

T-UES
1501
P414₂
2000
Ej. 2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
INGENIERIA CIVIL



ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS

PRESENTADO POR

WILFREDO PEÑATE FIGUEROA
OSCAR ARNOLDO ROMERO GONZÁLEZ

PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

15102053
15102053



CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2000

4 unidades el 20 de diciembre 2000

SIC 4932



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA

:

Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL :

Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO

:

Ing. Alvaro Antonio Aguilar Orantes

SECRETARIO

:

Ing. Saúl Alfonso Granados

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR

:

Ing. Luis Rodolfo Nosiglia Durán

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de :
INGENIERO CIVIL

Título :
ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS

Presentado por :
**WILFREDO PEÑATE FIGUEROA
OSCAR ARNOLDO ROMERO GONZÁLEZ**

Trabajo de Graduación aprobado por:

Coordinador :
Ing. M.Sc. Rogelio Ernesto Godínez González

Asesores Externos :
Ing. Héctor Alejandro Portillo Cortez
Ing. Mauricio Isaías Velásquez Paz

San Salvador, Diciembre de 2000.

Trabajo de Graduación aprobado por:

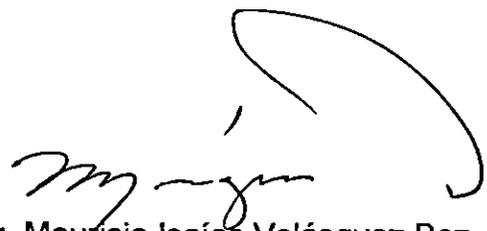
Coordinador :

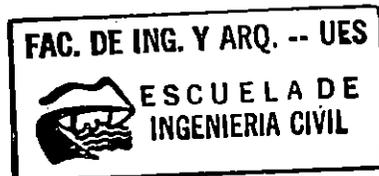

Ing. M.Sc. Rogelio Ernesto Godínez González

Asesor Externo :


Ing. Héctor Alejandro Portillo Cortez

Asesor Externo :


Ing. Mauricio Isaías Velásquez Paz



AGRADECIMIENTOS

El sueño de culminar nuestra carrera a través de este trabajo de graduación no hubiera sido posible sin la ayuda de:

Dios Padre Todopoderoso, a su único hijo Jesucristo, al Espíritu Santo y a la Santísima Virgen María, por habernos acompañado, iluminado y guiado en el desarrollo de nuestra carrera profesional.

Al Ing. Rogelio Ernesto Godínez, nuestro coordinador y a los ingenieros Héctor Alejandro Portillo y Mauricio Isaías Velásquez Paz nuestros asesores, por que creyeron en nosotros y por su incondicional apoyo y dedicación que nos brindaron.

A los Hermanos, Carlos Eduardo Parada y Sonia Elizabeth Chávez, por su colaboración y ayuda que nos brindaron en el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. José Armando Morales Henríquez, por su consideración y sincero apoyo para la culminación del presente trabajo de graduación.

Al Laboratorio de Suelos y Materiales Frances Cansino, Por la ayuda prestada en la realización de este trabajo.

A la Empresa Tecknova S.A. de C.V. por la colaboración del producto en estudio y por toda la información que nos proporcionaron.

“,, al construir su casa, cavó bien profundamente y puso los cimientos sobre la roca. Vino una inundación y la corriente se precipitó sobre su casa, pero no pudo removerla porque estaba bien construida.”

Lo. 6,47-48

DEDICATORIA

A la Santísima Trinidad y a la Virgen María, por sus inmensas gratitudes a lo largo de toda mi vida, por sus bendiciones de cada momento, y sobre todo por guiarme a través del sendero del bien; pero siempre respetando su voluntad.

A mis padres, Juan Antonio y Dora Alicia, por su amor y cariño que me brindan cada día, por su apoyo moral e incondicional mostrado tanto en las tristezas como en las alegrías; pero sobre todo por la enseñanza dada para el respeto a los demás.

A mi Mamadèla, por su sacrificio en las tantas veces que madrugó para que asistiera a clases, y estar pendiente de mi cuando estoy ausente.

A mis Hermanos, Dervin Mauricio, Denny Lorena y Sonia Guadalupe, a mi primo Javier Omar, por estar en todos los momentos del desarrollo de este trabajo apoyándome con todo su amor y por ser la luz y la alegría de mi vida.

A mi Esposa Claudia de Lourdes, por su amor y por brindarme abnegación, comprensión y apoyo incondicional en los momentos más difíciles.

A mi hijo Daniel Andrés, por ser lo más hermoso de mi vida y lo que más amo.

A mi tío Julio Cesar, por el aprecio y la fe de que cumpliría esta meta.

A mis amigos, por la amistad y consejos de esperanza, por la ayuda y comprensión dada en los momentos difíciles.

A todas las personas que creyeron en mi.

A mi Mamita.

*Dulce Madre no te alejes ven con nosotros a
a todas partes y solos nunca los dejes, pues
ya que nos proteges como verdadera madre
has que nos bendiga El Padre, El hijo y el
Espíritu Santo. Amen.*

Wilfredo

DEDICATORIA.

A DIOS TODO PODEROSO:

Por sus inmensas gratitudes a lo largo de mi vida; por sus bendiciones de cada momento; y sobre todo por guiarme a través del sendero del bien, y haberme brindado la luz del conocimiento y permitir que concluyera mis estudios universitarios.

A MIS PADRES, NAPOLEÓN ROMERO Y ANDREA DE ROMERO:

Por todo su amor y cariño que me brindan cada día, quiero agradecerles todo el esfuerzo y sacrificio que les signifique mi preparación académica, así como por brindarme su apoyo y consejos de aliento para seguir adelante en los momentos difíciles de mi carrera.

A MI ESPOSA, EDITH VICTORINA CHICAS DE ROMERO.

Por estar siempre a mi lado y ayudarme a sobrellevar los diferentes contratiempos que se presentaron a lo largo de mi carrera, así como por darme un hijo maravilloso. TE AMO.

A MI HIJO, OSCAR ARNOLDO ROMERO CHICAS.

Al heredero de mis deudas, por comprender a su corta edad y a su manera, el no poder compartir y salir a pasear los fines de semana. Presionándome de una manera inocente a terminar el presente trabajo de graduación.

A MIS HERMANOS, FRANCISCA, GUSTAVO Y GERMAN.

Que estuvieron siempre alentándome y apoyándome a coronar mi carrera.

A MI COMPAÑERO, WILFREDO.

Por la amistad y confianza que el presente trabajo nos permitió cultivar.

A MIS DEMAS FAMILIARES Y AMIGOS.

Por su oportuno apoyo y sinceros consejos de seguir siempre adelante, en busca de los objetivos propuestos para alcanzar tan anhelada meta. Se los agradezco mucho.

OSCAR.

RESUMEN

El trabajo de graduación titulado: Estabilización de Arcillas con Enzimas Orgánicas, tiene como propósito el desarrollo de una alternativa técnica para la estabilización de suelos arcillosos, a través de ensayos para evaluar la reacción de la enzima orgánica en dos tipos de suelo para ser útiles en base y sub-base en carreteras. Partiendo de esto, se realiza la investigación del estado actual de las vías en nuestro país, las cuales según el Ministerio de Obras Públicas hasta 1999 se determinó que más del 78% de las vías son caminos rurales, los cuales no poseen superficie pavimentada y se vuelven vulnerables al deterioro, producto de las deformaciones causadas por los cambios de humedad y la acción de las cargas de tráfico.

En este sentido es necesario el desarrollo de métodos para estabilizar y mejorar suelos no aptos en carreteras de manera que simule adecuadamente las condiciones de carga a la que están sometidas las vías durante su servicio, para que de esa manera se hagan estudios adecuados y económicos.

Para el desarrollo de este estudio se partió de los conceptos básicos de la mecánica de suelos aplicada a las vías terrestres, particularmente para la evaluación de la enzima orgánica; para ello, se revisaron conceptos con respecto a características físicas, como clasificación de suelos, granulometría, límites de consistencia, etc. con el objeto de identificar las muestras a analizar, también las características mecánicas principalmente esfuerzos y deformaciones debido a la transmisión de cargas al subsuelo.

Se estudiaron dos lugares importantes dentro de la zona arcillosa en el país, el Cerro Pacho en Chalatenango, y el Cerro Cirimba en Morazán, encontrando en estos suelos arcilla inorgánica CH y limo inorgánico MH respectivamente; a estas muestras se les realizaron ensayos con y sin enzimas orgánicas, para determinar si son aptos para usarlos en base y sub-base de carreteras.

En ese sentido, se compactaron muestras de suelo bajo la norma AASHTO T-1193 y la ASTM D-1883, Para determinar el CBR en estado natural y adicionando enzimas orgánicas y controlando a los 7, 14 y 21 días después del tratamiento (ver tabla 1), determinando que ambos suelos arcillosos sólo pueden ser usados en subrasantes de las vías, ya que no es suficiente la mejora en cuanto a resistencia y humedad que siempre fue mayor del 17% como límite máximo a aceptar para el propósito descrito.

Tabla 1. valores relativos de soporte CBR aplicando enzimas orgánicas.

Tiempo	0*	7	14	21
CBR (%) Cerro Pacho	5.0	5.0	7.6	8.7
CBR (%) Cerro Cirimba	6.8	7.0	8.6	12.4

* CBR en estado natural

Se elaboraron las graficas correspondientes a diferentes edades después de aplicada la enzima orgánica, para cada tipo de suelo en condiciones alteradas, el coeficiente de permeabilidad disminuyó (de 2.9 a 0.9) $\times 10^{-7}$ de suelo natural a un suelo con 21 días de tener enzima orgánica, ambos suelos son totalmente impermeables y cuyos valores

del coeficiente de permeabilidad son graficados a diferentes edades, según se muestran en siguiente tabla 2.

Tabla 2. Coeficiente de permeabilidad a diferentes edades, aplicando enzimas Orgánicas.

Proyecto \ Tiempo	0	7	14	21
Cerro Pacho (K x 10 ⁻⁷)	2.468	2.424	1.796	0.926
Cerro Cirimba (K x 10 ⁻⁷)	2.942	2.964	2.776	1.999

Considerando que los resultados de las diferentes pruebas, granulometría, hidrómetro, límites de consistencia, el valor relativo de soporte CBR, proctor y permeabilidad no se obtuvieron resultados favorables, ya que ambos suelos con tratamiento de enzimas orgánicas sólo pueden ser usados en subrasantes, y no en base y sub-base de carreteras como era el resultado esperado.

Este resultado final del trabajo de graduación, está sujeto a perfeccionamiento y ajuste sobre la base de investigaciones futuras de este tipo, analizando una cantidad mayor de pruebas y estipular más tiempo para la reacción de las enzimas orgánicas, utilizando variedad de suelos finos; este trabajo puede ser utilizado como una referencia preliminar en el desarrollo de varios agentes estabilizadores que existen en nuestro medio.

Por la importancia de tener valores más confiables de las enzimas orgánicas sobre los suelos finos de El Salvador, este estudio debe continuarse hasta obtener un marco de datos lo suficientemente representativo de las características particulares de los suelos finos.

**ESTABILIZACION DE ARCILLAS
CON ENZIMAS ORGANICAS**

INDICE GENERAL

	Página
INTRODUCCIÓN	i

CAPITULO I

GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTEPROYECTO	3
1.1.1 ANTECEDENTES	3
1.1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1.3 OBJETIVOS	7
1.1.3.1 OBJETIVOS GENERALES	7
1.1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.1.4 ALCANCES GLOBALES	8
1.1.5 LIMITACIONES	8
1.1.6 DELIMITACIONES	8
1.1.7 JUSTIFICACION	9
1.1.8 METODOLOGÍA A DESARROLLAR	9
1.2 LOS SUELOS Y SUS PROPIEDADES	11
1.2.1 GRANULOMETRIA DE LAS ARCILLAS	11
1.2.2 PERMEABILIDAD	13

1.2.3	LIMITES DE CONSISTENCIA DE LAS ARCILLAS.....	14
1.2.4	VARIACION VOLUMÉTRICA DE LAS ARCILLAS	16
1.2.5	COMPACIDAD	16
1.2.6	ESFUERZOS EN LOS SUELOS ARCILLOSOS	17
1.2.7	RESISTENCIA AL CORTE EN LOS SUELOS ARCILLOSOS .	18
1.2.8	DEFORMACION EN LOS SUELOS ARCILLOSOS	21
1.3	INFLUENCIA DEL AGUA SOBRE LAS ARCILLAS	22
1.4	CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS	24
1.4.1	DEFINICION DE ARCILLA, MINERALES Y MINERALOGIA DE LAS ARCILLAS.....	27
1.4.2	ORIGEN DE LAS ARCILLA	28
1.4.3	PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS	29
1.4.4	FACTORES DE CARACTERIZACION DE LAS ARCILLAS	30
1.4.4.1	COMPOSICION DE LOS MINERALES DE ARCILLA.....	30
1.4.4.2	COMPOSICION DEL MATERIAL NO ARCILLOSO...	33
1.4.4.3	SUSTANCIAS ORGANICAS EN LAS ARCILLAS.....	35
1.4.4.4	TEXTURA DE LA ARCILLA.....	37
1.4.5	LA ARCILLA Y LA CIENCIA DEL SUELO	38
1.4.6	LA ARCILLA EN EL SISTEMA DISPERSO DEL SUELO	41
1.4.6.1	TAMAÑO, SEPARACIÓN GRANULOMETRICA	43
1.5	COMPONENTES DE SUELO EN LAS ESTRUCTURAS	

VIALES, Y TRATAMIENTOS	44
1.5.1 LA BASE DEL PAVIMENTO EN LAS VIAS	44
1.5.1.1 LA BASE, DEFINICION	45
1.5.1.2 LA BASE DE LAS VIAS EN PAVIMENTO FLEXIBLE	45
1.5.1.3 LA BASE DE LAS VIAS EN PAVIMENTO RIGIDO	46
1.5.2 LA SUB-BASE DE LAS VIAS.....	47
1.5.2.1 DEFINICION DE SUB-BASE.....	47
1.5.2.2 LA SUB-BASE DE LAS VIAS EN PAVIMENTO FLEXIBLE	47
1.5.2.3 LA SUB-BASE DE LAS VIAS EN PAVIMENTO RIGIDO	49
1.5.3 COMPACTACIÓN EN CARRETERAS.....	50
1.5.3.1 COMPACTACION.....	50
1.5.3.2 METODOS DE COMPACTACION ESTATICOS	51
1.5.3.3 METODOS DE COMPACTACION DINAMICOS	52
1.5.3.4 MÉTODOS DE CONTROL DE LA COMPACTACIÓN DE CARRETERAS.....	55
1.5.4 DRENAJE Y SUB-DRENAJE EN CARRETERAS	58
1.5.5 ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN EN LAS VIAS.....	62
1.5.5.1 VIAS REVESTIDAS CON PAVIMENTO DE CONCRETO ASFALTICO.....	62

1.5.5.2	VIAS REVESTIDAS CON PAVIMENTO DE EMULSION ASFÁLTICA	63
1.5.5.3	VIAS REVESTIDAS CON CONCRETO HIDRÁULICO	65
1.5.5.4	VIAS REVESTIDAS CON ADOQUINES	65
1.6	LAS ENZIMAS COMO ADITIVO ESTABILIZANTE DEL SUELO PARA PAVIMENTO	66
1.6.1	PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LAS ENZIMAS	66
1.6.2	ESTABILIDAD DE LA ENZIMA.....	71
1.6.3	TEMPERATURA OPTIMA.....	72
1.6.4	ENZIMA ORGANICA DE PRUEBA.....	73
1.6.5	MEZCLA DE ENZIMA ORGANICA, EXPERIMENTAL.....	74
1.6.6	ESTABILIZACION DE LOS SUELOS CON ENZIMA ORGANICA.....	74
1.6.7	ESTABILIZACION CON ENZIMAS ORGANICAS.....	75
1.6.8	EXPERIENCIA Y COSTOS EN LA APLICACIÓN ARCILLA-ENZIMA ORGANICA.....	76
1.6.9	RESULTADOS Y ESTUDIO EN EL USO DE LAS ENZIMAS ORGANICAS.....	77
	RECOMENDACIONES.....	79

CAPITULO II
PRUEBAS DE LABORATORIO SIN Y CON ADICION DE ENZIMAS
ORGANICAS

INTRODUCCION	80
2.1 LOCALIZACION Y DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS	
SELECCIONADOS	81
2.2 METODOS PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUELO.....	84
2.3 GRADUACION ARTIFICIAL. ADICION O REMOCION DE	
PARTICULAS	86
2.4 ENSAYOS DE LABORATORIO	89
2.4.1 PROPIEDADES FÍSICAS.....	89
2.4.1.1 ENSAYO GRANULOMETRIA	
(NORMA ASTM D-421 Y D-411-95).....	89
2.4.1.2 ANALISIS GRANULOMETRICO – METODO	
DEL HIDROMETRO, ASTM D421-95 Y D422-95.....	94
2.4.1.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA	
(NORMA ASTM D4318-95)	114
2.4.2 PROPIEDADES MECANICAS	121
2.4.2.1 PRUEBA PROCTOR MODIFICADA	
(NORMAS ASTM D1557, ASSHTO T-180).....	121
2.4.2.2 ENSAYO DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE,	
, CBR(NORMAS AASHTO T-193, ASTM D-1883)	130

2.4.2.3 ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE (NORMA ASTM D2435-9).....	142
2.5 ENSAYO DE LABORATORIO CON ENZIMAS ORGANICAS.....	149
2.5.1 PROCESO DE ESTABILIZACION CON ENZIMAS ORGANICAS.....	149
2.5.2 PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACION Y PRUEBAS EN EL LABORATORIO CON ENZIMAS ORGANICAS.....	149
2.5.3 PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACION DE CAMPO.....	181
2.5.4 ESTIMACION EN TERRENO DE REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA EL GRADO DE HUMEDAD OPTIMA.....	183
CONCLUSIONES	185
RECOMENDACIONES	186

CAPITULO III

ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

INTRODUCCION	187
3.0 ANALISIS DE INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.....	188
3.1 GRANULOMETRIA.....	188
3.2 METODO DEL HIDROMETRO	191
3.4 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE, CBR	197
3.5 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE LA PRUEBA PROCTOR	199

3.6 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE PERMEABILIDAD	202
3.7 ANALISIS GENERAL.....	204
CONCLUSIONES	206
RECOMENDACIONES.....	207

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

INTRODUCCION	209
CONSIDERACIONES.....	210
CONCLUSIONES	212
RECOMENDACIONES	215

SIMBOLOGIA

ΔL	: Diferencial de longitud
r	: Radio de la partícula
η	: Viscosidad
c	: Cohesión del suelo
γ	: Peso Volumétrico
γ_s	: Peso Volumétrico de la partícula del suelo
γ_w	: Peso Volumétrico del agua
γ_h	: Peso Volumétrico Húmedo del suelo
τ	: Esfuerzo Cortante
σ	: Esfuerzo Normal
σ_n, σ_v	: Esfuerzo normal vertical y horizontal
ϕ	: Angulo de fricción interna del suelo
ε	: Deformación unitaria
h	: Altura de compactación
e	: Relación de vacíos
E	: Modulo de elasticidad
H_p	: Altura de probeta
I_L	: Índice de liquides
I_p	: Índice de plásticidad
N	: Porosidad
N	: Número de golpes
$w\%$: Porcentaje de contenido de humedad
w	: Humedad natural

%H	: Porcentaje de hinchamiento en el ensayo de CBR
V_s	: Volumen de sólidos
V_w	: Volumen de agua
L_L	: Límite Líquido
L_P	: Límite plástico
pH	: Acidez o alcalinidad
P_i	: Presión ínter granular
T	: Temperatura
t	: Tiempo
G_s	: Gravedad específica
μ	: Micra (0.001 milímetro)

SIGLAS UTILIZADAS

AASHTO	: Asociación Americana de Agencias Oficiales de carreteras y transporte
ASTM	: Sociedad Americana para Pruebas de material
CBR	: California Bearing Radio o Valor Relativo de Soporte
USDA	: Sistema del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
FAA	: Sistema de la Agencia Federal de Aviación
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
PVS	: Peso Volumétrico Seco
IAA	: Instituto Americano del Asfalto
MOP	: Ministerio de Obras Públicas
PCA	: Asociación Americana para Pavimentos de Concreto

INTRODUCCION

En el presente trabajo de graduación se estudia la estabilización de arcillas con enzimas orgánicas, para poder usarlas en la base y sub-base de carreteras, obtenidas de la zona norte del país, específicamente del Cerro Pacho en Chalatenango y del Cerro Cirimba en Morazán, ambas muestras se recolectaron protegiéndose de la pérdida de humedad y del deterioro durante el transporte, para conservar las condiciones originales del sitio de donde fueron extraídas.

Se estudian las propiedades físicas-mecánicas de los suelos finos bajo los conceptos de la Mecánica de suelos aplicados a carreteras, tales como granulometría, límites de consistencia, y clasificación de suelos; y métodos de compactación en laboratorio y en el campo; también una revisión de conceptos de las arcillas y las enzimas orgánicas.

La base teórica de las propiedades de las arcillas involucra el conocimiento de características principales como son: su textura, origen, composición de los minerales, sustancias orgánicas y componentes no arcillosos. En cuanto a las enzimas en general se estudia la estabilidad, estructuración y la temperatura; determinando la dosificación, experiencias y costos de aplicación de la enzima de prueba.

Para el desarrollo de este estudio se incluyen conceptos básicos de las vías terrestres, particularmente se revisaron conceptos con respecto a base y sub-base en los dos tipos de pavimentos rígido y flexible, con el objeto de identificar la calidad de los suelos y los métodos de compactación.

Para determinar si ambos suelos arcillosos analizados son aptos para utilizarlos en carreteras, se realizaron los ensayos con y sin enzimas orgánicas

para poder llegar a un resultado favorable, estas pruebas son: análisis granulométrico mecánico ASTM D-421 Y 422, Método del Hidrómetro AASHTO T87 Y T88, ASTM D-421 Y 422 95, límites de consistencia ASTM D 4318, Valor Relativo de Soporte CBR AASHTO T-193, Proctor AASHTO T-180, ASTM D1557 y Permeabilidad ASTM D 2435-90. Para esto se seleccionaron muestras de dos lugares importantes de la zona norte del país, ubicados en los Departamentos de Chalatenango y Morazán respectivamente, las muestras recolectadas tienen la característica principal de no ser suelos utilizados en carreteras por estar constituidos por suelos finos, estos se analizaron en condiciones naturales y con enzimas orgánicas.

Con los valores obtenidos de las pruebas se realizó el análisis comparativo, y se presentan los respectivos resultados, considerando que cada tipo de suelo tiene valores diferentes bajo los efectos de la enzima orgánica. El suelo de Chalatenango se clasificó como CH, y el suelo de Morazán como MH, ambos suelos se mejoraron, pero no sustancialmente determinando que se pueden usar solo en sub-rasante de vías.

Las consideraciones, conclusiones y recomendaciones, están basadas en la determinación de los cambios generados por la enzima orgánica, a través de la experiencia alcanzada en esta investigación en las pruebas realizadas al suelo.

CAPITULO I
GENERALIDADES

CAPITULO I

GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN.

Actualmente en el país se desarrolla un 19% del total de proyectos de carreteras, programados para los próximos 4 años. Bajo estas circunstancias se hace necesario el mejoramiento de los suelos locales no aptos para la construcción vial, ya que no cumplen los requisitos para este propósito, por lo que en estos casos se tiene que buscar alternativas para utilizar el suelo adecuadamente, de manera que no afecte la seguridad, ni el aspecto económico del proyecto.

Desde hace varios años la arcilla sirvió al hombre como materia prima en la construcción de múltiples actividades; su importancia económica ha llegado a ser tan grande que son pocas las actividades donde no se le utilice. En la construcción, la arcilla no cumple las condiciones necesarias que se establecen en las normas de la ASTM, para utilizarla como suelo selecto en la compactación de carreteras, por lo que es necesario mejorar sus condiciones por medio de aditivos para lograr su estabilización.

En este estudio investigativo se analiza el aditivo estabilizante de enzima orgánica, proveniente de la fermentación de materias orgánicas, y actúan sobre suelos cohesivos, acelerando los procesos de consolidación del suelo superficial.

Los procesos que se desarrollaran al adicionar enzimas orgánicas a los suelos cohesivos, se analizarán exclusivamente desde el punto de vista físico-mecánico; y será aplicado en el laboratorio sobre dos muestras de suelo de base y sub-base, característicos de la zona norte del país.

1.1 ANTEPROYECTO

1.1.1 ANTECEDENTES

En los últimos años El Salvador ha experimentado un desarrollo muy acelerado de infraestructura vial, de acuerdo al crecimiento urbano de las principales ciudades. Debido a esto, se puede decir que las obras de terracería juegan un papel muy importante en la ejecución de cualquier obra civil; para que estas presenten la resistencia requerida, es necesario que se conozcan las propiedades físicas-mecánicas de los suelos que se utilizan para tal efecto. Según el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, en el país se encuentra el 35% de suelos arcillosos del grupo latosoles arcillo-rojizos, y un 2% de latosoles arcillosos ácidos, similares a los anteriores diferenciándose por su Ph, y saturación de bases, ambos están distribuidos a lo largo y ancho del país¹.

La arcilla es objeto de considerable interés y uso por el hombre desde los tiempos más remotos, ya que se trata de un material tradicionalmente ligado a la arquitectura y a la cerámica. Desde el punto de vista de su origen, la arcilla no tiene significado genético unitario ya que puede ser un depósito sedimentario, un producto de meteorización, un producto hidrotermal o ser el resultado de una síntesis. El término arcilla, conceptualmente es diferente para el ceramista, el geólogo, el edafólogo o el fabricante de ladrillos. En este estudio el término arcilla se usará en acepción edafológica.

¹ EL SALVADOR ESTUDIO DE CAMPO PERFIL AMBIENTAL. EMTECSA de C.V. División de Consultoría.

Guerrero, L. y otros (1992)², encontraron arcillas (CH) de alta plasticidad, con Ip de 34.35 a 56.1, color gris oscuro, en el cantón el Talpetate, Pasaquina, La Unión. También, Aquino M. y otros (1999)³, encontraron arcillas de color negro, las clasificaron como arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), con índice de plasticidad (Ip) de 42.4, en el Km 144, carretera Panamericana hacia San Miguel (Facultad Multidisciplinaria de oriente, UES); ellos mismos en el Km 57 ½ hacia Chalatenango encontraron arcillas de mediana plasticidad, (CL) de color rojizo, inorgánicas, con Ip de 14.28.

Se conocen productos estabilizadores de suelos como las enzimas orgánicas⁴ que provienen de la fermentación de materias orgánicas y actúan sobre suelos cohesivos, acelerando los procesos de reducción de plasticidad.

Las especificaciones propias de las enzimas orgánicas consideran que al mezclarlas con suelos cohesivos se obtendrán los siguientes resultados:

- ✓ Disminuiría el límite líquido y el índice plástico de las arcillas
- ✓ Disminuiría la humedad óptima del proctor y aumentará la densidad máxima.

² Guerrero, Luis Alberto y otros.(1992) Estudio Experimental de las arcillas de Pasaquina, para su Utilización como Material de Construcción. Trabajo de Graduación Ing. Civil. FIA-UES. San salvador.

³ Aquino Cerna Manuel y otros.(1999). Comportamiento del cemento como estabilizador de distintos suelos. Depto de Ingeniería. Facultad Multidisciplinaria de Oriente-UES, San Miguel, San Salvador.

⁴ Las enzimas orgánicas se presentan en forma líquida, son solubles en agua, de color café, olor a maleza, peso específico igual o ligeramente superior al del agua, pH entre 4.3 y 4.6, la temperatura de almacenamiento no exceda los 55° C.

- ✓ El valor relativo de soporte (CBR) aumentaría, y la expansión se reduciría.
- ✓ La permeabilidad disminuiría.

Un estudio⁵, en 3 ensayos agregando producto de enzimas orgánicas a grava arenosa bien graduada, con 25% de finos ligeramente plásticos, color café oscuro provenientes del proyecto San Julián-Ishuatan, Departamento de Sonsonate, mostró que, el CBR aumentaba al doble con respecto al CBR del material en estado natural, como se indica en el tabla 1.0

Tabla 1.0 Resultados experimentales al adicionar enzimas orgánicas.

	Sin aditivo	Con aditivo		
Tiempo (en días)	–	5	14	21
CBR (%)	21	30	36	40

Fuente: Adaptado del Manual Técnico del Sistema Terrazyme.

1.1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el desarrollo de los países refleja de manera implícita en el estado de su red vial, puesto que las vías terrestres son sistemas de comunicación y transporte; por eso existen muchas empresas que se dedican a las actividades de terracería y específicamente a procesos de compactación, con materiales selectos, que muchas veces son difíciles de encontrar en el lugar, y que cumplan con las normas de construcción establecidas. Por tal situación, se considera necesario el mejoramiento de los

⁵ Realizado en el Instituto Tecnológico Centroamericano (1998).

materiales locales, por medio de aditivos técnicamente empleados para lograr su estabilización.

Las arcillas⁶ en estado natural, pueden ser deformadas permanentemente por acción de una presión, con frecuencia se modifican para servir como materia prima en la construcción, y en diferentes industrias⁷, su importancia ha llegado a ser tan grande que no existen actividades donde no se les considere o no se utilicen. Sin embargo al utilizarlas en las carreteras, las arcillas presentan características de consistencia problemática, principalmente cuando están en contacto con el agua, ya que la adhesión con ésta incrementa la plasticidad, experimentando cambios de volumen, causando daños en la capa de rodamiento y en las propiedades físico-mecánicas, no reúnen las condiciones requeridas en las especificaciones técnicas de cualquier proyecto de interés, ocurriendo fallas superficiales en los pavimentos tales como fisuras hundimientos y ensanchamientos.

Ya que un 37% de los suelos del país⁸ están constituidos por arcillas, que se usan como probables materiales locales en la construcción, esto hace

⁶ La arcilla se usará preferentemente en acepción edafológica, para indicar un producto natural, originado a partir de la meteorización de las rocas, cuyas partículas son del tamaño inferior a 2μ , constituido principalmente por aluminosilicatos de origen secundario (minerales propios de la arcilla) y componentes accesorios, primarios, secundarios u orgánicos, en el cual radica gran parte de la actividad físicoquímica del suelo.

⁷ En la industria de la cerámica, para la fabricación de porcelana, lozas, ladrillos y tuberías; en la industria del cemento; en la industria del petróleo, como catalizadores en el proceso del "cracking", en oxidaciones catalíticas; en la fabricación de ciertas grasas y lubricantes; en la industria del caucho y los plásticos; en la ingeniería de suelos, como factor determinante de muchas propiedades mecánicas.

⁸ El Salvador Estudio de Campo Perfil Ambiental. EMTECSA de C.V. División de consultoría.

necesario buscar formas alternativas para estabilizarlas. Una alternativa de solución al problema lo constituyen el adiconamiento de enzimas orgánicas para mezclarlas, ya que estas son estabilizadoras del suelo natural, se diluyen en agua fácilmente, reducen la penetración del agua en la base de la vía. Son una combinación de tres componentes principales: surfactantes*, traceadores* y fermentos*; cada uno de estos componentes tienen su papel en el proceso de estabilización.

1.1.3 OBJETIVOS.

1.1.3.1 OBJETIVOS GENERALES.

Mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las arcillas estabilizándolas con enzimas orgánicas, para la zona norte del país.

1.1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- a) Determinar los límites de consistencia, proctor, permeabilidad y capilaridad de las arcillas con y sin tratamiento de enzimas orgánicas.
- b) Determinar la capacidad de soporte para cargas de tráfico de las arcillas del norte del país tratándolas con enzimas orgánicas.

*Surfactante, las sustancias que modifican la tensión superficial del agua. Traceadores, tipo de esfuerzo cuando la dirección de la fuerza tiende a alargarse. Fermento, microorganismo capaz de producir fermentaciones en condiciones anaerobias

1.1.4 ALCANCES GLOBALES.

Obtener en el laboratorio la resistencia de las arcillas sin y con estabilizadores, de acuerdo con las normas de la ASTM C-117 análisis granulométrico por lavado, ASTM D-4318 límites de consistencia, ASTM D1883-97 Valor relativo de soporte de suelos compactados en laboratorio, y aplicarlas a las arcillas de la zona en estudio.

1.1.5 LIMITACIONES.

Si fuera necesario disponer de las propiedades químicas, así como de las propiedades mineralógicas, estas se gestionarán preventivamente en un laboratorio tal que cumpla con los objetivos del estudio para su determinación.

1.1.6 DELIMITACIONES.

Se experimentará con dos tipos de arcilla, una de alta plasticidad y la otra de baja plasticidad, para ver en qué medida se modifican sus propiedades mecánicas, y poder comparar entre los resultados de los dos tipos de muestra de arcilla recolectada.

Las muestras de arcilla a ensayar se escogerán en dos zonas programadas para proyectos de carretera.

1.1.7 JUSTIFICACIÓN.

La arcilla es un material que presenta problemas para ser estabilizada debido a los cambios de volumen que experimenta, por las variaciones en sus contenidos de humedad, esto daña los pavimentos de las carreteras, llevándolos hasta el muy mal estado, implicando grandes inversiones en reparaciones y mantenimiento de las vías; por tal razón, en el país se están utilizando materiales aditivos para estabilizar los suelos arcillosos, dentro de los cuales están las enzimas orgánicas que experimenta variaciones de las propiedades durante corto tiempo.

El alto costo que representa el acarreo de material selecto que cumpla las condiciones adecuadas para poder ser utilizado para la base y sub-base de las carreteras, obliga a mejorar las condiciones del suelo del lugar para que este pueda ser útil en la estabilización de suelos en la construcción de carreteras.

Con los resultados de este trabajo se espera, aportar en el mejoramiento de la calidad de las arcillas, aptas dentro del ambiente constructivo, renovando el estado natural de estas en sus propiedades físicas-mecánicas.

1.1.8 METODOLOGÍA A DESARROLLAR.

La información bibliográfica que se utilizará en el desarrollo de este trabajo de graduación, se obtendrá de diferentes autores relacionados con el

tema de estabilización de suelos, a través de distintos medios como, bibliotecas, entrevistas, visitas a empresas, Internet, etc.

El trabajo de campo y de laboratorio será fundamental en este estudio, el primero consiste en hacer dos visitas a diferentes sitios de Chalatenango⁹ y Morazán¹⁰, para la recolección de las muestras, los sitios reúnen condiciones que a futuro pueden ser considerados para diseñar pavimentos.

El trabajo de laboratorio consistirá en realizar diferentes pruebas a muestras de suelos arcillosos extraídas de cada sitio; estas consistirán en: granulometría, límites de consistencia, densidad, valor relativo de soporte, permeabilidad y capilaridad, con la finalidad de obtener la variación de las propiedades físicas-mecánicas de las arcillas.

También se realizarán visitas a un proyecto específico de una carretera en ejecución en el cual se esté utilizando enzimas orgánicas como agente estabilizante, dicha visita tendrá como objetivo observar la forma de aplicación del producto, proceso de mezclado, equipo utilizado, etc. Esto se hará con la colaboración de una empresa específica.

Para evaluar los resultados del tratamiento con las enzimas orgánicas sobre los suelos locales, se seleccionarán dos tipos de arcilla, una de baja, y la otra de alta plasticidad, provenientes de la zona norte del país. Los procesos que se desarrollarán al adicionar enzimas orgánicas a las arcillas, se analizarán solo desde el punto de vista físico y mecánico, este aditivo será

⁹ El Cerro Pacho, 10 Km. al nor-poniente de Nueva Concepción, Chalatenango.

¹⁰ El Cerro Cirimba, 1 Km. al nor-orientado de San Francisco Gotera, Morazán.

aplicado en el laboratorio sobre las dos muestras para base y sub-base de carreteras.

1. 2 LOS SUELOS Y SUS PROPIEDADES.

