

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE  
GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA



ESTABILIZACION DE ARENA POMEZ ROSADA PARA  
SU USO EN BASE Y SUB-BASE DE CARRETERAS

**TESIS**

Presentada a las autoridades de la  
Junta directiva de la Facultad de Ingeniería  
de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Por

**Oscar Fernando Ortiz Guzmán**  
Al conferirsele el título de  
**Ingeniero Civil.**

Guatemala Abril de 1,996

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

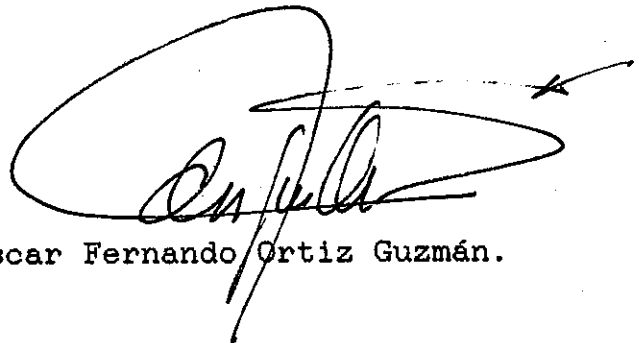
08  
T(3716)  
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración mi trabajo de tesis titulado:

"ESTABILIZACION DE ARENA PÓMEZ ROSADA PARA SU USO EN BASE Y SUB-BASE DE CARRETERAS"

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil el 25 de octubre de 1,994.



Oscar Fernando Ortiz Guzmán.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO: ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK  
VOCAL PRIMERO: ING. MIGUEL ANGEL SANCHEZ GUERRA  
VOCAL SEGUNDO: ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLORZANO  
VOCAL TERCERO: ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRIA MENDEZ  
VOCAL CUARTO: BR. FREDDY RODRIGUEZ QUEZADA  
VOCAL QUINTO: BR. MARIO NEPHTALI MORALES SOLIS  
SECRETARIO: ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LOPEZ

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO: ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK  
EXAMINADOR: ING. FRANCISCO JAVIER QUINONEZ DE LA CRUZ  
EXAMINADOR: ING. GUIDO ALBERTO GANDDINI VILLAMAR  
EXAMINADOR: ING. BUENAVENTURA CORONADO CASTILLO  
SECRETARIO: ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LOPEZ



Guatemala, 10 de Diciembre de 1994

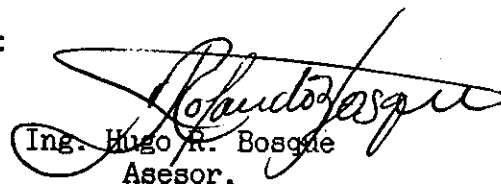
Ingeniero Javier Quifiones  
Coordinador del Área de Materiales,  
Escuela de Ingeniería Civil,  
Facultad de Ingeniería.

Estimado ingeniero

Por este medio le informo a usted que he revisado el trabajo de tesis del estudiante **Oscar Fernando Ortiz Guzmán**, el que lleva por título: "**Estabilización de arena Pómez Rosada para su uso en base y sub-base de carreteras**"; trabajo realizado en la sección de mecánica de suelo, en el cual se desarrollaron todos los análisis correspondientes.

Deseo manifestarle, que aunque no se encontraron los valores deseados, dicho documento si brinda un pequeño aporte en las investigaciones de estabilización de suelos.

Atentamente:

  
Ing. Hugo R. Bosque  
Asesor.

Guatemala,  
10 de marzo de 1,995

Ingeniero Jack Douglas Ibarra,  
Director de la Escuela  
de Ingeniería Civil,  
Facultad de Ingeniería.

Señor Director;

Tengo el agrado de informarle que he revisado el trabajo de tesis **ESTABILIZACION DE ARENA POMEZ ROSADA PARA SU USO EN BASE Y SUB-BASE DE CARRETERAS**, desarrollado por el estudiante universitario Oscar Fernando Ortiz Guzmán, quien contó con la asesoría del Ingeniero Hugo R. Bosque.

El trabajo fué desarrollado de manera experimental en el Centro de Investigaciones de Ingeniería. Considero que cumple con los objetivos para los cuales fué planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Francisco Javier Quiñónez  
Coordinador Área de Materiales



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Hugo Rolando Bosque Morales y del Jefe del Area de Materiales Ing. Francisco Javier Quiñónez, sobre el trabajo de tesis del estudiante Oscar Fernando Ortiz Guzmán, titulado ESTABILIZACION DE ARENA POMEZ ROSADA PARA SU USO EN BASE Y SUB-BASE DE CARRETERAS, da por este medio su aprobación a dicha tesis.

Ing. ~~Jack Douglas Ibarra Solórzano~~



Guatemala, mayo de 1,995

JDIS/bbdeb.



## FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de tesis titulado ESTABILIZACION DE ARENA POMEZ ROSADA PARA SU USO EN BASE Y SUB-BASE DE CARRETERAS, presentado por el estudiante universitario Oscar Fernando Ortiz Guzmán, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK

DECANO



Guatemala, mayo de 1,995

# AGRADECIMIENTO

A DIOS

A MIS PADRES:

Juan Pablo Ortiz

María Natividad Guzmán

A MIS HERMANOS:

Juan José, Yolanda, Carlos, y Marta

Con mucho cariño y agradecimiento por su apoyo  
moral.



## **RECONOCIMIENTO**

Al personal del laboratorio de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, por las atenciones y observaciones en el desarrollo del area experimental del presente trabajo.

A los ingenieros Hugo Rolando Bosque Jefe de la Sección de Mecánica de Suelos, por su asesoría, y Javier Quiñones Coordinador del Area de Materiales, quien hiciera las revisiones de este trabajo de tesis.

# INDICE GENERAL

Página:

Hipótesis.....	I
Objetivos.....	II
Introducción.....	III
CAPITULO I ENSAYOS DE LABORATORIO.....	1
1.1 descripción geológica de la arena pómez.....	1
1.1.2 Localización del banco de material.....	2
1.2 Ensayos para su uso en carreteras.....	2
1.2.1 Límites de consistencia o Límites de Atterberg.....	2
1.2.1.1 Límite líquido (L.L.).....	3
1.2.1.2 Límite plástico (L.P.).....	3
1.2.1.3 Índice de plasticidad (I.P.).....	3
1.2.2 Gravedad específica.....	3
1.2.3 Análisis granulométrico.....	4
1.2.3.1 Granulometría por vía seca.....	5
1.2.3.2 Análisis granulométrico por la vía húmeda.....	6
1.2.3.3 Análisis granulométrico por método del hidrómetro.....	7
1.2.4 Ensayo de compactación Próctor.....	10
1.2.5 Ensayo de capacidad soporte CBR.....	11
1.2.6 Prueba de mojado y secado.....	13
1.2.7 Equivalente de Arena.....	23
1.2.8 Tabla general de resultados.....	25
CAPITULO II TEORÍA DE ESTABILIZACION.....	27
2.1 Estabilización de suelos.....	27
2.2 Estabilización por medio de cal.....	27
2.2.1 Estabilización y Modificación.....	27
2.3 Estabilización por medio de yeso.....	30
2.4 Estabilización con cemento Portland.....	31
2.4.1 Tipo de suelo para los cuales es apropiado su uso.....	33
CAPITULO III VARIABLES ANALIZADAS.....	35
3.1 Las variables de estabilización.....	35
3.1.1 Elaboración de las probetas.....	35
3.1.1.1 Cilindro tipo A.....	35
3.1.1.2 Cilindro tipo B.....	36
3.1.2 Variación del porcentaje de estabilizador.....	36
3.1.3 Variación del contenido de humedad.....	37
3.1.4 Variación de la energía de compactación.....	37
3.1.5 Variación de la escala de la probeta.....	38
CAPITULO IV RESULTADOS OBTENIDOS.....	39
4.1 Resultado de la variación del estabilizador.....	39
4.2 Resultado de la variación del % de humedad.....	41
4.3 Resultado de la variación de la compactación.....	42
4.4 Resultado de la variación del tamaño de probeta.....	43
CAPITULO V ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	44
5.1 Influencia del % de humedad.....	44

5.2 Efecto de la compactación en las probetas.....	45
5.3 Variación en el tamaño de las probetas.....	46
5.4 Resultados de la prueba de mojado y secado.....	47
5.5 Resistencia máxima obtenida.....	47
CAPITULO VI ANALISIS DE COSTOS.....	49
6.1 Integración de costos para una base y sub-base.....	49
6.2 Comparación de costos entre estabilizar o transportar material.....	53
Conclusiones.....	54
Recomendaciones.....	57
Bibliografía.....	59
Anexos.....	62

## HIPOTESIS

El material analizado, en su estado natural no reúne los requisitos para ser empleado en la construcción de bases y sub-bases. Es viable entonces la estabilización empleando para ello los aglutinantes cemento, yeso, y cal. El resultado del proceso no sólo brindará un estabilizante que induzca en el material las características exigidas por la norma aplicada en Guatemala, sino también el costo de dicho proceso será inferior a importar material que si reúna las propiedades exigidas, supuesto verificable por medio de un análisis de costos.

## II

### OBJETIVOS

#### OBJETIVO GENERAL:

Aprovechar por medio de un proceso metodológico materiales propios del lugar para su empleo en la construcción de bases y sub-bases de carreteras, considerando que son de fácil adquisición como es el caso de la Arena Pómez Rosada.

#### OBJETIVO ESPECIFICO:

Someter al material Arena Pómez Rosada a los ensayos de laboratorio necesarios y en base a ello, considerar su uso en base y sub-base de carreteras según normas aplicadas en Guatemala.

En el caso de no cumplir especificaciones del libro de Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la cámara Guatemalteca de la construcción, proceder con la estabilización y de esta manera mejorar sus condiciones físico-mecánicas.

## INTRODUCCION.

La construcción de una carretera es una obra de ingeniería que no solo une dos puntos geográficos, sino que sus implicaciones abarcan lo técnico y lo económico, la tecnología necesaria para proyectarla, y los fondos para desarrollarla. Estos dos parámetros deben sopesarse para preparar un diseño acorde con las necesidades a cubrir; ninguno de los dos ha de ser preponderante, pues una excesiva reducción de costos puede propiciar deficientes carreteras con un mantenimiento correctivo costoso y molesto para los vehículos cuando se lleva a cabo. Por otro lado diseños desproporcionados a las necesidades de las comunidades a las que se pretende servir, encarecería tanto el proyecto tornándolo irrealizable.

Si se considera que Guatemala es el resultado de formaciones volcánicas, materiales como el aquí analizado se encuentra esparcido por distintos lugares del país, y por lo tanto presente en muchos proyectos carreteros, el acondicionamiento de dichos materiales presenta ventajas económicas por cumplir con una regla básica: la utilización de materiales propios del lugar.

El proceso de acondicionamiento es la estabilización y entre sus bondades se encuentra abaratar costos evitando la importación de otros materiales que llenen los requisitos deseados. Hacia este objetivo se encamina el presente trabajo; a determinar un

#### IV

estabilizante óptimamente económico con apego a las normas. Las variables consideradas pretenden recrear las condiciones que en el proceso de estabilización en campo se puedan presentar. Se han listado a manera de conocimiento general los renglones mas importantes a nivel de costos en la construcción de carreteras, sin embargo, la integración y análisis de costos solo se remite a la partida de Construcción de Base, y Construcción de Sub-base.

Para ello se han definido como ejemplo la amplitud de la corona, así como el espesor del pavimento para un tráfico mediano. El valor por concepto de construcción de base o sub-base, integrado en el análisis de costos, se obtuvo de las memorias de la Dirección General de Caminos.

El recuento bibliográfico aunado a las citas de normas de uso en Guatemala presenta el proceso de estabilización que no se circunscribe únicamente a este tipo de material ya que puede ser aplicado a distinta clase de material, claro esta adecuandolo a las circunstancias. La herramienta para llevar a cabo dicho proceso es la Mecánica de Suelos, de conocimiento del estudiante de ingeniería desde los primeros años de la carrera, por los que su aplicabilidad y comprensión no le representara problema, de emplearse este trabaja como documento de referencia.

De hecho la Dirección General de Caminos y las empresas que construyen carreteras en este país emplean los mismos principios

básicos para el aprovechamiento de bancos "in situ" de materiales, porque como se apuntaba, constituye una significativa reducción en costos.

No se pretende magnificar los alcances de éste trabajo de tesis, de hecho la hipótesis formulada no llegó a cumplirse como puede verificarse en el capítulo de resultados obtenidos, su verdadero valor quizá resida en la iniciativa de conjugar los conocimientos teóricos con la experiencia del personal del Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y la supervisión del Ingeniero Hugo Rolando Bosque, jefe de dicha sección; esta investigación se entrega para fortalecer la bibliografía referente al tema.



## CAPITULO I

### ENSAYOS DE LABORATORIO

#### 1.1 DESCRIPCION GEOLOGICA DE LA ARENA POMEZ

Este material proviene de depósitos formados por tefras o flujos piroclásticos, compuestos por cenizas volcánicas, producto de la intensa actividad ígnea del Terciario y Cuaternario. En su estado natural se encuentran mas o menos consolidadas, dependiendo de sus procesos de formación y consolidación, las provenientes de flujos piroclásticos pueden estar muy cementadas o soldadas, a los cuales se les acostumbra llamar rocas piroclásticas. La composición litológica de los materiales es riolítica.

El lapilli de pómez es muy común en estos materiales y está compuesto de vidrio volcánico espumoso, frecuentemente vesicular, con fenocristales de plagioclasas (oligoclasas, andesita), cuarzo y algunos minerales máficos, biotita, anfíbol (hornblenda, cummingtonita), piroxeno (hypersteno, augita, clinopiroxeno), olivino y magnetita. Además del lapilli de pómez se pueden presentar fragmentos líticos de andesita y basalto, y excepcionalmente de granito o granodiorita.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> R.V. FISHER, H.U. SCHMINCKE, Pyroclastic Rocks, USA, 1984  
página 29

### **1.1.2 LOCALIZACION DEL BANCO DE MATERIAL.**

El banco de material se localiza en la 37 calle final y avenida Aguilar Batres, zona 12 de la ciudad capital. Se ha extraído de una profundidad de 160 m. bajo el nivel de dicha calle, en el fondo de una barranca en la cual se explota material tipo selecto. La muestra es alterada, se transportó dentro de sacos de plástico hacia el Laboratorio de Suelos.

## **1.2 ENSAYOS PARA SU USO EN CARRETERAS**

### **1.2.1 LIMITES DE CONSISTENCIA O LIMITES DE ATTERBERG**

Las propiedades plásticas se estudian por medio de pruebas, que se denominan límites de consistencia o de Atterberg, por ejemplo un suelo arcilloso, con un alto contenido de agua, se comporta como un líquido, al perder agua, va aumentando de resistencia hasta llegar a tener un estado plástico fácilmente moldeable; al continuar el secado su estado es semisólido y de continuar la pérdida de agua, pasa al estado sólido. Los cambios de estado se producen gradualmente y los límites fijados arbitrariamente; se denominan límite líquido, límite plástico y límite de contracción. El primero fija el cambio entre el estado líquido y el estado plástico, el segundo entre el estado plástico y el semisólido, y finalmente; el tercero el cambio entre los estados semisólido o quebradizo y el sólido de gran resistencia.

### 1.2.1.1 LIMITE LIQUIDO (L.L.)

Es el contenido de agua de un suelo, expresado en porcentaje de peso seco, que posee una consistencia tal, que en una muestra a la que se le ha practicado una ranura, al sujetarse al impacto de varios golpes fuertes; se cierra sin que el suelo resbale sobre su apoyo. El "L.L." permite cerrar la ranura típica con 25 golpes en el aparato de Casagrande.

A mayor L.L. menor estabilidad.

A menor L.L. mayor estabilidad.

### 1.2.1.2 LIMITE PLASTICO (L.P.)

Es el contenido de agua expresado en porcentaje del peso seco, con el cual se agrieta un cilindro de suelo de 3 mm (1/8 plg) de diámetro, al rodarse con la palma de la mano sobre una superficie lisa.

### 1.2.1.3 INDICE DE PLASTICIDAD (I.P)

Es el más importante, ya que sirve para complementar la información para clasificar un suelo; y es igual a la diferencia numérica entre L.L. y L.P. o sea  $I.P = L.L. - L.P.$

La norma aplicada para este análisis es la, ASTM (D4318) límite líquido y plástico, AASHTO(T90-70) índice de plasticidad, AASHTO(T89-68) límite líquido.

Como resultado de dicho ensayo se determinó que el material es no plástico.

