
- 2.- Después se mete el espécimen adentro del horno a una temperatura de 72° C durante 42 hrs.
- 3.- Se sacan del horno y se someten a un raspado, que consiste pasar dos veces por el mismo lugar un cepillo de alambre, para quitar el material superficial se requieren de 18 a 20 pasadas.
- 4.- Todo el ciclo anterior se repite 12 veces.
- 5.- Después de doce ciclos se mete el espécimen al horno a 110° C de temperatura hasta obtener un peso constante.
- 6.- Se corrigen los pesos anteriores por el agua de la hidratación que el cemento retiene. Los contenidos promedio de humedad retenida por la hidratación del cemento en los especímenes secados a 110° C y hechos con diferentes tipos de suelos se dan a continuación.

**Contenido promedio de humedad retenida después del secado a 110° C. %**

**GW, GP-SC**

**GM, SW**

**SP, SM-ML**

**CL, OL Y MH, CH**

**Contenido promedio de humedad retenida después del secado a 110° C. %**

**1.5**

**2.5**

**3.0**

**3.5**

### 3.9 Tabla del contenido de humedad retenida.

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

**% de cemento** **2**

**% Humedad Inicial**

**Cálculo inicial seco, gr.**

**Peso final seco \***

**Peso final corregido seco**

**\*\***

**% Pérdida de suelo-cemento**

**Peso húmedo** **2032.05**

**% de cemento** **4**

**% Humedad Inicial**

**Cálculo inicial seco, gr.**

**Peso final seco \***

**Peso final corregido seco**

**\*\***

**% Pérdida de suelo-cemento**

**Peso húmedo** **2059.16**

\* Después de 12 ciclos de probado y secado.

\*\* Después de corregir por agua de hidratación.

Fecha	Hora de saturación	Hora de secado	Peso inicial gr.	Peso final gr.	% de Pérdida	No. de ciclos	Fecha	Hora de saturación	Hora de secado	Peso inicial gr.	Peso final gr.	% de Pérdida
18-09-95	15:00	19:00				-	18-09-95	15:00	19:00			
19-09-95	16:00	18:00	1883.22	1858.45	1.32	1	19-09-95	16:00	18:00	1885.62	1872.82	0.68
20-09-95	15:30	18:00	1855.34	1833.16	2.66	2	20-09-95	15:30	18:00	1871.53	1864.93	1.10
21-09-95	15:30	18:00	1829.03	1805.44	4.13	3	21-09-95	15:30	18:00	1863.60	1858.89	1.42
22-09-95	15:30	18:00	1800.15	1780.89	5.43	4	22-09-95	15:30	18:00	1856.26	1849.19	1.93
25-09-95	15:30	18:00	1773.40	1749.43	7.10	5	25-09-95	15:30	18:00	1850.38	1843.72	2.22
26-09-95	13:30	17:30	1746.63	1732.92	7.98	6	26-09-95	13:30	17:30	1841.27	1837.87	2.53
27-09-95	15:30	18:00	1731.33	1714.20	8.98	7	27-09-95	15:30	18:00	1836.97	1834.33	2.72
28-09-95	16:00	18:00	1710.35	1688.26	10.35	8	28-09-95	16:00	18:00	1834.48	1831.49	2.87
29-09-95	16:00	18:00	1685.96	1675.09	11.05	9	29-09-95	16:00	18:00	1830.71	1827.36	3.09
02-10-95	13:30	16:30	1669.04	1659.13	11.90	10	02-10-95	13:30	16:30	1827.14	1824.03	3.27
03-10-95	13:00	16:00	1656.84	1621.73	13.89	11	03-10-95	13:00	16:00	1823.44	1820.61	3.45
04-10-95			1619.08	1598.86	15.10	12	04-10-95			1820.85	1818.47	3.56

% de cemento 6

% Humedad inicial

Cálculo inicial seco, gr.

Peso final seco \*

Peso final corregido seco

\*\*

% Pérdida de  
suelo-cemento

Peso húmedo

2050.58

\* Después de 12 ciclos de probado y secado.

\*\* Después de corregir por agua de hidratación.

Fecha	Hora de saturación	Hora de secado	Peso inicial gr.	Peso final gr.	% de Pérdida	Nº de ciclos	Fecha	Hora de saturación	Hora de secado	Peso inicial gr.	Peso final gr.	% de Pérdida
18-09-95	15:00	19:00				-	18-09-95	15:00	19:00			
19-09-95	16:00	18:00	1880.48	1872.08	0.45	1	19-09-95	16:00	18:00	1889.60	1881.47	0.43
20-09-95	15:30	18:00	1869.70	1863.90	0.88	2	20-09-95	15:30	18:00	1879.05	1874.01	0.83
21-09-95	15:30	18:00	1863.71	1859.80	1.10	3	21-09-95	15:30	18:00	1873.88	1871.32	0.97
22-09-95	15:30	18:00	1858.04	1855.37	1.34	4	22-09-95	15:30	18:00	1870.86	1868.58	1.11
25-09-95	15:30	18:00	1856.85	1852.86	1.47	5	25-09-95	15:30	18:00	1869.69	1867.70	1.16
26-09-95	13:30	17:30	1851.41	1849.78	1.63	6	26-09-95	13:30	17:30	1866.70	1865.49	1.28
27-09-95	15:30	18:00	1849.97	1848.93	1.67	7	27-09-95	15:30	18:00	1865.85	1864.54	1.33
28-09-95	16:00	18:00	1846.53	1845.02	1.89	8	28-09-95	16:00	18:00	1864.14	1863.28	1.39
29-09-95	16:00	18:00	1844.34	1842.82	2.00	9	29-09-95	16:00	18:00	1862.90	1862.27	1.45
02-10-95	13:30	16:30	1843.48	1842.11	2.04	10	02-10-95	13:30	16:30	1863.53	1862.23	1.45
03-10-95	13:00	16:00	1842.35	1841.09	2.09	11	03-10-95	13:00	16:00	1862.09	1861.26	1.50
04-10-95			1810.55	1839.17	2.19	12	04-10-95			1861.16	1860.79	1.52

Tablas 3.7 y 3.8 de los Resultados de Humedecimiento y secado.

### 3.6.3 ENSAYE DE RESISTENCIA A LA COMPRESION.

Este ensaye complementa la información proporcionada por los ensayes de durabilidad, este ensaye determina la velocidad de endurecimiento y se observa si el suelo esta reaccionando normalmente.

Después de que es fabricado el suelo-cemento se almacena en un cuarto húmedo hasta el día del ensaye, las edades a la cual se realiza el ensaye es de 3, 7, 14 y 28 días, la velocidad de aplicación a la carga es de 1.4 Kg/cm<sup>2</sup> x seg.

La resistencia a la compresión de espécimen aumenta, con la edad y la cantidad de cemento.

La mezcla de suelo-cemento que presenta una resistencia a la compresión mayor a 21Kg/cm<sup>2</sup> a la edad de siete días, pasa los ensayes de durabilidad, y si el material no obtiene la resistencia antes citada, la cantidad de cemento se aumenta de dos en dos hasta obtener la resistencia antes mencionada.

En este ensayo de resistencia a la compresión, también se emplea para controlar la mezcla de suelo-cemento en la construcción.

A continuación se presentan los resultados y las gráficas.