1.2.1 GRANULOMETRIA DE LAS ARCILLAS.

El suelo según su granulometría se puede identificar así:

- a) Suelo grueso: es el material retenido en la malla No. 4 (4.75 mm de abertura cuadrada).
- b) Arenas: es el material que pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y que se retiene en la malla No. 200 (0.075 mm).
- c) Suelo Fino: el material que pasa la malla No. 200 (0.075 mm de abertura cuadrada).

La granulometría de un suelo se obtiene a través de los siguientes métodos:

Método Mecánico: Se utiliza para obtener la granulometría de suelos cuyos tamaños son mayores que la malla No. 200. Este método se realiza utilizando cribas o mallas de abertura cuadrada, colocadas en orden descendente; según la abertura, la muestra a analizar, deberá lavarse a través de la malla No. 200, antes de aplicarle el proceso mecánico de tamizado, para determinar más exactamente, el porcentaje de materiales menores que dicha malla, en el cual el tamaño máximo se fija como la abertura de la malla, en la que se retienen aquellas partículas de mayor tamaño.

Método del Hidrómetro: Se utiliza para obtener la granulometría de suelos cuyos tamaños son menores que la malla No. 200. Se utiliza un hidrómetro o densímetro que permite determinar el peso volumétrico del líquido en el cual se sumerge. La prueba se efectúa sedimentando una suspensión de suelo fino en agua destilada y midiendo la variación del peso volumétrico, de la suspensión, con respecto al tiempo; a medida que se asientan los granos de suelo. Este método proporciona los datos necesarios para determinar el diámetro máximo de las partículas en suspensión y el peso de ellas.

Con el hidrómetro se determina el diámetro de las partículas de suelo, atribuyendo a las mismas un valor obtenido en función de la velocidad de caída de una esfera dentro del agua, la cual se supone que es igual a la del grano de suelo, aún cuando la forma de éste no sea, ni remotamente esférica. Para lograr una mejor apreciación sobre las características de un suelo, desde el punto de vista del tamaño de sus granos, estos se representan gráficamente ploteando en papel semilogaritmico los resultados de una granulometría, tomando en cuenta para ello los siguientes factores:

- ✓ Tamaño de las mallas usadas en el proceso; esto equivale a tomar en consideración algunos de los tamaños de agregados presentes en el suelo (diámetro de las mallas).
- ✓ Porcentaje de suelo que pasa en cada una de las mallas usadas en el proceso de tamizado.

Se hace hincapié en lo siguiente:

Debido a que, en el proceso de tamizado se incluyen tamices de aberturas muy pequeñas (Ej. : malla 200) es muy conveniente usar una escala logarítmica (abscisas) para el ploteo de los porcentajes que pasan en cada una de las mallas. Para que la representación gráfica sea fidedigna, hay que asegurarse que el tiempo de vibrado haya sido lo suficiente para el logro de tal propósito, ya que para efectuar un buen análisis granulométrico se debe asegurar que todas las partículas tengan la oportunidad de estar en contacto con cada una de las mallas por donde pueden pasar.

1.2.2 PERMEABILIDAD

Es la facilidad o dificultad que tiene un suelo de permitir que lo atraviese el agua a través de sus vacíos. Esto permite clasificar los suelos en: suelos permeables y suelos impermeables, y su grado de permeabilidad está dado por el coeficiente de permeabilidad. Se necesita conocer esta propiedad del suelo, pues la presión de poro y lo relacionado con el flujo de agua a través del suelo, influyen en su capacidad portante.

Los factores más importantes que intervienen en la permeabilidad son:

- a) Densidad del suelo, es la masa de suelo por unidad de volumen.
- b) La granulometría, es la distribución de los diferentes tamaños de granos del suelo presentes en una muestra.

- c) La forma característica de las partículas, es la equidimensionalidad para los suelos granulares de donde se obtienen subdivisiones, tales como la forma redondeada, la sub-redondeada, la subangulosa y la angulosa. Las partículas de suelos finos, arcillosos, son de forma laminar o acicular.
- d) Orientación de las partículas, es la disposición de las partículas de una masa de suelos respecto a una orientación, esta es más marcada cuando más se aleja de su forma esférica.
- e) Grado de saturación, es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos de una muestra de suelo.
- f) Aire presente en el suelo, corresponde a la fase gaseosa del suelo.

1.2.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA DE LAS ARCILLAS

En los suelos finos tiene lugar la consistencia o el grado de cohesión de las partículas y su resistencia a aquellas fuerzas exteriores que tienden a deformarlo o destruir su estructura. Los límites de consistencia o límites de Atterberg son importantes porque sirven de base para la clasificación de los suelos finos. Para medir la plasticidad de los suelos finos y cohesivos o sea las arcillas, se han desarrollado varios criterios, de los cuales el debido a Atterberg es el más conocido. Así, un suelo con características plásticas puede estar en cualquiera de los siguientes estados, de acuerdo con el contenido de agua, en un orden decreciente:

- ✓ Estado Líquido: el suelo está desintegrado y contenido en una suspensión de agua con propiedades y apariencia pastosa, fluida y los gránulos se notan al tacto.
- ✓ Estado Semilíquido: tiene las propiedades de un fluido viscoso.
- ✓ Estado Plástico: el suelo se deforma y pierde consistencia generando expansión o contracción.
- ✓ Estado Semisólido: El suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
- ✓ Estado Sólido: el volumen del suelo no varía con el secado.

De los cinco estados de consistencia sugeridos por Atterberg, comúnmente se aceptan cuatro: estado líquido, estado plástico, estado semisólido, estado sólido. La transición de un estado a otro es gradual, no obstante resulta útil definir fronteras entre los estados. A estas fronteras se les llama Límites de Atterberg, estos son:

- ✓ Límite Líquido, es el contenido de humedad con el cual el suelo deja ser líquido y pasa a ser plástico.
- ✓ Límite Plástico, es el contenido de humedad con el cual el suelo deja de ser plástico y se convierte en un sólido semiplástico.
- ✓ Límite de Contracción, es el contenido de humedad con el cual, cesa la contracción de secado bajo un esfuerzo constante.

1.2.4 VARIACIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS ARCILLAS.

Los cambios de humedad influyen en la estabilidad de los suelos, expandiéndolos o contrayéndolos, esto es perjudicial para cuando soportan pesos de estructuras, principalmente; debido a la reducción de los esfuerzos generados al incrementarse la humedad o el agrietamiento por pérdida de humedad, ya que en ambos casos puede ocasionar deterioro, como en el caso de los pavimentos donde se ocasionan baches, hundimientos o una combinación de ellos y dañan las obras aledañas como postes, muros, tubos de drenaje etc. Es importante, detectar los suelos expansivos para aplicar el método más adecuado para su tratamiento, en la construcción de caminos.

1.2.5 COMPACIDAD.

La arena, de una cierta composición granulométrica, es más o menos compacta, según presenta in situ, un menor o mayor volumen de huecos. En una arena ideal compuesta de partículas esféricas, el índice de huecos y la porosidad varían entre los siguientes límites:

Tabla 1.1 Compacidad de las arenas

	Compacidad mínima	Compacidad máxima
Índice de huecos , e	0.91	0.35
Porosidad , n	0.48	0.26

Pero la porosidad de las arenas varía normalmente entre 0.50 y 0.30, estos valores son muy cercanos a los valores teóricos indicados en la tabla 1.1a Se pueden concebir valores de la porosidad superiores a 0.50, que corresponden a suelos en los que una capa líquida más o menos continua aísla los constituyentes sólidos. El estado de compacidad de una arena real en determinada composición granulométrica se puede caracterizar por la compacidad relativa C_r .

$$C_r = \frac{e_o - e}{e_o - e_{min}} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Siendo

e_o : el mayor índice de huecos posibles, que corresponde a la compacidad natural más pequeña, obtenido por vertido desde poca altura.

e_{min} : el menor índice de huecos posibles, que corresponde a la mayor compacidad posible.

e : el índice de huecos real del suelo in situ.

1.2.6 ESFUERZOS EN LOS SUELOS ARCILLOSOS.

Los esfuerzos en una masa de suelos arcillosos están influenciados por diferentes factores, tales como: compacidad del suelo, contenido de humedad, plasticidad, permeabilidad, etc., que hacen el análisis más complejo de lo que, se utiliza en otros materiales homogéneos, como los

metales, donde los esfuerzos dependen directamente de la carga aplicada, pudiendo ser estos esfuerzos, de compresión o de flexión. En los suelos se definen dos tipos de esfuerzos, primero los esfuerzos que son producto de la aplicación de cargas a una porción de suelo y segundo, los esfuerzos internos o esfuerzos de contacto que son esfuerzos en los puntos de contacto entre partículas, siendo estos de tipo microscópicos.

1.2.7 RESISTENCIA AL CORTE EN LOS SUELOS ARCILLOSOS.

Los suelos bajo la acción de las cargas tienden a ser como los materiales elásticos, aunque, en algunos casos se producen deformaciones mayores que las normales, teniendo que recurrir entonces a cálculos que tengan en cuenta la plasticidad del suelo. Una muestra de suelo sometida a un esfuerzo cortante (τ), tiende a producir un desplazamiento de las partículas entre sí o de una parte de la masa del suelo con respecto al resto del mismo. Se acepta, que la resistencia al corte (τ) de un suelo viene dada por la ecuación de Coulomb como sigue:

$$\tau = c + P_i * \tan \varphi \quad (\text{Ec. 1.2})$$

en la que:

τ : Resistencia al corte del suelo, en kg/cm^2

c : Cohesión del suelo, en kg/cm^2 .

P_i : Presión ínter granular, en kg/cm^2

ϕ : Angulo de fricción interna del suelo, el cual se supone que es constante.

En general, los suelos poseen al mismo tiempo cohesión y fricción¹² interna; sin embargo, existen dos casos límites:

a) Las arenas lavadas y secas no poseen cohesión, la carga de ruptura se produce para un valor de:

$$\tau = P_i * \tan \phi \quad (\text{Ec. 1.3})$$

pasando por el origen la envolvente del círculo de Mohr, como se puede ver en la Fig. 1.1.

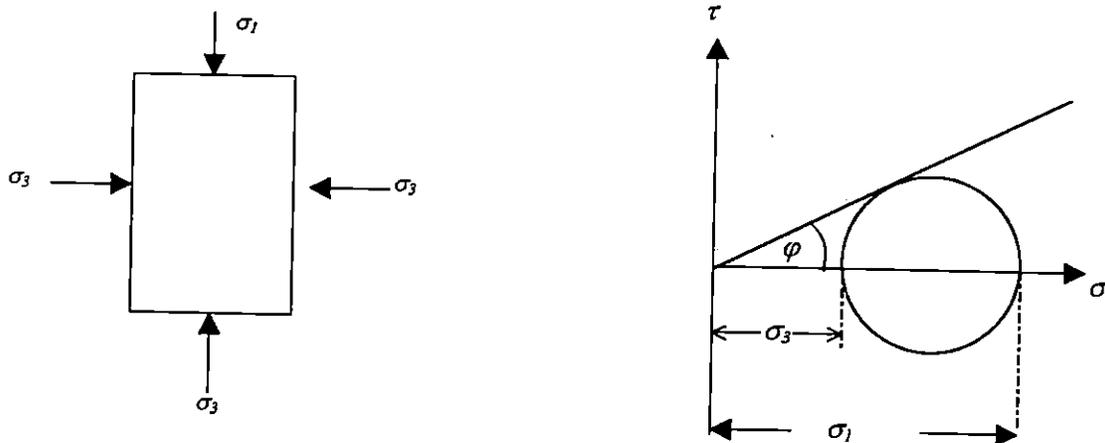


Figura 1.1

b) Las arcillas blandas, se consideran como si ϕ fuese igual a cero, Resultando la carga de ruptura constante e igual a la cohesión del suelo, como se indica en la Fig. 1.2; por lo tanto:

¹² La cohesión es típica en aquellos suelos que no son friccionantes y que por sus características físico-químicas tienen una pegajosidad que es la que caracteriza a la cohesión, siendo esta propiedad mecánica, cohesión real; sin embargo, los suelos friccionantes puede decirse que a veces definen cierta cohesión pero ésta es aparente, debido a sus características físico-mecánicas.

$$\tau = c$$

$$(Ec. 1.4)$$

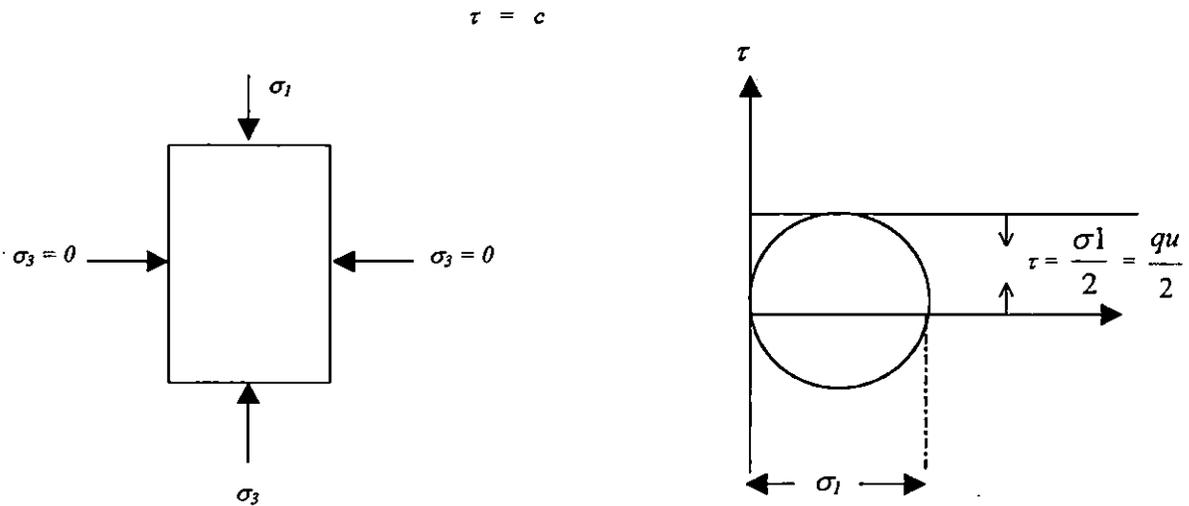


Figura 1.2

σ_1 y σ_3 son esfuerzos principales y q_u es el esfuerzo unitario de ruptura a compresión no confinada.

La cohesión se puede definir como la adherencia entre las partículas del suelo debido a la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares internas.

El ángulo de fricción interna es un valor que depende de la uniformidad de las partículas del suelo, del tamaño y la forma de los granos y de la presión normal, se le considera constante.

1.2.8 DEFORMACIÓN EN LOS SUELOS ARCILLOSOS.

Las deformaciones en los suelos, están ligadas al concepto de esfuerzos que pueden ser inducidos por cargas aplicadas. Los movimientos de las partículas en una masa de suelo son difíciles de explicar ya que, dependen de factores propios del tipo de suelo y sus propiedades a analizar, tales como la plasticidad, granulometría, cohesión, compacidad; además de las condiciones a que estén sometidos tales como el contenido de humedad del suelo; pero su análisis por modelos sencillos sirven para explicar los procesos complejos que se dan en una masa de suelo real.

Las deformaciones experimentadas por un elemento de suelo son el resultado de las deformaciones internas y los movimientos relativos entre las numerosas partículas que componen dicho suelo. Existen dos mecanismos, en suelos granulares, que son responsables de la deformación bajo carga: La distorsión y fractura de las partículas y el movimiento relativo de las partículas como el resultado del deslizamiento y fractura.

Generalmente éstos mecanismos se efectúan al mismo tiempo; las partículas tienden a fracturarse aumentando el número de vacíos, los cuales son ocupados por los fragmentos pequeños, acomodándose en la masa de suelo, ocasionando una disminución de volumen. Para ilustrar el concepto de deformación se considera el siguiente esquema. Ver Fig. 1.3.

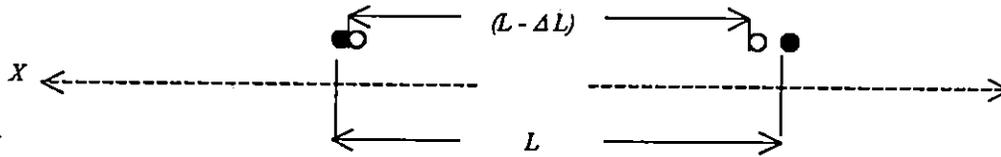


Figura 1.3. Esquema de deformación en un sistema de partícula.

La deformación de una masa de suelo bajo esfuerzo, es el cambio volumétrico que sufre el suelo, provocado por esfuerzos internos o por los esfuerzos provocados por carga aplicada, originando una disminución en el volumen de la masa de suelo y una recuperación parcial de volumen al retirar las cargas, su valor se obtiene como indica la ecuación 1.5.

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Ec.1.5})$$

Donde:

ϵ_x : Deformaciones unitarias a compresión en la dirección x
(cm. o plg.)

$\frac{\Delta L}{L}$: Deformación Lineal unitaria respecto al eje x (cm. o plg.)

1.3 INFLUENCIA DEL AGUA SOBRE LAS ARCILLAS.

La estructura de las moléculas de arcilla está formada por tetraedros y octaedros que poseen en su centro iones de silicio y aluminio y en los vértices cargas negativas de iones "O" u "OH".

Esta actividad electroquímica es lo que hace inestable las propiedades de las arcillas cuando son expuestas a la humedad. Así, cuando una arcilla es sometida al contacto del agua, las cargas electroquímicas negativas superficiales de sus granos atraen el hidrogeno de las moléculas de agua orientándolos definitivamente, a este fenómeno se le llama atracción de superficie. Esta atracción forma una película de agua alrededor de cada partícula. Debido a su diminuto tamaño y por consiguiente al valor elevado de la superficie específica de éstos suelos, el grueso de ésta película es tal, que el agua actúa como un lubricante separando las partículas del material, con el consecuente aumento de volumen y plasticidad (que es la característica de un suelo de deformarse sin agrietarse ni aumentar su volumen significativamente, y no recuperar su forma original al aplicarle y retirarle una carga externa).

Cuando la capa absorbente de las arcillas no es saturada las moléculas de agua actuarán como aglutinantes. Por esta razón la arcilla mezclada con arena da buenos resultados, pues la humedad se pierde, en parte por la evaporación y en parte por compactación producida por alguna carga externa, a través de los poros de la arena. Luego la película de agua que rodea las partículas es más delgada y actúa como aglutinante dando la mayor densidad e impermeabilidad cuando es compactada y por consiguiente más estabilidad a las propiedades físicas del suelo cuando está expuesto a cambios de humedad.

1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS ARCILLOSOS.

Los sistemas de clasificación de los suelos son tan antiguos como la misma Mecánica de Suelos, en un principio esta se basaba más que todo, en una descripción visual (olor, color, textura, etc.), posteriormente se introdujo el análisis por tamizado o granulométrico que ofreció un medio más sencillo para clasificarlo. Sin embargo, todavía hay criterios de clasificación poco apropiados, porque la correlación de la distribución granulométrica con las propiedades fundamentales (resistencia, compresibilidad, permeabilidad) resultan demasiado inseguras. Los métodos de clasificación de suelos (ver anexos 1A), son los siguientes:

- ✓ El de la asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transporte (AASHTO).
- ✓ El sistema del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).
- ✓ El sistema de la Agencia Federal de Aviación (FAA), entre otros.
- ✓ El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El sistema de clasificación de suelos que más usan los especialistas en la actualidad fue elaborado por el Dr. Arthur Casagrande. En 1969, el sistema Unificado fue adoptado por la American Society for Testing and Materials (ASTM), como método estándar de clasificación de suelos para obras de ingeniería, ASTM D-2487. Este sistema divide a los suelos en dos grandes grupos: Los gruesos, formados por partículas mayores que la malla No. 200 y menores que la malla de 3" y los finos formados por partículas que pasan la

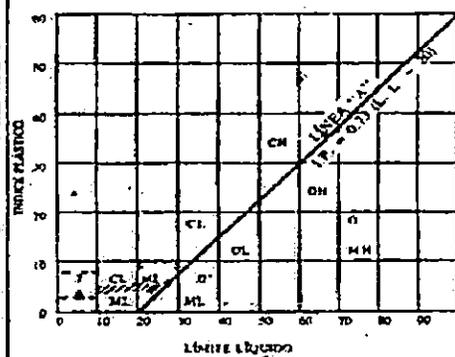
mallita No. 200. La fracción gruesa se subdivide en gravas y arenas teniendo como frontera la mallita No. 4. Este sistema simboliza estos suelos de la siguiente manera: - Grava y suelo gravoso, símbolo G, - Arena y suelo arenoso, símbolo S. También estos se subdividen separadamente en cuatro grupos: -Suelo bien graduado, Símbolo W. -Suelo bien graduado con excelente cementante arcilloso, símbolo C. -Suelo mal graduado, símbolo P. - Suelo grueso con finos, no comprendidos en los grupos anteriores, símbolo M.

La fracción fina se subdivide en grupos, tomando en cuenta sus características de plasticidad, las cuales se relacionan con las propiedades mecánicas e hidráulicas, que interesan al ingeniero; así, se dice que los finos se subdividen en tres grupos: suelos limosos inorgánicos y suelos arenosos muy finos, símbolo M. - arcillas inorgánicas, símbolo C. - limos y arcillas orgánicas, símbolo O.

Cada uno de estos grupos de suelos finos se subdividen de acuerdo al límite líquido en: -Suelos finos con límite líquido de 50 o menos, símbolo L. - Suelos finos con límite líquido mayor de 50, símbolo H.

Suelos con elevada proporción de materia orgánica, usualmente fibrosos como la turba y los fangos de muy alta compresibilidad, no se subdividen y se colocan en un grupo, símbolo P. Ver tabla 1.1

Tabla 1.1 Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)
Incluyendo identificación y descripción

DIVISIÓN MAYOR		Símbolo	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO					
SUELOS DE PARTICULAS GROSAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla N.º 4.	(PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE U. CM. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N.º 4)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.	<p>DETERMÍNENSE LOS PORCENTAJES DE GRAYA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla N.º 200) LOS SUELOS GRUPOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE:</p> <p>Más de 5% GW; GP; SW; SP; Más de 12% GM; GC; SM; SC; 3% al 12%: Caso de frontera que requiere el uso del símbolo doble **</p> <p>Coefficiente de uniformidad C_u: mayor de 4. Coeficiente de curvatura C_c: entre 1 y 3. $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$</p> <p>NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.</p> <p>Límites de Atterberg: abajo de la "línea A" o I.P. menor que 4.</p> <p>Límites de Atterberg: arriba de la "línea A" con I.P. mayor que 7.</p> <p>$C_u = \frac{100}{D_{10}}$ mayor de 6, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ entre 1 y 3</p> <p>No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW.</p> <p>Límites de Atterberg: abajo de la "línea A" con I.P. menor que 4.</p> <p>Límites de Atterberg: arriba de la "línea A" con I.P. mayor que 7.</p>				
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.					
			GM	d		Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.			
						Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.			
			SM	u		Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.			
						Arenas mal graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.			
			SC	a		Arenas limosas, mezclas de arena y limo.			
						Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.			
			SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla N.º 4.		(PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE U. CM. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N.º 4)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.	<p>EQUIVALENCIA DE SÍMBOLOS</p> <p>G = gravas; M = limo; O = suelos orgánicos; W = bien graduados; U = arenas; C = arcilla; P.I. = barro; P = mal graduados; L = baja compresibilidad; H = alta compresibilidad</p> <p>CARTA DE PLASTICIDAD</p> <p>Para la Clasificación de Suelos de Partículas Finas en el Lab.</p>  <p>ING. C. C. R. L.</p>
							SP	Arenas mal graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.	
SM	a	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.							
		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.							
ML	límite de 50	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.							
		Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.							
		Limos orgánicos y arcillas limosas depósitos de baja plasticidad.							
MH	límite de 50	Limos inorgánicos, limos micáceos o diastrómicos, limos elásticos.							
		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.							
		Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.							
OH	límite de 50	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.							
		Turbas y otros suelos altamente orgánicos.							

** Clasificación de frontera — Los suelos que posean las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos, por ejemplo GW-GC, mezcla de arena y grava bien graduadas con cementante arcilloso.
 * Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U.S. Standard.
 * La división de los grupos GM y SM en subdivisiones d, y u, son para caminos y aeropuertos únicamente. La subdivisión está basada en los límites de Atterberg. El sufijo d se usa cuando el L.L. es de 28 o menos y el I.P. es de 6 o menos. El sufijo u es usado cuando el L.L. es mayor que 28.

1.4.1 DEFINICIÓN DE ARCILLA, MINERALES Y MINERALOGIA DE ARCILLAS.

La arcilla se define como un material heterogéneo, cuyas partículas son de tamaño inferior a 2 micras, compuesto de minerales propios de la arcilla y otras sustancias orgánicas. Petrográficamente se llama arcilla a una gran cantidad de materiales sedimentarios, de granulometría fina y mineralogía poco definida. Los ceramistas llaman arcilla a materiales de textura que tienen propiedades plásticas cuando están húmedos, es decir que pueden ser deformados permanentemente por acción de una presión, y que son refractarios. Químicamente por arcilla se designa una serie de sustancias que con frecuencia se identifican con el caolín y son de composición muy variable, incluyendo Si, Al, Fe, elementos alcalinos y alcalinotérreos. De la arcilla se puede decir también que es un producto de la meteorización de las rocas. Por mineral de arcilla se comprende esencialmente "a los aluminosilicatos hidratados cristalinos, algunos con sustitución parcial o total del aluminio por magnesio o hierro y que incluyen como constituyentes, en ciertos casos, elementos alcalinos o alcalinotérreos". Estas partículas son de tamaño muy fino y se clasifican en grupos definidos según su estructura, por ejemplo, en minerales 2:1 (pirófilita, talco, esmécticas, vermiculita y micas) y 1:1 (caolinita, serpentina). El grupo de los aluminosilicatos amorfos y paracristalinos, con sus representantes principales alófana e imogolita, pese a su estructura poco definida, se incluye dentro de los minerales de arcilla.

La Mineralogía de arcillas, estudia la formación, transformación, y propiedades de los minerales arcillosos, además de su identificación según criterios químicos, físicos, estructurales y genéticos.

1.4.2 ORIGEN DE LA ARCILLA.

Los factores formadores del suelo determinan acciones físicas y químicas que transforman la roca original¹³. Las primeras desmenuzan el material, originando arenas, que mantienen sin mayores modificaciones las características del material parental. La arena gruesa está constituida por trozos de roca en los cuales persiste gran parte de los minerales originales. La arena fina contiene, sin embargo, separados o individualizados los constituyentes de la roca madre, con excepción de aquellos muy susceptibles al ataque químico. Es raro, por ejemplo, encontrar olivinos, piroxenos o anfíboles en la arena fina luego de acciones de meteorización relativamente intensas.

Mineralógicamente, el limo es una fracción menos definida ya que está constituido por productos provenientes de la desintegración física y de la alteración química. Aunque en su constitución dominan el cuarzo y los feldspatos, estos están en menor proporción que en la arena; además, contienen generalmente una pequeña cantidad de minerales secundarios,

¹³ Tales como la meteorización química y mecánica, el intemperismo, la degradación dinámica y la misma metamorfisación.

hidróxidos de hierro y productos intermediarios de alteración de los minerales primarios originales.

La arcilla de suelos está constituida por productos derivados de la meteorización química, minerales amorfos o cristalinos, principalmente de neosíntesis o secundarios, con alguna o ninguna semejanza al material original. También puede ser heredada directamente del material parental con ciertas transformaciones. La fracción gruesa de la arcilla ($\phi=2.0\mu$ a 0.2μ) contiene, generalmente, algunos minerales primarios (cuarzo, feldespato, mica).

1.4.3 PROPIEDADES DE LA ARCILLA.

El tamaño y la constitución son las características más relevantes que condicionan las propiedades de las fracciones de arcilla. Las propiedades químicas, físicas y aún las biológicas, dependen de la fracción arcilla. La arena y el limo poseen muy poca actividad superficial y contribuyen escasamente en el balance de las propiedades del suelo, esta actividad reducida se debe no solo al tamaño de las partículas sino a su constitución química y estructural, a menor tamaño de las partículas, mayor es la superficie específica y más intensas son las propiedades. La arcilla es más activa que la arena y el limo; este, aunque de actividad reducida, tiene más que la arena.

Según Albareda y Hoyos¹⁴, la identificación de los constituyentes integrantes de cada una de las fracciones de suelo, está ligada al tamaño de sus granos. En las arenas los métodos de análisis son relativamente simples, en las arcillas son muy complejos. En las primeras, la lupa y el microscopio petrográfico son los métodos más frecuentes; en las arcillas debe recurrirse a la difracción de rayos X, la microscopía electrónica, el análisis térmico y otros, aplicables sólo después de haber preparado la muestra convenientemente.

1.4.4 FACTORES DE LOS CUALES DEPENDE LA CARACTERIZACIÓN DE LA ARCILLA.

La caracterización de la arcilla depende de la complejidad y proporción de los componentes que la constituyen. Entre los varios factores que deben ser considerados están: la composición de los minerales de arcilla, la composición del material no arcilloso acompañante, la materia orgánica y la textura.

1.4.4.1 COMPOSICIÓN DE LOS MINERALES DE ARCILLA.

Se entiende por composición, la clase y la cantidad de minerales en una mezcla de suelo. La arcilla no es una sustancia única; es una fracción heterogénea constituida por aluminosilicatos cristalinos o amorfos, definidos como minerales propios de arcilla y minerales no arcillosos o acompañantes

¹⁴ ALBAREDA y A.. HOYOS de C. Edafología. Madrid, SAETA, 1995. pag.368

incluyendo silicatos, óxidos, geles y otros. Muchas veces una pequeña cantidad de un mineral puede influir fuertemente sobre las propiedades químicas, como sucede, por ejemplo, con la presencia de alófana o montmorilonita en una arcilla, por lo que la caracterización debe ser completa.

La proporción de los minerales en una arcilla varía con el tamaño del gránulo, es decir, hay tendencia a que se concentren algunos minerales entre límites de determinado tamaño. Así, el cuarzo, y más aún el feldespato, se acumulan preferentemente en la fracción arcilla gruesa ($\phi=2\mu$ a 0.2μ). Por el contrario, los minerales propios de la arcilla son más abundantes en las fracciones más finas. Por lo general, bajo tamaños de $\phi=0.2\mu$ existen sólo minerales de arcilla y algunos óxidos. La determinación completa de una arcilla sólo puede lograrse efectuando las segregaciones o fraccionamientos de tamaño adecuados.

Una correcta identificación mineralógica debe preservar las características que exhiben los minerales en su estado natural y tratar de evitar reacciones que puedan modificarlas. Por ejemplo, el estado de hidratación natural que presentan las alófanas y la imogolita puede ser fácilmente alterado, aún por elevación moderada de la temperatura, modificando considerablemente sus propiedades de cambio catiónico y de superficie. La haloisita hidratada ($4H_2O$) puede perder fácilmente dos moléculas de agua pasando a la forma deshidratada o metahaloesita ($2H_2O$).

Generalmente la arcilla de suelos contiene una apreciable cantidad de material asociado no arcilloso, especialmente óxidos de hierro y aluminio cristalinos o amorfos, óxidos de titanio y otros. Tales sustancias suelen disponerse como películas concéntricas alrededor de un núcleo de arcilla, modificando sensiblemente sus propiedades e impidiendo una adecuada caracterización, y son las que necesariamente deben ser eliminadas para su análisis.

La variación en el grado de cristalinidad de los minerales de una misma especie, hace la caracterización de un material arcilloso más difícil. En la kaolinita, por ejemplo, existe una gama de variación cristalina, desde términos muy desorganizados (caolinita pM)¹⁵ hasta caolinitas¹⁶ altamente cristalinas (caolinita T)¹⁷. Algunas propiedades de la arcilla son fuertemente dependientes del grado de cristalinidad, cuando la cristalinidad es muy baja, a menudo su identificación se dificulta y a veces se contradice.

Desde el punto de vista genético e industrial, la composición química de una arcilla puede ser un antecedente de importancia. Genéticamente la presencia de un elemento como Cu, Zn, Ni, etc., indica las condiciones ambientales de procedencia de la arcilla. Industrialmente, la existencia de estos elementos en proporción elevada, por ejemplo Fe, puede ser perjudicial

¹⁵ Caolinita pM: mineral con desplazamientos desordenados $b/3$ en la superposición de sus capas estructurales, aparentemente monoclinico. Caolinita: termino usado cuando hay incertidumbre respecto a la identidad de las especies anteriores.

¹⁶ Caolinita: Término usado cuando hay incertidumbre respecto a la identidad de las especies anteriores.

¹⁷ Caolinita T: mineral con poco desorden en la superposición de las capas estructurales, triclinico.

a un determinado propósito cerámico, de catálisis y otros. Hay dos condiciones indispensables que deben considerarse para caracterizar la arcilla: la segregación no debe ser destructiva y el análisis debe ser completo. Una adecuada combinación de métodos, como son rayos X, análisis térmico diferencial y fotometría infrarroja con el complemento del análisis elemental, suele ser suficiente. Si el material arcilloso es de composición simple, incluyendo minerales amorfos o interestratificados, la interpretación se hace difícil y debe complementarse con otros análisis como microscopía electrónica, difracción de electrones, disolución selectiva u otros.

1.4.4.2 COMPOSICIÓN DE MATERIAL NO ARCILLOSO.

Los componentes no arcillosos pueden ser de origen primario o secundario. Entre los primeros figuran los granos de minerales resistentes como cuarzo, cristobalita, algunos feldespatos, mica; ocasionalmente, en arcillas de suelos derivados de cenizas volcánicas o suelos de origen aluvial muy jóvenes, o sea minerales ferromagnesianos. Los minerales secundarios más importantes son gibbsita, óxidos de hierro (hematita, goetita, lepidocrocita y geles), calcita, yeso y óxido de titanio.

Debido a que los minerales primarios tienden a acumularse en la fracción más gruesa de la arcilla ($\phi=2\mu$ a 0.2μ), y como el grado de meteorización es función del tamaño, es muy improbable encontrarlos en las fracciones más finas, de ahí que una adecuada segregación de tamaños

pueda eliminar estos minerales. En el caso de los óxidos, la situación es diferente, ya que por tamaño no pueden eliminarse; su granulometría es muy fina, y hay que recurrir a métodos químicos. El contenido de óxidos en la arcilla, cuando se encuentran en proporción baja ($< 5\%$), es difícil de evaluar cuantitativamente dentro de un margen de seguridad mínimo. En el caso de los suelos derivados de cenizas volcánicas, la situación varía. No sólo pueden encontrarse silicatos primarios como cuarzo, cristobalita o feldespatos en la arcilla, sino minerales ferromagnesianos, a pesar de su alta susceptibilidad a la meteorización. Estos minerales provienen de un depósito muy joven o de una renovada contaminación de cenizas frescas como frecuentemente ocurre en áreas volcánicas. En numerosas arcillas de andosoles de Chile se presentan pequeñas cantidades de anfíboles en la fracción gruesa.

Genéticamente, la determinación de la fracción primaria acompañante de la arcilla es importante. La presencia de cristobalita, por ejemplo, distribuida uniforme y continuamente en un perfil, o su ausencia en un horizonte, puede indicar que el suelo se formó a partir de una ceniza volcánica y que existe una discontinuidad litológica.

La determinación cuantitativa de los minerales primarios asociados a la arcilla se hace por difracción de rayos X y complementariamente por espectrofotometría infrarroja. Sin embargo, la presencia de cuarzo, puede evaluarse por rayos X hasta niveles del 2%, mientras que para feldespatos éste procedimiento es mucho menos seguro. La gibbsita, un óxido secundario

de aluminio muy común en la arcilla, se evalúa usualmente en forma cuantitativa. No siempre existe una correlación estrecha entre el área del pico endotérmico alrededor de 300° C y su contenido, pudiendo influir en esto el grado de cristalinidad de la especie. La evaluación de las silicoaluminas amorfas es muy difícil, si se encuentran en baja proporción. Los procedimientos de disolución selectiva disuelven sílice y alumina de la fracción cristalina, lo cual introduce incertidumbre en el análisis; pese a lo cual, son los métodos más usados con este propósito.