### 1.2.2 GRAVEDAD ESPECIFICA.

La gravedad específica es la relación entre el peso al aire libre de una determinada cantidad de suelo a una temperatura

dada, y el peso al aire libre de un volumen igual de agua destilada a la misma temperatura. Su determinación se encuentra normada por ASTM (D854-58), y la AASHTO(T100-70). Los resultados se muestran a continuación:

**TABLA 1.2.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA**

NUMERO DE PRUEBA	1	2	3
CAPACIDAD DEL MATRAZ	500 cc.	500 cc.	500 cc.
PESO MATRAZ LIMPIO SECO	180.2 gr	179.6 gr	204.8 gr
PESO MATRAZ+SUELO SECO	280.1 gr	279.2 gr	254.7 gr
PESO SUELO SECO (a)	99.9 gr	99.6 gr	50 gr
PESO MATRAZ+SUELO+AGUA(c)	733.7 gr	732.5 gr	749.7 gr
PESO MATRAZ+AGUA (b)	678.5 gr	677.3 gr	722.1 gr
TEMPERATURA DEL AGUA Co	22	22	23
GRAVEDAD ESPECIFICA= $a/(a+b-c)$	2.23	2.24	2.23

Del promedio se obtiene la  $G_s = 2.23$

### 1.2.3 ANALISIS GRANULOMETRICO

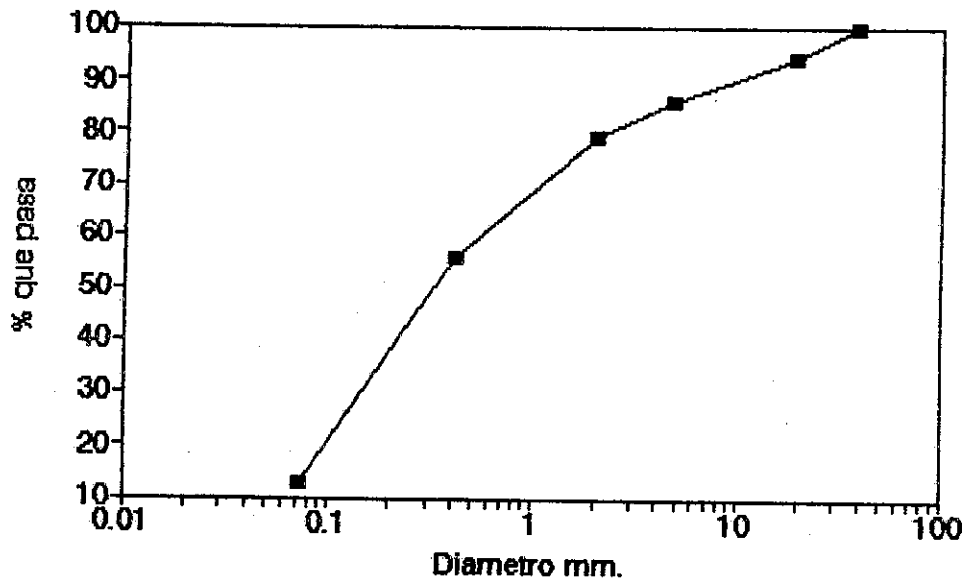
El análisis granulométrico determina las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa de suelo dada. Para obtener un resultado significativo la muestra debe ser estadísticamente representativa de la masa de suelo. Como no es físicamente posible determinar el tamaño real de cada partícula independiente de suelo, el ensayo agrupa los materiales por rangos de tamaño.

### 1.2.3.1 GRANULOMETRIA POR VIA SECA

Los rangos de tamaño, se obtienen al pasar determinada cantidad de material a través de un tamiz con una malla dada, pero que es retenido por otro cuya malla tiene diámetros menores a la anterior; se relaciona esta cantidad retenida con el total de la muestra pasada a través de los tamices, de donde se obtiene un porcentaje. El material retenido de esta forma en cualquier tamiz consiste de partículas de muchos tamaños, los cuales son menores al tamaño de la malla del tamiz en el cual el suelo fue retenido. Las normas aplicadas para este ensayo son AASHTO(T88-70) Y ASTM(D421-58) Y ASTM(D422-63). Los resultados se muestran a continuación:

## ANALISIS GRANULOMETRICO

Metodo Mecanico.



Gráfica 1.2.3.1

Grava: 14 %    Arena: 73 %    Finos: 13 %

CLASIFICACIÓN: Sistema unificado: S.M.  
Sistema P.R.A.    A-2-4

Descripción: Arena Pómez color rosado.

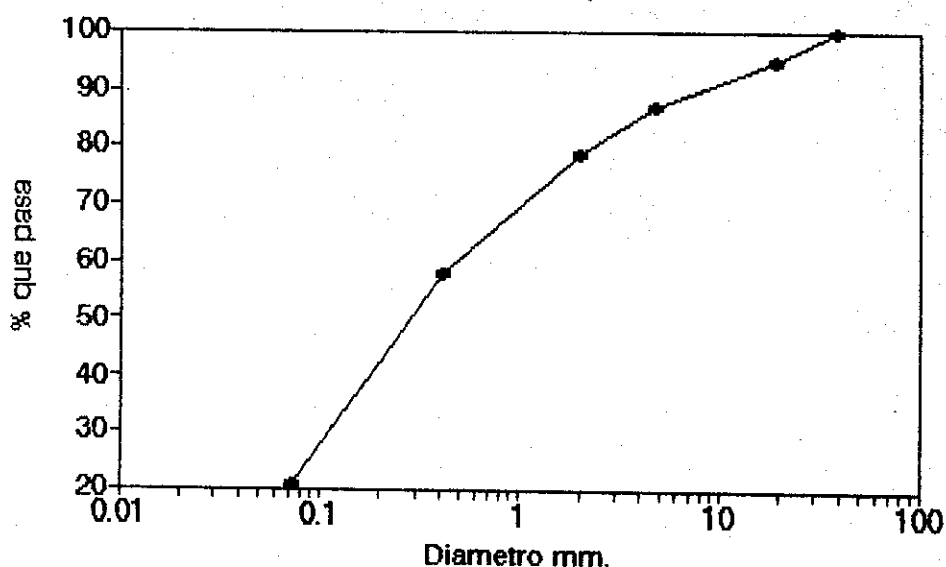
### 1.2.3.2 ANALISIS GRANULOMETRICO POR LA VIA HUMEDA

El procedimiento es tomar la muestra de suelo e inundarla con agua utilizando como recipiente el tamiz # 200; al hacer esto el polvo adherido a las particulas mayores se desprende y los grumos existentes se desintegran, dejando granos sueltos. Con ello los porcentajes de suelo retenido dentro de la serie de mallas representa mejor la distribución de tamaños. Las normas aplicadas para este ensayo son AASHTO(T11-70) Y AASHTO(T27-63). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Gráfica 1.2.3.2

## ANALISIS GRANULOMETRICO

Tamices y lavado previo



Grava: 14 %    Arena: 66 %    Finos: 21 %

CLASIFICACIÓN:

Sistema unificado: S.M.

Sistema P.R.A.    A-2-4

Descripción: Arena Pómez color rosado.

### 1.2.3.3 ANALISIS GRANULOMETRICO POR METODO DEL HIDROMETRO

El análisis de hidrómetro es un método ampliamente utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrica de suelos, cuyas partículas se encuentran desde el tamiz # 200 (0.075 mm) hasta alrededor de 0.001 mm. Los datos pueden combinarse con los datos obtenidos en el análisis mecánico del material retenido, o sea mayor que el tamiz # 200.

El principal objetivo del análisis de hidrómetro es obtener el porcentaje de arcilla (mas fino que 0.002 mm.), ya que en la curva de distribución granulométrica, cuando más del 12% del material pasa a través del tamiz #200, no es posible plotear la forma de dicha curva porque no existe ningún tipo de conducta particular del material que dependa intrínsecamente de ella. El análisis del hidrómetro utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico, tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido; todo se expresa por la ecuación de la ley de Stokes:<sup>2</sup>

$$v = (2 * P_s - P_f) / (9 * \eta) * (D/2)^2$$

v= velocidad de caída de la esfera, cm/s

P<sub>s</sub>= peso específico de la esfera (densidad\*g=masa/unidad de volumen)

P<sub>f</sub>= peso específico del fluido

η= viscosidad absoluta, o dinámico del fluido (dinas\*seg/cm o

---

<sup>2</sup> G.C. Stokes, físico Inglés dedujo en base a sus experimentos sobre resistencia a la viscosidad dicha fórmula hacia 1850.

g/seg\*cm)

D= diámetro de la esfera,cm

g= aceleración de la gravedad 980.7 cm/s<sup>2</sup>

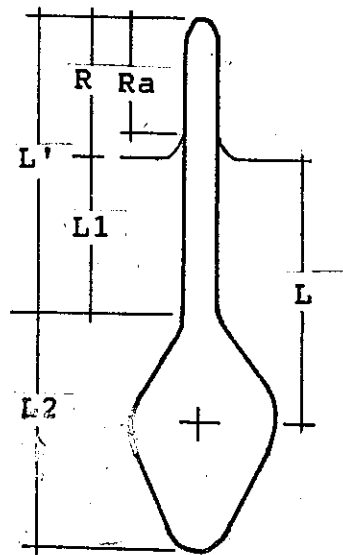
Al resolver la ecuación para el diámetro se tiene:

$$D=18*n*v/(P_s-P_t) \text{ ec. 1.2.3.3}$$

El rango de diámetros para los cuales esta ecuación es válida, es aproximadamente: 0.0002 mm.< D < 0.2 mm.

Para obtener la velocidad de caída de las partículas se utiliza el hidrómetro. Este aparato se desarrolló originalmente para determinar la gravedad específica de una solución, pero alterando su escala se puede utilizar para leer otros valores.

El hidrómetro mas usado es el 152H normado por ASTM, y está calibrado para leer "g" de suelo de un valor de  $G_s = 2.65$  en 1000 cm<sup>3</sup> de suspensión siempre que no haya mas de 60 gramos de suelo en la solución. La solución empleada es un dispersante que neutraliza las cargas negativas de las partículas finas del suelo.



$$V=L/t \text{ cm/s}$$

$$L=L1=\frac{1}{2}*(L2-V/grad)$$

$$L1=2.30 \text{ cm para } R=50$$

$$L2= 14 \text{ cm. (ASTM)}$$

$$grad= 27.8 \text{ cm}^2 \text{ para } 1000$$

ml probeta del hidrómetro

Ra= Lectura real

R-Ra corrección por menisco

Fig. 1.2.3.3 Hidrómetro estándar ASTM 150H.



El hidrómetro determina la gravedad específica de la suspensión agua-suelo en el centro del bulbo. Todas las partículas de mayor tamaño que aquellas que se encuentren aun en suspensión en la zona mostrada como L (la distancia entre el centro de volumen del bulbo y la superficie del agua), habrán caído por debajo de la profundidad del centro de volumen, y esto hace decrecer permanentemente la gravedad específica de la suspensión en el centro del volumen del hidrómetro. Como L representa la distancia de caída de las partículas en un intervalo de tiempo dado t, y la velocidad se puede definir en la ecuación de diámetro como la distancia dividida por el tiempo, la velocidad de caída de las partículas es:  $v = L/t$

Para el cálculo del diámetro, la ecuación 1.2.3.3 se reescribe comúnmente utilizando L en cm y t en minutos para obtener D en mm. como sigue:

$$D = (30 * n / (980 * (G_s - G_a)) * L / t)^{0.5} \text{ en mm.}$$

o en forma más simple como:  $D = K * (L/t)^{0.5} \text{ en mm.}$

donde  $G_s$  = gravedad específica del suelo.

$G_a$  = gravedad específica del agua.

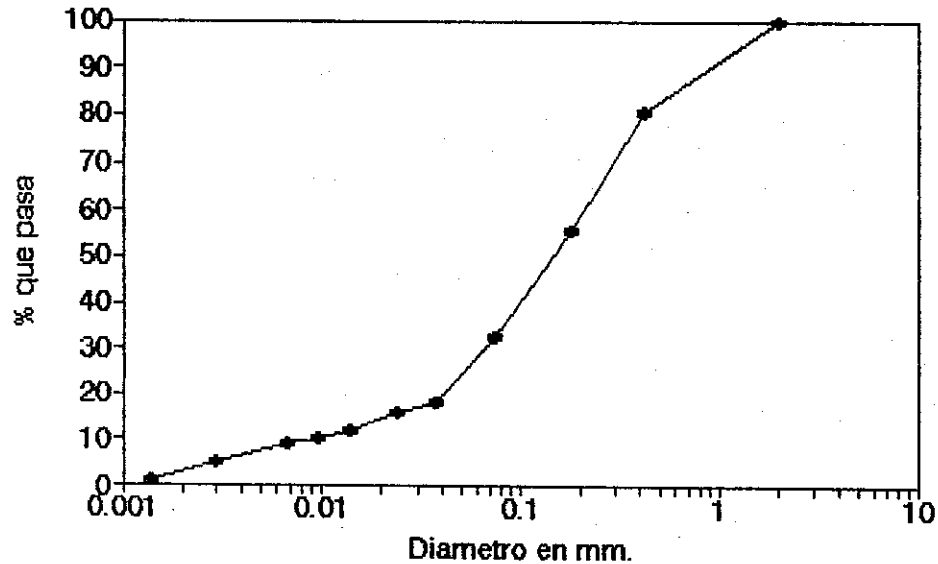
La norma aplicada para este ensayo fue ASTM D-422

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente gráfica:

Gráfica 1.2.3.3.1

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Metodo del Hidrometro



GRAVA:----- Gs.:2.23  
 ARENA:67.6 %  
 LIMOS:24.9 %  
 ARCILLAS:7.5 %

### CLASIFICACIÓN:

Sistema unificado:S.M.

Sistema P.R.A. A-2-4

Descripción:Arena Pómez color rosado.

### 1.2.4 ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR.

El ensayo de proctor permite conocer las características de compactación de un suelo: humedad óptima y densidad máxima. Existen dos tipos de análisis, el Proctor Standard, y el Proctor Modificado. Al material analizado se le aplicó el procedimiento del Proctor Standard ya que éste recrea las condiciones de compactación con maquinaria convencional en nuestro medio. Para esta prueba se emplea un molde de 1/30 de pie cúbico, y un apisonador de 5.5 libras con una altura de caída de 12 pulgadas. Se aplica el método A que considera el material de suelo que pasa

por el tamiz # 4. El ensayo está normalizado por AASHTO(T-134) y ASTM(D558).

Los resultados obtenidos de la compactación del material son los siguientes:

**TABLA 1.2.4.1 ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO**

PESO UNITARIO SECO MÁXIMO		HUMEDAD ÓPTIMA
KG/M3 1123.20	LBS/PIE3 70.20	31.00 %

**CLASIFICACIÓN:**

Sistema unificado: S.M.

Sistema P.R.A. A-2-4

Descripción: Arena Pómez color rosado.

**1.2.5 ENSAYO DE CAPACIDAD SOPORTE CBR.**

El CBR o Razón de soporte de California (California Bearing Ratio) es el método de evaluación de subrasantes, empleado en el diseño de pavimentos flexibles. Fue desarrollado por la división de carreteras de California, alrededor de 1930. En 1961, fue adoptado por la ASTM con la designación D-1883. El CBR es una medida comparativa de la resistencia del suelo en condiciones controladas de densidad y humedad. El ensayo es efectuado en una muestra de 6 pulgadas de diámetro, y 5 pulgadas de espesor (de suelo inalterado o compactado en el laboratorio), confinada dentro de un cilindro de metal. Antes de la prueba, la muestra es inundada, con el objeto de simular las condiciones más desfavorables de humedad que pudieran ocurrir en el campo. Seguidamente, se hace penetrar en la muestra, un pigton de 1.95 pulgadas de diámetro, a velocidad controlada, anotando las

lecturas de carga correspondiente a diferentes profundidades de penetración. El CBR es la carga requerida para producir una penetración determinada, expresada en porcentaje de la carga requerida para producir la misma penetración en una muestra standard de piedra triturada.

$$\text{CBR} = \frac{\text{(Carga a una penetración dada)}}{\text{(Carga standard a la misma penetración)}} * 100$$

TABLA 1.2.5.1 CARGA STANDARD PARA VALOR SOPORTE CBR.

CARGA STANDARD	PENETRACION PULGADAS				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
LIBRAS	3000	4500	5700	6100	7800
LIBRAS/PLG2	1000	1500	1900	2300	600

El valor de CBR de un suelo es el que corresponde a 0.1 o 0.2 pulgadas de penetración, el que sea mayor. Para la mayoría de los suelos, el valor a 0.1 pulgadas de penetración suele ser el mayor. El ensayo de CBR puede efectuarse en casi todo tipo de suelo, desde arcilla, hasta grava fina (material menor de 3/4 pulgada). La norma utilizada para este ensayo fue ASTM D-1883-78. El resultado aplicado al material es el siguiente:

TABLA 1.2.5.2 ENSAYO DE VALOR SOPORTE CBR.

PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	HUMEDAD ÓPTIMA %	VALOR SOPORTE CBR 95 % C.
KG/MT3 1123.20	31.00	74

#### 1.2.6 PRUEBA DE MOJADO Y SECADO.

La prueba de mojado y secado tiene por objeto determinar el grado de durabilidad que tendrá el pavimento en función de base y sub-base. Se determina en el laboratorio por medio de ciclos sucesivos de mojado y secado, así como por abrasión a los cilindros de prueba. Al final de dichos ciclos las probetas han perdido cierto porcentaje de su peso original, lo cual indicará si la mezcla de suelo-cemento es aceptable o no para su utilización en construcción de una base o sub-base. En caso negativo, debe seguirse ensayando con los mismo tipo de cilindros pero aumentando el porcentaje de cemento; hasta que el porcentaje de desgaste esté dentro de los límites recomendados. Los procedimientos para este ensayo se encuentran en las normas AASHTO(T-135) y ASTM(D-559), por los cuales se determina la pérdida de suelo-cemento, cambios de humedad y cambios de volumen (hinchamiento y contracción), todos ellos expresados en porcentaje.