Porcentaje de finos	Porcentaje de cemento.				Edad.
	2	4	6	8	
8	5.2	12.82	12.85	23.23	3 días
	8.4	14.83	26.69	32.13	7 días
	8.9	16.77	26.74	28.67	14 días
	15.29	23.28	32.59	23.68	28 días

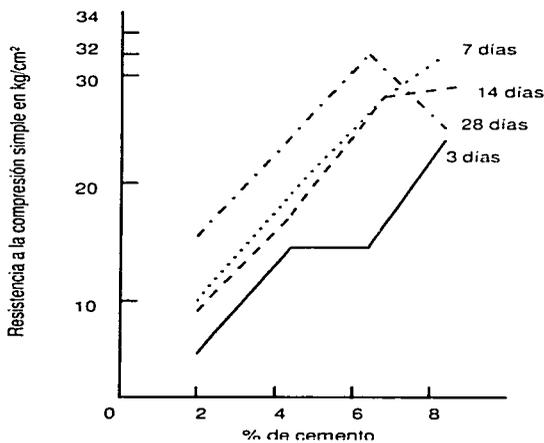


Fig. 3.9 Prueba a compresión simple con 8 % de finos.

En las dos últimas pruebas a compresión simple con 14 y 28 días de edad se le dió un tratamiento de distribución a los agregados.

Porcentaje de Contenido de cemento % por peso con 72 hrs de saturación y 3 días de edad.  
finos.

	4	6	8	10	12	
8	13.39	20.74	31.6	33.68	52.45	Kg/cm <sup>2</sup>
18	13.87	21.75	24.71	27.68		Kg/cm <sup>2</sup>
25	16.81	19.77	25.7	32.62		Kg/cm <sup>2</sup>

Contenido de cemento % por peso con 72 hrs de saturación y 7 días de edad.

	4	6	8	10	
18	16.81	26.69	26.66	30.65	Kg/cm <sup>2</sup>
25	19.77	22.74	31.63	34.6	Kg/cm <sup>2</sup>

Contenido de cemento % por peso a 28 días de edad.

	4	6	8	10	
18	21.83	29.77	31.76	39.7	Kg/cm <sup>2</sup>
25	24.81	35.73	37.71	57.56	Kg/cm <sup>2</sup>

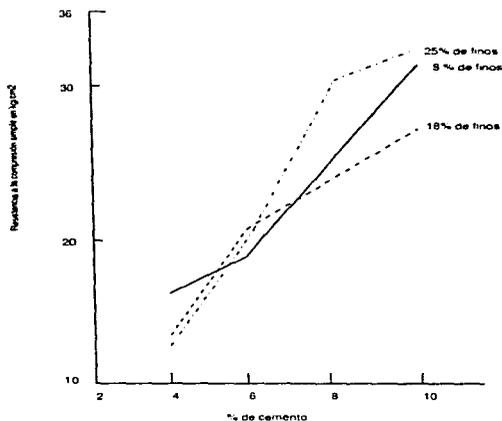


Fig. 3.10 Prueba a compresión simple con 72 hrs de saturación y 3 días de edad.

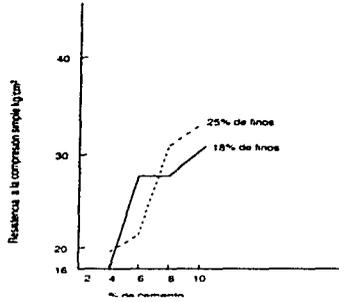


Fig. 3.11 Prueba a compresión simple con 72 hrs de saturación y 7 días de edad.

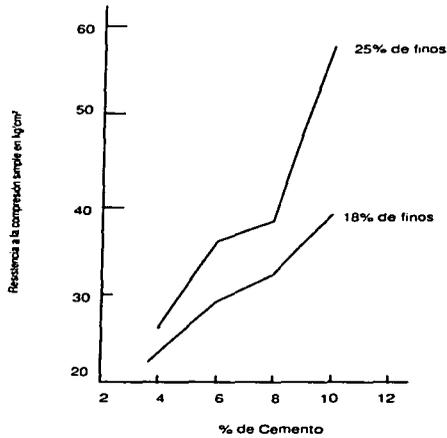


Fig. 3.12 Prueba a la compresión simple a 28 días de edad.

## Referencias.

- 1.- Avitia G Rodolfo "Suelo Cemento" IMCYC A.C pag 9
- 2.- Avitia G Rodolfo "Suelo Cemento. IMCYC A.C pag. 17
- 3.-Loaiza Fdz Carlos "Mejoramiento y Estabilización de Suelos" Ed. Limusa pag. 182

## **CAPITULO CUATRO.**

### **EJECUCION DE OBRAS CON SUELO-CEMENTO.**

#### **Generalidades.**

Como se ha mencionado anteriormente, el suelo-cemento es una mezcla bien compactada de suelo, cemento y agua. Con la cual se pueden hacer diversos tipos de estructuras tales como, muros de retención, caminos, diques, bases, subbases, etc.

Esta mezcla es resistente y durable para cualquier tipo de obra que se desee realizar.

Una de las principales razones es del tipo económico, ya que en nuestro país se tiene poca experiencia en construir estructuras de suelo-cemento, esto se debe de que no hay muchos conocimientos a cerca de esta técnica.

En este capitulo se verán dos ejemplos.

#### **4.1 MURO DE RETENCION.**

El muro del cual se va a comentar se encuentra situado al poniente de la Cd. de México, el muro de suelo-cemento se diseñó para la retención de rellenos en una zona cercana a una cañada.

##### **4.1.1 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO.**

Este MURO forma parte de un proyecto de un conjunto de edificios de 18 niveles con doble estacionamiento que se encuentra en un terreno con una gran pendiente.

Este muro de retención tiene aproximadamente 220 m de longitud y debido a las características topográficas y geológicas cuenta con una altura entre 15 y 20 m; tal como se puede apreciar en la siguiente figura.

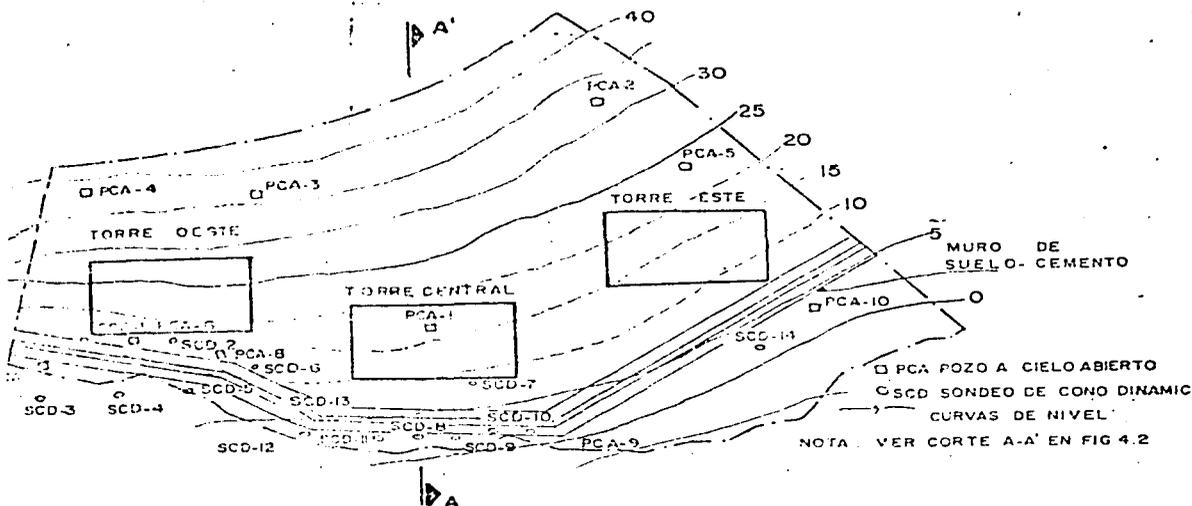


Fig. 4.1 Lugar en donde se encuentra situado el muro de suelo-cemento.