1.4.4.3 SUSTANCIAS ORGÁNICAS EN LAS ARCILLAS.

Generalmente los suelos arcillosos contienen materia orgánica en proporción variable; la arcilla de los horizontes superficiales contiene más sustancias orgánicas que la de los horizontes más profundos. Sin embargo, en algunos Podsoles, la arcilla del horizonte superficial puede contener considerable cantidad de materia orgánica y lo mismo ocurre con horizontes inferiores de algunos Andosoles. Frecuentemente, esta sustancia orgánica (ácidos húmicos, fúlvicos, enzimas y otras) está unida en el horizonte superior de la arcilla en forma compleja.

En propósito de caracterización, la materia orgánica debe ser necesariamente eliminada de la arcilla, a fin de facilitar el análisis por rayos X,

ATD¹⁸, infrarrojo y otros medios. Para ello, a menudo se usa el agua oxigenada, H₂O₂. Su uso implica un riesgo de ineficacia, en el caso de las arcillas alofánicas, y un riesgo de contaminación, por formación de oxalatos de Fe y Al solubles, y aun insolubles, por la peroxidación. La descomposición posterior de estos oxalatos podría liberar óxidos de Fe y Al amorfos, los que pueden depositarse como películas en la superficie de la arcilla dificultando el análisis. En el caso de las arcillas alofánicas, la asociación con la materia orgánica conduce a la formación de complejos organoalofánicos resistentes a la peroxidación. Tratándose de una pequeña porción de arcilla, la ozonificación de la muestra en suspensión con un líquido no-polar como la acetona que elimina prácticamente la totalidad de la sustancia orgánica.

La evaluación cuantitativa del carbón orgánico se realiza eficazmente por alguno de los métodos usuales, por ejemplo, el método de Walkeley y Black¹⁹ o el método de combustión seca. La evaluación por diferencias entre la pérdida por ignición a 105°C, u otros métodos, no conducen a resultados fidedignos.

El análisis cualitativo de los componentes orgánicos absorbidos por la arcilla es bastante difícil. Generalmente la sensibilidad del instrumental disponible (fotómetros en el infrarrojo, ultravioleta y visible, difracción de

¹⁸ Curvas que determinan la caracterización de las arcillas con particular éxito en los óxidos y otros componentes determinados cualitativamente. Se basan en la observación y medida del calor absorbido o desprendido cuando un material experimenta cambios físicos o químicos al ser calentado o enfriado.

¹⁹ ALBAREDA, J. M. El suelo. Madrid, SAETA, 1940. pág. 267.

rayos X) no permite detectar con precisión los grupos funcionales orgánicos por la pequeña cantidad de sustancias en juego. En algunos minerales expansibles, la distancia del eje c y su disminución por el colapso al calentamiento, permite conocer, en cierta medida, el diámetro de la molécula introducida.

En mineralogía de arcilla de suelos, y especialmente la de los Andosoles, el conocimiento de la materia orgánica asociada puede tener mucha importancia. Las limitaciones analíticas son, sin embargo, muy grandes.

1.4.4.4 TEXTURA DE LA ARCILLA.

Por textura se entiende la disposición que presentan los elementos constitutivos de un cuerpo, y en suelos se refiere a la proporción relativa de las partículas constituyentes del mismo; su expresión numérica es la composición granulométrica. La textura de arcillas implica no solo tamaño de los gránulos, sino la forma cómo están unidos, su orientación en el espacio, compactación y otros.

La morfología de los gránulos constituye un factor de importancia en la determinación de la textura de una arcilla ya que la forma influirá en la sedimentación de las partículas.

El uso de secciones delgadas de suelos, preparaciones micromorfológicas, permite el estudio de orientaciones de arcilla y la forma

cómo se asocia a componentes no arcillosos, particularmente óxidos de hierro. Se ha intentado con éxito el uso de los cortes delgados de suelos para localizar topográficamente algunos elementos (Fe, Ca), mediante la microradiografía de contacto. Tal método puede ser muy interesante en el estudio de agregados respecto a las fuerzas que actúan entre las partículas de arcilla y que determinan la unión entre ellas; se sabe que son de naturaleza electrostática y presumiblemente de rangos cortos²⁰.

1.4.5 LA ARCILLA Y LA CIENCIA DEL SUELO.

Hilgard y Dokuchaev²¹ reconocieron, a fines del siglo pasado, al suelo como un cuerpo natural, independiente y capaz de adquirir ciertas propiedades de acuerdo a los factores que sobre él han actuado. Estas propiedades son principalmente el resultado de características definidas que tienen sus componentes activos: la fracción coloidal orgánica, los coloides inorgánicos y los microorganismos que habitan en el suelo.

La arcilla es un constituyente fundamental que cuantifica la mayoría de las propiedades químicas, físicas o biológicas del suelo. No existen propiedades que se eximan, finalmente, de ser explicadas considerando la arcilla; incluso su importancia trasciende a campos más distantes como la clasificación y la sistemática. Si algunas características del suelo, como los

²⁰ EDUARDO BESOAIN. "Mineralogía de arcillas de suelos". Pág. 18.

²¹ HILGARD E.W., DOKUCHAEV V.V. "Report of the geology and agriculture of the state of mississippi", 1860.

horizontes, el color y la estructura, proporcionan una visión anatómica externa, la arcilla es causa de lo que podría asimilarse a una "fisiología" del cuerpo del suelo.

El término arcilla de suelos implica cierta inobjetividad, conceptual si se atiende a lo sugerido por Albareda y Hoyos²², puede ser definido según tres criterios; esto es, como un tamaño de partículas menor de $2\ \mu$, según su origen como minerales secundarios o de neoformación, y por su actividad, ya que es una fracción que manifiesta propiedades coloidales y es causa, junto con la materia orgánica, de la actividad fisicoquímica. Sin embargo, ninguno de estos tres criterios aislados puede por sí mismo, satisfacer el concepto de arcilla. Con frecuencia se define a la arcilla como un tamaño menor de $2\ \mu$ pero el uso de esta definición implica limitaciones. La fracción limo ($50\ \mu - 2\ \mu$) contiene minerales secundarios y posee cierta actividad fisicoquímica, y la fracción arcilla ($2\ \mu - 0.2\ \mu$) incluye minerales primarios de actividad muy reducida o casi nula. Sin duda, las propiedades más relevantes de la arcilla se relacionan con su naturaleza y se refieren a una superficie específica alta y características como plasticidad, adherencia, contracción, tixotropía²³ y otras. Estas propiedades influyen directamente sobre el comportamiento del suelo.

Si se consideran las propiedades físicas, la arcilla influye sobre la granulometría, retención de humedad, conductividad hidráulica, succión de

²² ALBAREDA y A. HOYOS de C. Edafología. Madrid, SAETA, 1995. pag.368.1965

²³ Propiedades que presentan algunas geles de transformarse en soles por efecto de la agitación mecánica.

agua, grado de infiltración, temperatura, conductividad térmica, punto de adherencia y otras. La textura, por ejemplo, con efectos directos sobre las funciones de crecimiento de las plantas, depende en mucho de la cantidad y calidad de la arcilla, especialmente cuando se considera asociada a la materia orgánica.

La arcilla influye sobre propiedades químicas tan importantes como la capacidad de intercambio de iones, reacción del suelo, poder tampón²⁴ y fijación y disponibilidad de nutrientes para las plantas. El papel que la arcilla juega sobre las propiedades biológicas y bioquímicas determina una serie de efectos, entre otros la formación de los complejos órgano - arcillosos, inhibición de la actividad enzimática, regulación del hábitat de los microorganismos del suelo y otros.

Morfológicamente, la arcilla actúa en el desarrollo del perfil a través de los movimientos de eluviación e iluviación. Puesto que la arcilla es una resultante de las acciones de meteorización sobre el material parental, su conocimiento puede proporcionar informaciones edafogenéticas muy útiles. Suelos y arcillas no pueden conocerse independientemente. La relación entre mineralogía de arcillas y clasificación de suelos es muy estrecha. Si bien se conocía desde hace mucho tiempo la asociación de determinados minerales con algunos tipos de suelos, por ejemplo caolinita con los suelos podsólicos rojos y amarillos; esmécticas e illitas con los aridisoles y alófanas con

²⁴ Solución que contiene un ácido débil y una de sus sales ó bien una base débil y una de sus sales, por lo que minimiza los cambios del pH cuando se añade un ácido ó una base.

andosoles, el uso determinante de la información mineralógica se debió a varias razones, como falta de información sobre la estructura cristalina de la mayoría de los minerales de arcilla y carencia de datos cuantitativos; el énfasis que los sistemas de clasificación dieron a factores ambientales externos al perfil respecto a sus propiedades intrínsecas determinadas por la mineralogía. La mineralogía se usa como un criterio fundamental para distinguir horizontes de suelos, diagnósticos y establecer discontinuidades litológicas. Pese a este avance, subsisten algunos problemas no resueltos respecto a un mayor uso de la caracterización mineralógica. Uno de ellos se relaciona con la carencia de información cualitativa y cuantitativa de los minerales del suelo; otro podría ser la falta de una evaluación matemática de la influencia que tienen las distintas especies minerales sobre el comportamiento del suelo. Tales problemas se agudizan en los minerales no cristalinos, cuya caracterización es defectuosa y su verdadera función no es bien conocida.

1.4.6 LA ARCILLA EN EL SISTEMA DISPERSO DEL SUELO.

Desde un punto de vista coloidoquímico, Wicklander²⁵, definió el suelo como "un sistema heterogéneo y polidisperso, de componentes sólidos, líquidos y gaseosos en diversas proporciones. La parte sólida está formada por minerales primarios, minerales de arcilla y óxidos hidratados junto con materia orgánica y organismos vivientes, lo cual forma un sistema polifásico,

²⁵ WIKLANDER, L. Cationes y Aniones. Editado por F.E. Bear. New York, 1955. pág. 373.

de partículas más o menos discretas o agregadas. En este sistema heterogéneo, la solución de suelo actúa como un medio a través del cual, las reacciones químicas entre miembros de las diferentes fases o una misma fase se hacen posibles, aun cuando los reactantes no se encuentran en contacto directo". La fase sólida es la que posee la mayor estabilidad y se usa para caracterizar el suelo. Las fases gaseosas y líquidas pueden experimentar grandes fluctuaciones y no constituyen un parámetro de caracterización adecuado.

No es fácil establecer una distinción absoluta entre la fase sólida orgánica e inorgánica desde el momento que existen componentes órgano minerales, por ejemplo, los complejos organo-alofánicos, aunque estos pueden ser considerados como una particularidad, la acción de los procesos formadores del suelo origina mezclas de materiales, los que, según Albareda y Hoyos²⁶, se diferencian del material parental en comportamiento, constitución y propiedades . Existen partículas mayores que conservan gran parte de las características del material original y son los constituyentes de las arenas. Otros, llamados limos y arcillas, han sufrido una transformación más profunda y casi no se aprecian los rasgos originales del material parental. Tales fragmentos pueden ser separados para su estudio y caracterización de acuerdo a su tamaño, origen y propiedades,

²⁶ ALBAREDA y A. HOYOS de C. Edafología. Madrid, SAETA, 1995. pag.368.1965

1.4.6.1 TAMAÑO, SEPARACIÓN GRANULOMÉTRICA.

La separación granulométrica de los componentes del suelo se efectúa mediante el uso de tamices y por sedimentación en medio líquido. Con tamices sólo es posible separar arenas, ya que su límite útil son aperturas de 50 μ . Por sedimentación se fraccionan limos y arcillas. Las técnicas de sedimentación se basan en la relación entre el tamaño de las partículas y su velocidad de caída en un líquido dado, regidas por la bien conocida ley de Stokes:

$$v = \frac{2}{9} g \frac{d - d'}{\eta} r^2 = kr^2 \quad \text{Ec.1.6)}$$

En la cual g es el valor de la gravedad en cm/seg^2 (o fuerza centrífuga); d es la densidad de la partícula en gr/cc ; d' , es la densidad del líquido en gr/cc ; η , es la viscosidad del líquido en $\text{dinas}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$; r , el radio de las partículas en cm (supuestas esféricas). Para un mismo líquido, sólido, lugar y temperatura, la velocidad solo depende del radio, pudiendo todas las demás magnitudes englobarse en una constante k , la cual, con el sistema c.g.s. adquiere el valor de 35970²⁷.

Una condición esencial para determinar la composición granulométrica o separar fracciones de un tamaño determinado de granos de suelo o arcilla, es someter la muestra a un pretratamiento que elimine los cementos que unen las partículas entre sí. Esto permite dispersar o peptizar la muestra

²⁷ Para ello se asume que, a 20°C, las partículas de suelo tienen una densidad d , de 2.65, ya que la densidad del agua d' es de 1.0 kg/m^3 , que la viscosidad del agua, η , es de 0.01005 poises y que la gravedad, g , vale 981 cm/seg .

adecuadamente y proceder a su separación. Los cementos pueden ser orgánicos o inorgánicos. Los primeros se eliminan con agua oxigenada o hipoclorito de sodio. Los inorgánicos requieren tratamientos específicos. La acción del acetato de sodio elimina los carbonatos.

1.5 COMPONENTES DE SUELO EN LAS ESTRUCTURAS VIALES, Y TRATAMIENTOS.

1.5.1 LA BASE DEL PAVIMENTO EN LAS VIAS.

El pavimento comprende la carpeta de rodadura, la base y sub-base. La base es la parte del pavimento cuya resistencia estructural distribuye en la subrasante las cargas concentradas del tránsito. Cuando se necesita una base de gran espesor, por razones de economía, se construye una parte de ella con especificaciones más bajas y se denomina sub-base. Las mejoras en la capacidad de sustentación de la subrasante se traduce en economía en las construcciones de la base. Mejorar las capas más profundas sale barato y permite, a veces, economías apreciables en la construcción de las bases, cuyo costo es alto.

La capa de rodamiento es apenas una carpeta que cubre la base y queda en contacto directo con las ruedas de los vehículos. "Ningún pavimento (capa de rodadura) puede ser de mejor calidad que la base que lo soporta".

1.5.1.1 LA BASE, DEFINICIÓN.

Puede definirse como una capa de espesor substancial que se coloca o prepara sobre la sub-base y bajo la capa de rodadura, con el fin de distribuir las cargas concentradas en la superficie sobre una área mayor de la sub-base, en la que las presiones unitarias deben ser pequeñas. Pueden emplearse también las bases para ayudar en el drenaje. Las bases según esta definición, no deben confundirse con capas de base del revestimiento. En algunos tipos de construcción de pavimentos bituminosos, la base, la capa de rodadura e incluso el revestimiento, pueden combinarse en una sola operación, donde un espesor de 5" a 6" de mortero asfáltico se tienden sobre sub-bases adecuadas y actúan como la estructura total del camino, por encima de la sub-base. En realidad la base se considera corrientemente como la capa de material de soporte de cargas situada sobre la sub-base y bajo la capa de rodadura.

1.5.1.2 LA BASE DE LAS VIAS EN PAVIMENTO FLEXIBLE.

Esta constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la subrasante. Es la capa principal de los pavimentos flexibles constituida por materiales pétreos con una buena distribución granulométrica. Pueden existir también bases estabilizadas con cemento Pórtland, cal o asfalto. Las funciones principales de la base son las siguientes:

- ✓ Ser resistente para transmitir a la Sub-base y a la subrasante los esfuerzos cortantes producidos por el tráfico.

- ✓ Drenar el agua que se infiltra a través de la carpeta a los hombros y a las cunetas.
- ✓ Resistir los cambios de temperatura, humedad y acción abrasiva producida por el tráfico.
- ✓ Reducir los costos de la estructura del pavimento al aumentar su espesor.

Las especificaciones granulométricas para bases se indican en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Requisitos Granulométricos para Base

Tamaño del Tamiz	% por peso pasando por el Tamiz designado (AASHTO T-27 Y T-11)		
	Grado de Designación		
	A	B	C
2" (50 mm)	100		
1 ^{1/2} " (37.5 mm)	97-100	100	
1" (25 mm)		97-100	100
3/4" (19 mm)	67-81		97-100
3/8" (9.5 mm)		56-70	67-79
No. 4 (4.75 mm)	33-47	39-53	47-59
No. 40 (425 μm)	10-19	12-21	12-21
No. 200 (75 μm)	4-8	4-8	4-8

Fuente: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration

1.5.1.3 LA BASE DE LAS VIAS EN PAVIMENTO RIGIDO.

Sus funciones son análogas a las de una sub-base en pavimento flexible, sirve también para proporcionar una superficie uniforme y como apoyo a la losa para que facilite su colado; protege también a la losa de cambios volumétricos en la subrasante, que de otra manera, inducirían esfuerzos adicionales a aquella. Los efectos de bombeo, pueden controlarse bastante bien con una base apropiada. En este caso, la base no tiene ningún fin

estructural, pues la losa debe ser suficiente para soportar las cargas; la base casi no influye en el espesor de la losa en caminos.

Las funciones de la losa en el pavimento rígido son las mismas de la carpeta en el pavimento flexible, más la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que se le apliquen.

1.5.2 LA SUB-BASE DE LAS VIAS.

1.5.2.1 DEFINICIÓN DE SUB-BASE.

Es una capa de material selecto que se coloca sobre la subrasante y, tiene por objeto:

Servir de capa de drenaje al pavimento. Controlar los cambios de volumen, debido a la elasticidad y plasticidad del material de la subrasante. Controlar la ascensión capilar del agua, protegiendo así el pavimento. El material de sub-base debe tener mayor capacidad de soporte que la subrasante y, puede ser: arena, grava, residuos, cascajo, etc.

1.5.2.2 LA SUB-BASE DE LAS VIAS EN PAVIMENTO FLEXIBLE.

Es la capa entre la Base y la subrasante, constituida de un material granular selecto, cuya principal función es disminuir, en lo posible, las deformaciones y las filtraciones perjudiciales a la subrasante provocadas por cambios de volumen, por inchamiento en estados húmedos, contracciones fuertes por pérdidas de humedad; características que son propias de los

suelos finos plásticos. Asimismo, facilita el drenaje de las aguas que se infiltran en la estructura del pavimento, es además una capa resistente a la erosión y al bombeo, sirve de control de la ascensión capilar en los terrenos con nivel freático bajo, reduciendo las deformaciones severas de la capa de rodamiento en la época lluviosa. Las especificaciones de granulometría, se muestran en la tabla 1.3

Tabla 1.3 Requisitos granulométricos para sub-bases

Tamaño del Tamiz	% por peso pasando por el Tamiz designado (AASHTO T-27 Y T-11)	
	Grado de Designación	
	A	B
2 ^{1/2} " (63 mm)	100	
2" (50 mm)	97-100	100
1 ^{1/2} " (37.5 mm)		97-100
1" (25 mm)	65-79	
1/2" (12.5 mm)	45-59	
No. 4 (4.75 mm)	28-42	40-60
No.40 (425 μm)	9-17	
No. 200 (75 μm)	4-8	0.0 – 12

Fuente: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (conocidas Como Normas F.P.)

Adicionalmente el material deberá cumplir lo siguiente:

- ✓ Límite líquido, AASHTO T-89: 25% Máx.
- ✓ Desgaste de los Ángeles, AASHTO T-96 : 50% Mín.
- ✓ Índice de durabilidad para Agregados Gruesos, AASHTO T – 210: 35% Mín.
- ✓ Índice de durabilidad para agregados Finos, AASHTO T – 210: 35% Mín.
Límite Líquido, AASHTO T-89: No Plástico.

1.5.2.3 LA SUB-BASE DE LAS VIAS EN PAVIMENTO RIGIDO.

El terreno y el relleno deben soportar firmemente al piso de concreto. Deberá removerse toda la parte superior del terreno, el relleno mal compactado y el material suave, y sustituirlos por material granular bien cribado y compactarlo a la altura especificada. Muchas especificaciones cubrirán la preparación del terreno en detalle; sus requerimientos variarán en relación al espesor de dren, a la carga del piso y a la importancia de crear una sub-base granular contra brotes de humedad; estas son:

- ✓ El drenaje en la sub-base debe contener rellenos permeables o desagües. Es necesario que el drenaje tenga una salida para retirar el agua del área. El personal de construcción debe darse cuenta de la importancia del drenaje, si se desea que los cimientos sean resistentes y los pisos se mantengan secos.
- ✓ El relleno debe ser compactado en capas no más gruesas de 150 mm, pasando de 6 a 8 veces un tambor vibratorio u otro equipo de compactación. Los vehículos con ruedas u orugas tienen poca presión en el contacto y no son adecuados para compactar el relleno.

Para lograr una sub-base granular adecuada es necesario colocar un mínimo de 100 mm de agregado granular, que haya sido pasado en su totalidad a través de un tamiz de 10 mm.

El drenaje se recubre entonces con una capa de 25 mm de arena gruesa, que ayuda a lograr los niveles correctos en el terminado. Esto reduce el peligro que la membrana subyacente se perfora durante la construcción.

1.5.3 COMPACTACIÓN EN CARRETERAS.

1.5.3.1 COMPACTACIÓN.

En general, compactación es el mejoramiento artificial de las propiedades mecánicas del suelo. En este proceso se busca reducir la relación de vacíos al mínimo, lo cual se logra de varias maneras: con reorientación de las partículas, fractura de las ligaduras entre granos, distorsión de las partículas absorbidas. La compactación se logra específicamente por el esfuerzo de comprensión que la máquina de compactar ejerce sobre el suelo; según el tipo de suelo que se tenga, así se elige la maquinaria de compactación a utilizar. En los suelos cohesivos la compactación se realizará específicamente por distorsión y reorientación; en cambio en un suelo no cohesivo esta se logra principalmente por reorientación de los granos. En la compactación, la humedad que posee el suelo es un factor muy importante para tal proceso, ya que a medida que esta aumenta, la tensión capilar de la película húmeda entre los granos disminuye haciendo que la compactación sea más efectiva. Sin embargo, si la humedad aumenta excesivamente esta llevará al suelo a la saturación, y ocasionará que el esfuerzo neutro que se cree impida que la relación de vacíos ya no se reduzca, produciéndose como

consecuencia de este efecto que el esfuerzo de compactación que se aplique no sea efectivo, de lo que se puede concluir que la saturación de un suelo es el límite teórico de compactación para la humedad²⁸.

En la actualidad se conocen varios métodos para determinar la humedad óptima y la densidad máxima de un suelo. La mayor parte de estos métodos son dinámicos y algunos estáticos. Los llamados dinámicos utilizan cargas dinámicas aplicadas mediante pisones o martillos, y los métodos estáticos emplean cargas estáticas aplicadas mediante prensas hidráulicas.

1.5.3.2 METODOS DE COMPACTACIÓN ESTATICOS.

Uno de los métodos más empleados es el conocido como Método California. Este se originó y fue usado durante muchos años en el Departamento de Carreteras del Estado de California de los Estados Unidos. Si bien este se sigue utilizando con frecuencia, existe la tendencia a emplear más bien los métodos "dinámicos" de compactación. Así, por ejemplo, en el mismo Departamento de Carreteras de California, se aplica el método de compactación No. 216-E, que consiste en compactar el suelo mediante 20 golpes de Martillo de 10 lb., haciéndolo caer desde una altura de 18". Los resultados obtenidos mediante este procedimiento se asemejan a los alcanzados por la especificación de la AASHTO Standard T-180 C.

²⁸ SOWER AND SOWER^o Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones^o 1^a. Edición, Editorial Limusa, México. 1993, Pág 264.

Como el método estático llamado de California aun se emplea en muchos lugares, se describe a continuación:

De acuerdo con este procedimiento, se aplica sobre la muestra una carga estática de 2,000 lb/plg.(140.6 kg/cm). Para la aplicación de carga estática puede emplearse un gato hidráulico cuya capacidad mínima sea de 27.24 kilogramos (60,000 lb). Generalmente, se compacta la muestra colocándola en un molde cilíndrico de 15 cm (6") de diámetro por 20 cm (8") de altura y se aplica la carga mediante un gato hidráulico.

El procedimiento que se emplea es, en síntesis, el siguiente: se toman 4 Kg. aproximadamente, del material que pasa el tamíz de $\frac{3}{4}$ " y se mezclan con una pequeña cantidad de agua. Una vez mezclado el material, se coloca dentro del molde y se compacta suavemente, introduciendo una varilla metálica, a fin de evitar que se formen burbujas de aire en la masa de tierra. Terminada esta operación, se coloca el pisón y se compacta el material aplicando la carga por medio del gato hidráulico.

1.5.3.3 METODOS DE COMPACTACIÓN DINÁMICOS.

Los métodos dinámicos más empleados en la actualidad, son los estandarizados por la Asociación Estadounidense que representa a los Departamentos de Carreteras de los 50 Estados de la Unión, más conocida por AASHTO (American Association of State Highway Officials). a continuación se indican estos métodos:

Métodos de la AASHTO Standard T-99: se diferencia con el método Proctor por el empleo de dos moldes cilíndricos para los ensayos de compactación, uno de 4 pulgadas de diámetro interior (que era el empleado anteriormente) y otro molde de 6 pulgadas de diámetro interior. Para la compactación se emplea un martillo o pisón de 5.5 libras (2.5 kg) de peso. El suelo a compactar se coloca en capas de igual espesor aproximadamente, y cada capa se compacta haciendo caer el martillo desde una altura de 12 pulgadas (30.5 cm). Si se utiliza el molde pequeño de 4 pulgadas, el suelo se compactará haciendo caer el martillo 25 veces sobre cada capa. En cambio, si se utiliza el cilindro grande de 6 pulgadas, se hará caer el martillo 56 veces sobre cada capa de suelo. La compactación debe hacerse en forma uniforme, haciendo caer libremente el martillo y distribuyendo los golpes sobre toda el área. Una vez compactado así el suelo, se quita el collar del molde, se alisa la superficie y se pesa el cilindro de tierra, se rompe y se toma una pequeña cantidad de muestra de la parte central, para determinar el contenido de humedad del suelo compactado. Es de advertir, que no siempre los moldes tienen un volumen exacto, de ahí que se recomiende calibrarlos antes de usarlos. Puede emplearse agua limpia para calibración, teniendo cuidado de cubrir las juntas con parafina líquida a fin de evitar pérdida de agua. Este método Standard T-99 tiene 4 subdivisiones: A, B, C y D. Los métodos T-99(A) y T-99(B) corresponden a los materiales que pasan el tamíz No. 4 (4.76 mm) y

los métodos T-99 (C) y T-99 (D), a los suelos que pasan el tamíz de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19.1 mm).

Método AASHTO Standard T-180: Este método corresponde, con algunas modificaciones, al conocido anteriormente como Standard Modificado o Proctor Modificado. Los moldes que se emplean son los mismos que los indicados para el método anterior, o sea el pequeño de 4 pulgadas de diámetro y el grande, de 6 pulgadas de diámetro. La diferencia fundamental entre este método y el anterior está en el peso del martillo y la altura de caída. El martillo empleado en este es el de 10 libras (4.5 kg) y la altura de caída es de 18 pulgadas (45 cm). En lugar de colocar el suelo en tres capas, se coloca en 5 capas, de aproximadamente igual espesor. Si se emplea el cilindro de 4 pulgadas de diámetro, cada capa se compacta haciendo caer el martillo 25 veces sobre cada una de estas, y si se utiliza el molde grande de 6 pulgadas, se hará caer el martillo 56 veces sobre cada capa. Igual que en el método anterior, una vez compactado el suelo, se quita el collar del cilindro, se hacen las pesadas necesarias y se determina el contenido de humedad del suelo compactado. Este método tiene también 4 subdivisiones: A, B, C y D. Las dos primeras A y B, se refieren a los suelos que pasan el tamíz No. 4, y las dos últimas corresponden a los suelos que pasan el tamíz de $\frac{3}{4}$ de pulgada. La densidad obtenida mediante el método AASHTO T-180 es mayor que la que se logra con el AASHTO Standard T-99. El equipo que se emplea para las pruebas AASHTO Standard T-180 es prácticamente el mismo que el utilizado

para el ensayo AASHTO T-99, variando únicamente el peso del martillo y la altura de caída.

1.5.3.4 MÉTODOS DE CONTROL DE LA COMPACTACIÓN DE CARRETERAS

Los tres métodos principales de control de compactación son:

- ✓ Control de la maquinaria y su empleo
- ✓ Control de la densidad seca de los materiales compactados;
- ✓ Control de ciertas características de la capa en cuestión.

Cada método tiene sus ventajas y sus inconvenientes. El primer método consiste en comprobar que el contenido de agua de la capa compactada es adecuado, que el espesor de las capas extendidas es inferior al máximo admitido y que las máquinas utilizadas están adaptadas y pasan un número de veces suficiente. Esto supone que se está seguro de que este método de trabajo permite obtener resultados, de los que se debe estar informado previamente por cualquiera de los otros dos métodos indicados.

En todos los casos, la gran dificultad que se presenta en el proceso de compactación, es el control del contenido de agua del suelo. Si se trata de capas de cimiento o de capas de base, fabricadas en central o in situ con medios precisos de humidificación, se sabe con certeza el contenido de agua. En el caso de suelos de cimiento o de capas de forma, el contenido de agua

de los suelos, en terraplén o en el yacimiento, puede ser superior al máximo tolerable. Se puede considerar entonces tres soluciones como sigue:

- a) Examinar por medio de ensayos de laboratorio cuáles son las consecuencias de este exceso de contenido de agua y, llegado el caso, admitir este estado de cosas, a riesgo de aumentar, por ejemplo, los espesores de la calzada;
- b) Cuando el contenido de agua de los terraplenes fuera tal que no tuviese ocasión de utilizarlos para la capa superior de plataforma, no hay otra solución que buscar suelo de préstamo, menos húmedo que el del lugar.
- c) Si la humedad excesiva se debe a una tormenta de lluvia, por ejemplo, se puede diferir la compactación y acelerar la desecación por escarificado y aireado.

Si la compactación y su control se hace solo con la maquinaria; hay que observar que la maquinaria y su forma de empleo es un criterio suficiente para controlar la compactación, sin buscar o medir las compacidades alcanzadas, o saber si algunas pasadas suplementarias de compactación serían útiles o no, se tomará en cuenta la compactación experimental, que la potencia necesaria para hacer pasar un compactador, sobre una capa dada, decrece a medida que la compacidad crece, para descender hasta un valor mínimo de pasadas; después de esto, es inútil entonces continuar compactando, ya que se está muy cerca de la asíntota de la curva (densidad / número de pasadas).

El control de esta potencia, que parece posible en ciertas máquinas provistas de transmisión hidráulica, permitirá sin duda conocer, no la densidad seca de la capa compactada, sino el límite de empleo de la maquinaria. El control directo de la densidad seca se obtiene por lo siguiente:

- ✓ Medida de la densidad húmeda.
- ✓ Medida del contenido de agua.
- ✓ Se tiene, en efecto:

$$d_h = \frac{p_s + p_a}{V} = d_s + \omega d_s = d_s(1 + \omega) \quad (\text{Ec. 1.7})$$

$$d_s = \frac{d_h}{1 + \omega} \quad (\text{Ec. 1.7a})$$

d_h : densidad húmeda

d_s : densidad seca

p_s : peso del suelo seco

V : volumen de la muestra

p_a : peso del agua

ω : contenido de agua.

La medida de la densidad húmeda, en la mayoría de los casos, consiste en hacer en la capa estudiada un hoyo del cual se mide el volumen, y los suelos extraídos, cuidadosamente recogidos, se pesan. Se tiene así, V y $p_s + p_a$, y por lo tanto, d_h . Una medida del contenido de agua de los suelos da " ω " y se tiene directamente d_s . Los métodos de control de la densidad seca difieren de los procedimientos empleados para medir V . Como los materiales extraídos no constituyen nunca una muestra remoldeada, la medida del volumen V se

hace, no por la medida del suelo extraído, sino por la medida del volumen del agujero. Para ello, se introduce convenientemente una cantidad controlada de un suelo susceptible de rellenar todas las irregularidades del hoyo. El procedimiento normal es el uso del agua, que no puede utilizarse más que encerrándola en un saco de caucho muy delgado. Este es el procedimiento del densitómetro de membrana. El aparato, por simple lectura, da directamente el volumen V.

Cuando se trata de pruebas en una capa compactada y se utiliza como criterio la compacidad, o índice de compactación, es decir, la relación entre la densidad seca medida, y una densidad seca de referencia (densidad máxima Proctor normal o modificado), es indispensable completar la medida de la densidad seca con un ensayo Proctor de los suelos extraídos, cuando es posible.

La tercera categoría de métodos de control de compactación hace intervenir criterios que están en correlación más o menos estrecha con la compacidad. Se trata de la resistencia a esfuerzos de punzonamiento (aguja Proctor, ensayo C.B.R. in situ) o de la deflexión bajo placa de carga, etc.

1.5.4 DRENAJE Y SUB-DRENAJE EN CARRETERAS.

En las carreteras (ver anexos 1B), las obras de drenaje superficial son destinadas a captar y eliminar las aguas que corren sobre el terreno natural o sobre la estructura; principalmente, esta agua procede directamente de las

lluvias, aunque a veces tienen su origen en inundaciones de corrientes fluviales o en manantiales. Por sus diferencias en cuanto a las obras de defensa recomendables conviene distinguir el caso de los cortes del de los terraplenes.

En los cortes para carreteras las dos estructuras fundamentales del drenaje superficial son la cuneta y la contracuneta. Las cunetas en los bordes de la corona, al pie del talud de corte. Su función es recoger la escorrentía desde el talud del corte y desde la zona pavimentada del camino; para lograr esta recolección de las aguas, la superficie pavimentada deberá tener una ligera pendiente transversal (bombeo) precisamente hacia la cuneta. Generalmente la cuneta cubre toda la longitud del corte, manteniendo pendiente longitudinal en el sentido del eje del camino y hacia alguna cañada abajo en el que pueda eliminarse el agua sin peligro de erosión; como quiera que sea, el tramo final de bajada a la cañada tendrá una pendiente excesiva, que dará al agua alto poder erosivo, será conveniente proteger esa zona con una estructura de descarga de mampostería o de concreto, denominada lavadero. La cuneta debe ir revestida de algún material impermeable y resistente a la acción del agua corriente, para evitar filtraciones hacia los materiales que formen el pavimento o el terreno de cimentación; los materiales más utilizados para este fin han sido el concreto (de uso generalmente costoso), la mampostería, el suelo-cemento, etc. La sección conveniente para una cuneta depende de la pluviosidad de la zona, de la longitud del corte y de

la pendiente que pueda proyectarse; este punto debe verificarse cuidadosamente en cada caso, llegando cuando sea necesario a la construcción de cunetas de sección variable a lo largo de la longitud cubierta. Las contra cunetas son también pequeñas zanjas construidas paralelamente al borde superior del corte, con el objeto de captar el agua que escurre superficialmente del terreno superior y evitar así que llegue al talud y lo erosione, estas contra cunetas no deben ser muy profundas y a veces se hacen con sección de zanja y bordillo para minimizar la excavación. Ha sido práctica usual, construir las contra cunetas sin impermeabilizar, y a veces la pendiente longitudinal de estas no ha sido lo suficiente para proporcionar una pronta salida del agua que captan; ambas cosas propician la filtración del agua en el cuerpo del talud, disminuyendo su estabilidad. Si la contra cuneta es profunda, la superficie potencial de falla del talud se origina precisamente en su fondo y como además en estas zonas superiores del talud son frecuentes los esfuerzos de tensión, se facilita la creación de grietas; por ello, es recomendable que las contra cunetas se construyan impermeabilizadas y con la suficiente pendiente para garantizar un rápido drenaje del agua que captan. Los materiales más usados para recubrimiento de contra cunetas son el concreto, convencional o de tipo especial, la mampostería, el suelo-cemento, el suelo-asfalto, etc. Los remates de las contra cunetas a ambos lados de los cortes deben ir también provistos de lavaderos para neutralizar el mayor poder erosivo del agua provocado por el aumento de la pendiente.

El agua que se infiltra en el contorno de la obra vial, puede perjudicar también muy seriamente a los pavimentos y la parte superior de las terracerías de las vías. El agua puede llegar a estas capas, por ejemplo al elevarse el nivel freático, por filtraciones de agua a través de la carpeta, etc., pero en cualquier caso su presencia es siempre indeseable.