Dependiendo de la gradación del suelo, se describen dos métodos para la preparación del material para las muestras moldeadas, (cilindros).

Método A: Aquí se usará material de suelo que pasa tamiz No 4. Este método será usado cuando el ciento por ciento de la muestra de suelo pase el tamiz No 4.

Método B: Se usará el material de suelo que pase el tamiz de 3/4 de pulgada, el método es válido, cuando parte de la muestra de suelo sea retenida en el tamiz No 4.

Para ambos casos se recomiendan los siguientes porcentajes de cemento<sup>3</sup> :

**TABLA 1.2.6.1 PORCENTAJE DE CEMENTO EN MIXTURAS DE SUELO-CEMENTO SEGÚN GRUPO DE SUELO.**

GRUPO DE SUELO	PORCENTAJE DE CEMENTO
A-1-a, A-1-b, A-3, A-2-4, A-2-5	14 % Mínimo
A-2-6, A-2-7, A-4, A-4	10 % Mínimo
A-6, A-7-5, A-7-6	7 % Mínimo

La muestra de suelo debe ser compactada con el porcentaje óptimo de humedad obtenido del ensayo de proctor; formando una capa próxima a las 2 pulgadas con el maso de 5.5 lb, normado para proctor standard. Es necesaria la realización de dos especímenes, uno identificado como el Número 1 y el otro como Número 2, el No. 1 es la referencia de cambio volumétrico en las condiciones extremas de humedad y temperatura. El No. 2 es la referencia de pérdida de material por abrasión. Las muestras compactadas dentro del molde de proctor se extraen por medio de un gato hidráulico, debe tenerse cuidado de no alterar las dimensiones del cilindro cuando se tome entre las manos. Ambas probetas se curan por espacio de 7 días; en una cámara de humedad; en el laboratorio no se cuenta con este dispositivo, por lo que el curado se ha llevado a cabo dentro de un tinaco de fibra de vidrio de los que

---

<sup>3</sup> Soil Cement Roads. Construction Handbook "A low cost of roads for ligh traffic use" Portlan Cement Association 6a. Edición. página 15

se emplean como depósitos de agua. Los cilindros se almacenaron dentro de bolsas de nylon.

Es necesario mencionar que la norma está concebida únicamente para mezclas suelo-cemento; sin embargo, para esta investigación se moldearon cilindros conteniendo cal, para establecer una comparación de este material al efecto abrasivo.

Una vez concluido el proceso de curado se inician los ciclos de secado y mojado que la norma fija en 12:

a) Se sumergen ambas probetas en un tanque con agua a temperatura ambiente durante 5 horas, tiempo necesario para la saturación de los cilindros.

b) El cilindro No.1 se mide y pesa,(referencia de cambio de volumen y humedad).

c) El cilindro No.2 únicamente se pesa,(referencia de pérdida de peso por abrasión).

d) Ambas probetas se colocan dentro del horno a  $160 \pm 5$  C°por un período de 42 horas.

e) Transcurrido las 42 horas de las muestras dentro del horno, se dejan enfriar al ambiente; se procede entonces a desgastar la probeta No. 2 con un cepillo de alambre. La abrasión se lleva a cabo paralelamente al eje del cilindro, siendo necesario para ello de 18 a 24 golpes de 3 libras aproximadamente de fuerza. Asimismo los lados del cilindro requirieran 4 golpes para su completa abrasión.

f) Se pesa el cilindro No 2.,se pesa y mide el Cilindro No. 1

Las partes de a) a f) constituyen un ciclo de secado y mojado.

Los resultados se grafican con la siguiente información:

- 1) Cambio del volumen de la muestra No.1 al tiempo de moldeo y volúmenes subsecuentes como un porcentaje del volumen original.
- 2) Contenido de humedad de la muestra No.1 al tiempo de moldeo y contenido de humedad subsecuente como el porcentaje del peso original seco al horno; la norma presenta los siguientes rangos:

**TABLA 1.2.6.2 PRUEBA MOJADO Y SECADO AGUA RETENIDA DESPUES DE 42 HORAS EN EL HORNO Y TIPO DE SUELO AASHTO (T-135)**

AASHTO	AL HORNO A 165 C°
A-1, A-3	1.5 %
A-2	2.5 %
A-4, A-5	3.5 %
A-6, A-7	3.5 %

- 3) Pérdida de suelo-cemento de la muestra No.2 como un porcentaje del peso original seco al horno de la muestra en la siguiente forma:

$$\text{pérdidas de suelo-cemento, por ciento} = A/B*100$$

donde:

A = peso original seco al horno calculado, menos el peso seco al horno final.

B= peso original seco al horno calculado.

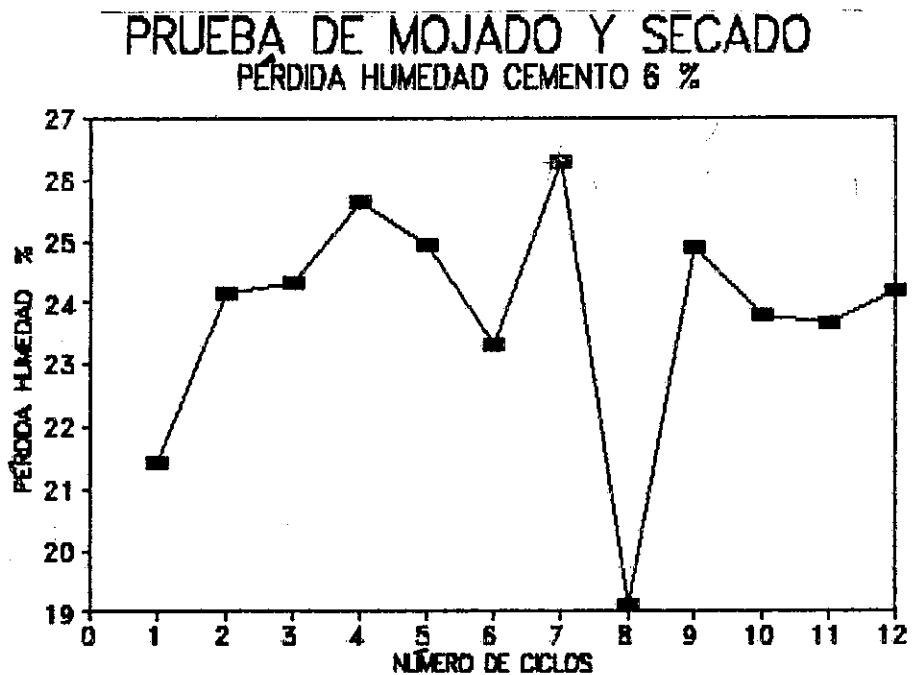
Para el tipo A-2 la tolerancia en peso es 3.0% y en volumen de 1.0%.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en forma gráfica, para los distintos especímenes de cemento y cal. Incluyen también un promedio de la variación de los valores



respecto al dato inicial, humedad, peso, volumen. Según sea el caso. Para obtener la pérdida en cada una de las variables debe restarse el valor final del inicial entre dos ciclos. Por ejemplo ciclo 2 menos el ciclo 3, ciclo 4 menos ciclo 3 etc. Dichos resultados se presentan comparativamente respecto a la norma AASHTO (T-135) en el capítulo IV.

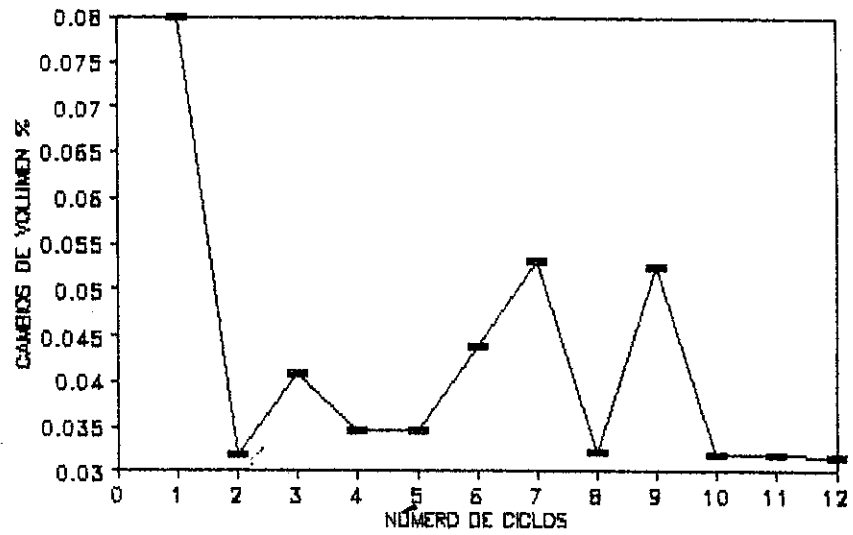
Gráfica. 1.2.6.3



PROMEDIO DE CAMBIO DE HUMEDAD: 23.80 %  
CEMENTO 6%

Gráfica. 1.2.6.4

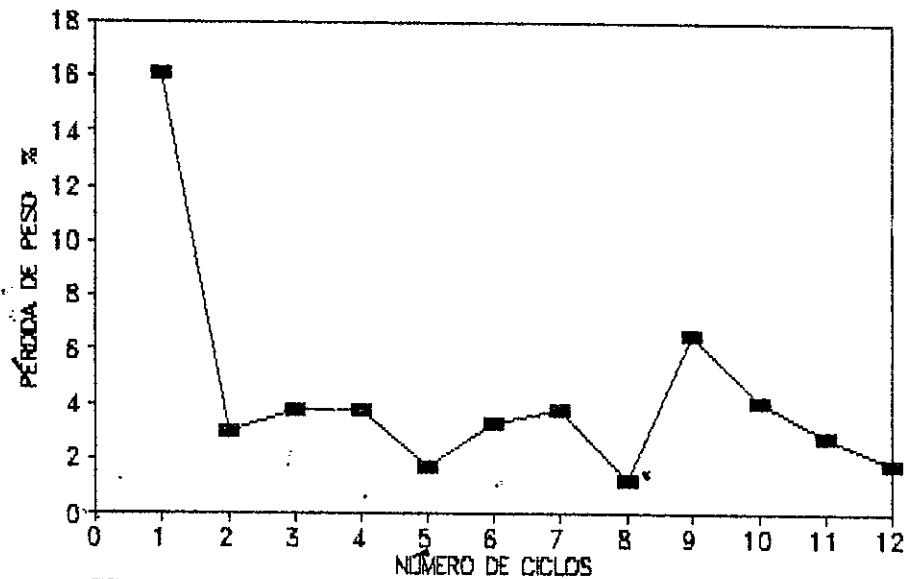
PRUEBA DE MOJADO Y SECADO  
CAMBIO VOLUMETRICO CEMENTO 6 %