Para esta construcción se plantearon tres alternativas, teniendo en cuenta las condiciones geométricas del proyecto, así como la topografía y características geológicas del terreno.

- a) Muro de concreto armado tipo cantiliver con contra fuertes.
- b) Muro de suelo-cemento tipo gravedad.
- c) Tierra armada o muros de gaviones.

Al hacer un análisis de costos entre la tierra armada y el suelo-cemento, resulto ser más cara la de tierra armada, debido a que implican gastos adicionales por la utilización de tecnología y materiales importación.

Entre el muro de concreto y de suelo-cemento, la decisión por la cual se inclinó fue de este último, ya que se hizo un análisis de costo que resultó del 40% con respecto a un muro convencional de concreto, lo que favoreció para la toma de decisión a favor del muro de suelo-cemento ya que el producto de excavación de tobas arenosas ofrecieron características idóneas para realizar una mezcla de suelo-cemento, no solo por la economía de este, sino por la facilidad constructiva y la optimización de la maquinaria utilizada en la construcción de terraplenes.

#### 4.1.2 CARACTERISTICAS DEL SITIO.

El muro que se construyó se localiza en la zona de lomas, el material que existe en este lugar es producto de erupciones volcánicas, que al paso del tiempo fueron erosionadas formando barrancas.

En la parte sur del terreno se localiza una barranca que debido a la topografía del terreno presenta una pendiente, tal como se muestra en la figura 4.2 .

El tipo de suelo que se encuentra en este lugar son la tobas que se agrupan en dos tipos que son:

a) Tobas arcillosas o areno-arcillosas, de color café amarillento a café rojizo, con diferentes grados de alteración.

b) Tobas arenosas con pocos finos (limos y arcillas) de café claro a blanquezo.

Estos materiales son ideales para la mezcla de suelo-cemento y para la formación de rellenos.

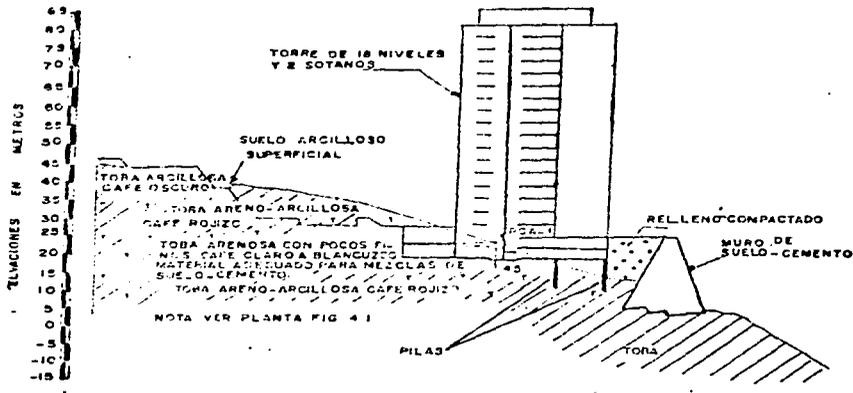


Fig. 4.2 Corte estratigráfico.

### 4.1.3 ANALISIS DEL MURO DE SUELO-CEMENTO.

Para que se pudiera construir el muro, primero se tuvo que conocer la estratigrafía del terreno, y para esto se llevaron a cabo sondeo de cono dinámico y pozos a cielo abierto, con las muestras de este último se realizaron pruebas de resistencia y en el lugar se efectuaron pruebas de placa para determinar la deformabilidad de los materiales.

En las siguientes gráficas se pueden apreciar los resultados obtenidos de los sondeos de cono dinámico y de la prueba de placa.

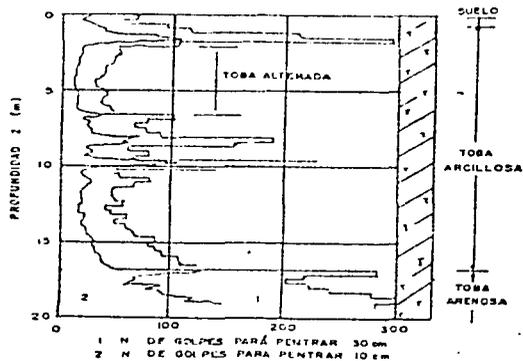


Fig. 4.3 Gráfica de los resultados del cono dinámico.

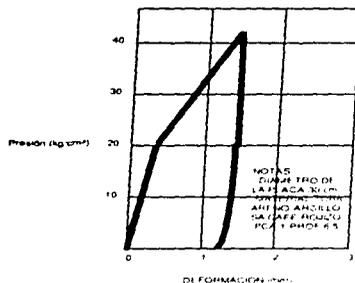


Fig. 4.4 gráfica de resultados de prueba de placa.

Aparte se utilizaron muestras de las tobas existentes, las cuales fueron la de granulometría, límites de consistencia y pruebas próctor, en la siguiente tabla se presentan resultados que se obtuvieron de ella.

**Tabla 1 Resultados de laboratorio en muestras disgregadas.**

Material	Granulometría			Límites de consistencia.			Prueba próctor estándar.	
	Grava %	Arena %	Finos %	L.L. %	L.P. %	I.P. %	Td max. Kg/m <sup>3</sup>	W opt %
<b>Toba arenosa</b>	9.7	62.8	27.5	35.4	18.5	16.9	1.482	26.2
<b>Toba arcillosa</b>	3.2	47.3	49.5	43.7	21.2	22.5	1.337	32.8

Tabla 4.1 Resultados de laboratorio de muestras disgregadas.

Para tener una buena mezcla de suelo-cemento se recomienda utilizar que el material tenga el 30% de límite líquido y el porcentaje de finos del 25% como máximo.

El primer material que se utilizó para hacer un espécimen de la mezcla de suelo-cemento fue el de la toba arenosa aunque sus valores se excedieron un poco, se obtuvieron resultados satisfactorios, a comparación de la toba arcillosa, al hacer la mezcla con este porcentaje se excedió más del 10% de cemento y esto presentaría a la mezcla problemas de erosión y de agrietamiento.

Los ensayos de laboratorio que se hicieron con la toba arenosa fueron con cemento portland de alta calidad el mismo que se utilizó en obra.

Se siguieron los procedimientos especificados por la Portland Cement Association (PCA) para la preparación de los materiales, con los siguientes porcentajes 4, 6 y 8 %, en la siguiente gráfica se puede apreciar la resistencia a compresión simple.

La resistencia mínima a compresión simple es de 21 Kg/cm<sup>2</sup> a siete días de edad también se realizaron pruebas de humedecimiento y secado en 12 ciclos, que representan la afectación del intemperismo.

Por último se decidió utilizar el 8% en la base del muro, 6.5 % en la parte media y 6 % en la parte superior del muro.

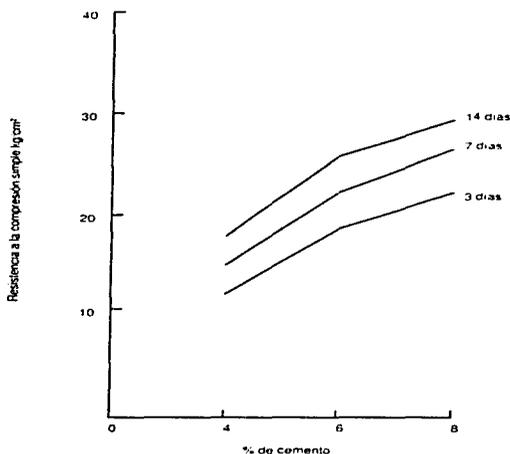


Fig. 4.5 Resultados de la mezcla de suelo-cemento a compresión simple.