La necesidad que haya subdrenaje, es independiente del tipo de carretera; no colocarlo donde sea necesario puede causar efectos destructivos, tanto en una gran autopista de peaje como en un modesto camino de tránsito escaso. No se debe dejar de invertir lo necesario en este concepto por considerar que la obra es de poca importancia tanto como la adecuada compactación, el subdrenaje forma parte del tipo de trabajos que determinan la buena calidad de la obra; no por esto puede causar la destrucción de la estructura a corto plazo. En una carretera modesta, por sus menores exigencias de alineamiento, pendiente, etc., resultan cortes y terraplenes de menor dimensión que en carreteras de trazo más ambicioso, los problemas de subdrenaje tenderán, en general, a ser cuantitativamente menores, aunque cualitativamente sean similares en los dos tipos de estructura.

El subdrenaje puede no necesitarse en todos los casos. Si en una carretera, se coloca en zonas específicas en que se concentran las aguas subterráneas se requerirá de él; buscar zonas libres de este tipo de problemas es uno de los requisitos que se desean en una buena localización y sólo

cuando tal zona no exista entre las ubicaciones posibles y económicas, quedará justificado construir la estructura en un lugar con problemas específicos que hagan necesario un subdrenaje de importancia.

1.5.5 ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN EN LAS VIAS.

1.5.5.1 VIAS REVESTIDAS CON PAVIMENTO DE CONCRETO ASFALTICO.

Las carpetas de concreto asfáltico son mezclas de materiales pétreos y cemento asfáltico, dosificadas por pesos en las plantas estacionarias. El cemento asfáltico es sólido cuando está a temperatura ambiente, se calienta en la planta a 140°C , y además los materiales pétreos son secados y calentados entre 133°C y 177°C, usualmente hasta 160°C, para ser mezclados.

Las carpetas fabricadas utilizando concretos asfálticos son de alta calidad, de dosificación precisa, pero debido al tipo de cemento asfáltico, estas carpetas elásticas, sufren ruptura de tipo elástico y de poca resistencia; por esta razón, las carpetas de concreto asfáltico se recomienda construir sobre bases rígidas, tratadas con cal hidratada, cemento Pórtland o sobre bases asfálticas. Un buen porcentaje de las principales vías del país se construyen con este tipo de carpeta asfáltica.

1.5.5.2 VIAS REVESTIDAS CON PAVIMENTO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA.

La emulsión asfáltica es un ligante o cementante asfáltico, que se obtiene al esparcir un ligante asfáltico, en agua, en forma de pequeñas partículas con diámetro entre 3μ y 9μ . Al conjunto de pequeñas gotas de ligante asfáltico se le llama fase discontinua y al medio en el cual están dispersas, fase continua. Para conseguir la dispersión de estos dos líquidos que no son miscibles entre sí, se utilizan agentes químicos denominados emulsionantes o emulsificantes. Los componentes básicos de las emulsiones son:

- a) Ligante o cementante asfáltico, emulsionantes, agua, aditivos.
- b) Ligantes asfálticos. Los más utilizados son : Asfalto de destilación, asfaltos Fluidificados y fluxados, mezclas asfalto-alquitrán.
- c) Emulsionantes. El emulsionante cumple una triple misión dentro de las emulsiones, que es:
 - ✓ Facilitar la dispersión del ligante asfáltico en el agua.
 - ✓ Conservar la emulsión como tal, en el tiempo. Esto se consigue al cargar las partículas de asfalto con cargas eléctricas que se repelen entre sí.
 - ✓ Favorecer la cubrición de los agregados por el ligante asfáltico al estar este cargado eléctricamente.

Según la característica química de los mismos, los emulsionantes pueden ser: aniónicos y catiónicos. Los emulsionantes aniónicos; son en

general sales sódicas o potásicas de ácidos orgánicos de cadena compleja, con fórmula general: R-COONa. Los emulsionantes catiónicos son los productos de reacción de ácidos inorgánicos fuertes (ácido clorhídrico, principalmente), con aminas grasas, con fórmula general: R-NH-Cl.

- a) Agua. El agua no necesita condiciones muy estrictas, salvo en las emulsiones de tipo aniónico, en las que hay que cuidar su dureza.
- b) Aditivos. En algunos casos especiales, los emulsionantes pueden venir acompañados de aditivos, con el fin de mejorar algunas de las características de las emulsiones, como pueden ser viscosidad, adherencia, etc.

Las emulsiones asfálticas surgen de la necesidad de poder trabajar un material asfáltico a temperatura ambiente, puesto que el asfalto no es manejable a estas temperaturas. La emulsión asfáltica es una mezcla de color café oscuro de consistencia fluida, de un asfalto rebajado, un agente emulsor, que mantiene separadas las partículas del asfalto y un estabilizador, y estos se encuentran suspendidos en agua, de la cual el contenido total de la mezcla es del 40% al 50% del volumen total. Las emulsiones pueden ser aniónicas y catiónicas según el agente emulsificante usado; de acuerdo con el porcentaje de cemento asfáltico se tienen emulsiones de fraguado lento, medio y rápido. La ventaja de usar emulsiones asfálticas, está en el hecho de que se pueden trabajar a temperatura ambiente, y no se necesitan equipos especializados

para realizar la mezcla de los materiales pétreos con la emulsión asfáltica. En el país, se carpetea con estos materiales.

1.5.5.3 VIAS REVESTIDAS CON CONCRETO HIDRÁULICO.

El concreto hidráulico es un material que se elabora mezclando agua, cemento Pórtland, grava y arena, en proporciones adecuadas para obtener la resistencia y densidad deseadas.

La superficie de una vía revestida de concreto hidráulico, es la parte superior del pavimento, constituida de las losas construidas de concreto hidráulico que se colocan sobre la sub-base, de la terracería. En El Salvador se han construido carreteras interdepartamentales con buenos resultados, por ejemplo la carretera que comunica los departamentos de La Libertad y Santa Ana, desde el km 15, al km 35, la cual a pesar de haber cumplido su vida útil, funciona en buenas condiciones.

1.5.5.4 VIAS REVESTIDAS CON ADOQUINES.

Los adoquines son bloques macizos hechos de concreto hidráulico, de forma prismáticas, de espesor uniforme recto de manera que al colocarlos sobre una superficie, estos encajen entre si, y que sólo quede una junta entre ellos. El tendido de ellos, se hace, sobre una base de material estabilizado, la unión de las juntas entre cada adoquín se hace con un mortero de arena y cemento Pórtland, esto es lo que forman los pavimentos de adoquines. Debido

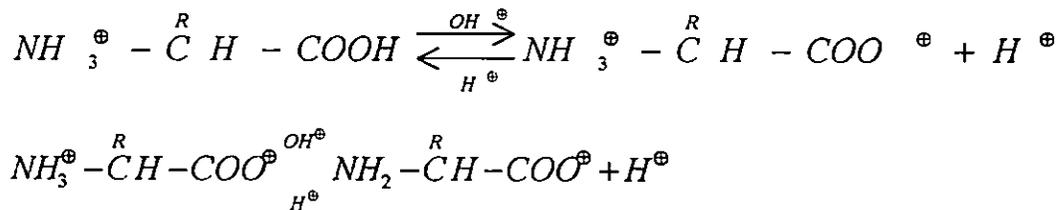
a su amplia gama de aplicaciones, como calles, avenidas, parqueos, etc.; es necesario realizar un diseño estructural en cada caso, según el tráfico y la resistencia del suelo de cimentación. Las ventajas de este tipo de pavimento son: durabilidad, mejor apariencia estética, fácil proceso de construcción, y bajo costo de construcción. Sus principales desventajas son: generan más ruido y no son aconsejables para velocidades mayores de 80 km/h.

1.6 LAS ENZIMAS COMO ADITIVO ESTABILIZADOR DEL SUELO PARA PAVIMENTO.

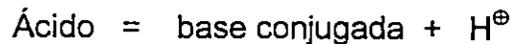
1.6.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS ENZIMAS

Antes de ver el funcionamiento de las enzimas, es necesario conocer su estructura. Las enzimas son proteínas, y las unidades estructurales de éstas se componen, en la mayoría de los casos, de aminoácidos unidos en secuencias específicas. Hay veinte aminoácidos que son componentes comunes de estas secuencias específicas. Las enzimas que tienen funciones similares a menudo poseen estructuras idénticas o bien muy semejante, por ejemplo, la proteína citocromo c, es un biocatalizador constituido por un proteido cuyo grupo prostético posee hierro; se caracteriza por su propiedad de absorber la luz, interviene en reacciones de transferencia de un solo electrón, es idéntica en el hombre, el mono rhesus y el chimpancé, y casi idéntica a la misma proteína animal como la víbora de cascabel y el pollo.

Las propiedades fisicoquímicas de los aminoácidos son fundamentales para entender la actividad de las enzimas. Los aminoácidos poseen grupos funcionales que les permiten comportarse como ácidos y como bases débiles. Un caso particular es el de las especies totalmente protonadas de un aminoácido general. El símbolo R corresponde a diferentes cadenas laterales de distintos aminoácidos. Al aumentar el pH, se producen dos disociaciones:



Estos dos protones ácidos se pueden representar por medio de constantes de disociación de ácidos débiles:



Puesto que cada aminoácido tiene, por lo menor, dos grupos ionizables, siempre se deben tomar en cuenta dos equilibrios.

De acuerdo con la ley de acción de las masas,

$$K_{A1} = \frac{[COO^{\oplus}][H^{\oplus}]}{[COOH]} \quad (\text{Ec.1.8})$$

$$K_{A2} = \frac{[NH_2][H^{\oplus}]}{[NH_3^{\oplus}]} \quad (\text{Ec.1.9})$$

Al tomar el logaritmo de los dos lados de la ecuación (1.8) ó (1.9), cada expresión de la constante de equilibrio se puede escribir (tomando como ejemplo K_{A1}) como sigue:

$$\log K_{A1} = \log [COO^{\ominus}] + \log [H^{\oplus}] - \log [COOH] \quad (\text{Ec.1.10})$$

O bien, después de reajustar:

$$-\log [H^{\oplus}] = -\log K_{A1} + \log \frac{[COO^{\ominus}]}{[COOH]} \quad (\text{Ec.1.11})$$

Puesto que el pH de los suelos se define como el logaritmo negativo de H^+ , entonces,

$$pH = -\log K_{A1} + \log \frac{[COO^{\ominus}]}{[COOH]} \quad (\text{Ec.1.12})$$

La cantidad pK_{A1} se puede definir como: $\log K_{A1} = pK_{A1}$ (Para la disolución en estudio). Esto lleva a la expresión.

$$pH = pK_{A1} + \log \frac{[COO^{\ominus}]}{[COOH]} \quad (\text{Ec.1.13})$$

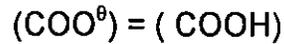
Cuando se aplica a problemas de bioquímica, la ecuación (1.13) se expresa casi siempre en términos más generales:

$$pH = pK_A + \log \frac{[\text{especie no protonada}]}{[\text{especie protonada}]} \quad (\text{Ec.1.14})$$

El pK_A se puede definir como sigue: Sí $pH = pK_A$, entonces,

$$\log \frac{[COO^{\ominus}]}{[COOH]} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{[COO^{\ominus}]}{[COOH]} = 1$$

o bien,



Como se puede ver, el pK_A se define como el pH en el que la mitad de las especies en estudio están en forma protonada (ácidos) y la otra mitad están en forma no protonada (bases). En otras palabras, experimentalmente hablando, el P_{K_A} es igual al punto medio de la titulación.

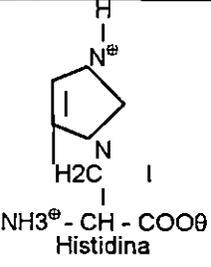
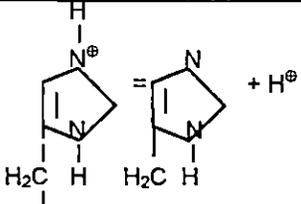
En la tabla 1.4 se dan los valores comprobados de pK_A de los grupos funcionales de los aminoácidos libres, así como los valores aproximados de pK_A de los mismos cuando ya se han incorporado en enzimas. Puesto que una cadena peptídica²⁹ sencilla sólo puede tener dos extremos, uno de ellos es la terminal de carboxilo (terminal C) y sólo puede tener dos extremos, uno de ellos es la terminal de carboxilo y amonio están presentes como cadenas a lo largo de la columna principal del polímero, junto con otros grupos con carga, tales como el imidazol³⁰, el tiol y el fenol³¹.

²⁹ Producto de las proteínas, formados por la reunión de varias moléculas de aminoácidos.

³⁰ Compuesto resultante de la sustitución de dos átomos de hidrógeno del amoniaco por metales o por radicales ácidos.

³¹ Compuesto organico en el que uno o mas atomos de H del núcleo bencenico han sido sustituidos por grupos OH. Se emplea en la fabricación de colorantes, medicamentos, plásticos.

Tabla 1.4 Diferencias en los valores de pK_A de los aminoácidos libres y las proteínas.

Ejemplo de aminoácido	Grupo	Ionización	Ambito de pK _A de las proteínas	Ambito de pK _A del aminoácido libre
$\text{NH}_3^{\oplus}-\text{CH}_2-\text{COO}^{\ominus}$ Glicina	Carboxilo	$-\text{COOH} = -\text{COO}^{\ominus} + \text{H}^{\oplus}$	1.8 – 2.5	2.2
$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{COO}^{\ominus} \\ \\ \text{NH}_3^{\oplus}-\text{CH}-\text{COO}^{\ominus} \end{array}$ Acido aspártico	w-carboxilo	$-\text{COOH} = -\text{COO}^{\ominus} + \text{H}^{\oplus}$	3.0 - 4.7	3.9
 Histidina	Imidazolio	 $+ \text{H}^{\oplus}$	5.6-7.0	6.1
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{NH}_3^{\oplus}-\text{CH}-\text{COO}^{\ominus} \end{array}$ Alanina	Amonio	$\text{NH}_3^{\oplus} = \text{NH}_2 + \text{H}^{\oplus}$	7.9-10.0	9.5
$\begin{array}{c} \text{NH}_3^{\oplus} \\ \\ (\text{CH}_2)_4 \\ \\ \text{NH}_3^{\oplus}-\text{CH}-\text{COO}^{\ominus} \end{array}$ Lisina	e-Amonio	$\text{NH}_3^{\oplus} = \text{NH}_2 + \text{H}^{\oplus}$	9.4-10.6	9.7
 Tirosina	OH Fenólico	$-\text{OH} = -\text{O}^{\ominus} + \text{H}^{\oplus}$	9.8-10.4	10.1
$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{SH} \\ \\ \text{NH}_3^{\oplus}-\text{CH}-\text{COO}^{\ominus} \end{array}$ Cisteina	Tiol	$-\text{SH} = -\text{S}^{\ominus} + \text{H}^{\oplus}$	9.4 – 10.8	10.3
Ejemplo de aminoácido	Grupo	Ionización	Ambito de pK _A de las proteínas	Ambito de pK _A del aminoácido libre

$ \begin{array}{c} \text{H}_2\text{C} \text{-----} \text{CH}_2 \\ \qquad \qquad \\ \text{H}_2\text{C} \text{---} \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{COO}^\ominus \\ \\ \text{N} \\ \\ \text{H}_2^\oplus \end{array} $ <p>Prolina</p>	Amonio Secundario	$ \oplus \text{NH}_2 = \text{N-H} + \text{H}^\oplus $	10.2-10.8	10.5
$ \begin{array}{c} \text{NH}_2 \\ \\ \text{C} = \text{N} \text{---} \text{H} \\ \\ \text{N} \text{---} \text{H} \\ \\ (\text{CH}_2)_3 \\ \\ \text{NH}_3^\oplus \text{---} \text{CH} \text{---} \text{COO}^\ominus \\ \text{Arginina} \end{array} $	Guanidinio	$ \begin{array}{c} \text{---N-C-NH}_2 = \text{---N-C-NH}_2 + \text{H}^\oplus \\ \quad \qquad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{NH}_2 \qquad \quad \text{H} \quad \text{N-H} \\ \oplus \end{array} $	11.6-12.6	12.4

1.6.2 ESTABILIDAD DE LA ENZIMA.

La estabilidad de las enzimas ya sea en almacenamiento o a diversas temperaturas se conoce midiendo la enzima en forma continua. La fig. 1.4 muestra la estabilidad relativa de la deshidrogenasa del L(+)- láctica de la levadura a 0 y 40°C, medida conservando la enzima en un recipiente con termostato, con agitación suave y bombeando a velocidad lenta de manera continua el analizador.

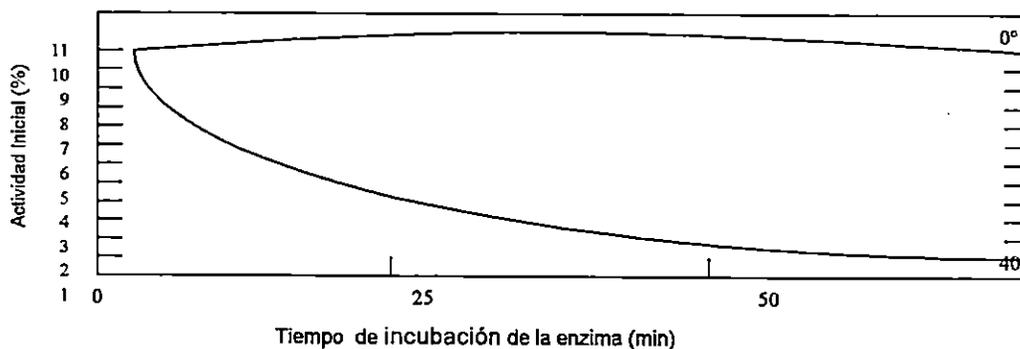


Fig. 1.4. Determinación automática de la estabilidad de la enzima. Deshidrogenasa láctica L(+) de mitocondrias de levadura analizada continuamente a 37°C. La enzima se mantuvo a 0 ó 40°C durante el análisis. (De Roodyn 1969).

1.6.3 TEMPERATURA ÓPTIMA.

La temperatura óptima se puede determinar automáticamente alterando en forma continua la temperatura del recipiente de reacción durante el análisis, preferentemente utilizando un registro de temperatura. En los baños María Technicon, si se conectan los calentadores con los baños a la temperatura ambiente, el incremento en la temperatura es lo suficientemente lento y continuo para que se hagan mediciones de la temperatura óptima en un período de tiempo conveniente. Según Tappel y Beck (1965) el baño María calentado casi linealmente a $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ aproximadamente, se ha encontrado que la desviación de la línea no es significativa. Un ejemplo de la medición automática de la temperatura óptima se da en la fig. 1.5 con la deshidrogenasa L (+)- láctica de la levadura. Si con los datos en esta figura en el intervalo de 19°C a 35°C , se trazan en una gráfica, está resulta con una buena linealidad, fig. 1.6. Así, el analizador es de utilidad al medir la energía de activación de las reacciones enzimáticas.

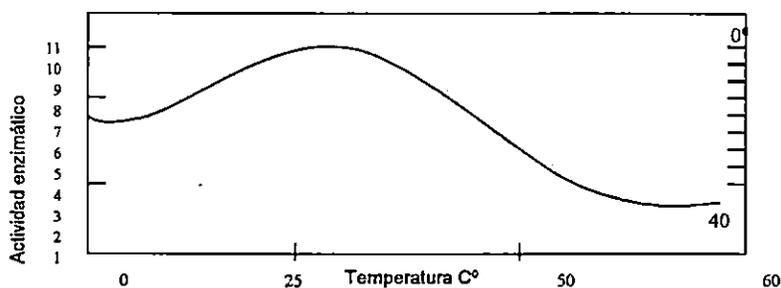


Fig. 1.5 Determinación automática del efecto de la temperatura sobre la actividad enzimática. Análisis para la deshidrogenasa del L (+)- lactato de la levadura. El baño María se ajustó inicialmente en 20°C y se dejó calentar lentamente mientras la enzima y la mezcla de reacción se bombeaban a través del analizador. (De Roodyn 1969.)

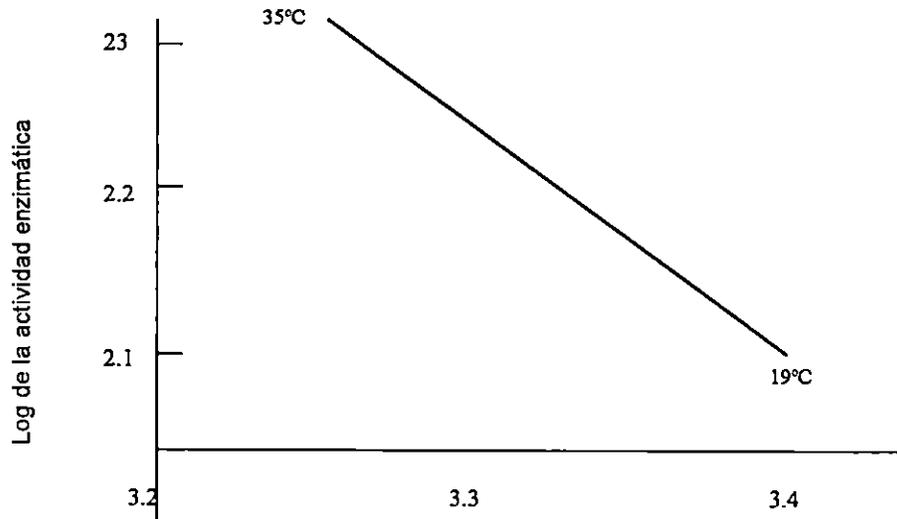


Fig. 1.6. Gráfica de Arrhenius de los datos de la fig. 7-5. Se encontró que el logaritmo de la actividad enzimática variaba inversamente con el recíproco de la temperatura absoluta en el intervalo de 19 a 35°C

1.6.4 ENZIMA ORGÁNICA DE PRUEBA.

Esta enzima orgánica es el producto de la fermentación de materiales orgánicos, perfectamente soluble en agua, de color café, olor a melaza, peso específico igual o ligeramente superior al del agua, pH entre 4.3 y 4.6; temperatura de almacenamiento no mayor de 55° C, estas enzimas reaccionan con agentes oxidantes, que mejoran las propiedades estructurales de los suelos cohesivos al catalizar y acelerar las reacciones químicas naturales en ellos, y los convierte en estructuras más resistentes, este

proceso, ocurre en corto tiempo, como la cementación en los suelos sedimentarios.

1.6.5 MEZCLAS DE ENZIMA ORGÁNICA, EXPERIMENTAL.

Basados en la dosificación típica de enzima orgánica, de un litro por cada 3m³ a 3.5 m³ ó 1galón por cada 15 m³ a 22.5 m³ de suelo, el rango de dilución en agua es de 1:500 a 1:1000, dependiendo del tipo de suelo y lo seco que esté, para dar tratamientos a tramos longitudinales de unos 100 metros de camino. Para establecer la dosificación más adecuada, condiciones de contenido de humedad, acumular experiencia y efectividad, se ha tenido que aplicar enzimas orgánicas en suelos que contienen un rango completo de tamaños de partículas, una distribución pareja de ellas; desde gruesos capaces de soportar las cargas del tráfico hasta los finos cohesivos. Algunos suelos de baja calidad son a menudo usados en caminos, pero con la aplicación de : 1) enzimas orgánicas y, 2) mayor contenido de finos, de 20% a 30% que pasa por el tamíz No. 200, si se requiere de una alta capacidad de soporte de carga de tráfico; necesitará un 15% - 20% de material granular, a su vez, si los suelos contienen bajo porcentaje de finos (menos del 5% que pase el tamiz No. 200) será necesario cambiar el perfil del suelo agregando arcilla cohesiva.

1.6.6 ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS CON ENZIMAS ORGÁNICAS.

Las rocas sedimentarias se formaron a partir de sedimentos que son arrastrados por diversos agentes atmosféricos que se van depositando en capas, que soportan las que se van acumulando por encima de cada una de estas. Cuanto más peso soportan las capas inferiores, menos es el espacio entre los poros. El suelo expulsa agua y se alcanza gran densidad. Pese a esto, el proceso por sí sólo no es suficiente para formar una roca, también debe existir un proceso de cementación que se produzca con minerales como carbonato de calcio, sílice u Oxido de hierro, estos fluyen a través de los poros similar a un lixiviado integrándose para cementar las partículas de suelo. Si estas son de arcilla, por ejemplo, se llega a formar con el tiempo una pizarra dura y estable.

Si a un suelo se agrega enzima orgánica ocurre algo como la compactación, donde se tiende a llevar al suelo a una densidad máxima. Así, los materiales cementados son reemplazados por los cationes orgánicos de la enzima, los cuales rompen los enlaces de los aniones ionizados. Se produce un intercambio catiónico en la estructura de la arcilla y se crea un proceso de cementación acelerado por el efecto enzimático; por eso, la enzima se define como un catalizador; el agua pelicular es liberada y se elimina por gravedad, en poco tiempo se forma una masa sólida y estable; la capilaridad se elimina por disminución de la porosidad y la estructura se vuelve casi impermeable.

1.6.7 ESTABILIZACIÓN CON ENZIMAS ORGÁNICAS.

El estabilizador enzimático, es un líquido natural, no-tóxico, biodegradable fácilmente mezclable en agua, su producción esta basada en la tecnología de fermentación³². Su fin es aumentar significativamente la estabilidad de los suelos cohesivos que se usan en la construcción de vías. Se logra reducir el espacio entre las partículas en el suelo, así como el agua que absorbe dicho suelo para lograr una máxima solidez. Al disminuir la capacidad de hinchamiento de las partículas del suelo, se reduce la permeabilidad, resulta una mejor resistencia al clima y aumento de la capacidad de resistencia a los esfuerzos producidos por el tráfico. Para los suelos finos como las arcillas, donde la dosificación puede afectar el hinchamiento y encogimiento de estos, puede cambiar la matriz del suelo de tal manera que después de volverse compacto el suelo pierde la propiedad de reabsorber agua y los beneficios mecánicos de la solidez no se pierden, aún después de reaplicar agua al suelo compacto.

1.6.8 EXPERIENCIAS Y COSTOS EN LA APLICACIÓN ARCILLA-ENZIMA ORGÁNICA.

Se ha utilizado la técnica de estabilización de suelo con enzimas orgánicas en base y sub-base. Ver Tabla 1.5

³² Manual técnico del sistema TERRAZYME El Método Optimo Para la Estabilización de Suelos.

Tabla 1.5 Proyectos realizados en El Salvador.

PROYECTO.	UBICACIÓN	LONGITUD
- Rehabilitación y estabilización de calle el Rancho	Santa Ana-Coatepeque	1 Km.
- Reparación de Camino Vecinal Calle Cantón El Paraíso	Turín- Ahuachapan	1 Km.
- Reconstrucción y Estabilización de Calle a cantón El Caubrillo.	El Carmen-La Unión	800 ML
- Estabilización de Camino Vecinal Calle Los Bambúes a San Emilio.	Guadalupe-San Vicente	1 Km.
- Estabilización de Calle de acceso a Hacienda Veranera.	Sonsonate	12 Km.
- Reparación y Estabilización de Carretera San Julian	Ishuatan-Sonsonate	22 Km.

Fuente: TEKNOVA SA de CV. Distribuidor del producto enzimatico en El Salvador.

A partir de los proyectos realizados en El Salvador y experiencias extranjeras se establece un costo de 60 colones + IVA, por 1 m³ de suelo a estabilizar.

1.6.9 RESULTADOS Y ESTUDIOS EN EL USO DE LAS ENZIMAS ORGÁNICAS.

Una vía tratada con producto enzimático en Malasia, de 27.2 Km de longitud, 4.80 mt de ancho y 0.15 mt de espesor, y 2.5 años de uso, ha soportado dos épocas de invierno. Algunas secciones del camino estuvieron cubiertas por agua por 1 hasta 10 días, desde varios centímetros hasta dos

metros. La vía esta todavía en muy buenas condiciones, a pesar de tal exposición.³³

Las lluvias en Malasia son más frecuentes y las áreas inundadas, por lo que la obstrucción de los drenajes es pesada. En el segundo año después de la aplicación, se realizó limpieza de los drenajes obstruidos. La superficie de la vía que fue tratada no necesitaba mantenimiento, comparado con la aplicación anterior. También se observó que la cantidad de polvo durante los días secos fue mucho menos comparada con la superficie de las secciones no tratadas.

Las pruebas para determinar los efectos acorde con el CBR sobre un suelo tratado, con enzima orgánica por ejemplo, se llevaron a cabo en Tailandia; así, una vez aplicadas las enzimas orgánicas al suelo, el CBR% pasa de 28% a 65.6%, tres semanas después, aumentando la capacidad portante del suelo.

El laboratorio Nacional de Vialidad del ministerio de Obras Publicas de Chile (1995) reportó haber obtenido un cambio en el valor del CBR de 19% a 37% en 72 horas al adicionar enzimas orgánicas, con lo cuál se puede decir que este hace aumentar la resistencia de los suelos. En el Anexo 4 muestra una curva típica de la relación fuerza/tiempo después de la aplicación del estabilizador a la superficie de la vía. El CBR aumenta rápido durante el primer mes y continua aumentando durante el uso de la vía.

³³ Manual técnico del sistema TERRAZYME El Método Optimo Para la Estabilización de Suelos.

RECOMEDACIONES.

- ✓ Controlar adecuadamente las variables que influyen en el proceso de compactación del suelo, para garantizar óptimos resultados que las variaciones en las propiedades de los suelos mezclados con enzimas orgánicas.

- ✓ Considerar la utilización de aditivos para la estabilización de suelos locales que no cumplen los requisitos necesarios de resistencia para soportar las cargas del tráfico de acuerdo con las normas de compactación ya establecidas por la AASHTO.

CAPÍTULO II

PRUEBAS DE LABORATORIO CON Y SIN ENZIMAS ORGÁNICAS

CAPITULO II

PRUEBAS DE LABORATORIO CON Y SIN ADICIÓN DE ENZIMAS ORGÁNICAS

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de este capítulo, corresponde a la obtención de resultados de las pruebas realizadas con las arcillas seleccionadas en dos lugares de la zona norte del país, específicamente en el Cerro Pacho, Km 10 al nor-poniente de Nueva Concepción, Chalatenango; y el Cerro Cirimba, Km. 1 al nor-oriente de San Francisco Gotera, Morazán. De estos Lugares, se extrajeron muestras para pruebas y ensayos de laboratorio, presentando los resultados obtenidos de cada uno, con y sin enzimas orgánicas. Las pruebas son las siguientes: granulometría, límites de consistencia, proctor, CBR, permeabilidad y la prueba del hidrómetro. El desarrollo de estos métodos de prueba ayudan a la investigación de las propiedades de las arcillas en cuanto a conocer la capacidad de resistir cargas, reacción ante la presencia de agua, la deformabilidad, etc.

Tomando como base los parámetros de las normas ASTM y AASHTO, se realizó el procedimiento de pruebas propuesto, presentándose equipos y formulas para el desarrollo de cálculos correspondientes.

2.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS SELECCIONADOS

Para la selección de los sitios de investigación, se eligieron dos lugares de la zona norte del país, cuyos suelos cumplen con las características de ser arcillosos.

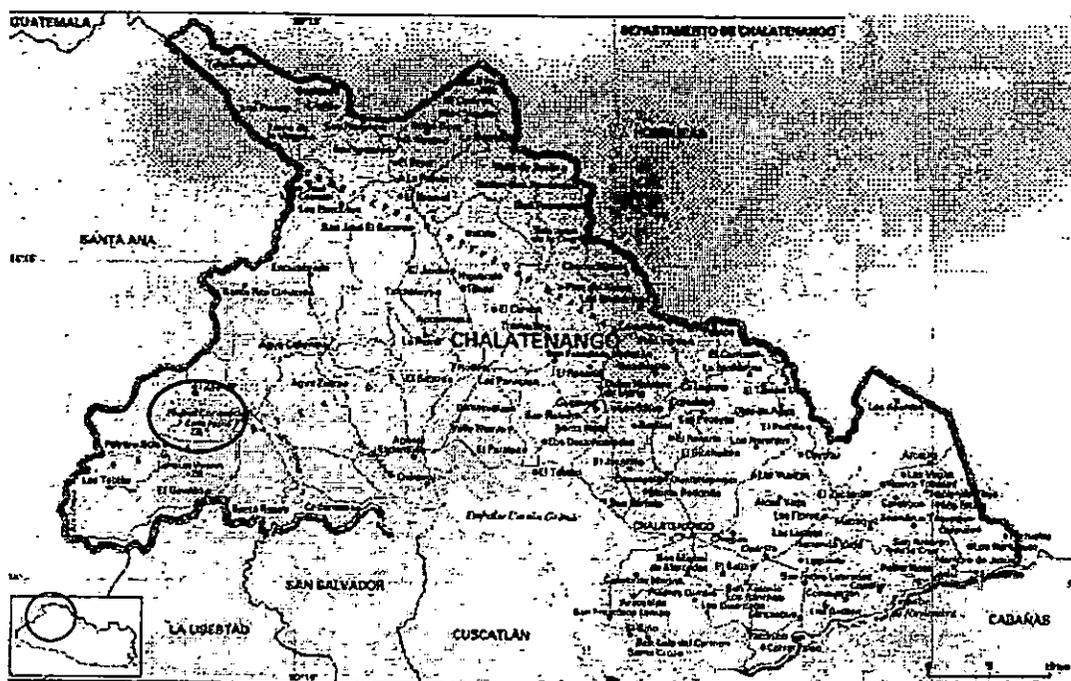
CERRO PACHO-CHALATENANGO

El muestreo se realizó en el Km 85 sobre la carretera CA-3, a 10 Km al poniente de la ciudad de Nueva Concepción, sobre el hombro derecho de la vía de paso que conduce a la cima del Cerro (ver ubicación geográfica en Mapa 1), a una distancia de 2.30 mt del eje de la vía, donde se ha construido una pequeña berma; las características del lugar son las siguientes:

- ✓ El estrato arcilloso subyace a un estrato aglomerático que es relativamente delgado (30 cm) sobre la ladera.
- ✓ La ladera del Cerro se puede definir como ladera de derrubio de pendiente.
- ✓ No se observa ningún grado de meteorización en la zona de muestreo; donde se pudo observar algún grado de meteorización fue en la parte baja del cerro.
- ✓ El material muestreado se observa muy uniforme (material parental), se puede clasificar visualmente como arcilla franca de color café rojizo encendido.
- ✓ La muestra presenta condiciones de humedad un poco alta, debido a la lluvia.
- ✓ La pendiente de la ladera es de un 10.6 % aproximadamente.

MUESTREO 1

Para la realización de la obtención de la muestra, se removió una capa de piedra, colocada en el hombro de la vía, así como el estrato aglomerático, hasta quedar totalmente descubierto el estrato arcilloso. Procediendo con la excavación de un pozo con dimensiones de 1.00 mt de largo, 0.60 mt de ancho y 0.40 mt de profundidad. Luego el material desalojado se colocó en sacos sintéticos, para facilitar su manejo y conservación de algunas propiedades como la humedad.



Mapa 1. Ubicación geográfica del Cerro Pacho, en Nueva Concepción, Chalatenango.