PROMEDIO DE CAMBIO DE VOLUMEN: 0.040 %  
CEMENTO 6%

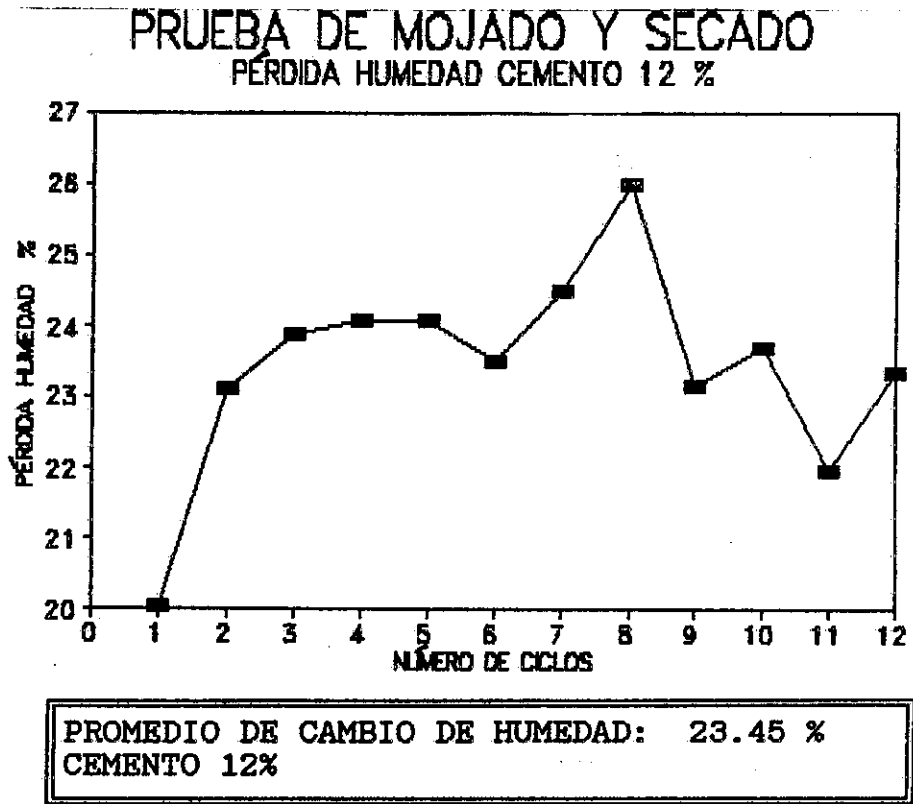
Gráfica. 1.2.6.5

PRUEBA DE MOJADO Y SECADO  
PÉRDIDA DE PESO CEMENTO 6 %

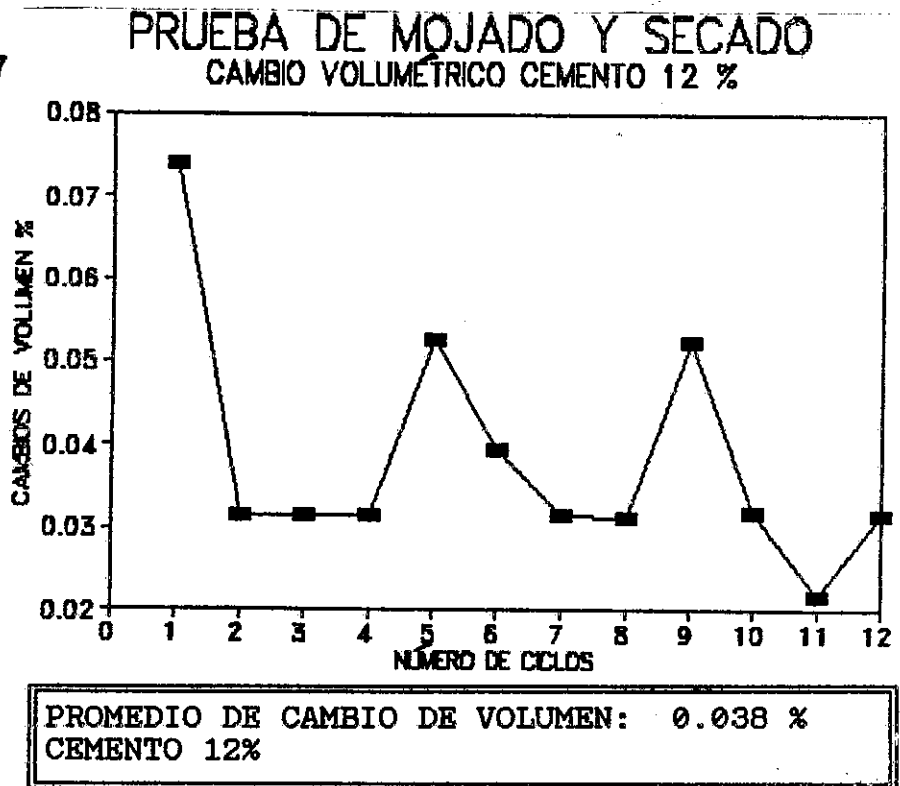


PROMEDIO DE CAMBIO DE PESO: 4.43 %  
CEMENTO 6%

Gráfica. 1.2.6.6

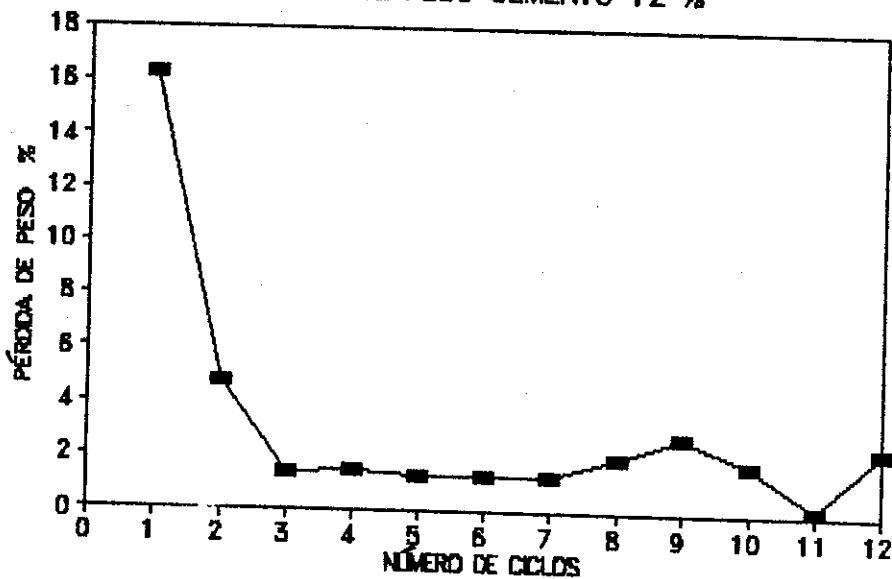


Gráfica. 1.2.6.7



Gráfica. 1.2.6.8

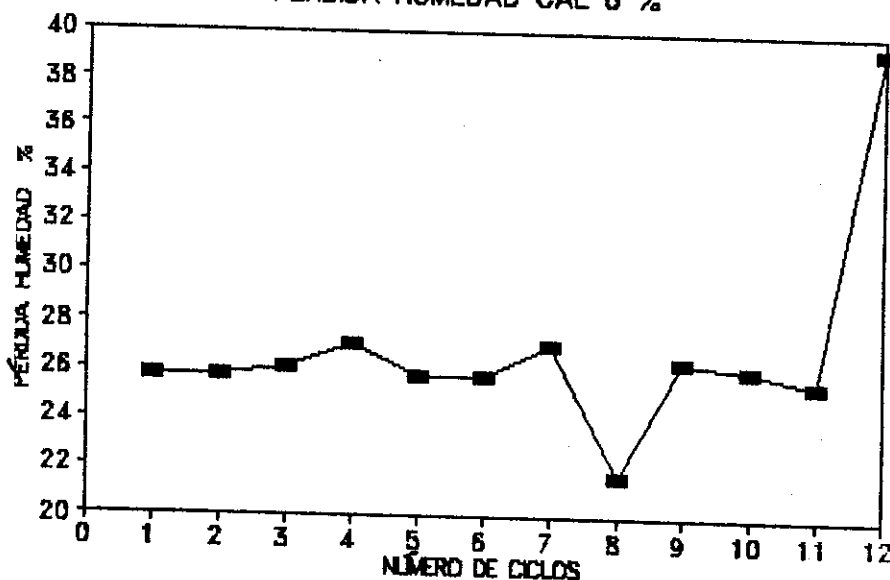
**PRUEBA DE MOJADO Y SECADO**  
**PÉRDIDA DE PESO CEMENTO 12 %**



PROMEDIO DE CAMBIO DE PESO: 3.09 %  
 CEMENTO 12%

Gráfica. 1.2.6.9

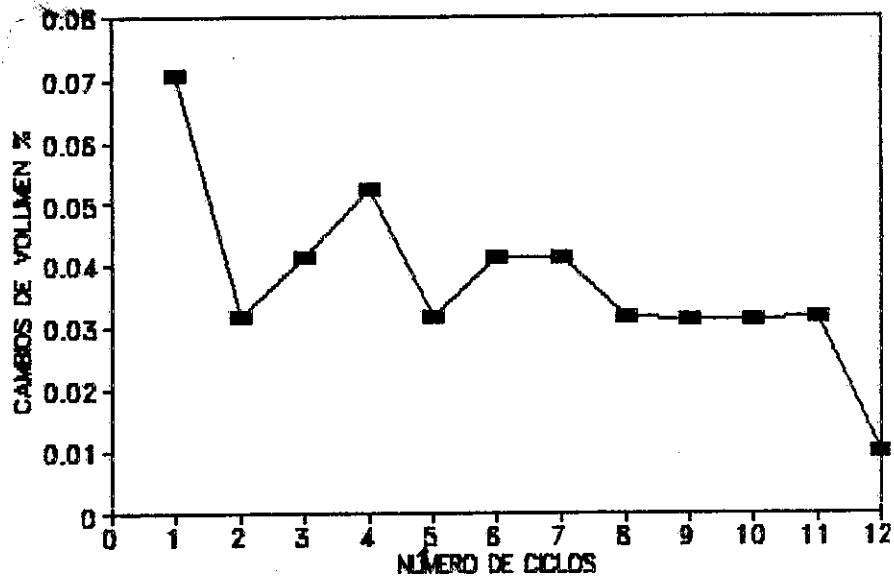
**PRUEBA DE MOJADO Y SECADO**  
**PÉRDIDA HUMEDAD CAL 6 %**



PROMEDIO DE CAMBIO DE HUMEDAD: 26.84 %  
 CAL 6%

Gráfica. 1.2.6.10

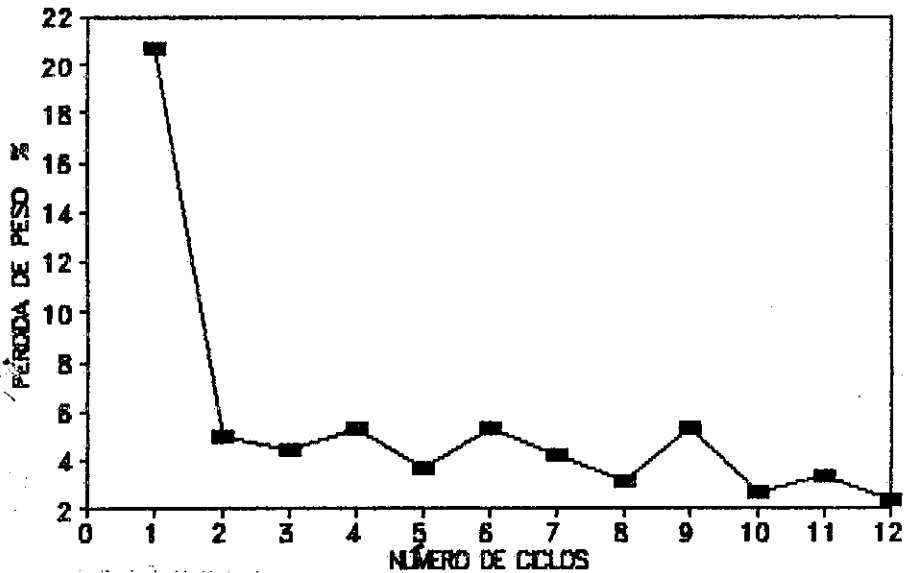
**PRUEBA DE MOJADO Y SECADO**  
**CAMBIO VOLUMÉTRICO CAL 6 %**



PROMEDIO DE CAMBIO DE VOLUMEN: 0.037 %  
 CAL 6%

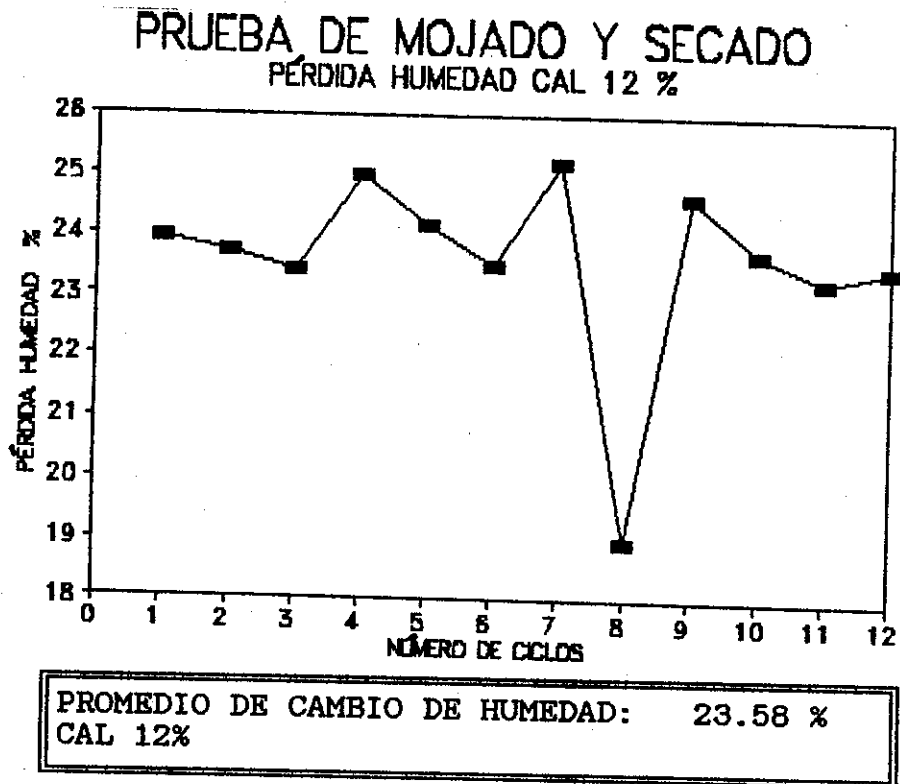
Gráfica. 1.2.6.11

**PRUEBA DE MOJADO Y SECADO**  
**PÉRDIDA DE PESO CAL 6 %**

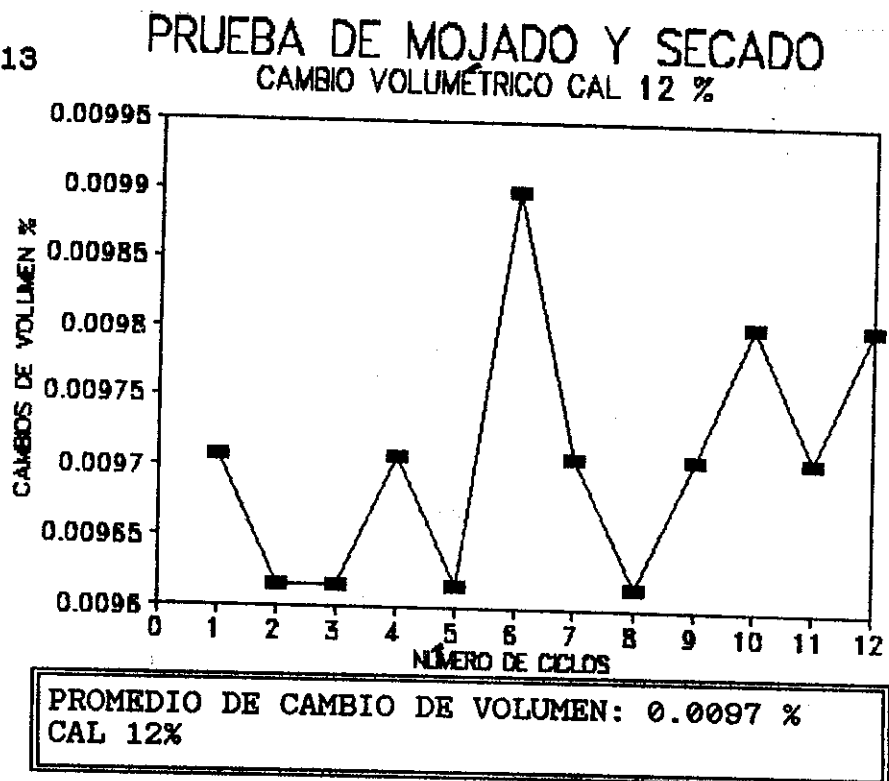


PROMEDIO DE CAMBIO DE PESO: 5.43 %  
 CAL 6%

Gráfica. 1.2.6.12

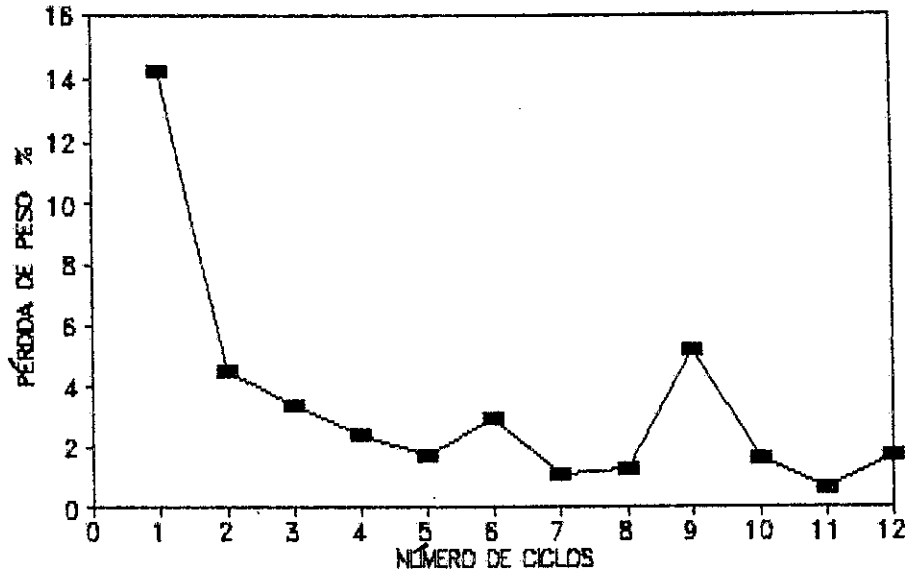


Gráfica. 1.2.6.13



Gráfica. 1.2.6.14

PRUEBA DE MOJADO Y SECADO  
PÉRDIDA DE PESO CAL 12 %



PROMEDIO DE CAMBIO DE PESO: 3.37 %  
CAL 12%

### 1.2.7 EQUIVALENTE DE ARENA.

Este ensayo se efectúa con el fin de conocer el porcentaje relativo de finos-plásticos que contienen los suelos y los agregados, pétreos; es una prueba que se puede hacer tanto en el campo como en el laboratorio. Se lleva a cabo, principalmente, en el caso de materiales que se usarán para base y sub-base. Se rige por las normas del AASHTO Standard T-176. El procedimiento es el siguiente:

- a) Debe prepararse la solución diluyente con 88 gramos de cloruro de calcio, mezclado con formaldehído y glicerina, y un galón de agua destilada.
- b) Por medio de un sifón manguera que en su extremo posee un tubo con perforaciones en la punta conocido como "cánula", se deposita dentro de una probeta de 17 pulgadas, una columna de 4 pulgadas.

- c) De 500 gramos pasados por el tamiz No. 4, debidamente cuarteados, se toman 110 gramos para la prueba.
- d) Por medio de un embudo los 110 gramos son depositados en la columna de 4 pulgadas, se recomienda golpear el fondo de la probeta para desalojar las burbujas de aire, que en el proceso se pudieron formar. Deje reposar la mezcla por 10 minutos.
- e) Se tapa la probeta con un tapón de goma, y se procede a oscilar en forma horizontal la probeta en una longitud de 8" de izquierda a derecha. Son necesarios 90 ciclos.
- f) Se asienta la probeta y con la cánula se lleva el nivel de solución a 15 pulgadas, con un movimiento vertical de fondo a tope a manera de dispersar las partículas de suelo.
- g) Finalizado el inciso f; inmediatamente active el cronómetro dejando transcurrir 20 minutos, tiempo durante el cual la probeta ha de estar en pleno reposo.
- h) La lectura de la arcilla es el nivel superior de la suspensión.
- i) para determinar la altura de la arena se introduce un peso con un fondo apisonador de forma heptagonal, éste se asienta donde las partículas de suelo soporten su peso.
- j) El equivalente de arena se obtiene con la siguiente fórmula:  
Equivalente de arena E.A.=

$$\text{Lectura de arena/lectura de arcilla} \times 100$$

Nota: los porcentajes aceptables de E.A. son:

Para bases: 30% como mínimo.

Para sub-bases: 25% como mínimo.



El resultado del ensayo para el material aquí examinado es de un E.A. = 84 %.

1.2.8 Tabla general de resultados de pruebas de laboratorio.

TABLA GENERAL DE RESULTADOS		
ENSAYO	RESULTADO	NORMA
Límites de Atteberg	LL.=0 LP.=0 IP.=0	AASHTO (T-189) LL.<25 AASHTO (T-190) I.P.< 3
Gravedad Especifica	2.23	
Análisis Granulométrico Método mecánico	Grava = 14 % Arena = 73 % Finos = 13 % tamiz 40 = 56% tamiz 200= 13%	AASHTO (T-27) TAMIZ 40< 50% TAMIZ 200<25%
Método de Tamices y Lavado Previo	Grava = 14 % Arena = 66 % Finos = 21 % tamiz 40 = 58% tamiz 200= 21%	AASHTO (T-27) TAMIZ 40< 50% TAMIZ 200<25%
Método del Hidrómetro	Grava = Arena = 67 % Finos = 25 % tamiz 40 = 80% tamiz 200= 32%	AASHTO (T-27) TAMIZ 40< 50% TAMIZ 200<25%
Compactación Proctor Estandard	Peso Unitario seco máximo 1123 kg/m <sup>3</sup> Humedad Óptima 31 %	
Equivalente de Arena	E.A.= 84 %	AASHTO(T-193) E.A.>25 %

Valor soporte C.B.R	Valor soporte CBR 95% de compactación = 74 %	AASHTO(T-193) a 95% de compactación 90 % mínimo		
Prueba de Mojado y Secado.	MEZCLA	HUMEDAD	PESO	VOLUMEN
	Cemento 6%	2.2	3.2	0.04
	Cemento 12%	1.2	1.8	0.03
	Cal 6 %	1.9	4.0	0.03
	Cal 12 %	1.7	3.3	0.09
Norma AASHTO (T-135)	TOLERANCIAS: HUMEDAD= 2.5% PESO= 3.0% VOLUMEN= 1.0%			

Se observa que el material analizado está dentro de la especificación en lo referente a límites de consistencia, de hecho no posee límites, que es más de lo que exige la norma. El análisis granulométrico revela un material de bueno a excelente para uso en bases y sub-bases, un A-2-4. Característica importante es la escasa presencia de finos, no más del 7.5 %, cosa contraria ocurre con la arena ( más del 65 %). Esta cualidad del material influirá en el proceso de estabilización como se explicará en el capítulo IV.