En la siguiente figura se presenta una sección transversal del muro en la que se muestra su geometría, así como el resultado permeable y un dren longitudinal para permitir la eliminación del agua que llegue a los rellenos contenidos en el muro. El agua se descarga por medio de un dren mediante tubos de concreto colocados a través del muro.

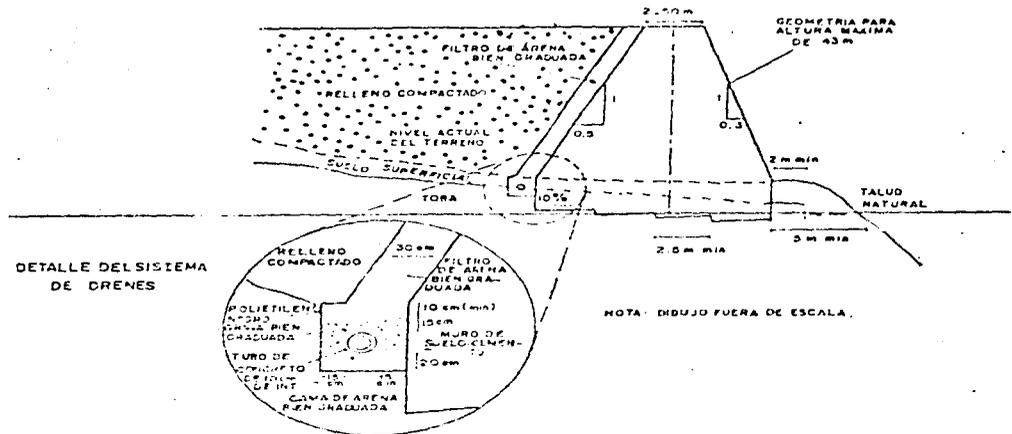


Fig. 4.6 Sección transversal al eje del muro.

El ancho se especificó como mínimo de 2.5 m en la parte superior, el talud exterior del muro tiene una inclinación 0.3:1 (horizontal:vertical), el talud interior se definió por medio de un análisis de estabilidad, se vio en la necesidad de hacer escalones de liga debido a la pendiente del terreno.

Para hacer la estabilidad del muro primero se definió la profundidad de desplante con apoyo directo sobre las tobas, calculando los hundimientos totales que no excedieran de tres cm.

La estabilidad del muro se calculó como un muro de tipo de gravedad, revisando los factores de seguridad contra deslizamiento y volteo, de la posición de la resultante y la presión máxima transmitida a la cimentación, los resultados son los siguientes:

Contra deslizamiento (F.Sd) 1.5

Contra volteo (F.Sy) 3.1

Excentricidad 0.86 m menor que  $B/6 = 2.33$  m



En condiciones sísmicas:

Coefficiente sísmico de las lomas de la ciudad de México  $c = 0.16 g$

Factor reductivo = 3

La inclinación del talud interior fue de 0.5:1

De acuerdo con los resultados de los análisis por deslizamiento se comprobó la necesidad de los escalones de liga.

#### **4.1.4 PROCESO CONSTRUCTIVO.**

- El suelo se disgrega hasta que ningún grumo quede retenido más del 30 % en la malla 2" y que en la malla No. 200 no pase menos del 5% .
- El agua debe de estar exenta de partículas nocivas y el cemento debe de ser de buena calidad.
- Se coloca el suelo a utilizar en la mezcla.
  
- Se aplica la cantidad de cemento correspondiente al proporcionamiento especificado repartiéndolo sobre el suelo disgregado de manera uniforme.
- Se agrega la cantidad necesaria de agua para realizar la compactación y que la humedad no debe de exceder del 2%
- Se realiza el mezclado inmediatamente después de agregar el agua en forma continua hasta que el producto tenga un color uniforme y la humedad adecuada en toda la mezcla.
- Se procede a compactar la mezcla a 95% de la prueba tipo próctor de acuerdo con las especificaciones ASTM-D558 o AASHTO- T134.
- El curado se efectúa por medio de riegos utilizando un sistema que no erosione las superficies expuestas.
- Se hacen juntas verticales para evitar los agrietamientos por expansión y contracción del suelo-cemento.
- Se puso especial atención en el apoyo del muro sobre tobas resistentes eliminando los suelos arcillosos y formando los escalones de liga.
- A los lados del muro se dejó un ancho de 40 cm. para la compactación con equipos ligeros, y en la parte superior del terraplén, fue necesario preparar la mezcla en la parte baja.
- En el talud exterior el muro se recortó aproximadamente 20 cm. para eliminar la capa de baja resistencia, después se protegió con una capa de concreto colado con una malla electrosoldada la cual se amarró con varillas ahogadas en el suelo-cemento.
- Y por último se colocaron referencias para nivelaciones de control y mediciones de colindancia, al terminar la obra se presentaron hundimientos de un cm. en un lapso de una semana, después se registraron hundimientos mínimos.

#### **4.1.5 CONCLUSIONES.**

Para la construcción de muros o terraplenes de gran altura el suelo-cemento, representa grandes ventajas económicas y constructivas siempre y cuando se encuentre un material adecuado para ello.

El llevar un estricto control de calidad la utilización de equipos convencionales facilita el trabajo siempre y cuando haya una coordinación entre el constructor, proyectista, laboratorio de campo y asesores técnicos.

El suelo-cemento se puede aplicar a otro tipo de proyectos como son caminos, presas, obras hidráulicas, etc.

#### **4.2 CIMENTACION SOBRE UN RELLENO MEDIANTE UNA LOSA DE SUELO-CEMENTO.**

La cimentación que se va a describir a continuación, es la de un centro comercial que se encuentra localizado al Sudoeste de la ciudad de México en la zona de las lomas en la Delegación Cuajimalpa. Esta cimentación consiste en una losa de suelo-cemento con un espesor de 3 m, que esta sobre rellenos que varían entre 4 a 22 m de profundidad, sobre la losa se desplanta una cimentación a base de zapatas corridas en dos direcciones.

##### **4.2.1 CARACTERISTICAS DEL SITIO.**

El terreno se encuentra en una zona de lomeríos que drena hacia el Valle de México, y alrededor de este existen profundas barrancas con paredes escarpadas, en las que existen depósitos clásticos continentales de distintas litologías. Los sedimentos fueron explotados con el fin de obtener agregados para la fabricación del concretos, después el terreno se relleno con los materiales de desperdicio, y de esta forma se modificó la fisiografía del lugar.