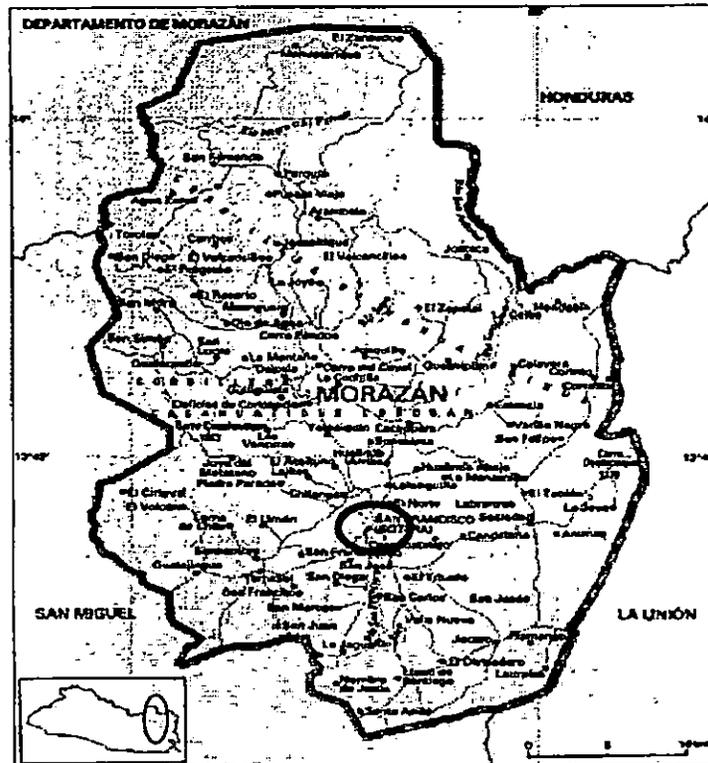
CERRO CIRIMBA – MORAZAN

La obtención de la muestra se realizó a la altura del Km 168 sobre la carretera CA-7, a 1 Km al oriente de la ciudad de San Francisco Gotera (ver ubicación geográfica en Mapa 2), sobre el hombro derecho de la vía de paso que conduce a la cima del cerro, a una distancia de 3.50 mt del eje de la vía, donde se adquirió la muestra; las características del lugar son las siguientes:

- ✓ El Cerro muestreado se describe como muy activo en su degradación, por el grado de descomposición que presentan las rocas (grado 3), pues la arcilla tiene gránulos que se pueden distinguir de la roca madre.
- ✓ La muestra recolectada es arcilla en proceso de evolución, pues se observa que el grano se va masificando, obteniendo su grado de plasticidad.
- ✓ Se observa que hay presencia de arcilla morada, característico de la zona.
- ✓ El estrato arcilloso subyace a un estrato aglomerático de 1.40 mt de espesor el cual está sub-dividido por dos estratos: el superior lo constituye un estrato aglomerático de grava gruesa de 1.10 mt de espesor , y el segundo estrato aglomerático está formado de grava más fina de 0.30 mt de espesor, debajo del cual se encuentra el material laterítico (arcilla a muestrear).
- ✓ El material muestreado no se observa uniforme, pues se observan fragmentos de roca altamente alterados, se puede clasificar visualmente como arcilla de color café claro.

MUESTREO 2

Para la realización del muestreo se removió parte de vegetación como raíces, y parte del estrato aglomerático, de tal manera que el material laterítico quedara al descubierto y libre de impurezas. En el talud donde se tomó la muestra se hizo una excavación de 1.50 mt de ancho, 1.20 mt de largo y 0.80 de alto; posteriormente el material obtenido se colocó en sacos sintéticos, para protección de la muestra y facilitar su manejo.



Mapa 2. Ubicación geográfica del Cerro Cirimba, en San Francisco Gotera, Morazán

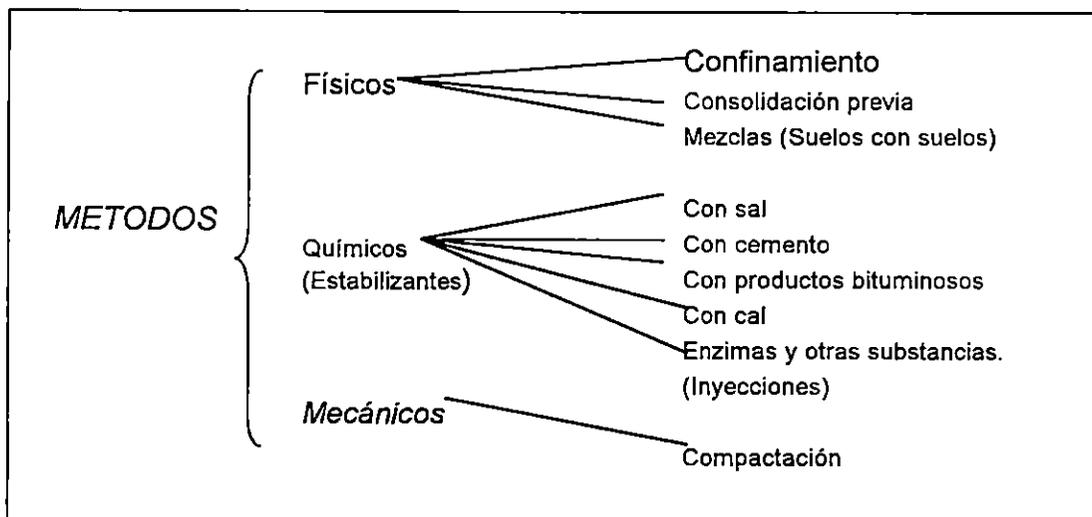
2.2 METODOS PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUELO

El mejoramiento del suelo es la modificación o cambio de cualquier característica de este para mejorar sus propiedades ingenieriles. Entre los

cambios se pueden mencionar la manipulación mecánica, la remoción de humedad y la adición de diferentes sustancias al suelo, que mezcladas con este, mejoran notablemente su resistencia bajo sollicitaciones de carga. El objetivo general de la estabilización es incrementar los esfuerzos admisibles de carga, disminuir los asentamientos y mejorar la estabilidad del suelo en forma gradual.

La estabilización del suelo se recomienda cuando se encuentran condiciones pobres en el terreno sobre el que se está proyectado construir una infraestructura. En la tabla 2.1 se presenta una descripción comparativa de distintos métodos de estabilización basada tanto en características propias de cada uno, como en el tipo de suelo al que resulta más conveniente su aplicación.

Tabla 2.1 Métodos para la estabilización de suelos



Fuente: Castro Ulloa Carlos y Otros (1995), Estabilización de Suelos, Trabajo de Graduación, Ing. Civil. UCA.

De los métodos presentados en la Tabla 2.1 se retomarán los más utilizados en la estabilización de suelos.

- ✓ Graduación artificial (adición o remoción de partículas de suelo).
- ✓ Estabilización con cementantes (enzimas orgánicas).
- ✓ Inyecciones.
- ✓ Compactación.
- ✓ Precarga o precompresión.
- ✓ Vibroflotación.
- ✓ Consolidación dinámica.
- ✓ Vibrocompactación.

2.3 GRADUACIÓN ARTIFICIAL. ADICIÓN O REMOCIÓN DE PARTÍCULAS.

La graduación artificial del suelo consiste generalmente en mezclar dos o más suelos naturales de distintas características, para obtener un material compuesto que posea mejores propiedades mecánicas que cualquiera de sus componentes y también incluye la adición de roca triturada.

Debido a que el comportamiento ingenieril del suelo depende entre otros factores, de la composición y distribución del tamaño de sus partículas, sus propiedades usualmente se pueden alterar en forma significativa con la adición o remoción de una porción selecta de suelo, lo cual convierte a la graduación artificial en uno de los métodos más sencillos y recomendados. Este método consiste en producir una mezcla artificial a partir de suelos de

diferentes características físicas, con el fin de obtener un fácil manejo en la compactación y que presente una mejor capacidad de carga, mejorándose así la estabilidad del estrato de cimentación. Un ejemplo típico de la utilización de este sistema de estabilización es cuando se tienen suelos puramente friccionantes o altamente plásticos. Los suelos friccionantes se mezclan con suelos cohesivos para que el conjunto obtenga unión entre sus partículas (ver figuras microscópicas 2.1 y 2.2); los suelos plásticos, en cambio, al mezclarlos con suelos friccionantes disminuyen su plasticidad y en ambos casos se mejoran sus propiedades portantes y se facilita su manejo. Este método resulta ventajoso y práctico cuando existen en la cercanía de la construcción, bancos de material que presenten características contrarias al suelo a tratar, siempre que la cantidad de este sea pequeña, ya que grandes volúmenes graduados artificialmente resultan antieconómicos e imprácticos debido al tiempo requerido para mezclarlo. Este tipo de estabilización se emplea principalmente en las subrasantes de pavimentos y en pavimentos de bajo costo.

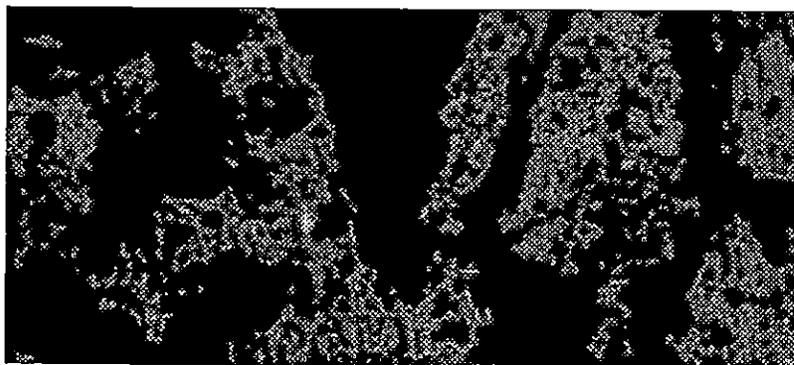


Figura 2.1: 80% arcilla – 20% arena



Figura 2.2: 90% arcilla - 10% arena

El ingeniero de suelos debe ser extremadamente cuidadoso en la determinación de la cantidad de suelo que se va a adicionar (selecto) o remover (desecho) de las partículas de suelo para mejorar las propiedades físico-mecánicas. Por ejemplo, si se escoge la adición incorrecta de material fino en la mezcla, como resultado se pueden cambiar las propiedades físicas de la misma convirtiendo el libre drenaje del material a una mezcla de drenaje ineficiente, si se le extrae una cantidad inadecuada de finos puede convertirse de una mezcla bien graduada y poco sensitiva a la variación de la humedad, a una combinación mal graduada de partículas; la mezcla se vuelve sensible a la variación de humedad y muy difícil de manejar, debido a que debe llevarse un control más estricto de la cantidad de agua que contiene. De ahí que la estabilización de suelo por la adición o remoción de partículas representa una técnica o herramienta muy útil para el ingeniero de suelos, pero debe ser usada con precaución y conocimiento técnico.

2.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

2.4.1 PROPIEDADES FÍSICAS.

2.4.1.1 ENSAYO GRANULOMÉTRICO (NORMAS ASTM D-421 y D-422-95).

La prueba de análisis granulométrico consiste en determinar los distintos diámetros de las partículas de suelo para su clasificación a partir de los porcentajes retenidos o que pasan en las mallas de tamizado; valiéndose de la curva granulométrica y de los valores de los coeficientes de uniformidad y curvatura.

La prueba se realiza por medio del cribado del suelo a través de las diferentes mallas (Tabla 2.2.), a lo cual se conoce como: Análisis Granulométrico Mecánico; pero cuando el suelo que compone la muestra, sus gránulos son demasiado finos, se hace necesario para análisis, recurrir a métodos por sedimentación lo cual constituye el Análisis Granulométrico en Húmedo.

Para el análisis granulométrico mecánico o por tamizado se pueden utilizar los siguientes grupos de mallas:

Tabla 2.2 Tamices utilizados para el análisis granulométrico.

GRUPO No.1							
3	2	1 ½	1"	¾	½"	⅜"	No.4
GRUPO No.2							
No.4	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100	No.200	

La cantidad de suelo necesario para realizar la prueba de granulometría se calcula según la tabla 2.3

Tabla 2.3 Cantidad de suelo a utilizar para el análisis granulométrico

Para suelos arcillosos y limosos	500 gr
Para suelos arenosos	1000 g

Fuente :Crespo Villalaz Carlos (1994), Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 4ª edición México. Pág 47.

Equipo utilizado para el análisis granulométrico:

- ✓ Juego de tamices del grupo 2 con tapa y fondo.
- ✓ Balanza de 0.1 gr de precisión (Ver figura 2.3).
- ✓ Vibrador eléctrico rop-tap (ver figura 2.4).
- ✓ Brocha pequeña.
- ✓ Cepillo.
- ✓ Recipientes para pesar muestras.

Procedimiento:

Para preparar la muestra se realizan los siguientes pasos:

- a) Exponer una muestra de suelo a los rayos del sol o secar en el horno.
- b) Cuartear el suelo hasta obtener una muestra adecuada ,según tabla 2.3.
- c) Pasar la muestra por la malla No. 4 y se determina el porcentaje de gravas arenas.
- d) De acuerdo a los porcentajes retenidos se procede a analizar la muestra como gravas, arenas, o por análisis granulométrico combinado.
- e) La prueba por análisis granulométrico combinado se realiza de la siguiente manera:
 - ✓ Efectuar el tamizado del suelo retenido en la malla No. 4, usando las mallas de 3", 1^{1/2}", 3/4", 3/8" y No.4. (Ver figura 2.3)

- ✓ Determinar el peso de cada porción por tamaño y anotar estos.
- ✓ Continuar con el análisis granulométrico de la fracción que pasa la malla No. 4; obteniendo previamente el contenido de humedad (W%) del suelo a ensayar así:

$$W\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

- ✓ Calcular el peso seco total de la muestra así:

$$PS = \frac{PH}{1 + \frac{w}{100}} \quad (\text{Ec.2.1a})$$

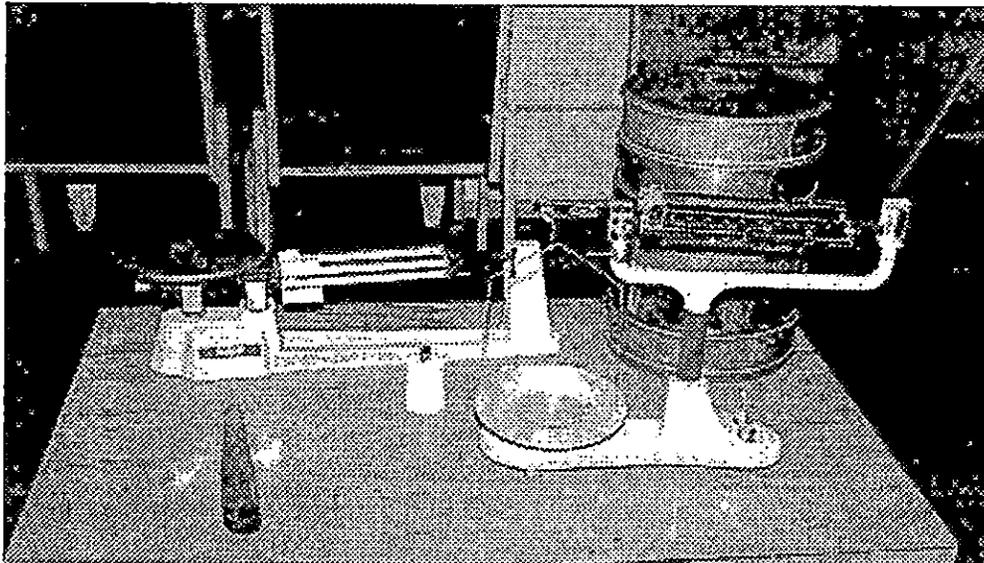


Figura 2.3. Equipo utilizado en el ensayo granulométrico.

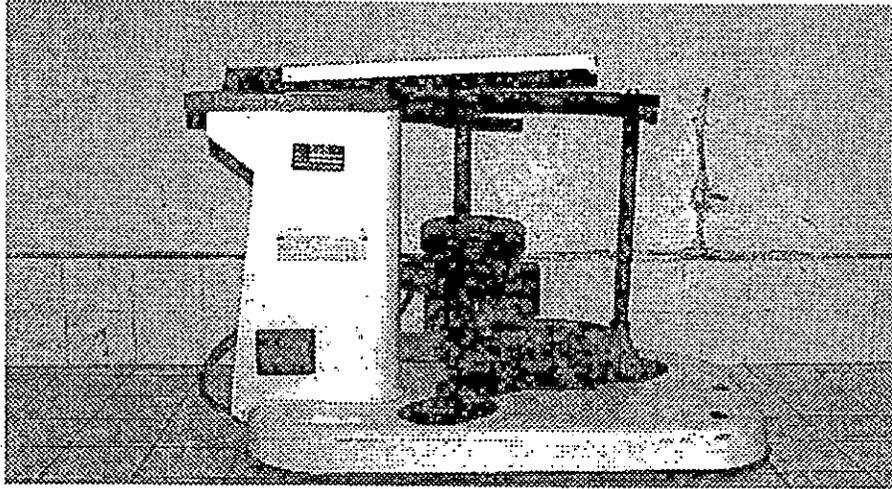


Figura 2.4. Vibrador eléctrico rop-tap.

- ✓ Cuartear la fracción que pasa la malla No. 4 reduciéndola hasta obtener la cantidad de suelo necesaria a analizar (500 gr).
- ✓ Tomar la muestra ya cuarteada y pesarla, este será el peso de la muestra humedad (PH).
- ✓ Colocar la muestra en saturación durante 12 horas. Con la muestra ya saturada desintegrar los grumos.
- ✓ Lavar el suelo en la malla No.200, dejando perder el material que pasa.
- ✓ El suelo retenido se coloca en una cápsula (previamente pesada).
- ✓ El suelo retenido se pone en el horno por unas 18 horas a 110°C más o menos 5°C, con el objeto de llevarlo a estado seco.
- ✓ Sacar del horno el suelo lavado y retenido, obteniendo así el peso retenido parcial seco.
- ✓ Calcular el peso del suelo perdido en el lavado así:

- ✓ Material que pasó la malla No. 200 = Peso total seco – Peso retenido parcial seco.
- ✓ Tamizar el suelo retenido parcial seco por las siguientes mallas: No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200, por un periodo no menor de 15 minutos.
- ✓ Determinar el peso de cada porción retenida en cada una de las mallas, de tal manera que la suma de estos no tenga variación de más o menos 0.5% del peso seco total.

Cálculos:

- ✓ Calcular los porcentajes de suelo parcialmente retenido en cada tamíz dividiendo el peso retenido en cada uno por el peso total seco.
- ✓ Con los porcentos retenidos parciales, calcular los porcentos retenidos acumulados y los porcentos que pasan.
- ✓ Trazar la curva granulométrica del suelo en estudio en una gráfica que tiene por abscisas a escala logarítmica la abertura de las mallas y por ordenadas los porcentajes del material que pasan por dichas mallas, a escala natural.
- ✓ Obtener de la curva trazada los diámetros característicos, para calcular el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura del suelo analizado.

2.4.1.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - MÉTODO DEL HIDRÓMETRO, NORMAS ASTM D421-95 Y D422-95.

Equipo utilizado para efectuar el análisis granulométrico con el Método del hidrómetro.

- ✓ Cilindro de sedimentación (cilindro de 1000 cm³), también conocido como cilindro de hidrómetro (figura. 2.6), Hidrómetro (modelo 152 H preferiblemente).
- ✓ Aparato para dispersar el suelo, batidor (ver figura 2.7).
- ✓ Agente dispersivo (hexametafosfato de sodio (NaPO₃) , cuyo nombre comercial es Calgón o silicato de sodio (Na₂SiO₃) . también llamado vidrio líquido.
- ✓ Termómetro.
- ✓ Un baño de temperatura controlada para el cilindro del hidrómetro (opcional).

El análisis con el hidrómetro es un método ampliamente utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrica de los suelos cuyas partículas se encuentran desde el tamíz No. 200 (0.075 mm) hasta alrededor de 0.001 mm. Los datos se presentan en un gráfico semilogaritmico de porcentaje de materiales más finos contra el diámetro de los granos, y puede combinarse con los datos obtenidos en el análisis mecánico del material retenido . o sea mayor que el tamíz No 200 (u otro tamaño cualquiera). El

principal objetivo del análisis con el hidrómetro es obtener el porcentaje de arcilla (porcentaje más fino que 0.002 mm) presente en un suelo.

El análisis con el 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, en la forma expresada por el físico Inglés G.G. Stokes (ca 1850) en la ecuación conocida como la ley de Stokes:

$$v = \frac{2\gamma_s - \gamma_f}{g\eta} * \left[\frac{D}{2} \right]^2 \quad (\text{Ec.2.2})$$

Donde v : velocidad de caída de la esfera, cm/s

γ_s : Peso específico de la esfera (peso específico = densidad x g = masa/unidad de volumen x gravedad = g/cm³ en el sistema cgs)

γ_f : Peso específico del fluido (usualmente agua), gr/cm³.

η : Viscosidad absoluta, o dinámica del fluido (g/cm.s)(ver anexo 2A)

D : Diámetro de la esfera, cm

g : Constante gravitacional (980.7 cm/s²)

Al resolver la ecuación para D , utilizando el peso específico del agua se obtiene:

$$D = \frac{18 \eta v}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (\text{cm}) \quad (\text{Ec.2.3})$$

El rango de los diámetros (D) de partículas de suelo para los cuales ésta ecuación es válida, es aproximadamente: $0.0002 \text{ mm} \leq D \leq 0.2 \text{ mm}$. Pues los granos mayores causan excesiva turbulencia en el fluido y los granos muy

pequeños están sujetos a movimientos de tipo Browniano (sujetos a fuerza de atracción y repulsión entre partículas).

Para resolver la ecuación 2.3 es necesario obtener el término velocidad v , conocer los valores correctos de γ_s y γ_w y tener acceso a la tabla de viscosidad del agua. Como el peso específico del agua y su viscosidad varían con la temperatura, es evidente que ésta variable también debe ser considerada.

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

Al mezclar una cantidad de suelo con agua y un pequeño contenido de un agente dispersante para formar una solución de 1000 cm^3 , se obtiene una solución con una gravedad específica ligeramente mayor que 1.0 (ya que la gravedad específica del agua destilada es 1.0 gr/cm^3 a 4° C) el agente dispersante (también llamado defloculante) se añade a la solución para neutralizar las cargas sobre las partículas más pequeñas del suelo, que a menudo tienen carga negativa. Con orientación adecuada, estos granos cargados eléctricamente se atraen entre si con fuerza suficiente para permanecer unidos, creando así unidades mayores que funcionan como partículas. De acuerdo con la ley de Stokes, estas partículas mayores sedimentarán más rápidamente a través del fluido que las partículas aisladas.

El hexametáfosfato de sodio, también llamado calgón (NaPO_3) y el silicato de sodio o vidrio líquido (Na_2SiO_3) son dos materiales usados muy a menudo como agentes dispersantes para neutralizar la carga eléctrica de las partículas de suelo. La cantidad exacta y el tipo de agentes dispersantes requeridos depende del tipo de suelo, y pueden ser determinados por ensayo y error. Una cantidad de 125 cm^3 de solución al 4% de hexametáfosfato de sodio en los 1000 cm^3 de suspensión de suelo-agua se han considerado en general adecuados. Si la suspensión de suelo-agua se aclara en un tiempo muy corto en 2 ó 3 horas por ejemplo; la cantidad apreciable de partículas de tamaño de arcillas permanecería muy turbio (aparición de barro) por varios días.

El metafósforo de sodio produce una solución ácida (torna azul los papeles utilizados para determinar acidez) y por consiguiente se podría esperar una mayor eficacia como agente dispersivo en suelos alcalinos. El silicato de sodio, por otra parte, produce una solución alcalina (torna rosado al papel utilizado para medir acidez) y debería ser más eficiente en suelos ácidos o suelos cuyo pH es menor de 7. La mayoría de las arcillas son "alcalinas". La presencia de cierta sal u otras impurezas, sin embargo, puede crear una condición "ácida". Para ser estrictos se debe determinar el pH (ver anexos 2B y 2C) de la solución del suelo antes de utilizar arbitrariamente algún agente dispersivo.

Es interesante anotar que este ensayo es ejecutado por algunos ingenieros en Inglaterra con un poco más de refinamiento, cerca de 100 gr de

suelo se tratan inicialmente con unos 100 ml de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) en solución al 6% con el objetivo de sacar todas las burbujas de gas de la muestra (esto remueve los materiales orgánicos). Este tratamiento puede tomar varios días y requerir cantidades adicionales de peróxido de hidrógeno. A continuación el suelo es tratado cerca de 100 ml de 0.2 N ácido clorhídrico (17 ml de ácido clorhídrico concentrado por litro de agua hacen una solución 0.2 N) para remover los compuestos de calcio que pudiesen aparecer durante el ensayo de descomposición. Este tratamiento debe continuarse hasta que el suelo produzca una reacción ácida al papel colorimétrico (pasar de azul a rosado). En este momento el suelo se encuentra listo para ser usado y cerca de 50 gr del material tratado se debe mezclar con 250 ml de solución a la cual se haya añadido 8 gr de oxalato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) por 1000 cm^3 como agente dispersante. El oxalato de sodio produce una solución alcalina; de forma que su adición causa la neutralización de la suspensión suelo-agua. A continuación se mezcla la suspensión de agua y suelo con el oxalato de sodio utilizando una batidora de leche malteada durante 15 minutos; este material se transfiere al cilindro de sedimentación y se hace el ensayo como se explica más adelante.

El hidrómetro usado mas comúnmente es el tipo 152H (designado por la norma ASTM D-421) y está calibrado para leer gramos de suelo de un valor de gravedad específica igual a 2.65 gr/cm^3 en 1000 cm^3 de sus pensión, siempre que no haya más de 60 gr de suelo en la solución. La lectura por consiguiente

está directamente relacionada con la gravedad específica de la solución. Esta calibración particular del hidrómetro es una ayuda considerable, como se verá a continuación. Por esta razón este tipo de hidrómetro se utiliza muy ampliamente, a pesar de existir otros tipos de hidrómetros que pueden ser leídos en términos de la gravedad específica de la suspensión suelo-agua, para estos últimos hidrómetros, debe tenerse mucho cuidado en no usar más de 60 gr de solución de suelo por litro de solución para evitar la interferencia entre las partículas granulares durante la sedimentación, lo cual empobrece los resultados obtenidos de la aplicación de la ley de Stokes.

El hidrómetro determina la gravedad específica de la suspensión suelo-agua en el centro del bulbo. Todas las partículas de mayor tamaño que aquellas que se encuentren aún en suspensión en la zona llamada como L (distancia entre el centro de volumen del bulbo y la superficie del agua) habrán caído por debajo de la profundidad del centro de volumen del hidrómetro. Además, como el hidrómetro tiene un peso constante, a medida que disminuye la gravedad específica de la suspensión, el hidrómetro se hundirá cada vez más dentro de la suspensión, aumentando así la distancia L; es preciso recordar también, que la gravedad específica del agua (o densidad) decrece a medida que la temperatura aumenta (o disminuye) en una variación de 4° C. Esto ocasiona adicionalmente un hundimiento mayor del hidrómetro dentro de la suspensión.

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 2.4 como la distancia dividida por el tiempo, entonces la velocidad de caída de las partículas es:

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Ec.2.4})$$

Por consiguiente, es necesario encontrar la profundidad L correspondiente a algún tiempo transcurrido t de forma que se pueda determinar la velocidad necesaria para utilizar en la ecuación Stokes.

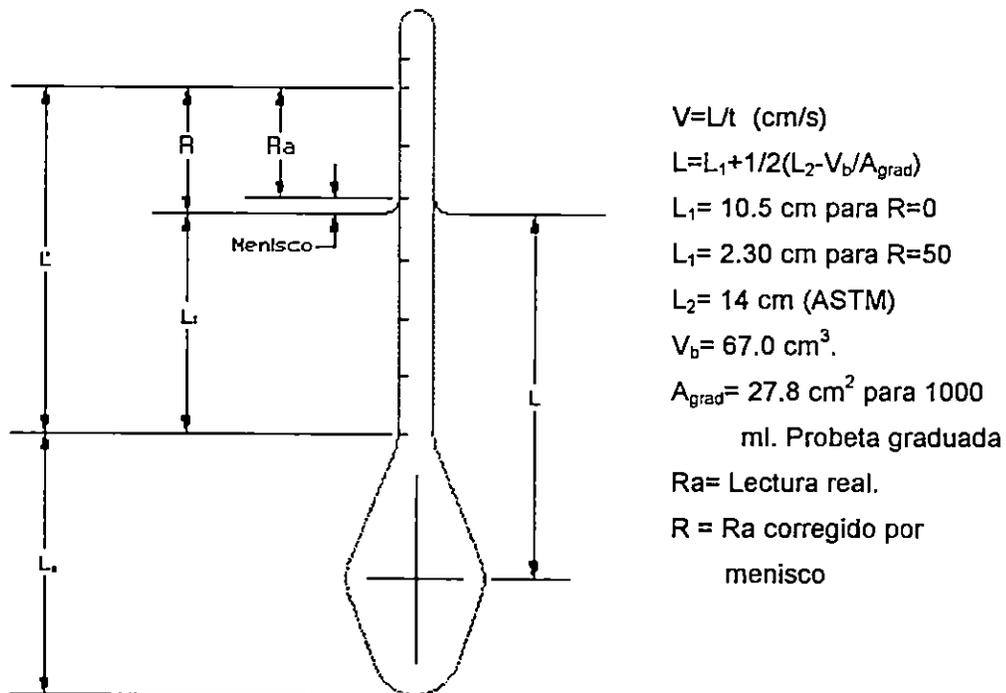


Figura 2.5. Dimensiones y términos del hidrómetro.

Para encontrar L , es necesario medir la distancia L_2 (ver figura 2.5) y varios valores de la distancia variable L_1 . A continuación, se usa un cilindro de sedimentación graduado de sección transversal (A) conocida, sumergir dentro

de el bulbo del hidrómetro y determinar el cambio en la medición del cilindro, esto permitirá determinar el volumen del bulbo del hidrómetro V_b . A continuación se puede calcular la longitud L en cm si L_1 y L_2 están en cm y V_b se encuentra en cm^3 , de la siguiente forma:

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left[L_2 - \frac{V_b}{A} \right] \quad (\text{Ec.2.5})$$

El término $- V_b/A$ de la ecuación 2.5 toma en consideración que la suspensión de suelo-agua se eleva una cantidad V_b/A cuando el hidrómetro se coloca en el cilindro de sedimentación. Así, el centro de volumen se desplaza hacia arriba $\frac{1}{2} (V_b/A)$ de la ecuación 2.5. Al dibujar una curva de las lecturas del hidrómetro (las cuales se relacionan con los valores correspondientes de L_1) contra L , se obtienen el valor de L para cualquier lectura del hidrómetro R . Realmente, como ésta curva es esencialmente lineal, solamente se necesitan 3 puntos para establecer la curva R contra L . Como el hidrómetro 152H tiene dimensiones razonablemente dentro de los patrones, los valores de L pueden obtenerse una sola vez con proyección adecuada para la mayoría de los trabajos posteriores de mecánica de suelos.

La lectura del hidrómetro no debe ser corregida para su utilización en la ecuación 2.5, excepto por el error de menisco (en una suspensión turbia, es necesario leer en la parte superior del menisco). La razón para sólo tener en cuenta esta corrección en la determinación de la velocidad de caída consiste en que la lectura real de la distancia L que las partículas han recorrido es

independiente de la temperatura, gravedad específica de la solución, o cualquier otro tipo de variable.

Si se conoce el diámetro de la partícula y el porcentaje de suelo que aún permanece en suspensión el cual, en este caso es el porcentaje de material más fino, se tiene suficiente información para dibujar la curva de granulometría.

El porcentaje más fino se relaciona directamente a la lectura del hidrómetro de tipo 152H ya que la lectura proporciona los granos de suelo que aún se encuentran en suspensión directamente si la gravedad específica de suelo es de 2.65 gr/cm^3 y el agua se encuentra a una densidad de 1.00 gr/cm^3 . El agente dispersante tendrá algún efecto sobre el agua y adicionalmente la temperatura del ensayo deberá ser lo más próxima a 20°C y la gravedad específica (G_s) de los granos de suelo seguramente no es 2.65 gr/cm^3 ; por consiguiente, se necesita corregir la lectura real del hidrómetro para obtener la "lectura" correcta de los granos de suelo todavía en suspensión en cualquier instante durante el ensayo.

La temperatura puede mantenerse como una variable de un sólo valor utilizando un baño de agua de temperatura controlada (si existe la disponibilidad), pero esto es una conveniencia, no una necesidad. El efecto de las impurezas en el agua y del agente dispersor sobre las lecturas del hidrómetro se puede obtener utilizando un cilindro de sedimentación de agua de la misma fuente y con la misma cantidad de agente dispersivo que se utilizó

al hacer la suspensión suelo-agua para obtener la corrección de cero. El cilindro de agua debe tenerse a la misma temperatura a la cual se encuentra la solución suelo-agua. Una lectura menor de cero en el cilindro patrón de agua se registra como un valor negativo. Una lectura entre 0 y 60 se registra como un valor positivo. Todas las lecturas se deben tomar desde la parte superior del menisco en ambos cilindros tanto el patrón (con agua clara) como el que contiene la suspensión de suelo-agua. (agua turbia).

Si la temperatura es demasiado alta en ambos cilindros, el que contiene el suelo y el patrón, la densidad del agua será igualmente menor y el hundimiento del hidrómetro será el mismo por ese concepto. Si ambos cilindros tienen la misma temperatura el efecto será igual, por consiguiente, es posible obtener una corrección de cero $\alpha (\pm)$ y la corrección de temperatura es también (\pm) con el signo que indique, la lectura corregida del hidrómetro para granos de suelo en suspensión se calcula así:

$$R_c = R_{\text{real}} \pm \text{corrección de cero} + C_t.$$

Una vez corregida la lectura del hidrómetro (sin incluir el hecho de que la gravedad específica de los sólidos que puede diferir respecto a 2.65 gr/cm^3), el porcentaje de material más fino puede calcularse por simple proporción (si $G_s = 2.65 \text{ gr/cm}^3$) como sigue:

$$\text{Porcentaje de material más fino} = (R_c/W_s) \times 100$$

Donde :

R_c : gramos de suelo en suspensión en un tiempo t dado (lectura

corregida del hidrómetro utilizando la ecuación.

W_s : peso original de suelo colocado en la suspensión, en gramos.

C_t : corrección por temperatura.

Si G_s no es igual a 2.65 gr/cm^3 , es posible calcular una constante para utilizar en la ecuación por proporción como sigue:

$$\frac{a}{G_s/(G_s - 1)} = \frac{1}{2.65/(2.65 - 1)} \quad (\text{Ec.2.6})$$

Despejando "a" se tiene:

$$a = \frac{G_s(1.65)}{(G_s - 1)2.65} \quad (\text{Ec.2.7})$$

El porcentaje más fino cuando $G_s \neq 2.65$, se calcula así:

Porcentaje más fino = $R_c a/W_s \times 100$.

Cuando se trata de realizar cálculos, la ecuación se describe comúnmente utilizando L en cm y t en minutos, para obtener D en mm como sigue:

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{980(G_s - G_w)} \frac{L}{t}} \quad (\text{Ec.2.8})$$

Que puede a su vez ser simplificada de la siguiente manera:

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (\text{mm}) \quad (\text{Ec.2.8a})$$

Como todas las variables menos L/t son independientes del problema, excepto por la temperatura de la suspensión, es posible evaluar $K = f(T, G_s, \mu)$ de una sola vez.

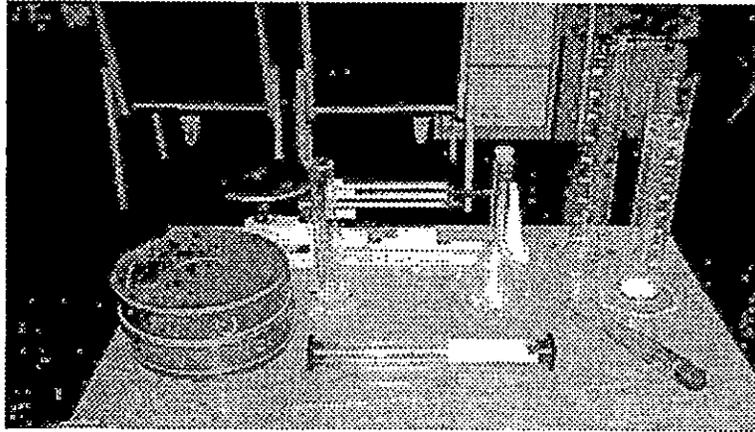


Figura 2.6. Equipo para análisis hidrométrico.