El problema principal en esta fase es el bajo valor CBR al 95% de compactación de 74% menor que el requerido, que es de 90 %. Por consiguiente la premisa que el material en su estado natural no reúne las características, se ha cumplido. El proceso de estabilización es aplicable. Se ha decidido de antemano elaborar las probetas de mojado y secado, siendo el espécimen de cemento al 12 % el que está dentro de todas las tolerancias, aunque las probetas de cemento 6% y cal 12 % se aproximan mucho.

## CAPITULO II

### TEORIA DE ESTABILIZACION

#### 2.1 ESTABILIZACION DE SUELOS

Es el mejoramiento de las resistencias mecánicas y de durabilidad de los suelos; la estabilidad de suelos se logra con diferentes métodos, entre los cuales están:

- Mecánicos (compactación, vibración, etc)
- Físicos (adición de material fino ó grueso)
- Químicos (adición de sales, sulfuros, cemento etc.)
- Físico-Químicos (adición de resinas, asfaltos, etc.)
- Mixtos (combinación de dos más de los métodos anteriores.)

La selección del método de estabilización más adecuado, depende de muchos factores, particularmente del tipo de suelo, el grado de estabilización requerido, el clima de la construcción, de los costos del material, y del equipo disponible.

#### 2.2 ESTABILIZACION POR MEDIO DE CAL

El empleo de la cal como un agente estabilizador data desde hace siglos, ya que los romanos, los chinos y los hindúes la emplearon en algunos casos. Sin embargo, ha sido después de la segunda guerra mundial, que se han intensificado los estudios relativos a su uso.

##### 2.2.1. Estabilización y Modificación<sup>4</sup>

En el tratamiento del suelo con cal se llevan a cabo las siguientes reacciones:

---

<sup>4</sup> "Estabilización Química de Suelos", Ingeniero Francisco Reyes Batz. Tesis Ingeniero civil USAC 1980 Capítulo 2 página 16 a 18.

- a) Intercambio Catiónico
- b) Floculación y Aglomeración
- c) Carbonatación
- d) Reacción Puzolánica

a) Intercambio Catiónico

Los agentes estabilizantes provocan la catálisis ; acción que ejercen ciertos agentes sobre la composición de otros sin sufrir ellos mismos modificación, el vehículo para que ello se realice es el intercambio de Iones. El principal objetivo de los estabilizantes es la reducción del agua absorbida o agua higroscópica, en el suelo, aumentando el número de huecos, facilitando de esta manera la compactación. El aumento o reducción del agua higroscópica es decisivo para la unión de las partículas del suelo. La catálisis, reduce el momento dipolar de la molécula de agua, que se separa en Iones hidrógeno (H+) e Iones oxhidrilo (OH-). Los Iones oxhidrilo se dividen nuevamente pudiendo quedar el hidrógeno con carga negativa o positiva. La tensión superficial en los suelos arcillosos es negativa, por lo tanto atrae hacia la superficie, a los Iones que tengan carga positiva, tales como H+ (Hidrógeno), Na+(sodio), K+(Potasio), Ca++(Calcio), etc. Estos Iones no quedan adheridos a la superficie del coloide propiamente, sino que se mantienen en equilibrio a distancias infinitesimales de ella.

b) Floculación

La adición de cal a suelos de grano fino, causa Floculación

y Aglomeración de las partículas de suelos arcillosos. Estas reacciones resultan en un aparente cambio de textura del material, aglutinandose en agregados de gran tamaño. La Floculación y la Aglomeración son afectados por el incremento de la cal en el agua Higroscópica y también como resultado de un cambio de Ion de la arcilla en forma de calcio.

c) Carbonatación:

La cal reacciona con el dióxido de carbono, dando origen a agentes cementantes relativamente débiles, tales como Carbonatos de Calcio y/o de Magnesio, dependiendo del tipo de cal usada.

d) Reacción Puzolénica:

Cuando una cantidad relativamente grande de cal, es agregada al suelo, da lugar a que exista un exceso de calcio, este calcio, incrementara el PH de la mezcla, devolviendo partículas de arcilla. Al agregar agua a la mezcla en presencia de Aluminio y Sílice, el calcio reacciona formando hidratos cristalinos de silicatos de calcio o hidratos de aluminatos de calcio, que vendrán a dar una ganancia en la resistencia tanto temprana como tardía en la mezcla Suelo-Cal. Esta reacción dependerá de la cantidad de cal que se agrega. A las reacciones a) Intercambio Catiónico y b) Floculación y Aglomeración, se les denomina de modificación y poseen características como: la reducción de la plasticidad, cambios de volumen, y aumento de la trabajabilidad. La reacción puzolénica, constituye básicamente la estabilización, y con ella se obtiene un sustancial aumento de la resistencia del suelo. En general la reacción de la cal es mejor en suelos

plásticos que contengan arcilla, arcillas de grano fino, o suelos arcillo-gravosos. En suelos que no poseen plasticidad o son inertes en presencia de la cal, se puede inducir la reacción Cal-Sílice; la presencia de las puzolanas que contienen compuestos silícicos o alumino-silícicos es suficiente para provocar dicho fenómeno.

### 2.3. ESTABILIZACION POR MEDIO DE YESOS

Pertenece a los métodos de estabilización por agentes químicos siendo el agente el sulfato de calcio. No es aplicable a todo tipo de suelo; su eficacia es mayor en elementos finos, limos y arcillas posee dos propiedades:

a) Reacciones Coloidales.

b) Alteración de las características del higroscópica del suelo.

a) Reacciones Coloidales. La estructura de las arcillas y de los limos orgánicos está constituida por pequeñísimos granos llamados geles que no poseen forma definida, que al desecarse se hacen muy aglutinantes, como ocurre con la cola de carpintero, (de ahí el apelativo de coloidales), en esta situación los coloides son capaces de absorber mucha agua. La presencia de agua produce hidratación y combinación química con los minerales que forman el suelo; el agua se separa en  $(H^+)$  e  $(OH^-)$ ; la llamada hidrólisis, y es entonces cuando se forma el complejo coloidal. Dicha agua no puede ser extraída mecánicamente, (hay películas de agua adheridas a la superficie de los coloides cuya presión en

---

<sup>5</sup> "Estabilización de Suelos" Ingeniero Jorge Solares Díaz. Tesis ingeniero civil, USAC 1978, capítulo 3. Página 35 a 37.

ocasiones sobrepasa las 10,000 atmósferas). La atracción electrostática del radical (OH-) con los Iones metálicos de Calcio en la superficie de los coloides desplaza el agua que se encuentra adherida ahí. Los (H-) liberados vuelven a reaccionar con los iones (OH-) libres, formando agua y gas hidrógeno. El agua puede profundizar por filtración o eliminarse por compactación y evaporación.

b) Alteración de las características del agua contenida en el suelo.

Las consecuencias de las reacciones coloidales son:

- Aumento de la permeabilidad del suelo por su incapacidad de absorber agua en la superficie de los coloides.
- Reducción del aumento volumétrico: consecuencia de la imposibilidad de aumentar el agua higroscópica en el suelo.

## 2.4 ESTABILIZACION CON CEMENTO PORTLAND

Las prácticas relativas a su uso se iniciaron en el año de 1917, cuando J.M. Aimes patentó un procedimiento de mejoramiento del suelo en base a mezclarles proporciones variables de cemento tipo Portland. Existen dos tipos de reacciones durante el proceso de la estabilización con cemento Portland:

a)Modificación

b)Estabilización

a)Modificación

El proceso que se lleva a cabo en la mezcla suelo-cemento,

es más mecánico que químico, por lo que la modificación con cemento no es muy importante ni se usa para suelos finos ya que se requerirán porcentajes muy altos de cemento, caso contrario a los que sucede con la cal. Un suelo modificado con cemento, es aquel que ha sido tratado sin llegar al endurecimiento, reduciendo su plasticidad, decreciendo el contenido de humedad y la capacidad de cambios de volumen, además de incrementar su valor soporte y su resistencia a corte. La modificación con cemento está clasificada de acuerdo al tamaño de los granos predominantes y se divide en dos grupos:

a.1) Modificación de suelos granulares: los suelos granulares no aptos para base de pavimentos por su alto índice plástico, o por tener una graduación muy pobre, pueden modificarse con cemento Portland para reducir o eliminar su plasticidad y para incrementar su valor soporte hasta el punto de que sea aceptable su uso en base y sub-base.

a.2) Modificación para suelos finos: la modificación de suelos arcillo-limosos incrementa el valor soporte o resistencia, reduce la plasticidad ( LL decrece y el LP se incrementa), reduce los cambios de volumen, e incrementar la trabajabilidad. Su uso es aceptado para base de pavimentos, subbase para pavimentos de concreto y de suelo-cemento, etc.

#### b) Estabilización

Al igual que en el caso de la cal, la literatura existente sobre la mezcla suelo-cemento trata o menciona únicamente a la estabilización, ya que se supone en ésta se reúnen las dos



reacciones, la modificación del suelo, y su endurecimiento.

La estabilización es básicamente un fenómeno físico, es una reacción puzolánica en la que los elementos silícicos y los aluminosos reaccionan con los componentes cálcicos para formar elementos cementantes.

#### 2.4.1 Tipo de suelo para los que es apropiado su uso.

El cemento puede utilizarse en casi cualquier tipo de suelo, aunque su uso no siempre resulta económico, ya que cada tipo requerirá distinta cantidad de cemento para su estabilización, operación que es complicada por las variaciones de la naturaleza del terreno, y frecuentemente no queda otro recurso que mezclar las diferentes clases de suelos, para reducir a un mínimo los cambios en el material antes de proceder a su estabilización. La materia orgánica puede interferir con la hidratación de cemento. También es nociva la presencia de sulfatos de Calcio, y de magnesio, además de sustancias ávidas al agua, pues privan a los aglomerantes de la humedad necesaria para su función.

Sus características mínimas son:

- a) Límite líquido < 50%
- b) Límite plástico < 18%
- c) El material que pase al tamiz #. 200 debe ser menor que el 50%
- d) El contenido de materia orgánica, no mayor de 1-2% en peso.

La tabla 1.3.3.1 muestra el % de cemento respecto al tipo de suelo y la resistencia no confinada esperada:

TABLA 2.4.1 DE CONTENIDO DE CEMENTO EN PORCENTAJE.<sup>7</sup>

TIPO DE SUELO	PORCENTAJE DE CEMENTO
GRAVAS	5 - 10
ARENAS	7 - 12
SEDIMENTOS	12 - 15
ARCILLAS	12 - 20

TABLA 2.4.1.2 RESISTENCIA ESPERADA DE ACUERDO AL TIPO DE SUELO.  
(Compresión simple)<sup>8</sup>

TIPO DE SUELO	KG/CM2
Arcilla plástica, Suelo orgánico	< 3.51
Limo, Arcilla-Limosa, Arena mal graduada	3.51-10.5
Arcilla-Limosa, Arcilla-Arenosa, Arena, Grava	7.0- 14.6
Arena-Limosa, Arcilla-Arenosa, Arena, Grava	17.6-35.1
Arena-Arcillosa, bien graduada, Grava-Arena	28.1-105

<sup>7</sup> Cámara Guatemalteca de la construcción. D.G.C. Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes". Mayo 1975 Ingenieros Consultores de C.A. Páginas 306-05 Capa base estabilizada con cemento Portland.

<sup>8</sup> Cámara Guatemalteca de la construcción. D.G.C. Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes. Mayo 1975 Ingenieros Consultores de C.A. Páginas 306-05 capa base estabilizada con cemento Portland.

## CAPITULO III

### VARIABLES ANALIZADAS

#### 3.1 LAS VARIABLES DE ESTABILIZACION

##### 3.1.1 ELABORACION DE LAS PROBETAS

###### 3.1.1.1 Cilindro tipo A Norma Francesa<sup>9</sup>

El molde empleado para la elaboración de los especímenes es un cilindro circular recto de 2 pulgadas de diámetro y 4 pulgadas de alto. Se utiliza la densidad del Proctor Standard, por lo que la energía de compactación ha de ser la misma. La energía de compactación de proctor standard es:

$$Esp = N * n * W * h / Vo.$$

donde:

N = número de golpes por capas.

n = número de capas, (en este caso igual a 3).

W = peso del martillo; para Proctor Standard igual a 5.5 libras.

h = Altura de caída libre; para Proctor Standard igual a 12 pulgadas.

Vo. = Volumen del Molde; para Proctor Standard igual a 1/30 de pie<sup>3</sup>

Igualando las energías del Proctor Standard y de la probeta se despeja el número de golpes que son necesarios para que la probeta tenga la densidad máxima de Proctor:

$$E_{proctor} = (25 \text{ golpes/capa}) * (3 \text{ capas}) * 5.5 \text{ lbs} * 12'' / (1/30 \text{ pie}^3)$$

---

<sup>9</sup> LCPC-SETRA Directive pour la réalisation des assises de chaussées en graves traités aux lians hydrauliques. Traducido por Dr. Rodolfo Hernandez. Paris. Francia, 1983.

$$E_{\text{probeta}} = N_{\text{golpes}} \cdot (3 \text{ capas}) \cdot (5 \text{ libras}) \cdot (12'') / (\text{volumen } 2'' \times 4'')$$

$$E_{\text{proctor}} = E_{\text{probeta}}$$

$$N_{\text{golpes}} = 5.46 \text{ golpes/capa} = 6 \text{ golpes/capa}$$

### 3.1.1.2 Cilindro tipo B Norma ASTM(D698)

La norma aplicada es la referente al Proctor Standard por ser el molde de  $1/30$  de pie<sup>3</sup>, el que se ha utilizado para compactar el suelo a humedad óptima y moldear la probeta. Las dimensiones que ésta posee al sacarla del molde; por medio de un gato hidráulico son, 4 pulgadas de diámetro y 5 pulgadas de altura. Por supuesto la energía de compactación es la del Proctor Standard o sea 25 golpes por capa siendo necesarias 3 capas para llenar el molde.

### 3.1.2 VARIACION DEL PORCENTAJE DE ESTABILIZADOR

En base a las consideraciones del tipo de suelo, así como el tipo de reacción esperada a nivel de la cementación que el material puede llegar a formar se ha decidido tomar en cuenta las siguientes proporciones de estabilizador :

**TABLA 3.1.2 VARIACION DE PORCENTAJE DE ESTABILIZADOR**

Material	%	Edades de Curado (Días)
Yeso	3, 6	7, 14, 28, 56
Cemento	6, 12	7, 14, 28
Cal	3, 6	7, 14, 28, 56

Probeta Tipo A, todos los especímenes.

### 3.1.3 VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

Los efectos de cementación varían de acuerdo al tipo de aglutinante probado, por ejemplo la presencia de agua entre los granos de suelo y el cemento es primordial para la formación de la gel de dicho aglomerante; de igual forma lo es para la cal, y en cierto grado lo es para el yeso. Para determinar el efecto que el contenido de humedad tiene sobre las mezclas se ha procedido a incrementar el % humedad óptima en 10 % de la siguiente forma:

**TABLA 3.1.3 VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD**

Material	Humedad	Edades de Curado (Días)
YESO	Opt+10%	7, 14, 28
CAL	Opt+10%	7, 14, 28

Probeta tipo A. todos los especímenes.

### 3.1.4 VARIACION DE LA ENERGIA DE COMPACTACION.

Al incrementar la energía de compactación por medio de aplicar mas golpes con el martillo de 5.5 lb, el espacio intersticial entre los granos de suelo se reducirán aun más, teniendo como efecto la exudación de la probeta y por consiguiente cierta pérdida de humedad. Se tomó la determinación de aplicar variación energética a las probetas de suelo-cemento, puesto que los primeros especímenes de yeso y cal a los que se intentó dar este tratamiento perdían sus respectivos estabilizantes a través de la exudación. La información se resume a continuación:

**TABLA 3.1.4 VARIACION DE LA ENERGÍA DE COMPACTACION EN PROBETAS ESTABILIZADAS CON CEMENTO Y HUMEDAD ÓPTIMA**

Energía de Compactación En número de golpes	% Cemento	Edades de Curado (Días)
6 golpes ( 3 capas )	6	7, 14, 28
	12	7, 14, 28
9 golpes ( 3 capas )	6	7, 14, 28
	12	7, 14, 28
12 golpes ( 3 capas )	6	7, 14, 28
	12	7, 14, 28

Probeta tipo A. todos los especímenes.