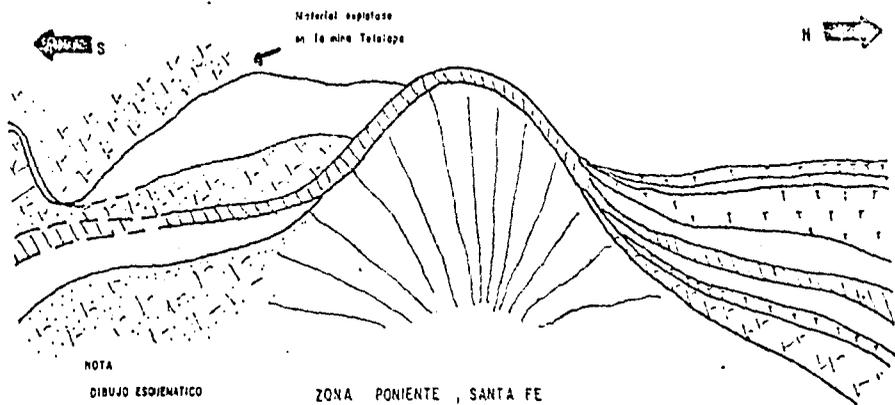
A continuación se va a describir la estratigrafía del terreno, en la parte central existe un conglomerado de color azul compuesto por boleros, gravas y arenas, abajo de éste existen conglomerados de color gris y rosa de la misma composición que la anterior, pero con una matriz de arena arcillosa, en medio de los conglomerados gris y rosa se encuentra una toba limo-arenosa de color rojizo.

En el centro se tiene un domo de roca dacítica de color gris claro, la roca presenta fracturas de 10 a 15 cm.

En la parte Norte del terreno existe una toba limo arenosa de color café en medio de esta toba se encuentra una arena pumítica de color crema, la toba descansa sobre un conglomerado gris dividido por toba de color rojiza.

Después subyace al conglomerado gris una toba limo-arenosa de color café, que se apoya sobre un conglomerado rosa y por último se encuentra una roca dacítica de color gris.

La estratigrafía del terreno se puede apreciar en la siguiente figura.



- |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Fig. 4.8 Corte estratigráfico de la zona.

Los pozos a cielo abierto se hicieron con el fin de conocer la deformabilidad de los rellenos, realizando 16 pruebas de carga estática con cono eléctrico.

Para conocer la estratigrafía del sitio se realizaron 24 sondeos y 7 pozos a cielo abierto, en la siguiente figura se pueden observar algunos sondeos en los cortes A-A' y B-B'. Al principio se llevaron a cabo tres sondeos con cono dinámico a profundidades entre 9.3 y 12.0. Debido a la dificultad de perforar el tipo de suelo existente en el terreno se optó por realizar sondeos de avance controlado (SAC-1 a SAC-21) a profundidades variables entre 15.3 - 33.1 m.

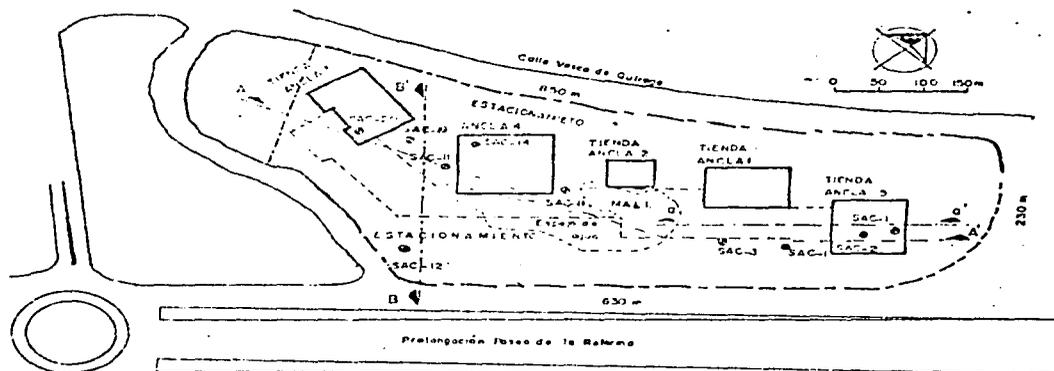


Fig. 4.9 Localización de los sondeos realizados en el terreno.

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

En las siguientes tablas se tienen los resultados de los módulos de rigidez del suelo, tanto para sondeo de avance controlado (SAC), como para pozo a cielo abierto (PCA).

Sondeo	Relleno		Conglomerado		Toba	
	Espesor, m	E Kg/cm <sup>2</sup>	Espesor, m	E Kg/cm <sup>2</sup>	Prof. m	E Kg/cm <sup>2</sup>
SAC-1	13.8	478	10.2		2.1	
SAC-2	14.4		9.0		6.6	462
SAC-3	2.6		7.8	719	9.6	1.073
SAC-4	5.8		9.2	724		
SAC-5	9.4		7.8		1.8	576
SAC-6	14.4		5.6		4.3	848
SAC-7	6.6		8.0	735	5.4	
SAC-8	22.4		4.6	667		
SAC-9	17.4		10.6	1.123	5.1	491
SAC-10	3.8					
SAC-11	15.9	399	4.3	707		
SAC-12	4.5		6.3	693		
SAC-13	11.6	485	13.4	1.097	1.0	751
SAC-14	11.4		7.0		11.7	597
SAC-15	8.7	115	17.9	715	3.7	493
SAC-16	9.6	692	5.4	706	3.4	517
SAC-17	9.6	433	9.4	503	3.8	414
SAC-18	13.8	407	6.2	730		
SAC-19	16.3	418	8.2		2.5	730
SAC-20	8.5	411				
SAC-21	7.0		9.9	723	2.1	502

Tabla 4.2 Resultados de los módulos de rigidez del suelo pruebas estáticas de cono.

Sondeo	Profundidad m.	Prueba de cono E Kg/cm <sup>2</sup>	Prueba de placa.E Kg/cm <sup>2</sup>
PCA-1	0.90	209	
	1.00		1042
	1.40		191
	1.60	395	
PCA-2	0.90	77	
	1.00		1057
	1.60	210	516
	0.90	519	
PCA-3	1.00		596
	1.60	234	1724
	1.00	235	667
PCA-4	1.60	137	399
	1.00		10
PCA-5	1.00	482	710
PCA-5'	1.60	415	1005
	1.00	102	619
	1.50		440
PCA-6	1.60	220	
	0.60		112
PCA-7	1.00	589	
	1.60	504	

Tabla 4.3 Resultados de los módulos de rigidez del suelo, pruebas de placa y conos superficiales.

En las muestras que se obtuvieron de los pozos a cielo abierto se determinaron las siguientes propiedades: Clasificación visual, al tacto, límites de consistencia, granulometría por mallas, densidad de sólidos y peso volumétrico.

Para diseñar la mezcla de suelo-cemento se estudiaron tres proporcionamientos de cemento 2.4 y 6 % en peso, los ensayos fueron de granulometría por mallas, valor cementante, prueba de compactación próctor estándar, durabilidad (ciclos de saturación y secado) y compresión simple, con los resultados obtenidos se obtuvieron los parámetros de resistencia, de deformabilidad y de durabilidad.

En la siguiente gráfica se muestran los módulos de rigidez de cada uno de los proporcionamientos a la edad de 28 días para 2, 4 y 6% de cemento.

Con la información obtenida de los trabajos de exploración, pruebas de campo y de laboratorio se definieron las condiciones estratigráficas y geotécnicas que a continuación se describen.

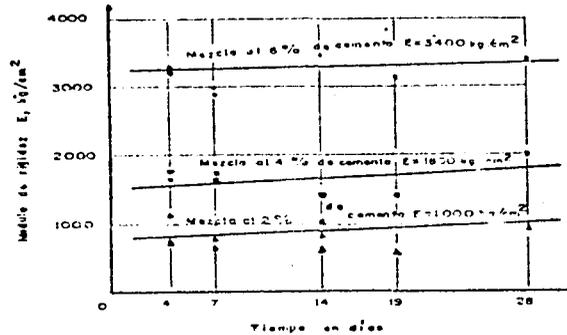


Fig. 4.10 Gráfica del módulo de rigidez del suelo-cemento.