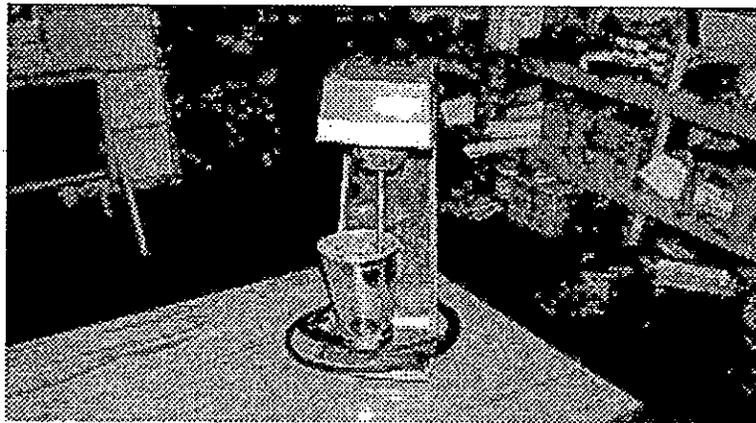


Figura 2.7. Mezcladora, batidora.

Procedimiento para realizar la prueba del hidrómetro.

METODO A: Utilizar el siguiente procedimiento siempre que la muestra de suelo tenga entre 80% y 90% del material menor que el diámetro correspondiente al tamíz No. 200. Cuanto menos cantidad de la muestra pase a través del tamíz No.200 y/o se encuentre presente material superior en tamaño al tamíz No.10, considere la utilización del método B que se da a continuación.

- a) Tomar exactamente 50 gr de suelo secado al horno y pulverizado y mezclarlo con 125 ml de solución al 4% de NaPO_3 ; una solución del 4% de metafosfato de sodio puede hacerse mezclando 40 gr de material seco con suficiente agua hasta completar 1000 ml. La solución debe ser siempre fresca y en ningún caso haber sido preparada con más de un mes de anterioridad.
- b) Dejar asentar la muestra de suelo cerca de una hora, luego se transfiere la mezcla al vaso de una máquina batidora de refrescos y añadir agua común hasta llenar $\frac{2}{3}$ del vaso, y mezclarlo por espacio de 1 minuto.
- c) Transferir el contenido del vaso de la batidora a un cilindro de sedimentación, teniendo mucho cuidado de no perder material en el proceso. Añadir agua común hasta completar la marca de 1000 ml. Preparar el cilindro patrón de control con agua común y 125 ml de la solución de dispersante al 4% o la misma que se utilizó en el paso No. 1. Verificar que la temperatura del agua común sea igual para ambos cilindros, el de sedimentación y el de control.
- d) Tomar un tapón de caucho No. 12 (usar la palma de la mano si no hay un tapón disponible) para tapar la boca del cilindro donde se encuentra la suspensión de suelo y agitarla cuidadosamente por cerca de un minuto. Poner sobre la mesa el cilindro, remover el tapón, inmediatamente insertar el hidrómetro y tomar lecturas con los siguientes intervalos de tiempo: 1, 2, 3 y 4 minutos. Tomar igualmente lectura del termómetro. Colocar el

hidrómetro y el termómetro en el recipiente de control (el cual debe encontrarse a una temperatura que no difiera en más de 1° C del suelo). Tomar una lectura para corrección de menisco en el hidrómetro dentro del cilindro de control. Es usual dejar el hidrómetro dentro de la solución de suelo durante las primeras dos mediciones, y luego removerlo y volverlo a colocar para cada una de las siguientes dos mediciones, sin embargo, el error que se produce al dejar el hidrómetro dentro de la suspensión durante las cuatro mediciones es mínimo. Es necesario evitar en lo posible la agitación de la suspensión cuando se coloca el hidrómetro dentro de ella, colocándolo suavemente como para requerir al rededor de 10 segundos en realizar dicha operación.

- e) Reemplazar el tapón No. 12 volver a agitar la suspensión y volver a tomar otra serie de medidas a 1, 2, 3 y 4 min. Repetir tantas veces como se necesite con el fin de obtener dos juegos de mediciones que concuerden a la unidad en cada una de las cuatro mediciones. Si no se utiliza un baño estabilizador de temperatura, se puede continuar la práctica como se indica en el paso 6. Si se utiliza un baño estabilizador de temperatura, es necesario agitar una vez más la suspensión, y colocarla junto con la solución control en el baño estabilizador de temperatura.
- f) Tomar una medición a los 4 minutos dentro del baño estabilizador y compararla con las mediciones de 4 minutos anteriores, si existe suficiente concordancia entre dichas lecturas, es posible continuar el ensayo, de otra

forma, es necesario volver a agitar y repetir el proceso hasta lograr dicha concordancia. Una vez que se haya logrado acuerdo en las medidas (hasta la unidad), se deben tomar medidas adicionales a los siguientes intervalos de tiempo 8, 15, 30, 60 minutos y 2, 4, 8, 16, 32, 64, 96 horas.

Los intervalos sugeridos para tomar mediciones después de 2 horas de comenzado el ensayo son sólo aproximados, ya que en realidad cualquier tiempo sería adecuado siempre y cuando sea tomado con suficiente espaciamiento para permitir una dispersión satisfactoria de los puntos en la grafica. Registrar la temperatura de la suspensión suelo-agua con una precisión de 1° C para cada medición del hidrómetro. El experimento debe continuarse hasta que el tamaño de las partículas (D) que se encuentran en suspensión sea del orden de 0.001 mm (se debe hacer simultáneamente el cálculo).

Entre lectura y lectura, se deben guardar el hidrómetro y el termómetro en el cilindro de control (el cual debe estar a la misma temperatura).

Pasar a la sección de "cálculos".

METODO B. Este método debe utilizarse para obtener el análisis mecánico e hidrométrico de suelos cuya fracción gruesa es apreciable. En realidad puede utilizarse para cualquier suelo, pero su duración es mucho mayor que el método A.

a) Secar al horno una cantidad adecuada de suelo sobre la base del máximo tamaño de agregado. Esta cantidad deberá variar entre 300 gr y 1000 gr

más que las siguientes cantidades: 500 gr si el máximo agregado de la muestra es de 10 mm o menos (peso total de la muestra), 5000 gr para suelos cuyo máximo agregado tenga un tamaño de 75 mm o mayor. Usar interpolación lineal y aproximar al millar mayor para diámetros intermedios. Denominar W_o al peso real de la muestra de suelo y usar 500, 1000, 2000 gr, etc. Asegurarse de que la muestra total secada al horno sea mayor, por ejemplo, para una muestra de 500 gr secar al horno una muestra entre 700 gr y 1000 gr. W_o . Será 500 gr.

- b) Lavar cuidadosamente la muestra W_o . A través del tamíz No. 200 como se hizo en el análisis granulométrico y secar los residuos al horno. Hacer un análisis mecánico utilizando entre cinco y ocho tamices escogidos desde el tamaño correspondiente al máximo agregado presente en la muestra y en la parte inferior un tamíz No. 50 y/o No. 100 y un tamíz No. 200. el hecho de que se escoja el tamíz No. 50 ó No. 100 (o ambos), depende del tamaño de la serie necesaria para estimar la gradación del material.
- c) Dibujar la curva granulométrica muy suavemente hasta el punto alcanzado con el análisis granulométrico mecánico.
- d) A partir de la curva de distribución dibujada, obtener el porcentaje de material más fino que los tamices No. 50 y No 100. utilizar el tamíz No. 100 si es necesario usar ambos. El tamíz No. 200 debe incluirse para verificar la eficiencia del lavado de la muestra. Llamar N_1 al porcentaje de suelo más fino obtenido.

- e) Obtener una muestra, representativa secada al horno y más pequeña a partir de la muestra grande secada al horno de un peso exacto W_1 obtenido de la siguiente forma:

$$W_1 = \frac{50}{N_1} \quad (\text{gr}) \quad (\text{Ec.2.9})$$

- f) Donde N_1 : Porcentaje más fino decimal del paso 3. Esto producirá una muestra para el hidrómetro 152H y con todas sus partículas dentro del rango de validez de la ley de Stokes.
- g) Pulverizar esta muestra tanto como se pueda, y tamizar en seco a una bandeja a través del tamíz que se haya escogido como límite máximo de la fracción fina (50 ó 100). Guardar el material más fino en la bandeja. Recuperar el residuo de material más grueso y mezclar con agua en una cápsula o recipiente adecuado de porcelana hasta que se sature. Permitir a este material saturarse por espacio de varias horas (hasta 24) de forma que todos los grumos existentes se ablanden y se disuelvan. A continuación, lavar el material saturado a través del tamíz sobre la bandeja que contenga el material que originalmente había pasado en seco. Utilizar tan poca agua como sea posible, pero suficiente para asegurar un lavado completo de la muestra. Guardar toda el agua (y suelo más fino) en un beaker o recipiente adecuado, dependiendo de la cantidad resultante, y dejarlo sedimentar.

- h) Recuperar el residuo de material más grueso que no logró pasar a través del tamíz, secarlo al horno y obtener el peso seco de dicho residuo W_f . Utilizar el peso inicial seco W_t del paso 4 y repetir el paso 2 para obtener una nueva curva de distribución granulométrica. Dibujar suavemente esta nueva curva sobre la que se obtuvo en el paso 2. Nótese que sólo por coincidencia se lograrían dos curvas idénticas. Calcular W_s como:

$$W_s = W_t - W_f \quad (\text{Ec.2.10})$$

- i) Si el material lavado ocupa más de 1000 ml, es necesario dejar sedimentar por un tiempo la suspensión de suelo agua con el fin de decantar el agua limpia de la parte superior hasta obtener un volumen remanente entre 400 y 600 ml.
- j) Transferir la suspensión suelo-agua al vaso de un mezclador eléctrico de refresco y mezclarlo entre 5 y 10 minutos. Verter el material en un cilindro de sedimentación graduado de 1000 ml. Añadir 125 ml de agente dispersante en solución y suficiente agua común adicional para llenar el cilindro de sedimentación.
- k) Referirse al método inicial A, pasos 4 y siguientes para la conclusión del ensayo del hidrómetro.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION		
TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENCIMAS ORGANICAS		
UBICACION: CERRO PACHO CHALATENANGO		
FECHA: 17 DE SEPTIEMBRE 2000		

METODO MECANICO

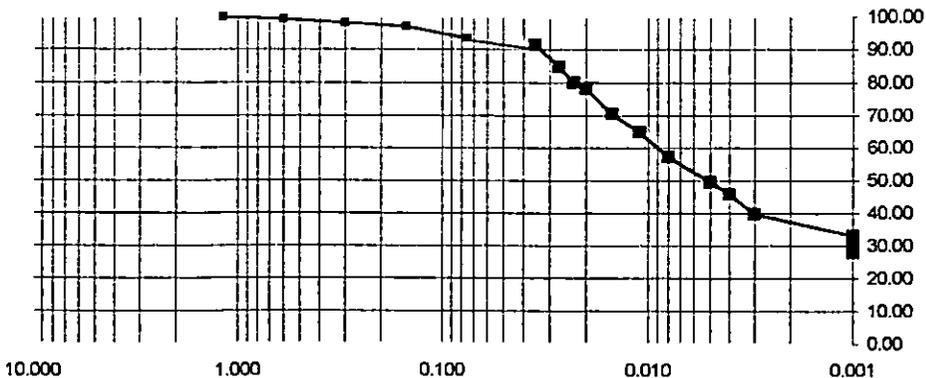
Peso Bruto = 441.5 Tara = 142.3 Peso Neto = 299.2

Malla	Peso retenido	% Retenido acum	% Que pasa	Diámetro (mm)
No. 4				4.750
No. 8				2.360
No. 16	0.5	0.20%	99.80	1.180
No. 30	1.9	0.80%	99.20	0.600
No. 50	3.2	1.90%	98.10	0.300
No. 100	3.3	3.00%	97.00	0.150
No. 200	10.7	6.60%	93.40	0.075

METODO DEL HIDROMETRO

Agente dispersante:	Silicato de Sodio	Gs de los sólidos:	2.47
Corrección por defloculante:	-5.0	Corrección por menisco:	1.0 cm
Cantidad de dispersante:	1.0 cc	Peso de suelo W _s :	50 gr.

fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido (minutos)	Temperatura °C	Lectura del Hidrómetro Rc	Porcentaje más fino (referido a muestra total)	Hidrómetro corregido por menisco	L	L/T	K	D(mm)
19 Sep.	11:15	1	27.0	48.00	91.50	47.0	8.1	8.1	0.01298	0.035
	11:16	2	27.0	44.50	84.80	43.5	8.8	4.4	0.01298	0.027
	11:17	3	27.0	42.00	80.00	41.0	9.2	3.07	0.01298	0.023
	11:18	4	27.0	41.00	78.10	40.0	9.3	2.32	0.01298	0.02
	11:22	8	27.0	37.00	70.50	36.0	10	1.25	0.01298	0.015
	11:30	15	27.0	34.00	64.80	33.0	10.5	0.7	0.01298	0.011
	11:45	30	27.0	30.00	57.20	29.0	11.1	0.37	0.01298	0.008
	12:45	90	27.0	26.00	49.50	25.0	11.9	0.13	0.01298	0.005
	13:45	150	27.0	24.00	45.70	23.0	12.2	0.08	0.01298	0.004
	15:45	270	26.5	20.82	39.70	20.0	12.7	0.05	0.01305	0.003
20 Sep.	07:00	1225	25.0	17.30	33.00	17.0	13.2	0.011	0.01327	0.001
	15:00	1701	25.3	15.40	29.30	15.0	13.55	0.008	0.01323	0.001
21 Sep.	07:00	2358	25.5	15.47	29.50	15.0	13.55	0.006	0.01320	0.001
	15:00	2763	27.0	15.00	28.60	14.0	13.7	0.005	0.01318	0.001
22 Sep.	07:00	3813	26.0	14.65	27.90	14.0	13.7	0.004	0.01312	0.001
	15:00	4203	26.0	14.65	27.90	14.0	13.7	0.003	0.01312	0.001



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION		
TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENCIMAS ORGANICAS		
UBICACION: CERRO CIRIMBA, MORAZAN.		
FECHA: 26 DE SEPTIEMBRE 2000		

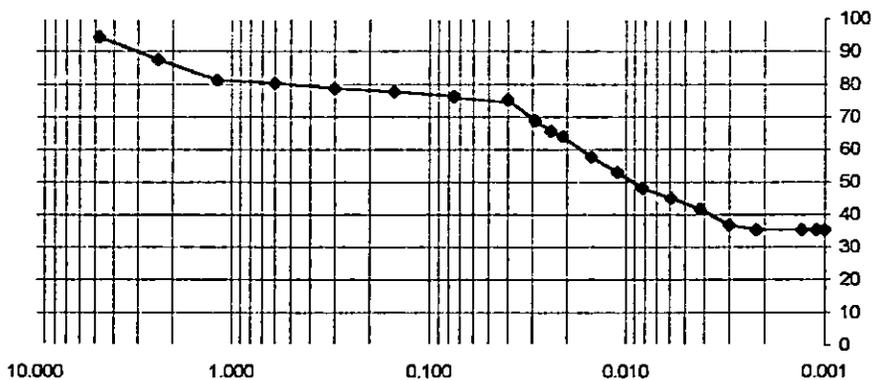
METODO MECANICO
 Peso Bruto = 500 Tara = 140 Peso Neto = 360

Malla	Peso retenido	% Retenido acum	% Que pasa	Diámetro (mm)
No. 4	20.3	5.60%	94.4	4.750
No. 8	25.2	12.60%	87.4	2.380
No. 16	21.7	18.70%	81.30	1.180
No. 30	3.8	19.70%	80.30	0.600
No. 50	5.9	21.40%	78.60	0.300
No. 100	3.3	22.30%	77.70	0.150
No. 200	5.1	23.70%	76.30	0.075

METODO DEL HIDROMETRO

Agente dispersante:	Silicato de Sodio	Gs de los sólidos:	2.47
Corrección por defloculante:	-5.0	Corrección por menisco:	1.0 cm
Cantidad de dispersante:	1.0 cc	Peso de suelo Ws:	50 gr.

fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido (minutos)	Temperatura °C	Lectura del Hidrómetro Rc	Porcentaje más fino (referido a muestra total)	Hidrómetro corregido por menisco	L	L/T	K	D(mm)
28 Sep.	11:20	1	27.0	47.00	75.30	46.0	8.80	8.8000	0.01333	0.0400
	11:21	2	27.0	43.00	68.90	42.0	9.40	4.7000	0.01333	0.0290
	11:22	3	27.0	41.00	65.70	40.0	9.70	3.2300	0.01333	0.0240
	11:23	4	27.0	40.00	64.10	39.0	9.90	2.4800	0.01333	0.0210
	11:27	8	27.0	36.00	57.70	35.0	10.5	1.3100	0.01333	0.0150
	11:34	15	27.0	33.00	52.90	32.0	11.1	0.7400	0.01333	0.0110
	11:49	30	27.0	30.00	48.00	29.0	11.5	0.3830	0.01333	0.0082
	12:19	60	27.0	28.00	44.90	27.0	11.9	0.1980	0.01333	0.0059
	13:19	120	27.0	26.00	41.70	25.0	12.2	0.1020	0.01333	0.0042
	15:20	241	26.3	23.00	36.80	22.0	12.7	0.0530	0.01348	0.0030
	18:20	482	25.4	22.00	35.30	21.0	12.9	0.0270	0.01363	0.0022
27 Sep.	08:10	1292	26.0	22.00	35.30	21.0	12.9	0.0100	0.01348	0.0013
	16:30	1784	25.2	22.00	35.30	21.0	12.9	0.0072	0.01363	0.0011
28 Sep.	08:40	2750	26.3	22.00	35.30	21.0	12.9	0.0047	0.01348	0.0010



2.4.1.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA (NORMA ASTM D 4318-95).

Generalidades

Los límites de plasticidad deben determinarse en la fracción del suelo menor que la malla No. 40. Si el espécimen es arcilloso, es preciso que nunca haya sido secado a humedades menores que su límite plástico aproximadamente.

Equipo utilizado para la determinación de los límites de consistencia:

El equipo necesario para la determinación de los límites de consistencia comprende:

- a) Una copa de Casagrande con ranurador laminar (Ver en figura 2.8).
- b) Una balanza con sensibilidad de 0.01 gr.(figura 2.8).
- c) Un horno de temperatura constante, comprendida entre 105⁰ C y 110⁰ C.
(Ver figura 2.9)
- d) Vidrios de reloj.
- e) Cápsulas de porcelana.
- f) Espátulas y demás equipo obligado.

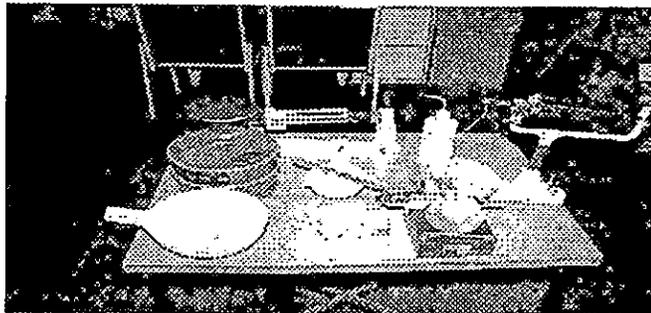


Figura 2.8. Equipo utilizado en los límites de consistencia, a la derecha copa de Casa Grande, balanza de sensibilidad de 0.01 gr, y demás equipo.

LIMITE LIQUIDO

Procedimiento de prueba:

Se ajustara a lo siguiente:

- a) Tomar unos 100 gr. de suelo húmedo y mezclar continuamente con una espátula, añadiendo agua destilada si es preciso, hasta que adopte una consistencia suave y uniforme.
- b) Coloque una porción de esa pasta en la copa de Casagrande, con espesor máximo de 1 cm. y haga con el ranurador apropiado la ranura correspondiente; el ranurador deberá mantenerse en todo el recorrido normal a la superficie interior de la copa.
- c) Acciónese la copa a razón de dos golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la parte inferior del talud de la ranura se cierre 1.27 cm. (0.5"). La ranura deberá cerrarse por flujo del suelo y no por deslizamiento del mismo respecto a la copa.

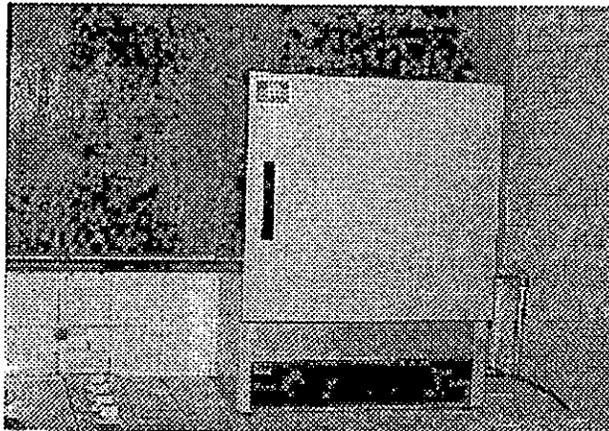


Figura 2.9. Horno de temperatura constante, comprendido entre 105⁰ C a 110⁰ C.

- d) Remezclese el suelo en la copa, con la espátula, repitiendo las etapas (2) y (3) dos veces más, si el número de golpes necesario para el cierre de la ranura es consistentemente el mismo en las tres ocasiones. Si alguno de esos números resulta muy diferente de los otros, repetir una cuarta vez las etapas (2) y (3). Así se tiene un número de golpes correspondiente a un cierto contenido de agua del suelo. Entre dos determinaciones, el número de golpes no debe diferir en más de un golpe.
- e) Cuando se ha obtenido un valor consistente del número de golpes, comprendido entre 6 y 35 golpes, tómense 10 grs. de suelo, aproximadamente, de la zona próxima a la ranura cerrada y determínese su contenido de agua de inmediato.
- f) Repetir las etapas de la (2) a la (5) teniendo el suelo otros contenidos de agua. Para humedecer el suelo, úse un gotero, remoldeando la pasta hasta que el agua añadida quede uniformemente incorporada. Para secar el suelo, use la espátula, premezclando de modo que se produzca evaporación; en ningún caso se secará la muestra en un horno o sometiéndola a ningún proceso de evaporación violenta. De esta manera deberán tenerse, como mínimo, cuatro valores del número de golpes correspondientes a cuatro diferentes contenidos de agua, comprendidos entre los 6 y los 35 golpes. Cada valor estará obtenido, como se indicó en (4), de por lo menos tres determinaciones sucesivas.

g) Dibujar la gráfica (curva de fluidez) con los contenidos de agua y los números de golpes correspondientes, los primeros como ordenadas en escala natural y los segundos como abscisas, en escala logarítmica. Esta curva debe considerarse como una recta entre los 6 y los 35 golpes. La ordenada correspondiente a los 25 golpes será el límite líquido del suelo.

LÍMITE PLÁSTICO.

Se ajustará a lo siguiente:

- a) mezclese perfectamente al rededor de 15 gr. de suelo húmedo.
- b) Rolar el suelo sobre una superficie de vidrio o metal con la mano, hasta alcanzar un diámetro de 3mm (1/8").
- c) Repetir la etapa (2) hasta que el cilindro presente señales de desmoronamiento y agrietamiento al alcanzar el diámetro de 3mm (1/8").
- d) Al llegar al límite señalado (3), determinar el contenido de agua de una parte del cilindro correspondiente.
- e) Repetir las etapas de la (2) a la (4) dos veces más, para obtener tres valores. El límite plástico del suelo será el promedio de los tres contenidos de agua encontrados.

INDICE DE PLASTICIDAD

El índice de plasticidad o índice plástico (I.P.) es la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico, indicando el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico del suelo tal como se define en los

ensayos. Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo; sin embargo, el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo que la contiene.

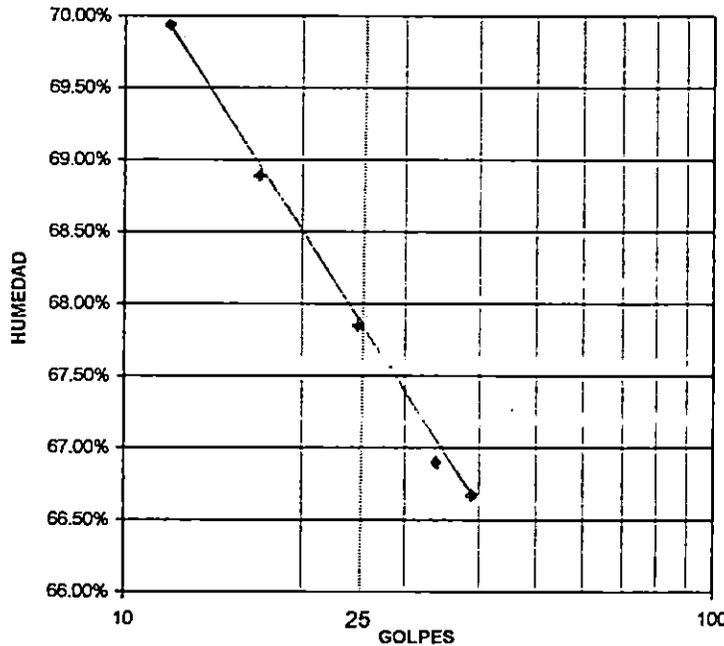
En lo que sigue, se presentan datos experimentales de laboratorio para los análisis del suelo en estado natural.

LIMITES DE ATTERBERG			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO. SUELO SIN ADITIVO			
		FECHA: 02/07/00	

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO

Numero de golpes	12	17	25	34	39
Tara	231	232	233	234	235
Peso Tara	10.08	9.70	9.64	9.98	10.27
Muestra humeda + tara	21.84	21.86	21.49	21.83	20.72
Muestra seca + tara	17.00	16.90	16.70	17.08	16.54
% de humedad	69.94%	68.89%	67.85%	66.90%	66.67%

GRAFICO



LIMITE LIQUIDO	67.8%
----------------	-------

LIMITE PLASTICO	30.8%
-----------------	-------

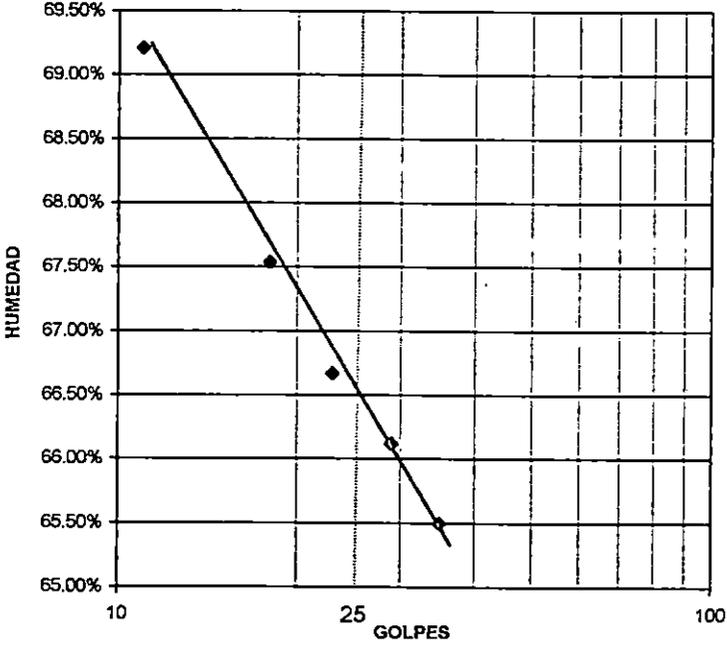
INDICE PLASTICO	37.0%
-----------------	-------

CLASIFICACION	CH
----------------------	-----------

PASA MALLA No. 200	93.40%
--------------------	--------

DETERMINACION DE LIMITE PLASTICO

Tara	236	237	238	239	240
Peso tara	10.53	10.32	10.23	9.88	10.00
Muestra humeda + tara	22.15	24.28	26.31	25.43	24.93
Muestra seca + tara	19.41	20.97	22.51	21.80	21.41
% de humedad	30.86%	31.08%	30.94%	30.45%	30.85%

LIMITES DE ATTERBERG																			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN. SUELO SIN ADITIVO					FECHA: 03/07/00														
					 														
DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO																			
Numero de golpes	11	18	23	29	35														
Tara	231	232	233	234	235														
Peso Tara	10.08	9.70	9.64	9.98	10.27														
Muestra humeda + tara	22.94	21.26	20.59	22.04	21.64														
Muestra seca + tara	17.68	16.60	16.21	17.24	17.14														
% de humedad	69.21%	67.54%	66.67%	66.12%	65.50%														
GRAFICO																			
			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">LIMITE LIQUIDO</td> <td style="text-align: center;">66.5%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">LIMITE PLASTICO</td> <td style="text-align: center;">34.5%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">INDICE PLASTICO</td> <td style="text-align: center;">32.0%</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">CLASIFICACION</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">MH</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">PASA MALLA No. 200</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">74.30%</td> </tr> </table>			LIMITE LIQUIDO	66.5%	LIMITE PLASTICO	34.5%	INDICE PLASTICO	32.0%	CLASIFICACION		MH		PASA MALLA No. 200		74.30%	
LIMITE LIQUIDO	66.5%																		
LIMITE PLASTICO	34.5%																		
INDICE PLASTICO	32.0%																		
CLASIFICACION																			
MH																			
PASA MALLA No. 200																			
74.30%																			
DETERMINACION DE LIMITE PLASTICO																			
Tara	236	237	238	239	240														
Peso tara	10.38	10.00	10.23	9.88	10.00														
Muestra humeda + tara	25.18	24.54	25.24	24.91	24.13														
Muestra seca + tara	21.38	20.81	21.38	21.05	20.52														
% de humedad	34.55%	34.51%	34.62%	34.56%	34.32%														

2.4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.

2.4.2.1 PRUEBA PROCTOR MODIFICADA (NORMAS ASTM D1557, AASHTO T-180)

Esta prueba es una variación de la prueba Proctor estándar, que obedece al rápido desenvolvimiento del equipo de compactación, por lo que esta busca representar en forma adecuada las mayores compactaciones que podrían alcanzarse en el campo; así que la energía de compactación especificada para este método de prueba es mayor que la del método estándar; esta energía es lograda colocando el suelo en 5 capas y aplicando 25 golpes por capa, utilizando un martillo de 10 lb. (ver figura 7), con una altura de caída de 18" (457 mm.), considerando a la vez que el espécimen puede ser preparado en un molde de 4" ó 6" (101.6 mm ó 152.4 mm) de diámetro, produciendo una energía de compactación de 56000 lb-pie/pie³ (2700 KN-m/m³).

Los procedimientos indicados para esta prueba son los mismos que para la prueba estándar, únicamente se tiene que tomar en cuenta que se trabajará con un martillo de un peso y altura de caída mayor, así como que la compactación se realizará en 5 capas.

La norma AASHTO T-180, establece los cuatro procedimientos siguientes para realizar dicho ensayo.

Método A.

Molde: 4 plg. (101.6 mm.) de diámetro.

Material: que pase la malla No.4 (4.75 mm.)

Número de capas: cinco.

Número de golpes por capa: 25

Método B

Molde: 6 plg. (152.4 mm.) de diámetro.

Material: que pase la malla No. 4 (4.75 mm).

Número de capas: cinco

Número de golpes por capa: 56

Método C

Molde: 4 plg. (101.6 mm.) de diámetro.

Material: que pase la malla de $\frac{3}{4}$ " (19 mm).

Número de capas: cinco

Número de golpes por capa: 25

Método D

Molde: 6 pulgadas (152.4mm.) de diámetro.

Material: suelo que pasa la malla de $\frac{3}{4}$ " (19 mm).

Número de capas: cinco.

Número de golpes por capa: 56

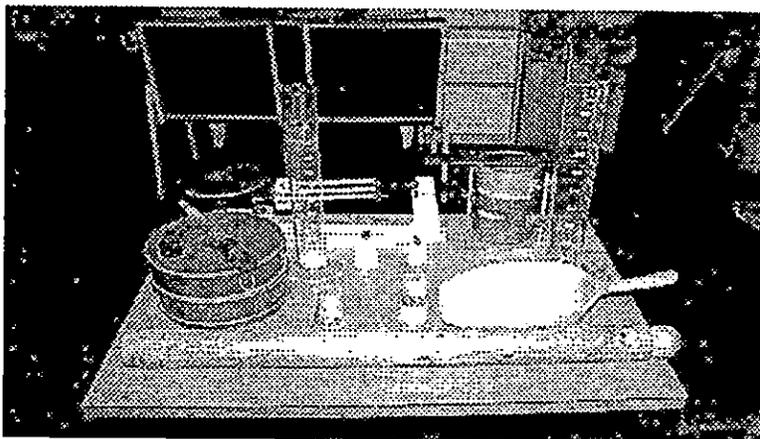


Figura 2.10. Parte del equipo utilizado en el ensayo.

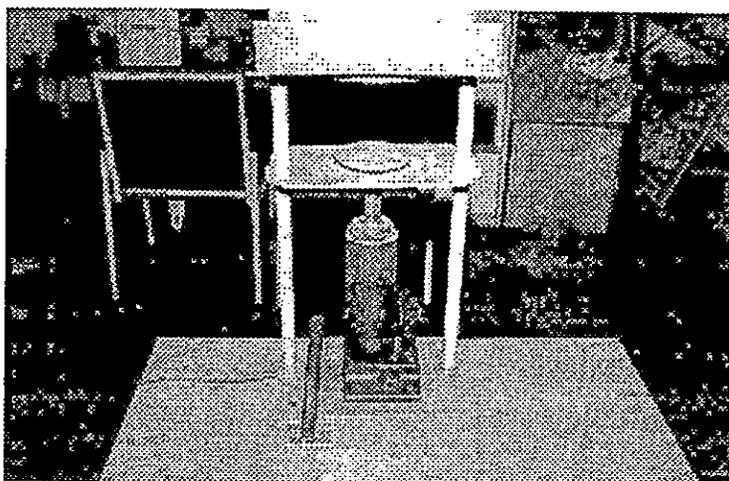


Figura 2.11. Extractor de muestras.

Equipo utilizado para la realización de la prueba proctor:

- ✓ Molde de 4" de diámetro (ver figura 2.10).
- ✓ Martillo de compactación (2.5 Kg. y altura de caída 12")
- ✓ Extractor de muestra (ver figura 2.11).
- ✓ Balanza de 0.1 gr. de precisión (ver figura 2.10).

- ✓ Horno de secado.
- ✓ Varios:
- ✓ Regla metálica.
- ✓ Guantes de hule
- ✓ Cucharón
- ✓ Probeta de 500 ml
- ✓ Mallas: No. 4, 3/8", 3/4"
- ✓ Recipientes para determinar contenido de humedad.

Procedimiento:

Preparación de la humedad del suelo para definir curva de compactación.

- a) Secar la muestra de suelo al aire libre durante aproximadamente 24 horas antes del ensayo.
- b) Si pasadas las 24 horas de exponer la muestra al aire, se observa que aún tiene cierto grado de humedad, se procede a determinar el valor de humedad inicial (W_i).
- c) Determinar método a usar.
- d) Tamizar la muestra secada al aire por la malla No. 4 (4.75 mm.), 3/8" (9.5 mm.) ó 3/4" (19.0 mm.), dependiendo del método que se utilice.
- e) Preparar por lo menos 4 muestras (preferentemente 5) de tal manera, que la variación de humedad de las mismas, permita definir dos puntos en la rama seca y dos en la húmeda, y si se prepara la quinta, buscar darle una

- humedad que se estime lo más cercanamente posible a la humedad óptima.
- f) Usar aproximadamente 2.3 Kg. de material tamizado por cada muestra para ser compactada con el método A o B, y 5.9 Kg. si se utiliza el método C.
 - g) Cuando se calcula la cantidad de agua para añadir a las muestras, hacer incrementos que varíen en más o menos un 2% y en caso de suelos con alto contenido de humedad óptima, las variaciones podrán ser mayores del 2% pero no deberán exceder del 4%.
 - h) Agregar al suelo (muestra) la cantidad de agua necesaria para hacerla llegar a la humedad requerida y mezclar completamente hasta observar un color uniforme.
 - i) Permitir que la muestra entre en un proceso de curado dejándola reposar, antes de realizar la compactación, por un periodo no menor del estipulado en la tabla 2.4

Tabla 2.4 Requerimientos en los tiempos de duración de curado.