### 3.1.5 VARIACION DE LA ESCALA DE LA PROBETA.

La concentración de esfuerzos, está siempre presente en la prueba Compresión axial sin confinamiento. Factores como, la exentricidad de la carga respecto al centroide de la muestra, imperfecciones en la fabricación de ésta, velocidad de la carga; producen esfuerzos cortantes en las cercanías de las bases de la probeta; por efecto de poisson, se inducen deformaciones transversales que son críticas al centro del elemento. Todo ello coadyuva para que se produzca una falla frágil, conocida como "falla del reloj de arena". Si se amplifican las dimensiones de la base de la probeta el efecto se reduce. El aparente incremento de la resistencia en las muestras de diámetro mayor, es producto de la esbeltez del cilindro. Al determinar el factor de esbeltez, se halló un valor promedio para la condición de esfuerzo comprensivo. Las dimensiones de los cilindros son las que se mencionan en el inciso 3.1.1.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS OBTENIDOS

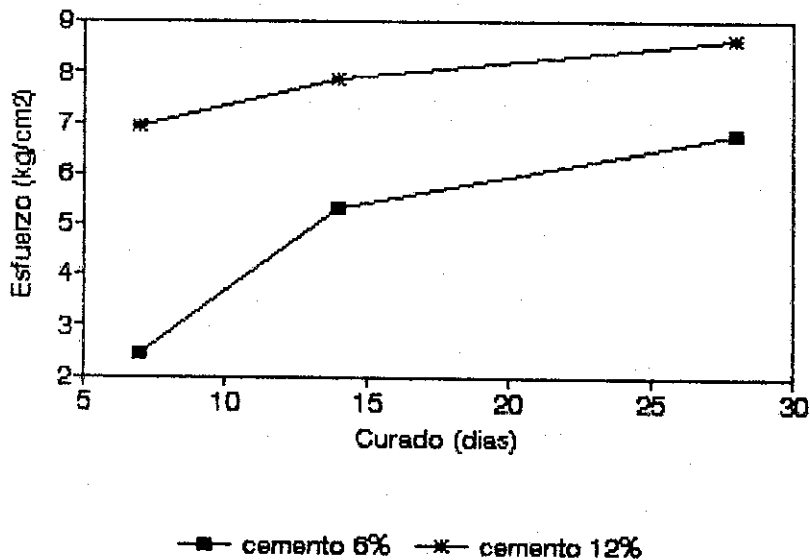
A continuación se presenta en gráficas el comportamiento de los especímenes luego de su respectivo periodo de curado; la cantidad de agente estabilizador y el grado de compactación a través de la variación de energía.

#### 4 . 1 V A R I A C I O N D E L ESTABILIZADOR: Cemento, Yeso, Cal.

Gráfica 4.1.1

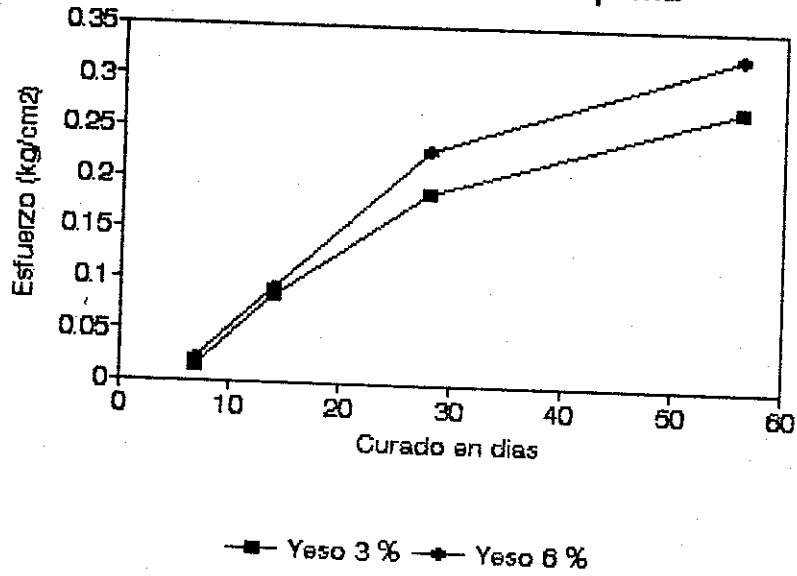
### COMPRESION NO CONFINADA

Probeta tipo A Humedad optima



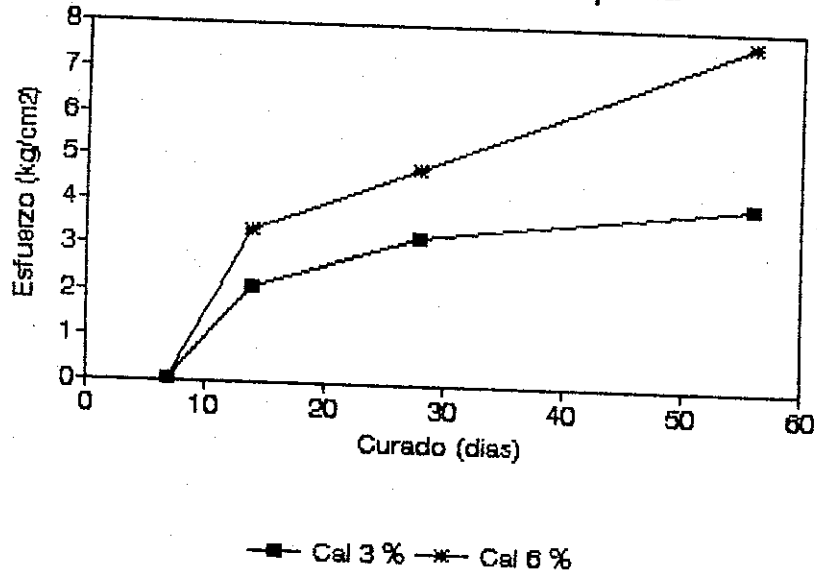
Gráfica 4.1.2

### COMPRESION NO CONFINADA Probeta tipo A Humedad optima



Gráfica 4.1.3

### COMPRESION NO CONFINADA Probeta tipo A Humedad optima



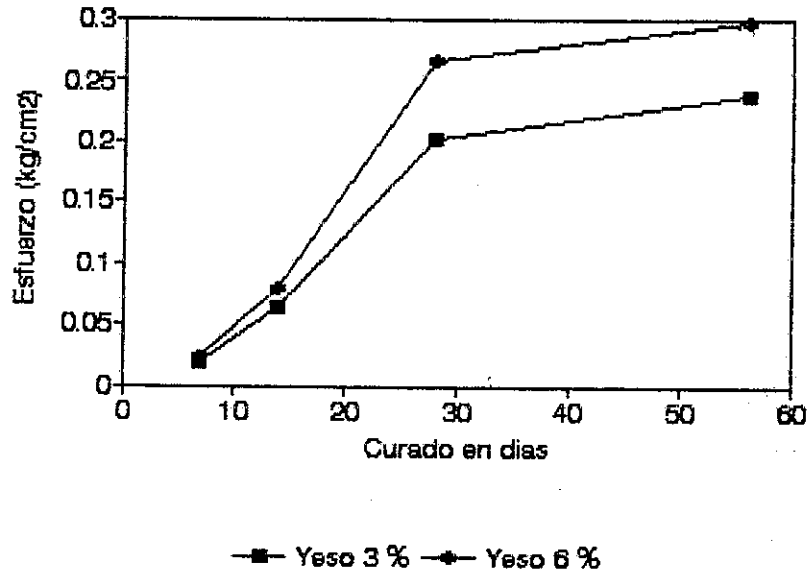


## 4.2 VARIACION DEL % DE HUMEDAD.

Gráfica 4.2.1

### COMPRESION NO CONFINADA

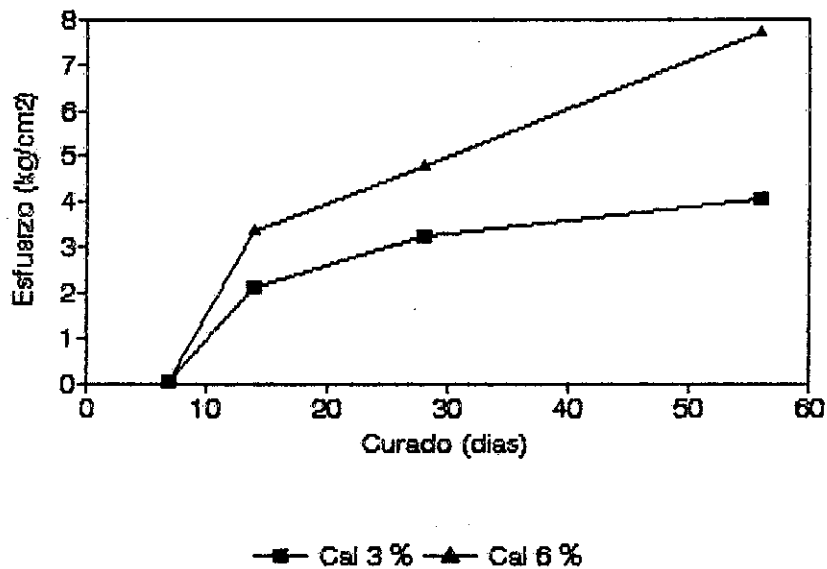
Probeta tipo A Humedad optima + 10%



Gráfica 4.2.2

### COMPRESION NO CONFINADA

Probeta tipo A Humedad optima + 10%

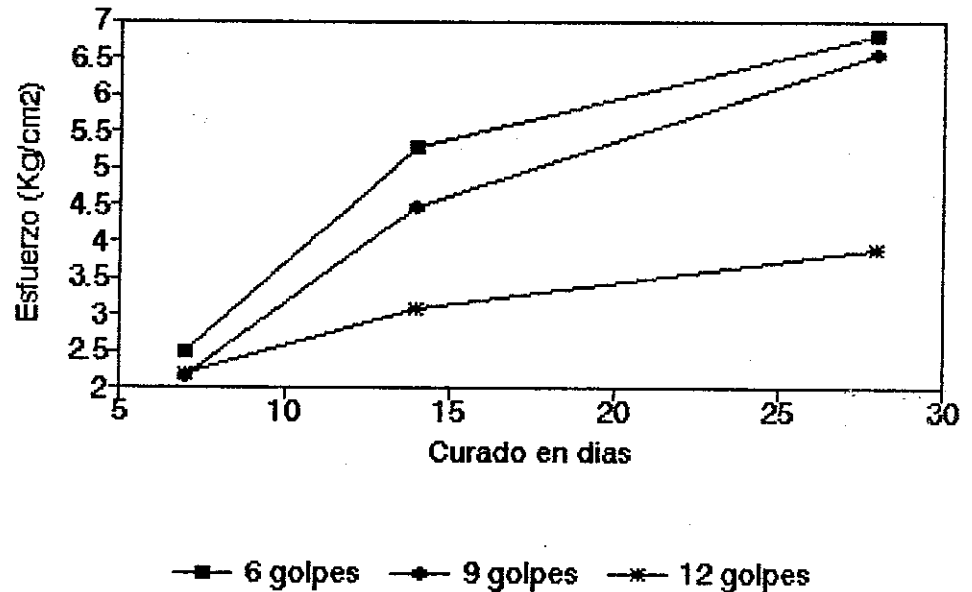


### 4.3 VARIACION DE LA ENERGIA DE COMPACTACION.

Gráfica 4.3.1

#### ENERGIA DE COMPACTACION

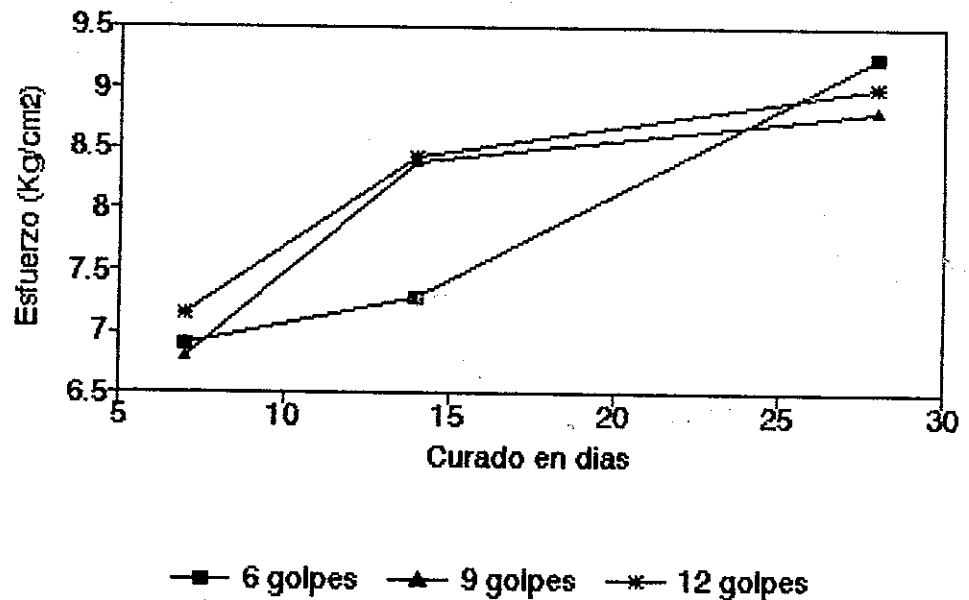
Cemento 6% Humedad óptima



Gráfica 4.3.2

#### ENERGIA DE COMPACTACION

Cemento 12% Humedad óptima

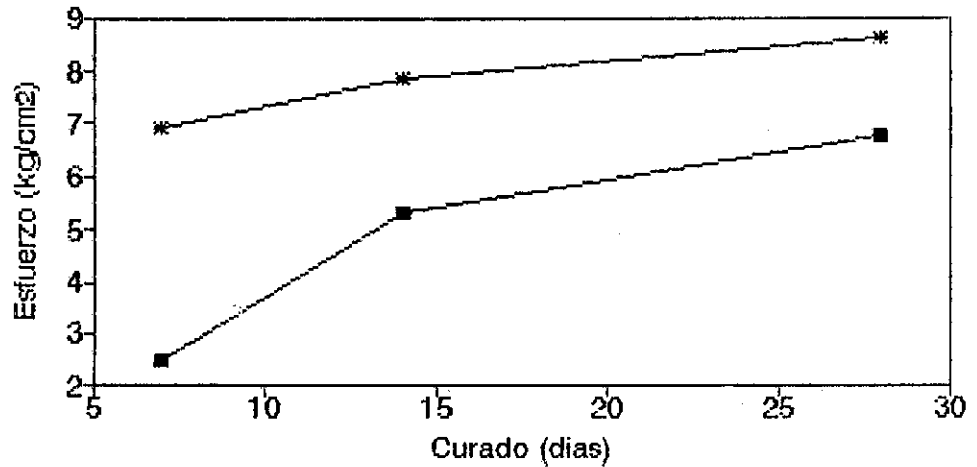


4.4 VARIACION DEL TAMANO DE LA PROBETA.

Gráfica 4.4.1

COMPRESION NO CONFINADA

Probeta tipo A Humedad optima

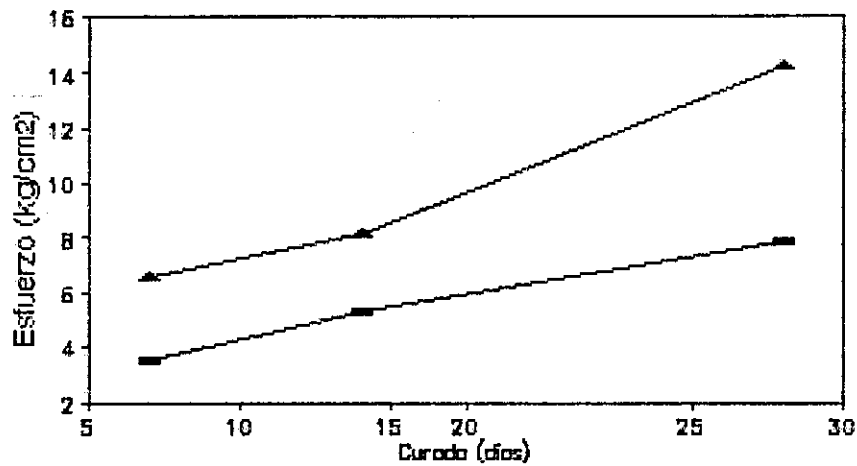


■ cemento 6%    \* cemento 12%

Gráfica 4.4.2

COMPRESION NO CONFINADA

PROBETA TIPO B Humedad optima.