#### Rellenos.

Material heterogéneo producto de la explotación de la mina de color gris y café rosado, constituido principalmente por arenas arcillosas, con gravas, fragmentos de roca y boleos. La forma de las partículas es semiangulosa, el relleno se compactó al 90% próctor estándar. El ángulo de fricción interna del material es de  $30^{\circ}$ , el módulo de rigidez calculado por cono dinámico y prueba de placa es de  $418 \text{ Kg/cm}^2$ . La proporción de arcillas es del orden de un 40%.

#### Conglomerado.

Esta formado por arenas arcillosas que empaqueta gravas, algunos boleos y fragmentos de roca de grandes dimensiones. El material se encuentra compactado y cementado, también tiene una cohesión de  $10 \text{ Ton/m}^2$ , el ángulo de fricción interna es de  $40^{\circ}$ , y el módulo de rigidez es de  $687 \text{ Kg/cm}^2$ .

#### Toba limosa.

Este material es de color café, con algunas gravillas, de cementación variable entre mediana y buena, la cohesión es media de  $15 \text{ ton/m}^2$  y un ángulo de fricción interna de  $20^{\circ}$ .

#### Roca andesítica.

Roca de color gris claro, que presenta un fracturamiento espaciado entre 10 y 15 cm. Los módulos de rigidez se muestran en la tabla 4.2.

El espesor del relleno en el corte A-A' se incrementa hacia el cuerpo de agua y hacia la laguna de regulación DGCOII, y varía entre 7 y 22 m.

El espesor del conglomerado presenta una forma sinuosa y describe dos valles hacia el cuerpo de agua y la laguna, su espesor oscila entre 4.0 y 10.0 m.

El espesor del relleno en el corte transversal B-B' varía de 4.0 a 16.0 m aumentando en la zona del cuerpo de agua, y disminuyendo en la dirección SE, el espesor del conglomerado varía entre 6.0 y 8.0 m.

#### **4.2.2 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO.**

El terreno se localiza en una zona baja entre la prolongación Reforma y la carretera México-Toluca, su topografía corresponde a la de un lomerío suave y con un desnivel de 20.0 m como máximo en el sentido longitudinal.

El centro comercial consta de 160000 m<sup>2</sup> de construcción y 49000 m<sup>2</sup> de estacionamiento. El desarrollo está dividido en 5 tiendas, un hotel, un Mall y un estacionamiento techado. Todas las estructuras son de 4 y 5 niveles. Los edificios están estructurados con muros y losas macizas de concreto reforzado con claros que varían entre 6.8 y 9.2 m. Para la construcción del centro comercial se conformaron terrazas a diferentes elevaciones, mediante rellenos granulares compactados, con alturas que varían entre 5 y 20 m .

#### **4.2.3 ANALISIS DE CIMENTACION.**

Los resultados que se obtuvieron de los trabajos de exploración del suelo, y las características estructurales de los edificios, se estudiaron 5 alternativas de cimentación que a continuación se describen.

##### **a) Zapatas corridas apoyadas en relleno granular compactado al 90% próctor estándar.**

Una ventaja que tiene esta alternativa es que no modifica el proyecto de las terrazas pero la capacidad admisible del terreno de cimentación es baja 7.0 Ton /m<sup>2</sup> y los asentamientos son de 8 cm. con distorsiones angulares de 0.009, resulta que lo imposibilita para su utilización.

##### **b) Zapatas corridas apoyadas en relleno granular compactado al 95 % próctor estándar.**

Al igual que la anterior no se modifican los niveles de las terrazas. La capacidad de carga es de 12 Ton /m<sup>2</sup> , los asentamientos diferenciales son de 5 cm., con distorsiones angulares de 0.005. Debido a los aumentos del contenido de agua, puede sufrir incrementos en su deformabilidad y disminución de su resistencia.

**c) Zapatas corridas apoyadas sobre una losa de suelo-cemento con un espesor de 3 m.**

Una ventaja es que se aprovecha el material para alcanzar los niveles del proyecto, la capacidad de carga es de 20 Ton /m<sup>2</sup>, los asentamientos son de 2 cm. y las distorsiones son menores a 0.002, un inconveniente es que a la hora de hacer el tendido de la mezcla y la compactación puede ser susceptible al agua.

**d) Pilotes de punta hincados a percusión.**

Estos se colocan en el conglomerado, su capacidad de carga es buena y los asentamientos diferenciales son despreciables. Pero una desventaja es que con la presencia de boleos y bloques de roca al hincarse el pilote presentarían retrasos en el programa de obra.

**e) Pilas Coladas "in situ".**

Al igual que la anterior se apoyan en el conglomerado, tienen una muy buena capacidad de carga, y asentamientos diferenciales casi nulos. Uno de los problemas que se tendría al atravesar los boleos y bloques de roca es que los rellenos no son muy estables de tal modo que se hubieran requerido ademes metálicos, al igual que la alternativa anterior presentaría retrasos en el programa de obra.

La cimentación que seleccionó se debió a la siguientes características.

- Heterogeneidad de los rellenos.
- Espesor mínimo del relleno 5.0 m compactado al 90 % próctor estándar.
- Cantidad de arcilla del relleno es de 40% y esto se vuelve susceptible a los aumentos del contenido de agua ya que provocaría una disminución de la resistencia y aumento de la deformabilidad del suelo.
- El tipo de cimentación que se seleccionó fue el de las zapatas corridas en dos direcciones desplantadas sobre una capa de suelo-cemento de 3 .0m de espesor.
- El ancho mínimo de las zapatas es de 0.90 m.

La losa de suelo-cemento es de un espesor de 3.0 m y con una mezcla de suelo-cemento agua, colocada en capas y compactada a 95 % próctor estándar, el proporcionamiento es del 4 %.

El suelo esta constituido por una arena arcillosa (SC) que es producto de la explotación de la mina, con las siguientes fórmulas se puede conocer la capacidad de carga del suelo y son:

$$\begin{aligned} qu &= qurF'd \\ qur &= Nq + 1/2B'N \end{aligned}$$

Donde:

$qu$  = Capacidad de carga última en la losa de suelo-cemento en Ton /m<sup>2</sup> .

$qur$  = Capacidad de carga última para el relleno compactado al 95 % próctor estándar en Ton /m<sup>2</sup>

$Nq$  = Esfuerzo efectivo al nivel de desplante, 8.1 Ton /m<sup>2</sup>

$B$  = Ancho de la zapata en m.

$N_q, N_c$  = Factores de capacidad de carga, para un ángulo de fricción interna del relleno de  $30^\circ$   
 $F_d$  = Factor por distribución de esfuerzos.  
La capacidad última de suelo-cemento es igual a  $250 \text{ Ton/m}^2$  el valor que se obtuvo se revisó considerando un mecanismo de falla por penetración de la zapata.  
 $q_c = (F'c)^{1.2}$

Donde,

$F'c$  = Resistencia a la compresión simple del suelo, la probeta de suelo-cemento  $40 \text{ Kg/cm}^2$ .

La presión última fue de  $360 \text{ Ton/m}^2$  que fue mayor a la resultante de capacidad de carga de  $250 \text{ Ton/m}^2$ .

Se consideraron las siguientes características para determinar la carga admisible del suelo.

- 1.- Presiones transmitidas al relleno inferiores a  $15 \text{ Ton/m}^2$ .
- 2.- Heterogeneidades del suelo-cemento con el material constituido.
- 3.- Distorsiones angulares admisibles, y condiciones estáticas y sísmicas de  $20$  y  $25 \text{ Ton/m}^2$ .