■ Cemento 6%    ▲ Cemento 12%

## CAPITULO V

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

#### 5.1 INFLUENCIA DE LA VARIACION DEL % DE HUMEDAD.

La presencia de un 10% de excedente sobre la humedad óptima propicia un descenso en la resistencia en los especímenes de yeso, ya que a los 56 días las muestras de humedad óptima al 3% de yeso tienen una resistencia a la compresión de 0.27 kg/cm<sup>2</sup> en tanto que las probetas con 10% más de humedad resisten 0.23 kg/cm<sup>2</sup> o sea una baja de 12% en la resistencia. Para las probetas de 12% de yeso hay un descenso de resistencia de 0.33 kg/cm<sup>2</sup>, con humedad óptima a 0.30 kg/cm<sup>2</sup> con 10% arriba de la óptima, siendo el descenso de 9% en la resistencia.

En los especímenes de cal se presentó un incremento de resistencia con el aumento de humedad al 3%, el aumento fue de 4.09 kg/cm<sup>2</sup> a 5.24 kg/cm<sup>2</sup> a una edad de 56 días, o sea 22% de incremento. Las muestras cuyo contenido fue de 6% de cal a una edad de 56 días presentó un incremento de 7.71 kg/cm<sup>2</sup> a 8.76 kg/cm<sup>2</sup> o sea un 12% de aumento. De todo ello el estabilizante cal al 3% presenta el mayor incremento en su resistencia.

Los resultados se presentan a continuación en el cuadro 5.1

TABLA 5.1 RESULTADO DE VARIACION DE LA HUMEDAD.<sup>10</sup>

Resultado de la variación de humedad Probeta tipo a edad: 56 días. Resistencia mínima según norma 35 kg/cm <sup>2</sup> a 7 días.			
TIPO DE ESTABILIZANTE	RESISTENCIA		PORCENTAJE DE AUMENTO + DISMINUCION -
	HUMEDAD OPTIMA	HUMEDAD OPTIMA+10%	
CAL 3%	4.09	5.24	22 % +
CAL 6%	7.71	8.76	12 % +
YESO 3%	0.27	0.24	12 % -
YESO 6%	0.32	0.30	8 % -

### 5.2 EFECTO DE LA VARIACION DE COMPACTACION EN LAS PROBETAS

El efecto de la variación de energía de compactación es un descenso en la resistencia respecto al espécimen de 28 días de curado, este comportamiento se presenta tanto en las muestras de 6% y 12% de cemento. Los resultados se presentan en el cuadro

5.2

TABLA 5.2 RESULTADO DE LA VARIACION DE COMPACTACION<sup>11</sup>

Resultado de la Variación de Energía de compactación Probeta tipo A Porcentaje de humedad óptima Edad 28 días. Resistencia mínima según norma 35 kg/cm <sup>2</sup>					
TIPO DE ESTABILIZANTE	RESISTENCIA SEGUN NUMERO DE GOLPES			PORCENTAJE DE DESCENSO EN LA RESISTENCIA	
	7	14	28	14 días	28 días
CEMENTO 6%	6.78	6.54	3.90	4.0 %	43.0 %
CEMENTO 12%	9.25	8.82	9.0	5.0 %	3.0 %

<sup>10</sup> Op. Cit página 34

<sup>11</sup> Op. Cit página 34

### 5.3 VARIACION DEL TAMAÑO DE LA PROBETA

Para determinar una relación entre los resultados obtenidos en distinto tamaño de probetas se analizó la relación de sus esbelteces. Se considera a la probeta como una columna circular corta. La luz libre es la altura del cilindro, el radio de giro igual a 0.30 veces el diámetro. No se toma en cuenta el pandeo pues su falla fue quebradiza y por consecuencia compresiva.

La esbeltez es entonces:  $E=0.5*Lu/r$ . Los resultados se muestran a continuación:

**TABLA 5.3 FACTOR DE ESBELTEZ.**

RELACIONES DE ESBELTEZ Y RESULTADOS DE COMPRESION NO CONFINADA EN PROBETAS TIPO A Y B $E_a=3.4$ $E_b=1.9$ $E_a/E_b= 1.8$ $E_b/E_a= 0.60$			
ESTABILIZANTE	CURADO DIAS	RESISTENCIA TIPOA/TIPOB	RESISTENCIA TIPOB/TIPOA
CEMENTO 6%	7	0.69	1.43
	14	0.99	1.00
	28	0.87	1.15
	PROMEDIO	0.85	1.19
CEMENTO 12%	7	1.06	0.95
	14	0.90	1.11
	28	0.65	1.54
	PROMEDIO	0.87	1.19

Si se considera que se presentaron imperfecciones en las probetas y los efectos de concentración de esfuerzos una aproximación a los resultados anteriores es:

$$\text{RESISTENCIA (TIPO A/ TIPO B)} \approx E_b/E_a$$

#### 5.4 RESULTADO DE LA PRUEBA DE MOJADO Y SECADO.

A continuación se presenta un cuadro que resume los resultados de la prueba de mojado y secado, así como una comparación con la norma empleada, (recuérdese que la norma es aplicada a mezclas suelo-cemento únicamente).

**TABLA 5.4 RESULTADO PRUEBA DE MOJADO Y SECADO.**

RESULTADOS DE PRUEBA DE MOJADO Y SECADO. SUELO CEMENTO Y SUELO CAL. TOLERANCIA AASHTO T-135 HUMEDAD = 2.5% PESO = 3% VOLUMEN= 1.0%			
MEZCLA	HUMEDAD %	PESO %	VOLUMEN %
CEMENTO 6%	2.2	3.2	0.04
CEMENTO 12%	1.2	1.8	0.03
CAL 6%	1.9	4.0	0.03
CAL 12%	1.7	3.3	0.09

Los especímenes que cumplen con la norma son las mezclas suelo cemento al 12% y cal al 12%.

#### 5.5 RESISTENCIA MAXIMA OBTENIDA Y ESTABILIZADOR OPTIMO.

Las máximas resistencias obtenidas según tipo de estabilizante se presentan en el siguiente cuadro, la variación de energía no presenta incremento por lo que solo se listan los datos para humedad óptima.

TABLA 6.5 MAXIMA RESISTENCIA ALCANZADA<sup>12</sup>.

RESISTENCIA A LOS 28 DIAS MUESTRAS CON CAL O CEMENTO RESISTENCIA SEGUN NORMA 35KG/CM2	
ESTABILIZANTE	RESISTENCIA (KG/CM2)
YESO 3 %	0.18
YESO 6 %	0.23
CEMENTO 6 %	6.8
CEMENTO 12 %	8.6
CAL 3 %	3.2
CAL 6 %	4.8

Ninguno de los especimenes cumpli6 con la norma.

---

<sup>12</sup> Se le aplic6 el mismo valor que para las muestras suelo-cemento de nota en p6gina 34



## CAPITULO VI

### ANALISIS DE COSTOS

#### 6.1 INTEGRACION DE COSTOS PARA BASE Y SUB-BASE.

A continuación se presenta el resumen de la integración de costos, basado en las memorias de la Dirección General de Caminos de octubre de 1991. Debe quedar claro que el material aquí analizado no reúne las condiciones para ser empleado en la construcción de base y sub-base, sin embargo se integran los costos de forma didáctica; el renglón que debe ser agregado para su empleo real podría ser el material grueso que halla que agregar para mejorar su granulometria. Al determinar la cantidad se sumarán las distintas opciones base, sub-base estos resultados se comparan entonces con la opción de transportar otro material.

##### CAPA BASE ESTABILIZANTE: CEMENTO 6%

$7\text{mt.} \cdot 1000\text{mt.} \cdot 0.10 \text{ m.} = 711.2 \text{ M}^3$

1) Valor del estabilizante

se estima en Q.25.00/saco con 42.63 kg de cemento/saco.

Volumen suelto  $711.2 \cdot 1.3 = 925 \text{ M}^3$

Peso específico del material = 1123,2 kg/mt<sup>3</sup>

Cantidad de material = 1,038,465.8 kg

Cantidad de cemento (6%) = 62,307.9 kg

Número de sacos = 1,462 sacos

Valor del material Q 36,550.00

## 2) Limpia y Explotación

Equipo a utilizar	depreciación/mes	mantenimiento/hora
1 tractor D8	Q34,000.00	Q107.10
1 cargador 930	Q12,400.00	Q35.70
1 Equipo laboratorio	Q265.00	Q2.20
	Q46,665.00	Q145.00

Mano de obra	salario/día
1 Encargado	Q50,00
1 Operador tractor	Q48,00
1 Operador de cargador	Q36,00
2 peones de maquinas	Q32,00
1 laboratorista "b"	Q35,00
2 ayudantes laboratorio	Q36,00
2 peones ordinarios	Q30,00
TOTAL	Q267,00
Prestaciones (10 horas)	Q618.66

Producción= 900 mt<sup>3</sup>/día

tiempo de ejecución  $925/900 = 1,03$  días = 1.0 días

(10 horas/día) = 10 horas

$10 \text{ horas} * 1 \text{ día} / 10 \text{ horas} * 1 \text{ mes} / 17.8 \text{ días} = 0.06$  mes-maquinaria

Depreciación=  $46665 * 0.06 =$  Q2,799.90

Mantenimiento=  $145 * 10 =$  Q1.450,00

Mano de obra=  $618.66 * 1.03 =$  Q637,22

## 3) Colocación y Compactación

Equipo a utilizar:	Depreciación/mes	mantenimiento/hora
1 Compactador c-550	Q19.200,00	Q89,24

1patrones 120G	Q93.600,00	Q40,00
1regadora (2000 gal.)	Q11.600,00	Q72,00
1bomba 4"	Q600,00	Q29,00
1camión de volteo	Q1.500,00	Q30,00
1equipos de laboratorio	Q530,00	Q4,40
	Q127.030,00	Q264,64

Mano de obra salario/día

1encargado general	Q50,00
1operario de patrol	Q50,00
2operarios de compactadora	Q70,00
1chofer de regadora	Q30,00
1operarios de bomba	Q25,00
1chofer de camión	Q30,00
1laboratorista "a"	Q45,00
2laboratoristas "b"	Q70,00
2ayudantes de laboratorio	Q36,00
4ayudantes de operador	Q36,00
4peones de máquinas	Q64,00
10 peones ordinarios	Q150,00
Sub-total	Q1810,00
Prestaciones(10horas)	Q3,744.38

Producción= 800 mt<sup>3</sup>/día

tiempo de ejecución  $925/800 = 1,03 = 1.5$  días

(10horas/día)= 15 horas

$15\text{horas} * 1\text{día} / 10\text{horas} * 1\text{mes} / 17.8\text{días} = 0,08$  mes-maquinaria

Depreciación=  $127030 * 0.08 = Q10,162.40$

Mantenimiento=  $264.64 \times 15 =$  Q3,969.60

Mano de obra=  $3744.38 \times 1.5 =$  Q5,616.57

RESUMEN GENERAL

DEPRECIACIÓN Q12,962.30

MANTENIMIENTO Q5,419.60

MANO DE OBRA Q6,253.79

MATERIAL Q36,550.00

TOTAL Q61,185.69

Valor por mt3= Q 66.15/Mt3

Equipo y servicio 9,61% Q5,879.95

Costo por lluvia 3,85% Q2,355.65

Movilización de maquinaria 0,78% Q477.25

COSTO DIRECTO Q69,898.54

Valor por mt3= Q75.56 /mt3

COSTOS INDIRECTOS 18,22% Q12,735.51

IMPREVISTOS 5,00% Q3,494.93

UTILIDAD 15,00% Q10,484.78

TOTAL Q26,715.22

COSTO TOTAL Q96,613.76 Valor total por mt3= Q104.45 /mt3

INTEGRACIÓN BASE CEMENTO 12%

Siguiendo el mismo procedimiento, se tiene

COSTO TOTAL Q147,133.17 Valor total por mt3= Q159.06/mt3

INTEGRACION BASE CAL 12%

Siguiendo el mismo procedimiento, tenemos

COSTO TOTAL Q106,696.91 Valor total por m3= Q115.35/m3

**INTEGRACION COSTO CAPA SUB-BASE: CEMENTO 6%**

De igual manera se obtiene:

COSTO TOTAL Q138,412.34 Valor total por m3= Q85.55 /m3

**INTEGRACION COSTO CAPA SUB-BASE: CEMENTO 12%**

COSTO TOTAL Q226,804.04 Valor Total por mt3= Q140.18 /mt3

**INTEGRACION COSTO CAPA SUB-BASE: CAL 12%**

COSTO TOTAL Q156,090.69 Valor Total por mt3= Q96.47 /mt3

**COSTO DE TRANSPORTACION Y COMPACTACION DE MATERIAL.**

Supuesta una distancia de acarreo de 1 kilómetro.

Costo=Volumen\*distancia\*costo/km.

Por ejemplo para la base a 6% cemento se tiene:925mt3\*1km\*1k/km.

Costo base 6% cemento= Q. 925/mt3 los resultados para las otras opciones se muestran en el siguiente cuadro.

**6.2 COMPARACIONES DE COSTOS ENTRE ESTABILIZAR O TRANSPORTAR.**

**TABLA 6.2 COMPARACION DE COSTOS ENTRE ESTABILIZAR CAPA BASE Y SUB-BASE O IMPORTAR MATERIAL.**

OPCIÓN:	COSTO Q/M3	TRANSPORTE	AHORRO %
A) BASE 12% Y SUB-BASE 6% DE CEMENTO	244.61	925.00	73.55
B) BASE 12% Y SUB-BASE 12% DE CEMENTO	299.24	1618.00	81.50
C) BASE 12% Y SUB-BASE 12% DE CAL	211.82	1618.00	86.90

Ahorro entre opción B y C es igual a 29.20%

## CONCLUSIONES.

La ausencia de limos, así como la nulidad en la plasticidad de este material, debido a su bajo porcentaje de arcilla, impidió la satisfactoria cementación del yeso, esta característica era predecible desde el análisis granulométrico, sin embargo se decidió llevar a cabo el proceso, para establecer un parámetro de comparación con los otros estabilizantes.

El material no posee límites de consistencia, está constituido en alto porcentaje por arena ( más del 70% de la muestra). El examen granulométrico lo clasifica como un suelo tipo A-2-4, de acuerdo a P.R.A., del mismo modo se revela una escasa presencia de finos, no más del 21 % a través del método mecánico y lavado previo o de 7 % por el método del hidrómetro. El equivalente de arena supera con un valor del 84 % el mínimo AASHTO (T-176) de 25 %. De los especímenes sometidos a la prueba de mojado y secado únicamente la probeta al 12 % de cemento se encontró dentro de la tolerancia, sin embargo se aproximan bastante las muestras de cemento al 6% y cal al 12%.

Hay un incremento de la resistencia en las probetas de cal de 3% y 6% al aumentar en 10% el contenido de agua sobre la humedad óptima. El incremento no se presenta sino después de 28 días de curado, ya que a los 14 días las muestras con mayor contenido de humedad se fracturaron a inferior esfuerzo, que las de humedad óptima. La proporción del incremento de resistencia se

eleva de 0.5 kg/cm<sup>2</sup> luego de 28 días hasta 1 kg/cm<sup>2</sup> sobre los 56 días respecto a las muestras de humedad óptima.

Para las muestras estabilizadas al 6% de cemento el incremento de energía de compactación redujo el valor del esfuerzo compresivo, a mayor número de golpes respecto a la energía de compactación óptima (6 golpes) menor resistencia. Esta tendencia se presenta durante todo el curado del cilindro, aunque es menor entre las muestras de 6 y 9 golpes a los 56 días. Por otro lado el espécimen que contiene 12% de cemento presenta un incremento de esfuerzo con 12 golpes a los 7 y 14 días, es a los 14 días donde las probetas de 9 y 12 golpes tiene el mismo valor. Nuevamente el esfuerzo mayor se obtuvo con 6 golpes de compactación a 56 días de curado.

La norma recomienda un porcentaje de 12-14% de cemento, sin embargo para lograr la resistencia mínima requerida (35 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días), se necesitaría incrementar aun más dicho porcentaje, esto incrementará los costos dependiendo del tramo que se deba estabilizar. la adición de otra material que mejore su granulometría a nivel de material grueso es lo que procede.

El efecto de los estabilizantes cal y cemento en las muestras ha mejorado su trabajabilidad; para que este efecto se realice es necesario que transcurra mas tiempo de reposo luego de la hidratación de la mezcla cal, que en la de cemento, siendo

esta última la de mayor trabajabilidad.

La norma aplicada en Guatemala; requiere una resistencia mínima para base y sub-base estabilizada con cemento de 35 kg/cm<sup>2</sup> a los siete días de curado, no fue posible llegar a esta norma con ninguno de los estabilizantes aquí tratados. Lo que procede es mejorar la granulometría del banco con presencia de material grueso, que incidirá en el aumento de la resistencia de las mezclas suelo-cemento.

El máximo valor de compresión obtenido en las probetas de yeso se encontró en los especímenes al 6% con humedad óptima, el incremento de humedad en un 10% presentó un ligero incremento en el esfuerzo, aproximadamente de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>, conducta que se observa luego de los 14 días de curado y se mantiene hasta los 56 días como puede observarse en las gráficas 4.2.2 y 4.3.1

Los cilindros de cemento al 6% superan a las probetas de cal al 6% en 2 kg/cm<sup>2</sup> de esfuerzo compresivo, esta tendencia se inicia desde los 14 días. Para que la probeta de cal al 6% llegue al valor obtenido en 30 días en la muestra de cemento al 12%, debe transcurrir el doble del tiempo, 60 días, esto se verifica al observar las gráficas 4.1.3 y 4.3.1. La tardía respuesta en resistencia de la cal respecto al cemento se compensa por la reducción de costos como se ha demostrado en el capítulo de Análisis de Costos.



## RECOMENDACIONES.

Seria interesante verificar el comportamiento del material aqui tratado en presencia de distinto tipo de cenizas volcánicas, cuyo contenido de catalizadores para la reacción puzolánica que propicie la reacción con la cal. De hecho es un desarrollo abordado ya desde la mitad de los años 60, pero en aquel entonces se hicieron mezclas de limos, arcillas y ceniza volcanica; una determinada cantidad de arcilla puede darle la plasticidad mínima para que el efecto aglomerante tanto del yeso como de la cal pueda ocurrir. (véase incisos 2.2.1.1 y 2.3.2).

La localización de este tipo de material en distintos puntos del país es muy probable puesto que el territorio de Guatemala es el resultado de formaciones volcánicas y este material es una ceniza volcánica. La cordillera volcánica atraviesa Guatemala de occidente a oriente, las cenizas volcánicas están presentes en un alto porcentaje de las vías de terracería del país, es más, existen mapas geológicos que ubican las formaciones por lo que es recomendable considerarse de antemano en un proyecto carretero, su empleo en la fabricación de bases y sub-bases reducirá los costos en este renglón; también por eso la necesidad del empleo de la cal como estabilizante, dados los altos costos que el uso del cemento representa. El valor de su obtención a través de caleras o transportada desde los centros urbanos, también es menor que la opción de estabilizar con cemento; aunque la adición

a suelos limoso-arcillosos prevé una respuesta positiva del yeso o de la cal. Es importante también considerar la posibilidad de aumentar la resistencia temprana en el cemento por la presencia de material grueso.

En el reporte del doctor Rodolfo Hernández "Estudio de laboratorio de selectos estabilizados con cal usados en técnica vial", que se lista en la bibliografía de este trabajo queda demostrado que el incremento de finos en el material tipo selecto por él analizado favoreció el aumento en la resistencia de las probetas estabilizadas con cal. La arena pómez aquí ensayada no contiene un alto porcentaje de finos lo que aunado a la escasez de plasticidad no indujo la reacción estabilizante deseada, a nivel de esfuerzo compresivo. Sería interesante someter la arena pómez rosada igual o similar al proceso de molienda para elevar el porcentaje de finos y buscar con ello mejorar las resistencias de las probetas así fabricadas. Esta iniciativa deberá considerar el costo de la molienda que influirá elevando costos.

**BIBLIOGRAFIA .**

ANCKERMANN ALVARES, Enrique. Manual de laboratoristas de suelos en construcción de carreteras. (Tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), Guatemala, 1,969, 128 pp.

AVITIA, Rodolfo. Suelo-Cemento. revista mexicana del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC; Año 3 Vol. 4. No. 5. México: Edit. IMCYC, 1,972.

AVITIA, Rodolfo. Pavimentos de concreto. revista mexicana del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC; Año 3 Vol. 4. No. 11. México: Edit. IMCYC, 1,972.

BATZ REYES, Francisco javier. Estabilización química de suelos. (Tesis: Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), Guatemala, 1,982, 268 pp.

CASTANEDA MORGAN, Byron alfonso. Superficies estabilizadas para carreteras de bajo costo en guatemala. (Tesis: Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), Edit. Piedra Santa, Guatemala, 1,962, 85 pp.

CAMARA GUATEMALTECA DE LA CONSTRUCCIÓN. Especificaciones Generales para la construcción de carreteras y puentes. Ingenieros consultores de Centro América. Páginas 306-05 307-07 "Capa Base estabilizada con cemento Portland". Mayo de 1975

et.al. Laboratory handbook, road for ligh use. revista del Portlan Cement Association; Año 23, Vol. 7. No.16. E.U.A: Edit P.C.A, 1,971.

et.al. Soil cement roads construction handbook, a low cost road for ligh use. revista del Portlan Cement Association; Año 1, Vol. 2. No.1. E.U.A: Edit P.C.A, 1,949.

GALVEZ CRUZ, Carlos humberto. Análisis de la tendencia de los costos en las obras viales de Guatemala. (Tesis: Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), Guatemala, 1,973, 45 pp.

Hernández, Rodolfo. Estudio de laboratorio de selectos puzolánicos estabilizados con cal usados en técnica vial. Investigaciones especiales realizadas con apoyo del Centro de Investigaciones de Ingeniería, CII, de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, abril 1993.

Hernández, Rodolfo. Estudio de la succión en arenas pómez del valle de la ciudad de Guatemala. Investigaciones especiales realizadas con apoyo del Centro de Investigaciones de Ingeniería, CII, de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Publicación 28/91 Guatemala, 1993.

LEMUS DAHINTEN, Pedro Enrique. Estabilización de Material tipo selecto con cal, una nueva opción en la construcción de pavimentos. (Tesis: Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), Guatemala, 1,992, 50 pp.

LOSA JULIAN, Alberto. Caminos económicos. Madrid: Edit. Espasa-Calpe, 1,973. 128 pp.

TORRENTE MANUEL, Sagues Luis. Estabilización de suelos. Barcelona, España: Edit. El Ateneo, 1,980 267 pp.

SOLARES DIAZ, Jorge ovidio. Métodos de estabilización de suelos. (Tesis: Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), Guatemala, 1,978, 95 pp.

**ANEXOS**

ANEXO No. 1

PRUEBA DE MOJADO Y SECADO			
CEMENTO 6% PROBETA 2 DELTA PESO.			
CICLO	PESO (KG)		DELTA PESO %
	INICIAL	FINAL	
1	1368	1147	16.15
2	1147	1106	3.00
3	1106	1054	3.80
4	1054	1002	3.80
5	1002	979	1.68
6	979	934	3.29
7	934	882	3.80
8	882	866	1.17
9	866	776	6.58
10	776	720	4.09
11	720	682	2.78
12	682	657	1.83

ANEXO No. 2

PRUEBA DE MOJADO Y SECADO

CEMENTO 6% PROBETA 1 DELTA HUMEDAD, DELTA VOLUMEN

CICLO	DIAMETRO (CM)		ALTURA (CM)		Vo. inicial CM3	Vo. final CM3	Delta V %	PBH KG	PBS KG	HUMEDAD %
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL						
1	8.8	8.4	10.1	10.2	614.30	565.26	0.08	1429	1177	21.41
2	8.9	8.8	10.2	10.1	634.56	614.30	0.03	1424	1147	24.15
3	9.1	9	10.3	10.1	669.90	642.54	0.04	1421	1143	24.32
4	9	8.8	10.2	10.3	648.90	626.46	0.03	1431	1139	25.64
5	9	8.8	10.2	10.3	648.90	626.46	0.03	1423	1139	24.93
6	9	8.8	10.3	10.3	655.26	626.46	0.04	1412	1145	23.32
7	9	8.8	10.3	10.2	655.26	620.38	0.05	1432	1134	26.28
8	8.8	8.7	10.3	10.2	626.46	606.36	0.03	1421	1193	19.11
9	9.2	9	10.2	10.1	678.06	642.54	0.05	1415	1133	24.89
10	8.9	8.8	10.3	10.2	640.78	620.38	0.03	1409	1138	23.81
11	8.9	8.8	10.2	10.1	634.56	614.30	0.03	1412	1142	23.64
12	9.1	9	10.2	10.1	663.40	642.54	0.03	1413	1138	24.17



ANEXO No. 3

PRUEBA DE MOJADO Y SECADO			
CAL 6% PROBETA 2 DELTA PESO.			
CICLO	PESO (KG)		DELTA PESO %
	INICIAL	FINAL	
1	1418	1125	20.66
2	1125	1055	4.94
3	1055	991	4.51
4	991	916	5.29
5	916	864	3.67
6	864	789	5.29
7	789	729	4.23
8	729	684	3.17
9	684	608	5.36
10	608	570	2.68
11	570	523	3.31
12	523	489	2.40

ANEXO No. 4  
PRUEBA DE MOJADO Y SECADO

CAL 6% PROBETA 1 DELTA HUMEDAD, DELTA VOLUMEN											
CICLO	DIAMETRO (CM)		ALTURA (CM)		Vo. inicial CMS	Vo. final CMS	Delta V %	PBH (KGR)	PBS (KGR)	HUMEDAD %	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL							
1	9.3	9.01	10.2	10.1	692.88	643.96	0.07	1408	1120	25.71	
2	9.1	9	10	9.9	650.39	629.81	0.03	1383	1100	25.73	
3	9.1	9	10	9.8	650.39	623.45	0.04	1379	1094	26.05	
4	9.2	9	10.2	10.1	678.06	642.54	0.05	1382	1088	27.02	
5	9.1	9	10.1	10	656.89	636.17	0.03	1373	1092	25.73	
6	9.1	9	10.1	9.9	656.89	629.81	0.04	1374	1093	25.71	
7	9.1	9	10	9.8	650.39	623.45	0.04	1383	1089	27.00	
8	9.1	9	10	9.9	650.39	629.81	0.03	1378	1132	21.73	
9	9.2	9.1	10.1	10	671.41	650.39	0.03	1370	1084	26.38	
10	9.1	9	10.2	10.1	663.40	642.54	0.03	1362	1080	26.11	
11	9.1	9	10.1	10	656.89	636.17	0.03	1366	1088	25.55	
12	9.1	9.1	10.2	10.1	663.40	656.89	0.01	1368	982	39.31	

ANEXO No. 5

PRUEBA DE MOJADO Y SECADO			
CEMENTO 12% PROBETA 2 DELTA PESO.			
CICLO	PESO (KG)		DELTA PESO %
	INICIAL	FINAL	
1	1483	1241	16.32
2	1241	1171	4.72
3	1171	1150	1.42
4	1150	1128	1.48
5	1128	1109	1.28
6	1109	1089	1.35
7	1089	1069	1.35
8	1069	1039	2.02
9	1039	998	2.76
10	998	972	1.75
11	972	969	0.20
12	969	933	2.43

ANEXO No. 6  
PRUEBA DE MOJADO Y SECADO

CEMENTO 12% PROBETA 1 DELTA HUMEDAD, DELTA VOLUMEN												
CICLO	DIAMETRO (CM)		ALTURA (CM)		Vo. inicial CM3	Vo. final CM3	Delta V %	PBH (KG)	PBS (KG)	HUMEDAD %		
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL								
1	9.1	8.8	10.2	10.1	663.40	614.30	0.07	1491	1242	20.05		
2	9.1	9	10.2	10.1	663.40	642.54	0.03	1470	1194	23.12		
3	9	8.9	10.2	10.1	648.90	628.34	0.03	1467	1184	23.90		
4	9.1	9	10.2	10.1	663.40	642.54	0.03	1469	1184	24.07		
5	9.1	8.9	10.2	10.1	663.40	628.34	0.05	1468	1183	24.09		
6	9.1	9	11	10.8	715.43	687.07	0.04	1467	1188	23.48		
7	9	8.9	10.3	10.2	655.26	634.56	0.03	1474	1184	24.49		
8	9.1	9	10.3	10.2	669.90	648.90	0.03	1473	1169	26.01		
9	9.2	9	10.2	10.1	678.06	642.54	0.05	1467	1191	23.17		
10	8.9	8.8	10.3	10.2	640.78	620.38	0.03	1462	1182	23.69		
11	9.1	9	10.1	10.1	656.89	642.54	0.02	1466	1202	21.96		
12	9.1	9	10.2	10.1	663.40	642.54	0.03	1469	1191	23.34		

ANEXO No.7

PRUEBA DE MOJADO Y SECADO			
CAL 12% PROBETA 2.			
PERDIDA DE PESO.			
CICLO	PESO (KG)		DELTA PESO
	INICIAL	FINAL	%
1	1408	1208	14.20
2	1208	1145	4.47
3	1145	1098	3.34
4	1098	1064	2.41
5	1064	1040	1.70
6	1040	999	2.91
7	999	984	1.07
8	984	967	1.21
9	967	893	5.26
10	893	871	1.56
11	871	862	0.64
12	862	838	1.70

ANEXO No. 8  
 PRUEBA DE MOJADO Y SECADO  
 CAL 12% PROBETA 1 CAMBIO DE HUMEDAD, DELTA VOLUMEN.

CICLO	Diámetro (cm)		Altura (cm)		Vo.		Delta V	PBH	PBS	HUMEDAD
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL				
1	8.8	8.8	10.3	10.2	626.46	620.38	0.01	1477	1192	23.91
2	8.8	8.8	10.4	10.3	632.54	626.46	0.01	1444	1167	23.74
3	8.7	8.7	10.4	10.3	618.25	612.30	0.01	1434	1162	23.41
4	8.8	8.8	10.3	10.2	626.46	620.38	0.01	1446	1157	24.98
5	8.7	8.7	10.4	10.3	618.25	612.30	0.01	1438	1158	24.18
6	8.8	8.8	10.1	10	614.30	608.21	0.01	1436	1163	23.47
7	8.8	8.8	10.3	10.2	626.46	620.38	0.01	1451	1159	25.19
8	8.8	8.8	10.4	10.3	632.54	626.46	0.01	1442	1212	18.98
9	8.8	8.8	10.3	10.2	626.46	620.38	0.01	1436	1152	24.65
10	8.8	8.8	10.2	10.1	620.38	614.30	0.01	1428	1154	23.74
11	8.8	8.8	10.3	10.2	626.46	620.38	0.01	1436	1165	23.26
12	8.7	8.7	10.2	10.1	606.36	600.41	0.01	1430	1158	23.49

ANEXO No. 9

COMPRESION NO CONFINADA PROBETA TIPO A		
ESTABILIZANTE: YESO 3 %		Humedad optima
CURADO (DIAS)	CARGA (KGR)	RESISTENCIA (KG/CM2)
7	1.20	0.01
14	6.80	0.08
28	15.00	0.19
56	22.00	0.27

COMPRESION NO CONFINADA PROBETA TIPO A		
ESTABILIZANTE: YESO 6 %		Humedad optima
CURADO (DIAS)	CARGA (KG)	RESISTENCIA (KG/CM2)
7	1.87	0.02
14	7.42	0.09
28	18.56	0.23
56	26.35	0.33

ANEXO No. 10

COMPRESION NO CONFINADA		
PROBETA TIPO A		Humedad optima
ESTABILIZANTE: Cemento 6 %		
CURADO (dias)	CARGA (Kgr)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	200	2.47
14	430	5.30
28	550	6.78

COMPRESION NO CONFINADA		
PROBETA TIPO A		Humedad optima
ESTABILIZANTE: Cemento 12%		
CURADO (dias)	CARGA (Kgr)	ESFUERZO (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	560	6.91
14	638	7.87
28	700	8.63



ANEXO No. 11  
COMPRESION NO CONFINADA  
PROBETA TIPO B

Estabilizante: Cemento 6%      Humedad optima

Curado (días)	Carga (kg)	Esfuerzo(kg/cm <sup>2</sup> )
7	710	3.53
14	1075	5.35
28	1565	7.78

Estabilizante: Cemento 12%      Humedad optima

Curado (días)	Carga (kg)	Esfuerzo(kg/cm <sup>2</sup> )
7	1315	6.54
14	1630	8.11
28	2860	14.22

ANEXO No. 12

ESFUERZO COMPRESION NO CONFINADA PROBETA TIPO A		
ESTABILIZANTE: YESO 3 %		Humedad optima + 10%
CURADO (DIAS)	CARGA (KG)	RESISTENCIA (KG/CM2)
7	1.50	0.02
14	5.23	0.06
28	16.35	0.20
56	19.26	0.24

ESFUERZO COMPRESION NO CONFINADA PROBETA TIPO A		
ESTABILIZANTE: YESO 6 %		Humedad optima + 10%
CURADO (DIAS)	CARGA (KG)	RESISTENCIA (KG/CM2)
7	1.78	0.02
14	6.42	0.08
28	21.69	0.27
56	24.21	0.30

ANEXO no. 15

VARIACION DE ENERGIA DE COMPACTACION			
PROBETA TIPO A		Humedad optima	
Estabilizante: Cemento 6%			
Curado (dias)	Carga respecto al # de golpes (kg)		
	6	9	12
7	200	175	177
14	430	362	250
28	550	530	315

Curado (dias)	Esfuerzo respecto al # de golpes (kg/cm <sup>2</sup> )		
	6	9	12
7	2.467	2.159	2.18
14	5.304	4.465	3.08
28	6.784	6.537	3.89

VARIACION DE ENERGIA DE COMPACTACION			
PROBETA TIPO A		Humedad optima	
Estabilizante: Cemento 12%			
Curado (dias)	Carga respecto al # de golpes (kg)		
	6	9	12
7	560	550	580.00
14	590	680	684.00
28	750	715	730.00

Curado (dias)	Esfuerzo respecto al # de golpes (kg/cm <sup>2</sup> )		
	6	9	12
7	6.907	6.784	7.15
14	7.277	8.387	8.44
28	9.251	8.819	9.00