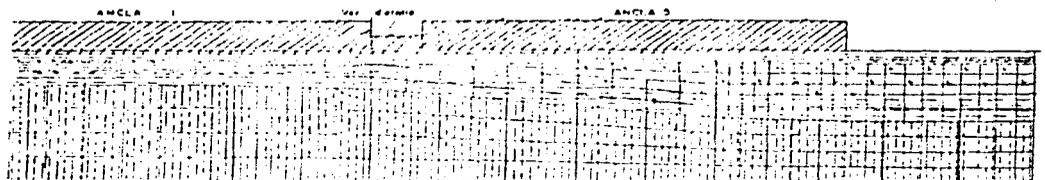
El diseño se revisó de acuerdo con el reglamento de construcción del Distrito Federal, el cual exige que la carga sea menor a la capacidad de carga de las zapatas considerando el factor de resistencia, manteniendo los márgenes de seguridad requeridos.

Los asentamientos totales y diferenciales se calcularon por medio de la técnica de elementos finitos, tomando en cuenta un comportamiento de los materiales elástico lineal y haciendo un análisis de deformación plana.

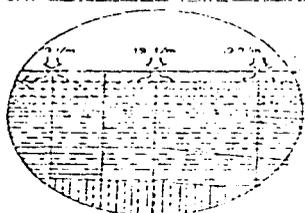
Con los datos obtenidos del módulo de Young ( $E$ ) módulo de rigidez y la relación de Poisson, se supuso la homogeneidad de los materiales.

En las figuras siguientes se presenta la malla de elementos finitos de los cortes A-A' y B-B'. Con este modelo se calcularon los hundimientos del corte A-A' entre ancla y ancla.

El máximo asentamiento fue de  $1.75$  y las distorsiones angulares  $0.001$ .



Corte a - a'

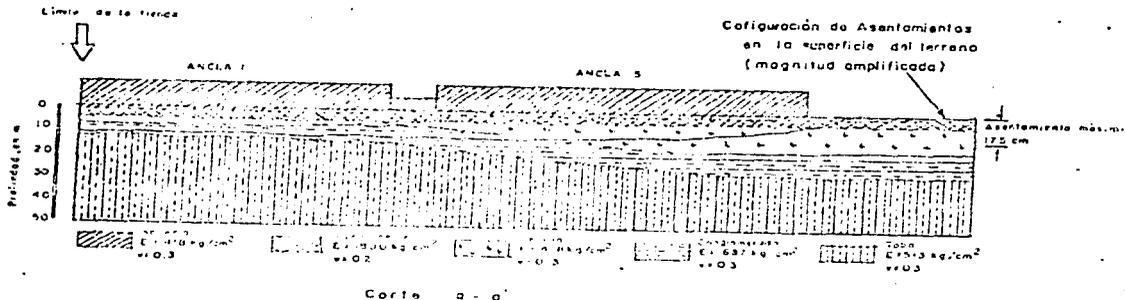


Detalle  
 Repleno al 95%  
 Fracción Estándar

DETALLE

-  Repleno  
 $E = 110 \text{ kg/cm}^2$   
 $v = 0.3$
-  S. de arena  
 $E = 200 \text{ kg/cm}^2$   
 $v = 0.3$
-  Repleno  
 $E = 110 \text{ kg/cm}^2$   
 $v = 0.3$
-  Concreto  
 $E = 2070 \text{ kg/cm}^2$   
 $v = 0.3$
-  Tapa  
 $E = 510 \text{ kg/cm}^2$   
 $v = 0.3$

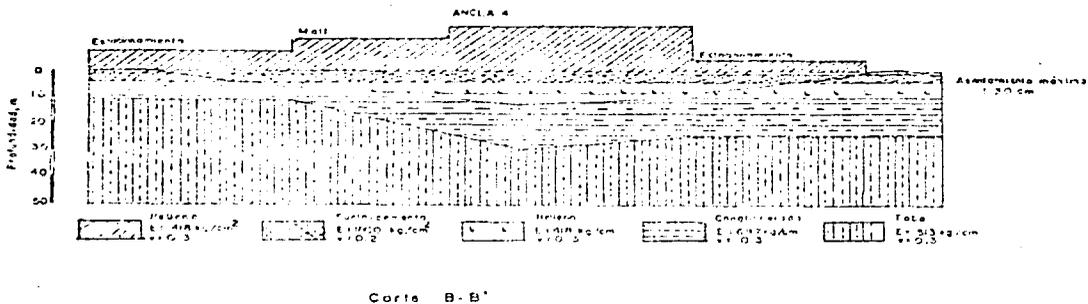
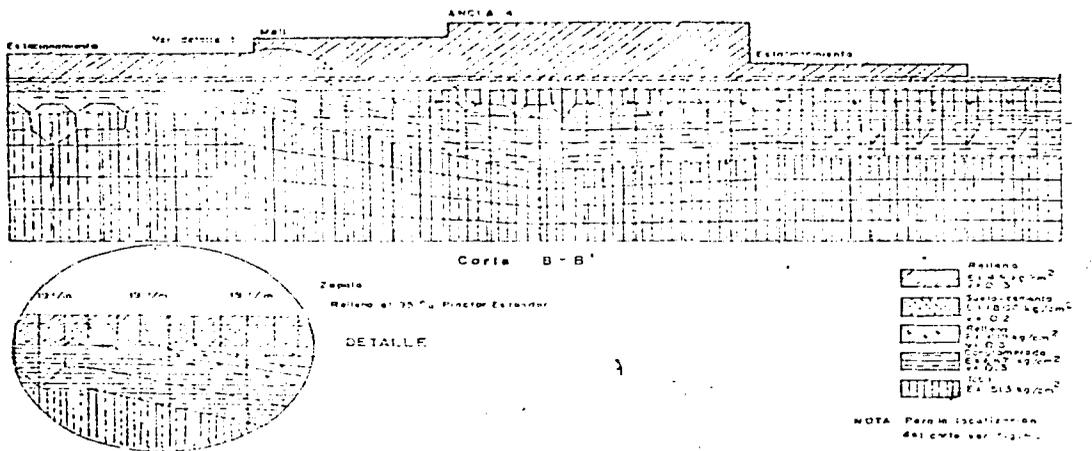
NOTA: Para la localización en planta del corte ver fig. 4.9



Corte a - a'

Fig. 4.11 Hundimiento en superficie del corte A-A'.

Del corte B-B' el asentamiento máximo y las distorsiones angulares fueron menores a 0.001.



Figs 4.12 y 4.13 Hundimientos en superficie del corte B-B'.

Para diseñar la cimentación estructuralmente, se recomendó utilizar el modulo de reacción de 8.0 Kg /cm<sup>2</sup>, que se definió a partir de análisis de hundimientos, se considero que las distorsiones angulares entre las columnas fuera de 0.002 y el coeficientes sísmico de 0.032 que corresponde al de la zona de transición.

#### **4.2.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CIMENTACION.**

- Se compacta el conglomerado areno-arcilloso en capas de 30 cm. de espesor hasta alcanzar el 95 % próctor estándar utilizando un rodillo vibratorio, y el contenido de agua óptimo del 2 % .

La mezcla se prepara en el sitio, seleccionando un lugar adecuado para los volúmenes a colocar, y se procede de la siguiente manera:

- Cargar, acarrear y tender el material areno-limoso en el sitio de mezclado.
- Cuantificar el material.
- Cuantificar la cantidad de cemento, requerido acarrear el cemento, colocarlo sobre la capa tendida.
- Mezclar el suelo y el cemento, utilizando una motoconformadora o un cargador frontal hasta que adquiera un color uniforme.
- Se agrega la cantidad de agua necesaria libre de impurezas para alcanzar el contenido óptimo y cuidando que no excede del 2 %.
- Se mezcla de nuevo el material en forma continua hasta que adquiera un color uniforme y el agua se aprecia uniformemente distribuida.
- Se prepara diariamente cierto volumen de mezcla, y su colocación no debe de exceder de tres horas.
- Se carga la mezcla en unidades de acarreo para su transporte al sitio de colocación.
- Se tiende el material en el área preparada, formando una capa horizontal y con el espesor suelto.
- Se compacta la capa de la mezcla hasta alcanzar el 95 % próctor estándar, la compactación se hizo con rodillos de pata de cabra o con rodillos neumáticos.
- Se escarifica ligeramente para evitar planos de deslizamiento horizontales, y permitir además la adherencia con la capa siguiente.
- Se inspecciona la superficie para verificar la uniformidad de la compactación y se efectúan las calas para determinar el grado de compactación.
- La compactación y la escaificación se deben hacerse en un lapso de dos horas contadas a partir de la colocación de la mezcla.
- El curado se efectúa después de la compactación de cada capa, esta se efectúa por medio de riegos de agua o con algún procedimiento que se determine en la obra, tomando en cuenta el tiempo necesario para ello, y si se hace con riego se debe de tener cuidado para no erosionar la superficie y los taludes mientras se hace el curado, mientras tanto se hace otra mezcla para la capa siguiente.
- Se forman juntas verticales a cada 15.0 m con el fin de impedir que se generen agrietamientos por contracción durante el fraguado, las juntas se cortan en cada capa y se delimitan tramos entre ellas para la colocación de la mezcla. Después de que se corta la junta se rellena con cemento asfáltico de No. 6 caliente. En los tramos de juntas frías la construcción se programa en capas completas sin interrumpir las operaciones respectivas en lapsos de tres horas.

- Después de terminar la construcción de la losa y de los rellenos superficiales para alcanzar los niveles de planta baja se inicia la excavación hasta alcanzar una profundidad de 1.3 a 1.5 m .
- Se coloca una plantilla de concreto de 5 cm. de espesor.
- Se coloca el armado y se cuellan de las zapatas y con las trabes.
- Y por ultimo los espacios comprendidos entre las contratraves y paredes de las excavaciones se rellena con el material que se extrajo y se coloca en capas de 20 cm. y se compactan hasta alcanzar el 95 % próctor estándar.
- Se recomienda la construcción de un respaldo permeable para evitar empujes hidrostáticos debidos a la acumulación de agua en los materiales contenidos por el muro. El respaldo se fabrico con concreto con partículas menores a 0.074 mm. , este a su vez descarga a un colector horizontal, que esta formado por un tubo perforado de asbesto-cemento de 15 cm. de diámetro, que esta conectado al sistema de drenaje general del centro comercial.

#### **4.2.5 CONCLUSIONES.**

De acuerdo con los estudios geotécnicos que se realizaron al terreno y el análisis de cimentación que se le realizo a este se decidió por la cimentación de zapatas corridas desplantadas a una profundidad de 1.3 m desplantadas sobre una losa de suelo-cemento con tres metros de espesor, el porcentaje del cemento es del 4 % y compactado al 95 % próctor estándar.

Con esta solución se optimizaron los aspectos técnicos y económicos y esto se debe a los resultados que se obtuvieron del análisis de la cimentación con respecto a los aspectos técnicos.

- la capacidad de carga se diseño para las zapatas en condiciones estáticas es de 20 Ton /m<sup>2</sup> y de 25 Ton /m<sup>2</sup> .
- El coeficiente sísmico para el diseño de las estructuras debe de ser igual 0.32 , este valor corresponde a la zona de transición.
- Los hundimientos fueron de tipo elástico e inferiores a 2.0 cm. durante la construcción de la obra.
- La distorsión entre las columnas serán menores a 0.002 .

Esto indica que la cimentación por la que se optó es mejor que las alternativas a y b, ya que la capacidad de carga es mayor.

Con respecto al aspecto económico, esta alternativa resultó ser más benéfica en cuestión de costos de obra, esto se debió a que las alternativas d y e serian mas costosas al ser hincado el pilote o la pila ya que a la hora de atravesar los boleos y los bloques de roca se atrasaría el programa de obra y esto significa que habría perdidas de dinero y tiempo.

## **CONCLUSIONES.**

- La construcción de estructuras de suelo-cemento ofrece una opción que puede presentar grandes ventajas económicas y de plazos de ejecución respecto a otras alternativas convencionales.
- La utilización de equipos normales en la construcción de caminos facilita la ejecución de los trabajos.
- Es necesario tener un estricto control de la calidad en obra, verificando la dosificación adecuada del cemento y en especial en la humedad de la mezcla.
- la mezcla de suelo-cemento se puede aplicar en cualquier tipo de suelo en comparación con otros tipos de estabilizaciones a excepción del asfalto.
- La mezcla de suelo-cemento mejora el comportamiento mecánico del suelo, disminuyendo la porosidad y la plasticidad y a su vez aumentando la resistencia y la durabilidad.
- El contenido de cemento, la homogeneidad y la edad en la mezcla son factores que hacen crecer la resistencia a la tensión al igual que la resistencia a la compresión simple.
- Esta mezcla puede ser reforzada con aditivos como por ejemplo la cal, que puede ayudar a que el suelo-cemento sea mas trabajable.
- El contenido de materia orgánica y de sulfatos reduce la acción cementante de la mezcla así como la resistencia.
- Las propiedades que modifica esta mezcla son:
  - Estructura interna.
  - permeabilidad.
  - Resistencia a la compresión
  - Rotura.
  - Resistencia al desgaste.
  - Cambios volumétricos.

Estas propiedades dependen de la naturaleza del suelo, las cantidades de cemento, agua, la edad de la mezcla y la hidratación del cemento compactado, curado y acabado.

- Para obtener buenos resultados se debe de trabajar en forma coordinada entre el constructor, proyectista, el laboratorio de campo y los asesores geotécnicos.
- Esta tecnología se puede utilizar en cualquier tipo de obra es por eso que resulta ser una herramienta versátil.

## BIBLIOGRAFIA

- Juárez Badillo, E. Rico " Mecánica de Suelos" Tomo I Ed. Limusa, México, D.F. 1990.
- Fernández Loaiza, C. " Mejoramiento y Estabilización de Suelos" Publicación interna de la Secretaría de Obras Públicas de México Ed. Limusa México D.F. 1975.
- Rico Alfonso y Del Castillo Hermilo. "La Ingeniería de Suelos en las vías terrestres" Ed. Limusa México, D.F. 1990.
- Manuel Torrente, Luis Saquís. " Estabilización de Suelos, Suelo-Cemento" Ed- Técnicos Asociados, Barcelona 1968.
- Ing. Avitia, C. Rodolfo. "Suelo-Cemento. Publicación del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, D.F. 1973.
- Simposio Experiencias Geotécnicas en la zona del Poniente del Valle de México. Publicación de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F. 1992.
- XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Inovaciones en Geotécnica. Publicación de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F. 1990.
- Soil Cement Laboratory Hand Book Portland Cement Association, 1970.
- Sowers B George, Sower F George " Mecánica de suelos y Cimentaciones" Ed. Limusa. Méx. 1975.