Clasificación	Mínimo de periodos de tiempo (horas)
GW,GP,SW,SP	No requiere
GM, SM	3
Todos los demás suel	16

- j) Pesar el molde de compactación (con base y sin anillo de extensión) y además determinar sus dimensiones internas (diámetro y altura).

- k) Fijar la base metálica al molde con la extensión (collarín) y ajustarlos debidamente.
- l) Colocar el molde en una superficie rígida, nivelada y uniforme, para realizar la prueba sin error.
- m) Compactar el espécimen en el número de capas que corresponda al método, procurando que cada una sea de igual espesor.
- n) Compactar cada capa uniformemente con 25 golpes si se utiliza molde de 4" (101.6 mm.) o con 56, si el molde es de 6" (152.4 mm).
- o) Al finalizar cada capa, picar con un cuchillo la superficie de esta, para garantizar una buena adherencia con la próxima capa.
- p) Al finalizar la compactación de la última capa, utilizar un cuchillo para aflojar el suelo del collar, de tal manera que al retirar este, no se pierda material de la capa superior del espécimen.
- q) Enrasar el material del molde con una regla metálica.
- r) Quitar la placa de base y pesar el conjunto molde-muestra compactada.
- s) Sacar el cilindro de suelo compactado utilizando un gato hidráulico.
- t) Cortarlo axialmente a través de su centro de tal forma de sacar dos partes, y luego tomar una muestra de la parte central de cada una de estas.

Cálculos:

Calcular el peso unitario seco y el contenido de humedad para cada espécimen, graficar dichos valores para definir la curva de compactación.

$$\gamma_w = \frac{\text{Peso de la muestra sin molde}}{\text{Volumen del molde}} \quad (\text{Ec.2.11})$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w}{1 + w\%} \quad (\text{Ec.2.12})$$

Donde:

γ_w : Peso volumétrico húmedo.

γ_s : Peso volumétrico seco.

w% : Contenido de humedad.

Calcular los puntos para determinar la curva de saturación.

$$W_{sat} = \frac{\gamma_w G_s - \gamma_d}{\gamma_d G_s} * 100 \quad (\text{Ec.2.13})$$

W_{sat} : Contenido de agua correspondiente a la saturación.

γ_w : Peso unitario húmedo.

γ_d : Peso unitario seco.

G_s : Gravedad específica del suelo.

PRUEBA PROCTOR	   UES
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO AASTHO T-180 METODO A SUELO SIN ADITIVO FECHA: 16/07/00	

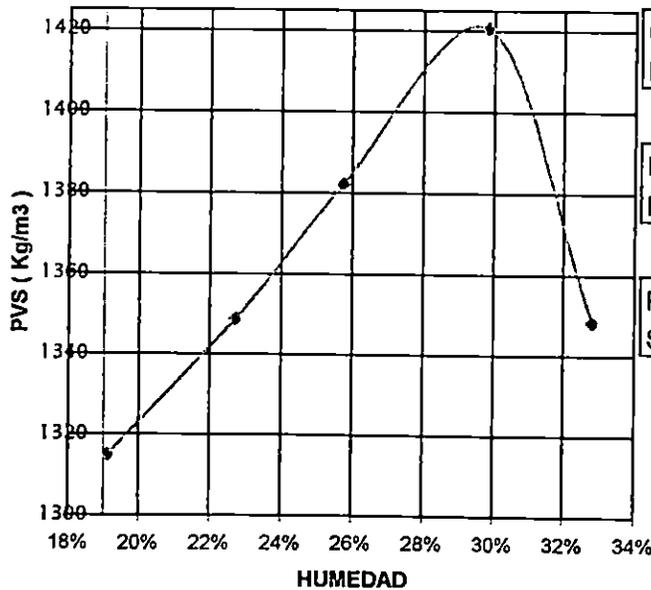
DETERMINACION DE LA HUMEDAD

No de tara	161	162	163	164	165
Peso suelo humedo + tara	103.90	83.90	116.00	62.30	62.00
Peso suelo seco + tara	88.60	69.90	94.00	50.10	48.80
Peso de tara	8.60	8.30	8.60	9.20	8.60
% de humedad	19.13%	22.73%	25.76%	29.83%	32.84%

DETERMINACION DE LA DENSIDAD

Peso muestra humeda + molde	3506.00	3590.00	3668.00	3768.00	3718.00
Peso del molde	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00
Capacidad del molde	942.30	942.30	942.30	942.30	942.30
Peso volumetrico seco	1314.85	1348.91	1382.24	1420.64	1348.51

GRAFICO
PVS vrs. HUMEDAD



CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	29.83%
-----------------------------	---------------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1844.42
--------------------------------	----------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO	1420.64
------------------------------	----------------

PRUEBA PROCTOR			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN SUELO SIN ADITIVO		AASTHO T-180 METODO A FECHA: 09/07/00	
			UES

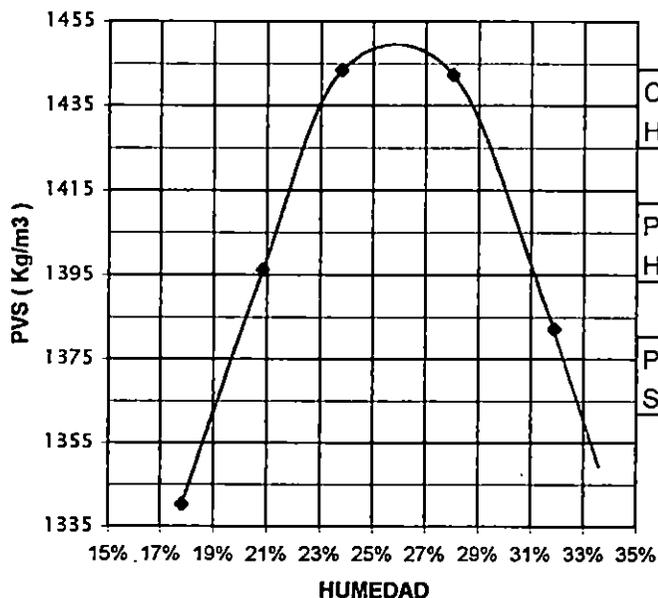
DETERMINACION DE LA HUMEDAD

No de tara	1	2	3	4	5
Peso suelo humedo + tara	282.70	250.70	68.60	66.10	73.30
Peso suelo seco + tara	245.10	213.60	57.10	53.60	58.50
Peso de tara	34.10	35.70	8.80	9.00	12.10
% de humedad	17.82%	20.85%	23.81%	28.03%	31.90%

DETERMINACION DE LA DENSIDAD

Peso muestra humeda + molde	3518.00	3620.00	3714.00	3770.00	3748.00
Peso del molde	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00
Capacidad del molde	942.30	942.30	942.30	942.30	942.30
Peso volumetrico seco	1340.27	1396.24	1443.44	1442.28	1382.26

**GRAFICO
PVS vs. HUMEDAD**



CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	26.00%
-----------------------------	---------------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1823.22
--------------------------------	----------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO	1447.00
------------------------------	----------------

2.4.2.2 ENSAYO DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE C.B.R. (NORMAS AASHTO T-193, ASTM D-1883).

El valor relativo de soporte C.B.R. (California Bearing Ratio), fue desarrollado por la Division de Carreteras del estado de California en 1930. Esta prueba ha sido adoptada y usada en muchos países, cuyas instituciones encargadas de construcción de carreteras, han desarrollado los diseños de sus carreteras con el método basados en esta prueba; ella es un índice de la resistencia al corte del suelo, involucrada indirectamente a través del mecanismo de punzonamiento del espécimen, la cual se obtiene en determinadas condiciones de compactación y humedad.

Este valor se obtiene esencialmente midiendo la resistencia a la penetración de un pistón de área circular de 3 plg² en un espécimen, y se expresa como un porcentaje de la carga unitaria que se necesita para introducir ese mismo pistón a una profundidad de ½ plg igual que en una muestra de piedra triturada que se toma como patrón. El material estándar es una caliza triturada, para la cual ya se tienen los valores constantes de resistencia para cualquier penetración. (ver tabla 2.5).

Tabla 2.5 Presiones para Distintas Penetraciones del Vástago en el Material Patrón.

Penetración		Presión en el vástago	
Cm.	Plg.	Kg/cm ² .	lb/plg ² .
0.25	0.1	70	1,000
0.5	0.2	105	1,500
0.75	0.3	133	1,900
1.00	0.4	161	2,300
1.25	0.5	182	2,600

Fuente: Rico Rodríguez, A. Del Castillo, H.
La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, pag. 103.

La muestra del suelo con la que se hace la prueba se encuentra confinada en un molde de 15.2 cm. (6 plg) de diámetro y 20.3 cm. (8 plg) de altura; para compactar la muestra de suelo se utiliza un martillo de 45.72 cm. (18 plg) y 4.5 Kg. (10 lb) (ver figura 9), que es un método de compactación dinámico, y se hace con cinco niveles de compactación, con lo que se intenta reproducir de una manera razonable las condiciones de compactación que se logran con el equipo de campo. Para simular la sobrecarga que tendrá una capa en el pavimento real, se le coloca una o dos placas que ejercen en el espécimen una presión equivalente a la sobrecarga que se tendrá en el pavimento, estas placas poseen un orificio en el centro que permite el paso del pistón que efectuara la penetración.

Para obtener el valor del C.B.R, se hacen lecturas de la penetración a 1.27, 2.54, 3.81, 5.08, 7.62, 10.16, 12.70 mm, con estos datos se dibuja una

gráfica (ver las gráficas de los ensayos), en la que en las abscisas se coloca la penetración y en las ordenadas, las cargas correspondientes, si la curva trazada no tiene cambios bruscos, el C.B.R. se calcula con la carga correspondiente a 2.54 mm; con la formula siguiente:

$$CBR = \frac{A}{1360} * 100 \quad (Ec.2.14)$$

Donde:

A: Es la carga en Kg correspondiente a una penetración de 2.54 mm.

1360: Es valor en Kg correspondiente a la misma penetración en el material estándar.

La curva de penetración-presión que resulta de la prueba del C.B.R. (ver anexo 2D) es lineal para bajas penetraciones pero tiende a hacerse ligeramente curva, cóncava hacia abajo a penetraciones mayores; sin embargo, cuando el piston no se encuentra perfectamente normal a la superficie a penetrar, la curva resulta con un pequeño tramo cóncavo hacia arriba en su tramo inicial, al tener este caso será necesario corregirla, desplazando la curva hacia la izquierda ignorando la concavidad inicial, prolongando su parte recta hasta el origen.

Los factores que afectan a los resultados que se obtienen de la prueba del C.B.R. son: la textura del suelo, su contenido de agua y su condición de compactación. Esto es debido a que los suelos friccionantes, exhiben poca

expansión en su etapa de saturación, pero si, es considerable su influencia en su etapa de penetración y para los suelos cohesivos ocurre lo opuesto.

DESVENTAJAS

Siendo el C.B.R. un parámetro para medir la capacidad portante del suelo, se encuentran inconvenientes al interpretar los resultados y darle una aplicación práctica en los problemas de carreteras, estos son:

- ✓ La Penetración o punzamiento en una muestra de suelo se ve afectada de forma importante por: la naturaleza del suelo, el contenido de agua, las condiciones de compactación y la textura del suelo.
- ✓ No se tiene definida una base teórica que sustente su valor como prueba destinada a medir la resistencia de los suelos para determinar la capacidad cortante del suelo.
- ✓ El punzamiento es una forma poco usual de hacer trabajar el suelo y por lo tanto no se parece a ninguna circunstancia de interés práctico a que vaya a estar sujeto el suelo en un pavimento bajo cargas de tránsito y a los factores climáticos como la temperatura, dada que estas cargas son repetitivas, lo cual no se representan en la prueba.
- ✓ Para dimensionar las capas del pavimento el C.B.R, únicamente considera la deformabilidad de los suelos, dejando a un lado la resistencia de estos, que es un factor importante para resistir las cargas de tránsito.

VENTAJAS

Como toda prueba para medir la capacidad portante de un suelo, se puede mencionar las siguientes ventajas de la prueba.

- ✓ Es una prueba ampliamente conocida, por su uso extenso puesto la mayoría de los pavimentos flexibles construidos se han diseñado con el método basado en esta prueba.
- ✓ Es económicamente factible y puede llevarse a cabo en un tiempo relativamente corto.
- ✓ Puede llevarse a cabo en muestras alteradas como en muestras inalteradas.

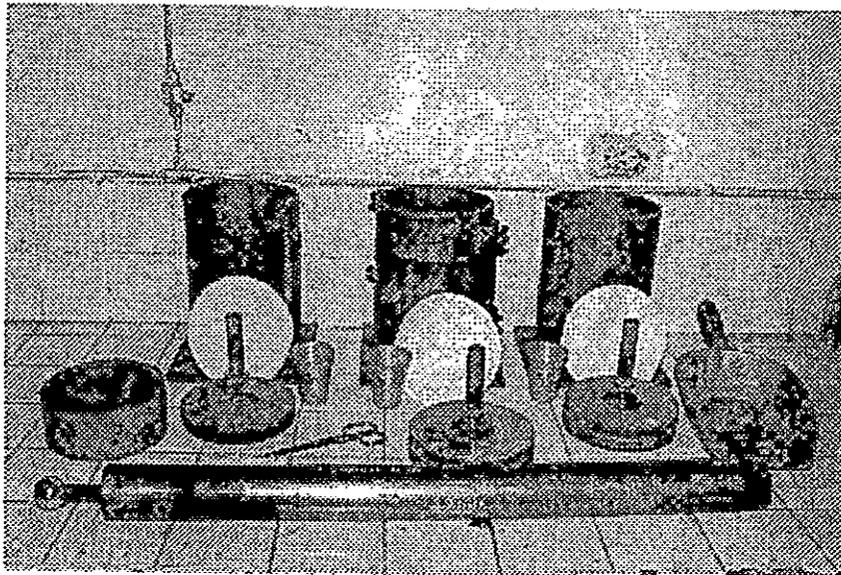


Figura 2.12. Equipo utilizado en el ensayo de C.B.R.

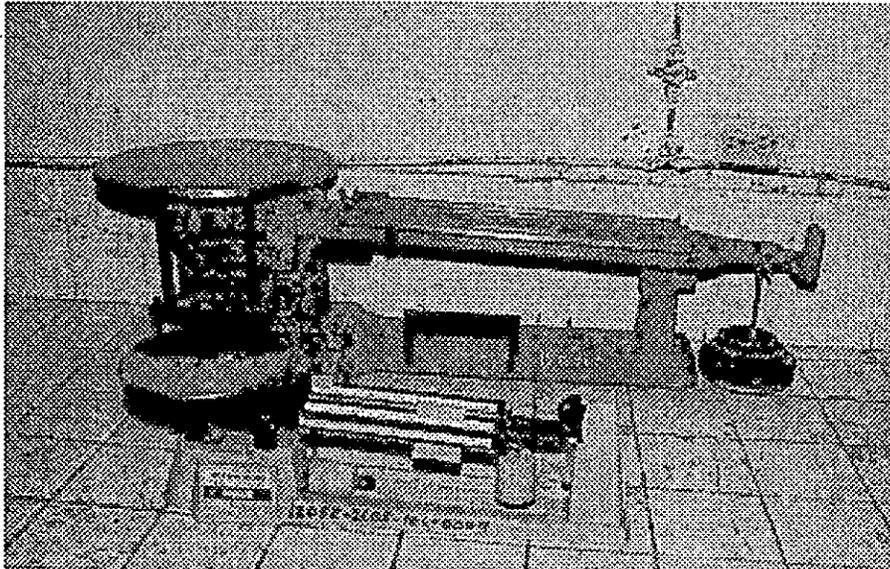


Figura 2.13. balanzas de precisión utilizadas.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

El procedimiento para realizar las pruebas se puede dividir en cuatro grandes partes:

- a) Determinación de la densidad y humedad máxima mediante el ensayo Densidad-Humedad, AASHTO T-180, método A.
- b) Elaboración de los tres especímenes de ensayo para C.B.R. diferentes energías de compactación para el mismo martillo de compactación, 10 lb. de peso y 18 plg. de altura de caída, así:
 - ✓ Molde No. 1 cinco capas de 12 golpes por capa.
 - ✓ Molde No. 2 cinco capas de 25 golpes por capa.
 - ✓ Molde No. 3 cinco capas de 56 golpes por capa.
- c) Saturación de los especímenes de ensayo: Los moldes compactados con diferentes energías compactación, son colocados en un recipiente y se

sumergen en agua para saturación por un periodo de 96 horas, cuatro días, durante el cual se toman lecturas de hinchamiento cada 24 horas. El hinchamiento se mide con un micrómetro de aproximación de 0.001 pulg. La lectura de hinchamiento registrada al final de estas 96 horas se expresa como un porcentaje de la altura inicial del especimen, que se calcula según la siguiente formula:

$$\%H = \frac{L_f * 0.001}{h_i} * 100 \quad (\text{Ec.2.15})$$

Donde:

% H: Porcentaje de altura

L_f : Lectura al término de las 96 horas.

0.001: Constante de conversión del micrómetro

h_i : Altura inicial del especimen (cm. o plg.)

d) Penetración de los especimenes de ensayo:

- ✓ Transcurrido el periodo de saturación se sacan los especimenes del recipiente de saturación, se secan superficialmente y se pesan.
- ✓ Se registra este peso como peso saturado de muestra más molde, antes de penetrar.
- ✓ En estas condiciones se procede a penetrar cada especimen, utilizando la máquina de carga a una velocidad de penetración de 0.05 plg/min. Se hacen lecturas en el micrómetro del anillo de carga, correspondiente a las penetraciones siguientes: 1.27, 2.54, 3.81, 5.08, 7.62, 10.16, 12.70 mm. o sea; 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 plg.

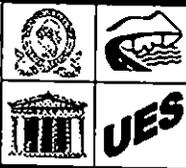
- ✓ Durante la penetración se deberá colocar en el extremo penetrado de las muestras, dos contrapesos de 5 lb. cada una.
- ✓ Estas lecturas serán traducidas a valores de Esfuerzo Normal de la siguiente manera:

Donde:
$$\sigma = \frac{L_c K}{A_p} \quad (\text{Kg/cm}^2 \text{ o psi}) \quad (\text{Ec.2.16})$$

K : Constante del anillo de carga (lbs/dinas).

A_p : Área del pistón de penetración (3 plg.)

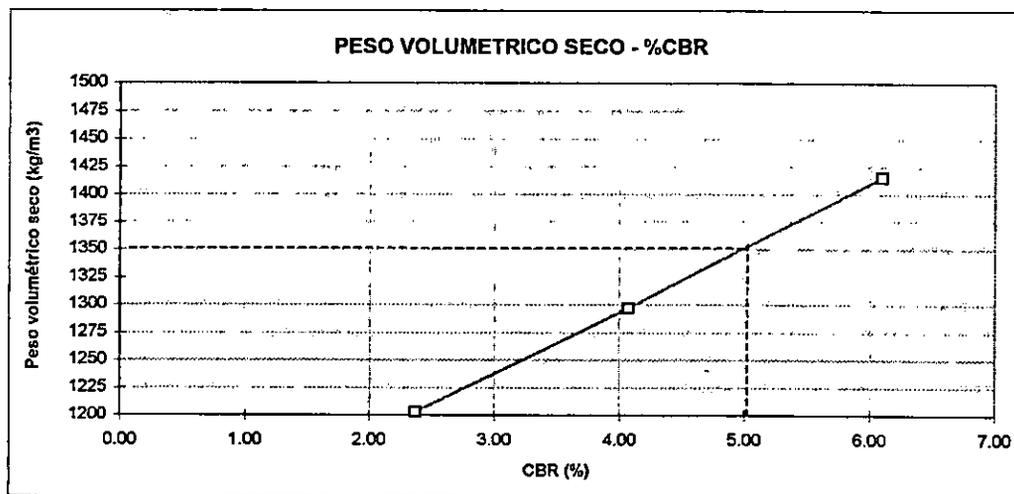
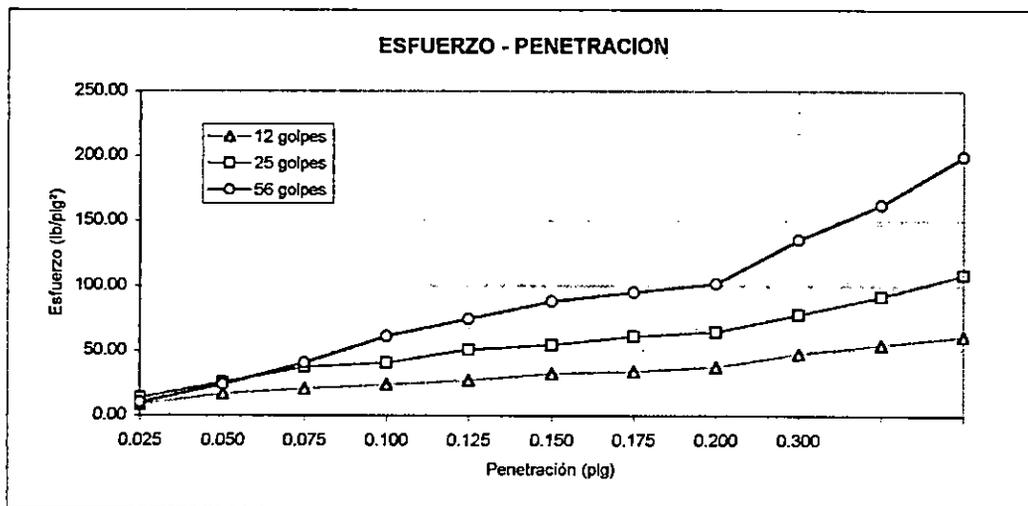
L_c : Lecturas del micrómetro.

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO SUELO SIN ADITIVO			
			FECHA: 30/07/00
Molde #	3	5	7
Golpes	12	25	56
CONTENIDOS DE HUMEDAD			
Peso suelo húmedo + tara (g)	146.8	153.6	167.3
Peso suelo seco + tara (g)	121.5	126.8	137.6
Peso tara (g)	35.4	35.2	35.9
Contenido de humedad (%)	29.4%	29.3%	29.2%
PESOS VOLUMETRICOS			
Peso suelo húmedo + molde (kg)	9960	10240	10565
Peso molde (kg)	6675	6665	6700
Volumen molde (cm ³)	2111	2133	2114
Peso volumétrico seco (ka/m ³)	1203	1297	1416
Peso volumétrico seco máximo (ka/m ³)		1421	
Grado de compactación (%)	84.6	91.3	99.6
95% de Peso volum. seco máximo		1350	
ESFUERZO - PENETRACION			
Penetración	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)
0.025	8.48	13.67	10.18
0.050	16.97	25.45	23.75
0.075	20.36	37.30	40.70
0.100	23.76	40.70	61.00
0.125	27.15	50.87	74.53
0.15	32.24	54.23	88.07
0.175	33.93	61.00	94.83
0.200	37.30	64.40	101.60
0.300	47.47	77.93	135.43
0.400	54.23	91.47	162.43
0.500	61.00	108.37	199.57
%CBR a 0.1"	2.38	4.07	6.10
%CBR a 0.2"	2.49	4.29	6.77
HINCHAMIENTO (PULG)			
MOLDE	24 H	96 H	
3	0.014	0.019	
5	0.012	0.017	
7	0.009	0.014	

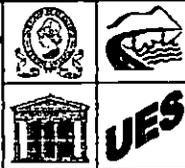
VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN
 TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO
 SUELO SIN ADITIVO

FECHA: 30/07/00



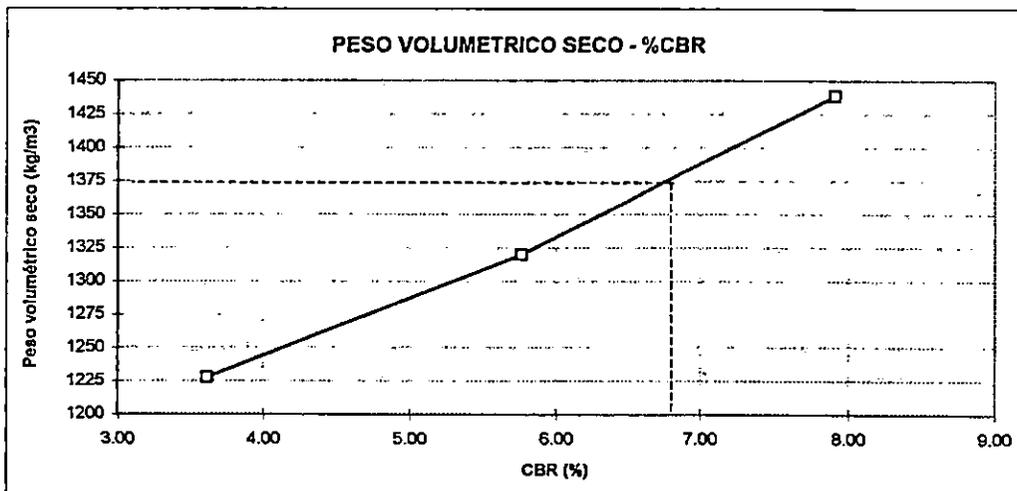
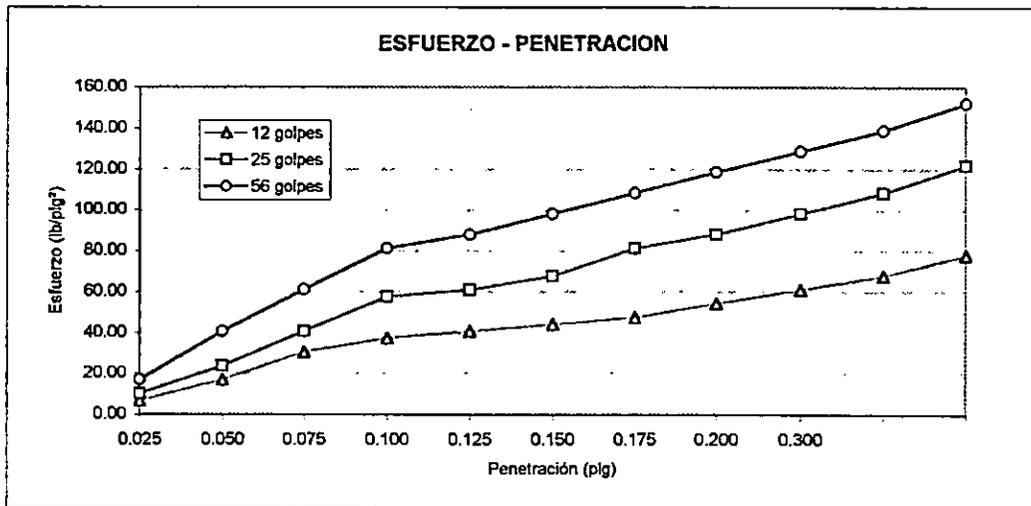
CBR (0.1")=6%

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN SUELO SIN ADITIVO			
FECHA: 23/07/00			
			
Molde #	3	5	7
Golpes	12	25	56
CONTENIDOS DE HUMEDAD			
Peso suelo húmedo + tara (g)	87.5	92.8	89.0
Peso suelo seco + tara (g)	71.5	75.8	73.0
Peso tara (g)	9.2	9.8	10.5
Contenido de humedad (%)	25.7%	25.8%	25.6%
PESOS VOLUMETRICOS			
Peso suelo húmedo + molde (kg)	9932	10205	10520
Peso molde (kg)	6675	6665	6700
Volumen molde (cm ³)	2111	2133	2114
Peso volumétrico seco (kg/m ³)	1228	1320	1439
Peso volumétrico seco máximo (kg/m ³)	1447		
Grado de compactación (%)	84.8	91.2	99.4
95% de Peso volum. seco máximo	1375		
ESFUERZO - PENETRACION			
Penetración	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)
0.025	6.79	10.18	16.97
0.050	16.97	23.75	40.70
0.075	30.54	40.70	61.00
0.100	37.30	57.63	81.33
0.125	40.70	61.00	88.07
0.150	44.09	67.77	98.23
0.175	47.47	81.33	108.37
0.200	54.23	88.07	118.53
0.300	61.00	98.23	128.67
0.400	67.77	108.37	138.80
0.500	77.93	121.90	152.30
%CBR a 0.1"	3.73	5.76	8.13
%CBR a 0.2"	3.62	5.87	7.90
HINCHAMIENTO (PULG)			
MOLDE	24 H	96 H	
3	0.016	0.020	
5	0.014	0.018	
7	0.012	0.015	

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN
 TEMA: ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN
 SUELO SIN ADITIVO

FECHA: 23/07/00



CBR (0.1") = 6.8%

2.4.2.3 ENSAYO DE PERMEABILIDAD, CARGA VARIABLE (NORMA ASTM D 2435-90)

En los suelos, la permeabilidad se plantea en términos generales en dos problemas básicos, relacionados con la disipación de las presiones de poro y con el flujo del agua a través del suelo; tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en terracerías y el flujo de agua puede originar tubificaciones y arrastres.

Si se compacta un suelo arcilloso con humedades muy bajas o prácticamente en seco, se obtendrá finalmente alta permeabilidad en el suelo debido a los grumos que no se disgregan, resistiendo el esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se forme una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la humedad de compactación se producirán menores permeabilidades en el suelo compactado ya que este tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminandose así grandes vacíos. A medida que la humedad de compactación aumenta la permeabilidad disminuye en el "lado seco" rama izquierda de la curva " γ_d vs w "; se tiene una permeabilidad mínima cerca de la humedad óptima " $w_{\text{ópt}}$ ", mientras que en la rama derecha de la curva, "lado húmedo" se presenta un ligero incremento en la permeabilidad. Esto último se debe a que al compactar el suelo del "lado húmedo" el agua de compactación llena espacios que ocupan las partículas en el lado seco y esto hace que el suelo aunque se encuentre orientado presente una mayor permeabilidad que cuando se le compactó con una humedad

cercana a la óptima. Al incrementar la energía de compactación se obtendrá una permeabilidad todavía menor debido a que se tiene una mejor orientación de las partículas a la vez que se cerrara más la estructura.

Se puede reducir la permeabilidad de un suelo mediante la inyección de lechadas; sin embargo, debido a que estos productos no sellan perfectamente a los poros finos, solamente se logra disminuir el gasto y la velocidad del flujo sin lograr una impermeabilidad adecuada. Algunos defloculantes como el polifosfato de sodio pueden sellar perfectamente a un suelo. En la actualidad se cuenta también con algunos aditivos líquidos y emulsiones que al penetrar 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 los productos "hidrófobos" generalmente hacen que la cohesión del suelo se reduzca parcial o totalmente.

El control práctico del movimiento de la humedad en un suelo establece una interesante paradoja, la cual consiste en que, en ciertas circunstancias una zona arenosa altamente permeable puede funcionar como una zona completamente impermeable si subyace a una arcilla ya que destruye los efectos de succión en esta. La succión o potencial capilar, es otro aspecto muy importante ligado con la permeabilidad de un suelo, pues las variaciones de la succión en un suelo originan el movimiento de la humedad de zonas de baja succión a zonas de alta succión, por lo cual la humedad sufre redistribuciones, hasta que se alcanza un nuevo estado de equilibrio que involucra una

distribución no uniforme de la humedad. Dos suelos diferentes que se encuentran en contacto pueden estar en un estado de humedad en equilibrio, aunque sus contenidos de agua sean diferentes.

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

Equipo utilizado para la realizar la prueba de permeabilidad.

- ✓ Material que pasa la malla No. 4.
- ✓ Aparato de permeabilidad (ver figura 2.14).
- ✓ Cronómetro
- ✓ Termómetro graduado hasta 50°C.
- ✓ Templete con mástil y soporte para sujetar tubos de ensayo.
- ✓ Embudo
- ✓ Papel filtro

Procedimiento:

- a) Preparar el espécimen de suelo compactado.
- b) Luego de preparado el espécimen de prueba, retirar el molde de su base metálica y colocar este sobre la base porosa del permeámetro, fijándolo cuidadosamente.
- c) Sobre la superficie de la muestra colocarle papel filtro del mismo diámetro del molde que contiene el espécimen a ensayar.

- d) Posteriormente colocarle la tapadera al molde de permeabilidad.
- e) Ensamblar la tubería con el embudo a la tapadera, la cual servirá para alimentar de agua al permeámetro.
- f) Sujetar el embudo al templete con mástil.
- g) Una vez instalado el equipo, proceder a saturar la muestra agregando agua en el embudo, por 24 horas. Hay que tener cuidado que el embudo tenga siempre agua para alimentar la muestra.
- h) Pasado este tiempo, proceder a aforar la columna de agua que se aplicará a la muestra; cerciorándose que se encuentre saturada, lo cual se observa cuando existe flujo de agua a través del conducto de salida del permeámetro.

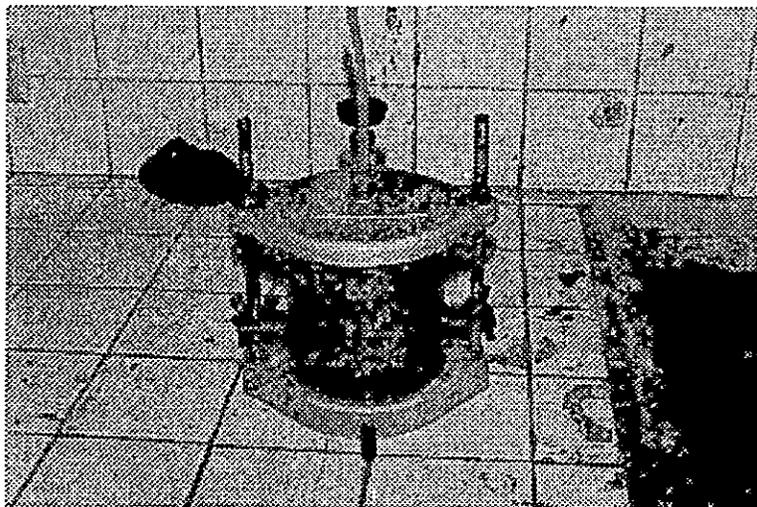


Figura 2.14. Aparato de permeabilidad durante el ensayo.

- i) Luego se mide la altura o carga hidráulica sobre la muestra h_1 , y se anota el tiempo al cual se tomo dicha altura. Dejar pasar un tiempo y

cuando la columna de agua haya bajado una altura considerable por la tubería, medir la carga y anotar la hora a la cual se hizo la medición h_2 .

- j) Repetir el procedimiento de los pasos 8 y 9, unas dos veces más para obtener otros valores de K.
- k) Una vez obtenidos los datos necesarios y para finalizar la prueba tomar muestras representativas de suelo, con el objetivo de obtener el contenido de humedad correspondiente a la saturación. Teniendo el cuidado de no tomarlas de la parte extrema superior del espécimen por el posible hinchamiento que pueda sufrir en esta zona.

Cálculos:

El coeficiente se calculara a partir de la siguiente formula:

$$K = \frac{a * l}{\Delta t * A} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (\text{Ec.2.17})$$

Donde :

a : Área de la sección transversal de la tubería de entrada, en cm^2

A : Área de sección transversal de la muestra de suelo, en cm^2

h_1 : Carga hidráulica inicial a través de la muestra.

h_2 : Carga hidráulica a través de la muestra al final del ensayo

l : Longitud de la muestra en cm.

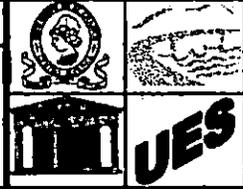
Δt : Tiempo transcurrido durante el experimento, en segundos

ln : Logaritmo natural

Se calcularán los valores de K para cada ensayo y posteriormente se obtendrá un promedio de estos.

PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Proyecto : TRABAJO DE GRADUACION
 Tema : ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 Ubicación: CERRO PACHO CHALATENANGO



Fecha : 13-09-00
 SUELO : SIN ADITIVO
 TIPO DE SUELO : MH
 PVS : 1421 kg/m³
 HUMEDAD: 29.8%
 Ss : 2.51

$$K = \frac{a \times l}{A \times \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Fecha	Hora	Carga (mt)
13-09-00	14:05	2.395
14-09-00	9:05	1.573
14-09-00	14:05	1.425

Variables	Datos	
a (cm ²)	0.281	0.281
l (cm)	11.668	11.668
A (cm ²)	80.72	80.72
Δt (seg)	68400	86400
h ₁ (mt)	2.395	2.395
h ₂ (mt)	1.573	1.425
K	2.4965 E-07	2.4409 E-07
K Promedio	2.4687 E -07	

PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Proyecto : TRABAJO DE GRADUACION
 Tema : ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 Ubicación: CERRO CIRIMBA, MORAZAN



Fecha : 17-09-00
 SUELO : SIN ADITIVO
 TIPO DE SUELO : MH
 PVS : 1447 kg/m³
 HUMEDAD: 25.9%
 Ss : 2.47

$$K = \frac{a \times l}{A \times \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Fecha	Hora	Carga (mt)
17-09-00	8:00	2.130
17-09-00	17:00	1.688
18-09-00	9:00	1.103

Variables	Datos	
a (cm ²)	0.281	0.281
l (cm)	11.668	11.668
A (cm ²)	80.72	80.72
Δt (seg)	32.400	90.000
h ₁ (mt)	2.130	2.130
h ₂ (mt)	1.688	1.103
K	2.8157 E-07	2.97005 E-07
K Promedio	2.94287 E-07	

2.5 ENSAYOS DE LABORATORIO CON ENZIMAS ORGÁNICAS.

2.5.1 PROCESO DE ESTABILIZACION CON ENZIMAS ORGANICAS.

En la estabilización suelo-enzima, se emplea enzima orgánica para formar una mezcla árida, la cual es una combinación de suelo, enzima y agua. Este método puede ser utilizado por el ingeniero para la estabilización, debido a que podría aumentar la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y a la vez incrementaría su rigidez. En la la estabilización con enzima orgánica el nivel de tratamiento y las propiedades finales de la mezcla varían considerablemente con la naturaleza del suelo tratado.

2.5.2 PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACION Y PRUEBAS EN EL LABORATORIO CON ENZIMAS ORGÁNICAS.

La dosificación para humedecer el suelo de enzimas orgánicas agregadas al agua utilizada, efectuadas en el laboratorio, se realizarón en funcion del peso.

Segùn hoja tècnica de enzimas organicas. Las enzimas liberan el agua retenida en el suelo. Por lo tanto, el agua utilizada para estimar los requerimientos de humedad deberìa contener 1 parte de concentrado de enzimas en 500 partes de agua (Dos mililitros de concentrado de enzimas en un litro de agua). Los pasos a seguir para la dosificación en el laboratorio son:
Paso 1: Medir en un Beaker la cantidad de un litro de agua, agregàndole dos mililitros de concentrado enzimático, mezclando vigorosamente.

Paso 2.: Pesar una muestra de suelo secada al sol.

Paso 3: Obtener del porcentaje de humedad de la muestra de suelo secada al sol.

Paso 4: Calcular la cantidad de suelo completamente seco. Dividiendo el peso de la muestra de suelo secada al sol entre el porcentaje de humedad de muestra de suelo secada al sol más 1 ($w\%+1$).

Paso 5: El porcentaje de agua requerida es igual a la diferencia entre el porcentaje de humedad óptima según proctor, y el porcentaje de humedad obtenido en el paso N° 3.

Paso 6: Para calcular el peso de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima se multiplica el peso de suelo completamente seco por el porcentaje de agua requerido.

Ejemplo de calculo.

Peso de suelo secado al sol = 500 gr

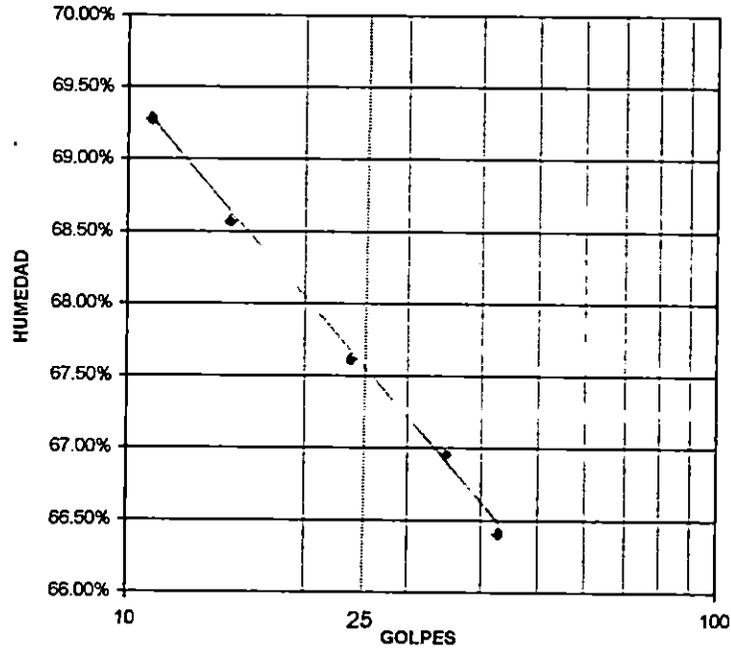
% de humedad óptima (según Proctor) = 29.8%

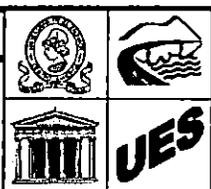
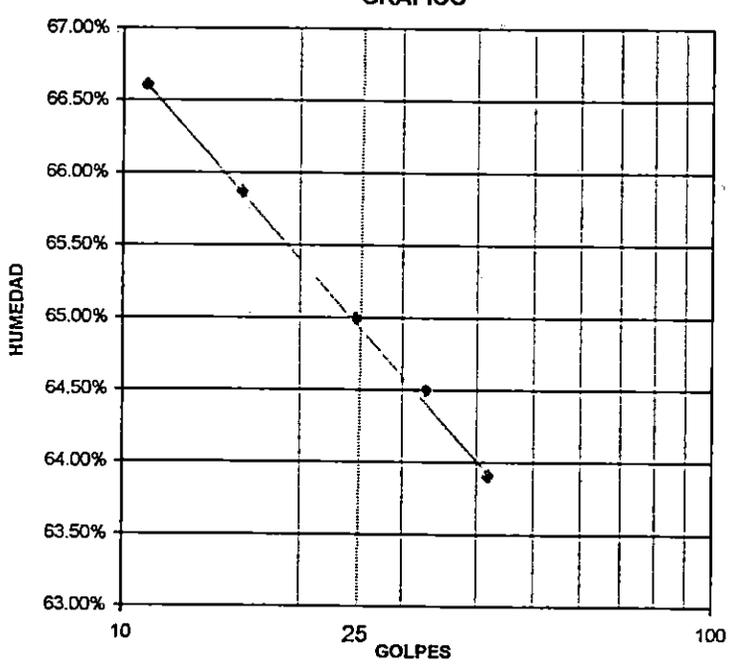
% de humedad de suelo secado al sol = 9.7%.

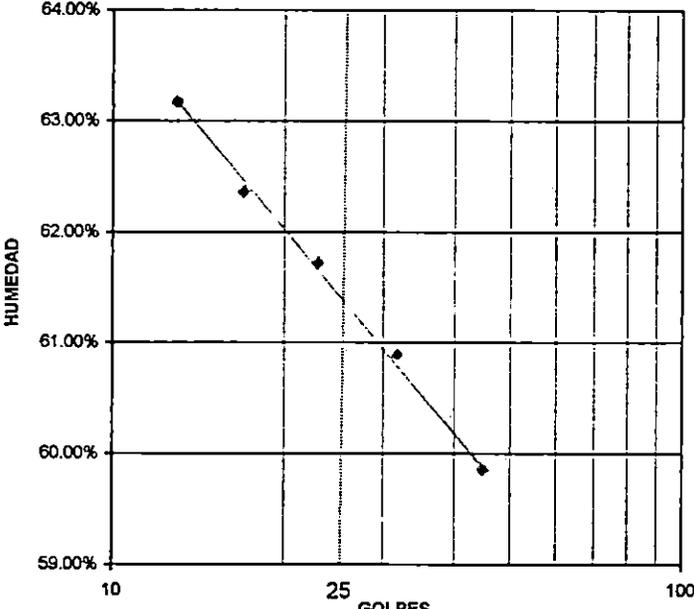
% de agua requerida = $(29.8 - 9.7)\% = 20.1\%$

Peso de suelo completamente seco = $\frac{500}{1+0.097} = 455.79$ gr

Peso de agua necesaria = 455.79 gr * $0.201 = 91.61$ gr.

LIMITES DE ATTERBERG							
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO. SUELO CON ADITIVO A LOS 7 DIAS					   UES		
FECHA: 13/09/00							
DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO							
Numero de golpes	11	15	24	35	43		
Tara	30	31	32	33	34		
Peso Tara	10.42	9.87	10.12	10.53	10.22		
Muestra humeda + tara	29.65	22.58	30.25	27.81	23.10		
Muestra seca + tara	21.78	17.41	22.13	20.88	17.96		
% de humedad	69.28%	68.57%	67.61%	66.96%	66.41%		
GRAFICO							
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">LIMITE LIQUIDO</td> <td style="text-align: center;">67.6%</td> </tr> </table>			LIMITE LIQUIDO	67.6%
LIMITE LIQUIDO	67.6%						
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">LIMITE PLASTICO</td> <td style="text-align: center;">31.1%</td> </tr> </table>			LIMITE PLASTICO	31.1%
LIMITE PLASTICO	31.1%						
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">INDICE PLASTICO</td> <td style="text-align: center;">36.5%</td> </tr> </table>			INDICE PLASTICO	36.5%
INDICE PLASTICO	36.5%						
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">CLASIFICACION</td> <td style="text-align: center;">CH</td> </tr> </table>			CLASIFICACION	CH
CLASIFICACION	CH						
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">PASA MALLA No. 200</td> <td style="text-align: center;">93.40%</td> </tr> </table>			PASA MALLA No. 200	93.40%
PASA MALLA No. 200	93.40%						
DETERMINACION DE LIMITE PLASTICO							
Tara	35	36	37	38	39		
Peso tara	10.25	9.83	10.39	10.43	10.13		
Muestra humeda + tara	15.06	16.38	16.29	15.73	16.45		
Muestra seca + tara	13.92	14.82	14.90	14.47	14.95		
% de humedad	31.06%	31.26%	30.82%	31.19%	31.12%		

LIMITES DE ATTERBERG									
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO. SUELO CON ADITIVO A LOS 14 DIAS					FECHA: 20/09/00				
									
DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO									
Numero de golpes	11	16	25	33	42				
Tara	181	182	183	184	185				
Peso Tara	11.39	11.29	11.37	11.54	11.07				
Muestra humeda + tara	31.15	28.69	29.14	32.58	30.51				
Muestra seca + tara	23.25	21.78	22.14	24.33	22.93				
% de humedad	66.61%	65.87%	65.00%	64.50%	63.91%				
GRAFICO									
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">LIMITE LIQUIDO</td> <td style="text-align: center;">65.0%</td> </tr> </table>			LIMITE LIQUIDO	65.0%		
LIMITE LIQUIDO	65.0%								
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">LIMITE PLASTICO</td> <td style="text-align: center;">32.5%</td> </tr> </table>			LIMITE PLASTICO	32.5%		
LIMITE PLASTICO	32.5%								
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">INDICE PLASTICO</td> <td style="text-align: center;">32.5%</td> </tr> </table>			INDICE PLASTICO	32.5%		
INDICE PLASTICO	32.5%								
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%; text-align: center;">CLASIFICACION</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">CH</td> <td></td> </tr> </table>			CLASIFICACION		CH	
CLASIFICACION									
CH									
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">PASA MALLA No. 200</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">93.40%</td> <td></td> </tr> </table>			PASA MALLA No. 200		93.40%	
PASA MALLA No. 200									
93.40%									
DETERMINACION DE LIMITE PLASTICO									
Tara	186	187	188	189	190				
Peso tara	11.47	11.19	11.31	11.12	11.04				
Muestra humeda + tara	15.14	15.42	13.25	14.25	15.24				
Muestra seca + tara	14.24	14.39	12.77	13.48	14.22				
% de humedad	32.49%	32.19%	32.88%	32.63%	32.08%				

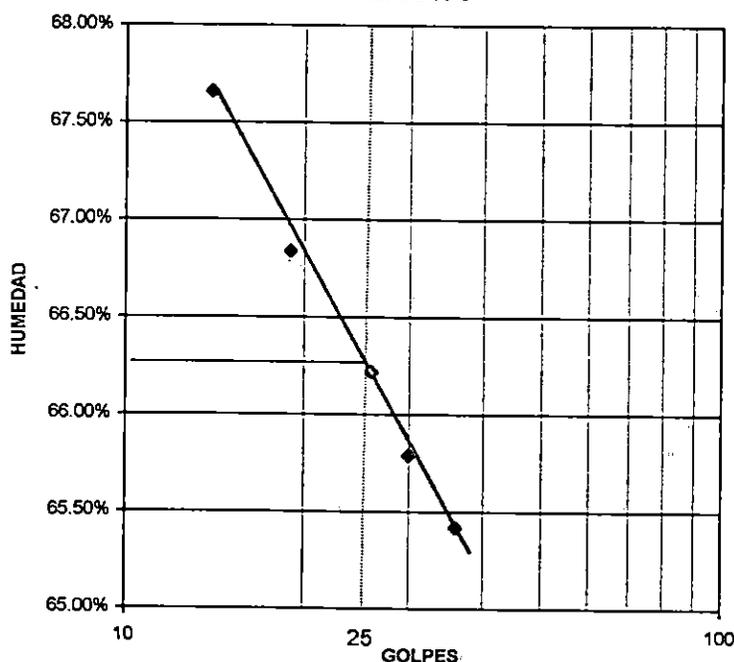
LIMITES DE ATTERBERG					
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO. SUELO CON ADITIVO A LOS 21 DIAS				FECHA: 27/09/00	
					
					
DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO					
Numero de golpes	13	17	23	32	45
Tara	2	3	8	18	52
Peso Tara	9.74	9.75	10.40	9.91	9.85
Muestra humeda + tara	39.60	60.00	45.38	58.00	51.35
Muestra seca + tara	28.04	40.70	32.03	39.80	35.81
% de humedad	63.17%	62.36%	61.72%	60.89%	59.86%
GRAFICO					
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">LIMITE LIQUIDO</td> <td style="text-align: center;">61.5%</td> </tr> </table>	LIMITE LIQUIDO	61.5%
LIMITE LIQUIDO	61.5%				
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">LIMITE PLASTICO</td> <td style="text-align: center;">34.5%</td> </tr> </table>	LIMITE PLASTICO	34.5%
LIMITE PLASTICO	34.5%				
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">INDICE PLASTICO</td> <td style="text-align: center;">27.0%</td> </tr> </table>	INDICE PLASTICO	27.0%
INDICE PLASTICO	27.0%				
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">CLASIFICACION</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">CH</td> </tr> </table>	CLASIFICACION	CH
CLASIFICACION					
CH					
			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">PASA MALLA No. 200</td> <td style="text-align: center;">93.40%</td> </tr> </table>	PASA MALLA No. 200	93.40%
PASA MALLA No. 200	93.40%				
DETERMINACION DE LIMITE PLASTICO					
Tara	14	26	53	81	83
Peso tara	9.75	10.26	10.37	10.55	11.08
Muestra humeda + tara	13.48	14.09	13.71	15.18	14.82
Muestra seca + tara	12.52	13.11	12.85	14.00	13.86
% de humedad	34.66%	34.39%	34.68%	34.20%	34.53%

LIMITES DE ATTERBERG			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN. SUELO CON ADITIVO A LOS 7 DIAS			UES
		FECHA: 16/09/00	

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO

Numero de golpes	14	19	26	30	36
Tara	101	102	103	104	105
Peso Tara	10.22	9.65	10.12	10.14	9.71
Muestra humeda + tara	19.24	22.18	16.37	24.68	17.65
Muestra seca + tara	15.60	17.16	13.88	18.91	14.51
% de humedad	67.66%	66.84%	66.22%	65.79%	65.42%

GRAFICO



LIMITE LIQUIDO	66.3%
----------------	-------

LIMITE PLASTICO	34.8%
-----------------	-------

INDICE PLASTICO	31.5%
-----------------	-------

CLASIFICACION
MH

PASA MALLA No. 200
74.30%

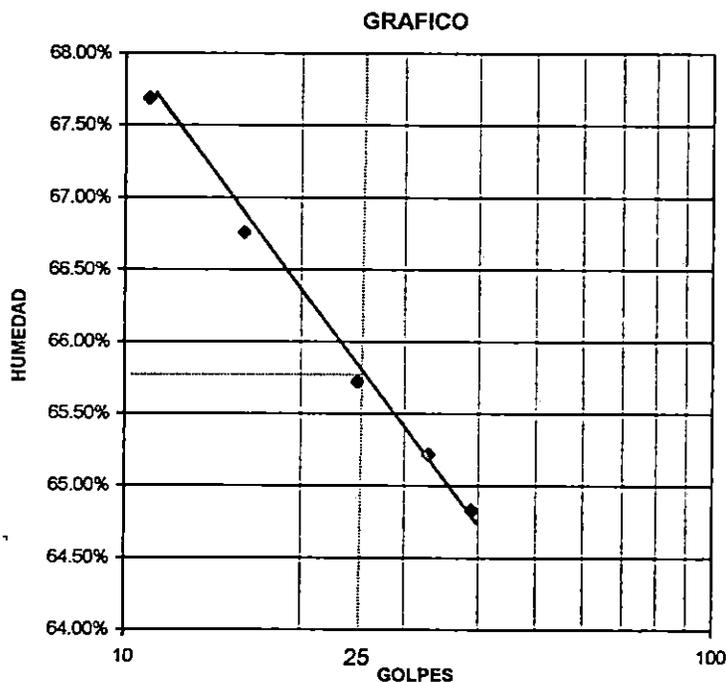
DETERMINACION DE LIMITE PLASTICO

Tara	106	107	108	109	110
Peso tara	10.35	9.78	10.21	10.95	10.43
Muestra humeda + tara	15.21	17.25	16.35	17.42	19.43
Muestra seca + tara	13.95	15.32	14.78	15.75	17.10
% de humedad	35.00%	34.84%	34.35%	34.79%	34.93%

LIMITES DE ATTERBERG			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN. SUELO CON ADITIVO A LOS 14 DIAS			UES
		FECHA: 23/09/00	

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO

Numero de golpes	11	16	25	33	39
Tara	80	81	82	83	84
Peso Tara	10.35	9.75	9.71	9.87	9.95
Muestra humeda + tara	25.61	27.26	19.67	21.65	23.68
Muestra seca + tara	19.45	20.25	15.72	17.00	18.28
% de humedad	67.69%	66.76%	65.72%	65.22%	64.83%



LIMITE LIQUIDO	65.8%
----------------	--------------

LIMITE PLASTICO	38.6%
-----------------	--------------

INDICE PLASTICO	27.2%
-----------------	--------------

CLASIFICACION
MH

PASA MALLA No. 200
74.30%

DETERMINACION DE LIMITE PLASTICO

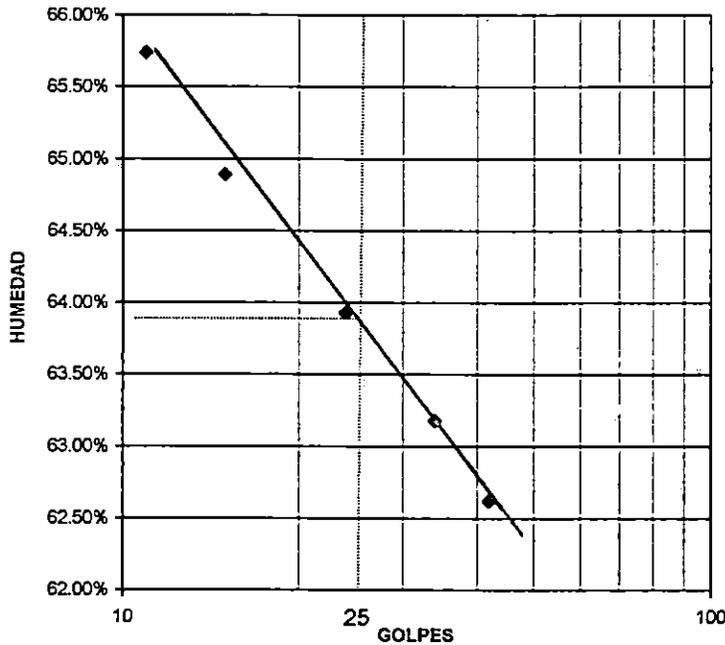
Tara	85	86	87	88	89
Peso tara	10.11	9.52	10.34	10.25	9.82
Muestra humeda + tara	16.32	15.36	14.56	15.51	17.31
Muestra seca + tara	14.60	13.72	13.39	14.05	15.21
% de humedad	38.31%	39.05%	38.36%	38.42%	38.96%

LIMITES DE ATTERBERG			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN. SUELO CON ADITIVO A LOS 21 DIAS			
		FECHA: 30/09/00	

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO

Numero de golpes	11	15	24	34	42
Tara	181	182	183	184	185
Peso Tara	11.39	11.29	11.37	11.54	11.07
Muestra humeda + tara	75.35	65.72	68.73	61.75	70.49
Muestra seca + tara	49.98	44.30	46.36	42.31	47.61
% de humedad	65.74%	64.89%	63.93%	63.18%	62.62%

GRAFICO



LIMITE LIQUIDO	63.9%
----------------	-------

LIMITE PLASTICO	44.4%
-----------------	-------

INDICE PLASTICO	19.5%
-----------------	-------

CLASIFICACION	
MH	

PASA MALLA No. 200	
74.30%	

DETERMINACION DE LIMITE PLASTICO

Tara	53	14	26	83	81
Peso tara	9.93	10.50	9.00	10.59	10.14
Muestra humeda + tara	13.71	14.15	13.23	15.16	14.24
Muestra seca + tara	12.55	13.02	11.93	13.76	12.98
% de humedad	44.27%	44.84%	44.37%	44.16%	44.37%

PRUEBA PROCTOR	 
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO AASTHO T-180 METODO A SUELO CON ADITIVO A LOS 7 DIAS	 
FECHA: 12/09/00	

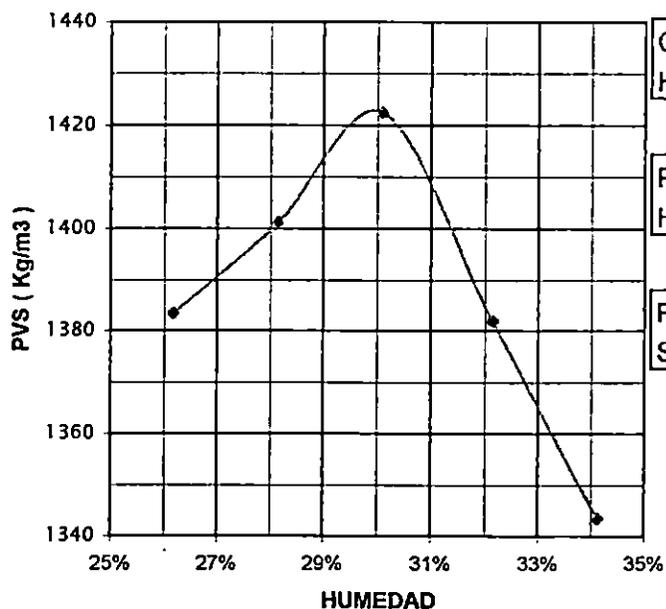
DETERMINACION DE LA HUMEDAD

No de tara	100	101	102	103	104
Peso suelo humedo + tara	85.30	79.40	62.80	69.30	62.80
Peso suelo seco + tara	69.40	64.20	50.50	54.90	49.40
Peso de tara	8.70	10.22	9.65	10.12	10.14
% de humedad	26.19%	28.16%	30.11%	32.16%	34.13%

DETERMINACION DE LA DENSIDAD

Peso muestra humeda + molde	3675.00	3722.00	3774.00	3751.00	3728.00
Peso del molde	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00
Capacidad del molde	942.30	942.30	942.30	942.30	942.30
Peso volumetrico seco	1383.41	1401.07	1422.48	1381.95	1343.45

**GRAFICO
PVS vrs. HUMEDAD**



CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	30.11%
-----------------------------	---------------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1850.79
--------------------------------	----------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO	1422.48
------------------------------	----------------

PRUEBA PROCTOR	 
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO AASTHO T-180 METODO A SUELO CON ADITIVO A LOS 14 DIAS FEHA: 19/09/00	 UES

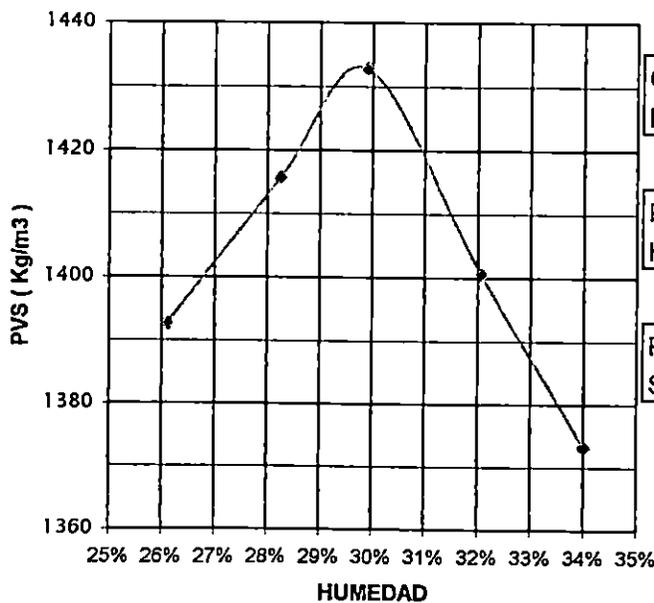
DETERMINACION DE LA HUMEDAD

No de tara	160	161	162	163	164
Peso suelo humedo + tara	51.20	55.80	52.60	57.20	42.30
Peso suelo seco + tara	42.40	45.40	42.40	45.40	33.90
Peso de tara	8.70	8.60	8.30	8.60	9.20
% de humedad	26.11%	28.26%	29.91%	32.07%	34.01%

DETERMINACION DE LA DENSIDAD

Peso muestra humeda + molde	3685.00	3741.00	3784.00	3773.00	3764.00
Peso del molde	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00
Capacidad del molde	942.30	942.30	942.30	942.30	942.30
Peso volumetrico seco	1392.70	1415.69	1432.84	1400.57	1373.17

**GRAFICO
PVS vs. HUMEDAD**



CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	29.91%
-----------------------------	---------------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1861.40
--------------------------------	----------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO	1432.84
------------------------------	----------------

PRUEBA PROCTOR		
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO AASTHO T-180 METODO A SUELO CON ADITIVO A LOS 21 DIAS FEHA:26-09-00		UES

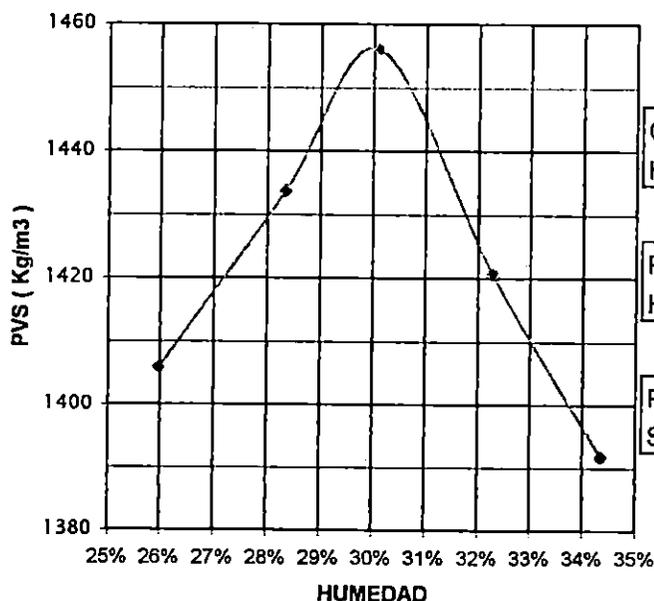
DETERMINACION DE LA HUMEDAD

No de tara	230	231	232	233	234
Peso suelo humedo + tara	65.40	78.90	72.80	67.00	74.50
Peso suelo seco + tara	54.00	63.70	58.20	53.00	58.00
Peso de tara	10.13	10.08	9.70	9.64	9.98
% de humedad	25.99%	28.35%	30.10%	32.29%	34.36%

DETERMINACION DE LA DENSIDAD

Peso muestra humeda + molde	3699.00	3764.00	3815.00	3801.00	3792.00
Peso del molde	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00
Capacidad del molde	942.30	942.30	942.30	942.30	942.30
Peso volumetrico seco	1405.83	1433.72	1456.03	1420.70	1391.70

**GRAFICO
PVS vs. HUMEDAD**



CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	30.10%
-----------------------------	---------------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1894.30
--------------------------------	----------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO	1456.03
------------------------------	----------------

PRUEBA PROCTOR			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN			UES
TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS			
UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN	AASTHO T-180 METODO A		
SUELO CON ADITIVO A LOS 7 DIAS		FECHA: 16/09/00	

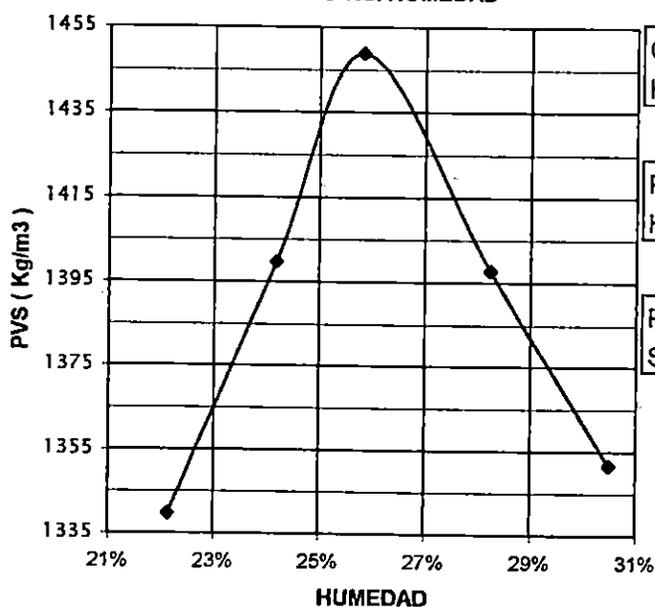
DETERMINACION DE LA HUMEDAD

No de tara	75	76	77	78	79
Peso suelo humedo + tara	59.60	63.40	65.90	43.90	52.80
Peso suelo seco + tara	50.70	52.90	54.30	36.50	42.80
Peso de tara	10.50	9.50	9.40	10.30	10.00
% de humedad	22.14%	24.19%	25.84%	28.24%	30.49%

DETERMINACION DE LA DENSIDAD

Peso muestra humeda + molde	3572.00	3668.00	3748.00	3719.00	3692.00
Peso del molde	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00
Capacidad del molde	942.30	942.30	942.30	942.30	942.30
Peso volumetrico seco	1339.79	1399.71	1448.82	1397.71	1351.65

**GRAFICO
PVS vs. HUMEDAD**



CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	25.84%
-----------------------------	---------------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1823.20
--------------------------------	----------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO	1448.82
------------------------------	----------------

PRUEBA PROCTOR			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN			
SUELO CON ADITIVO A LOS 14 DIAS		AASTHO T-180 METODO A	FECHA: 23/09/00

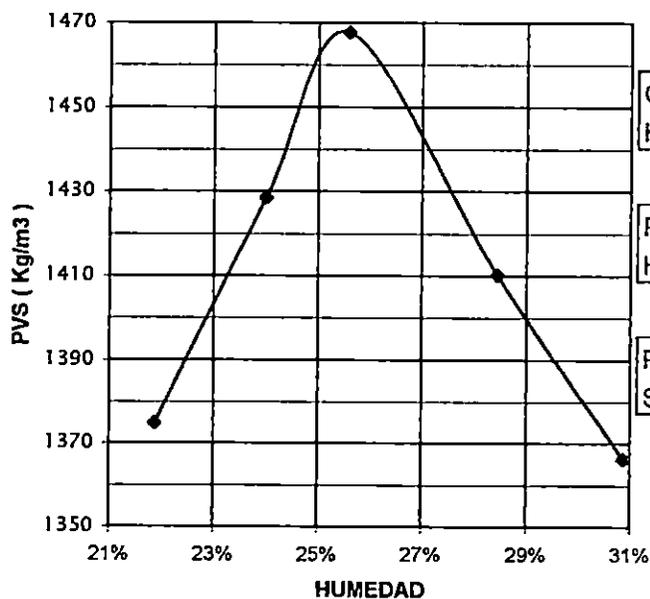
DETERMINACION DE LA HUMEDAD

No de tara	20	21	22	23	24
Peso suelo humedo + tara	62.50	71.60	68.30	70.40	65.30
Peso suelo seco + tara	53.20	59.70	56.40	57.00	52.30
Peso de tara	10.70	10.10	9.90	9.90	10.20
% de humedad	21.88%	23.99%	25.59%	28.45%	30.88%

DETERMINACION DE LA DENSIDAD

Peso muestra humeda + molde	3609.00	3699.00	3767.00	3737.00	3715.00
Peso del molde	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00
Capacidad del molde	942.30	942.30	942.30	942.30	942.30
Peso volumetrico seco	1374.87	1428.50	1467.76	1410.29	1366.27

GRAFICO
PVS vs. HUMEDAD



CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	25.59%
-----------------------------	---------------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1843.36
--------------------------------	----------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO	1467.76
------------------------------	----------------

PRUEBA PROCTOR			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN SUELO CON ADITIVO A LOS 21 DIAS		AASTHO T-180 METODO A FECHA: 30/09/00	
			UES

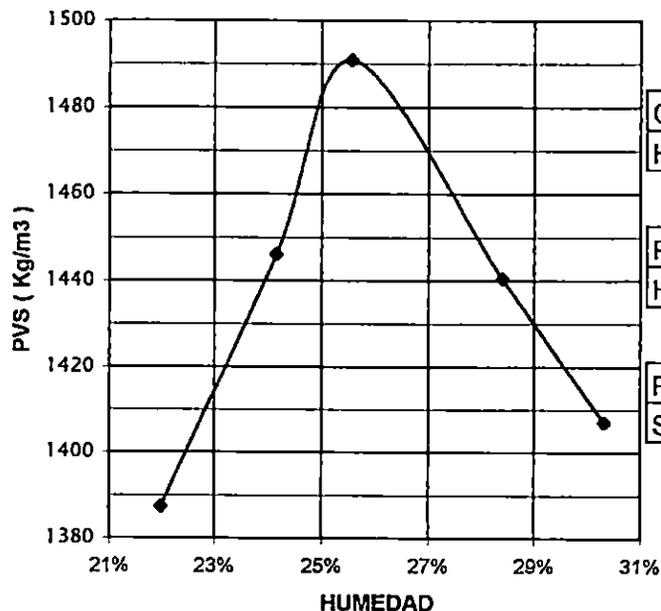
DETERMINACION DE LA HUMEDAD

No de tara	40	41	42	43	44
Peso suelo humedo + tara	75.90	58.30	60.80	67.50	73.40
Peso suelo seco + tara	64.00	49.00	50.50	54.80	58.60
Peso de tara	9.90	10.50	10.20	10.10	9.80
% de humedad	- 22.00%	24.16%	25.56%	28.41%	30.33%

DETERMINACION DE LA DENSIDAD

Peso muestra humeda + molde	3625.00	3722.00	3794.00	3773.00	3758.00
Peso del molde	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00	2030.00
Capacidad del molde	942.30	942.30	942.30	942.30	942.30
Peso volumetrico seco	1387.43	1446.21	1490.94	1440.49	1407.05

**GRAFICO
PVS vs. HUMEDAD**



CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	25.56%
-----------------------------	---------------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1872.02
--------------------------------	----------------

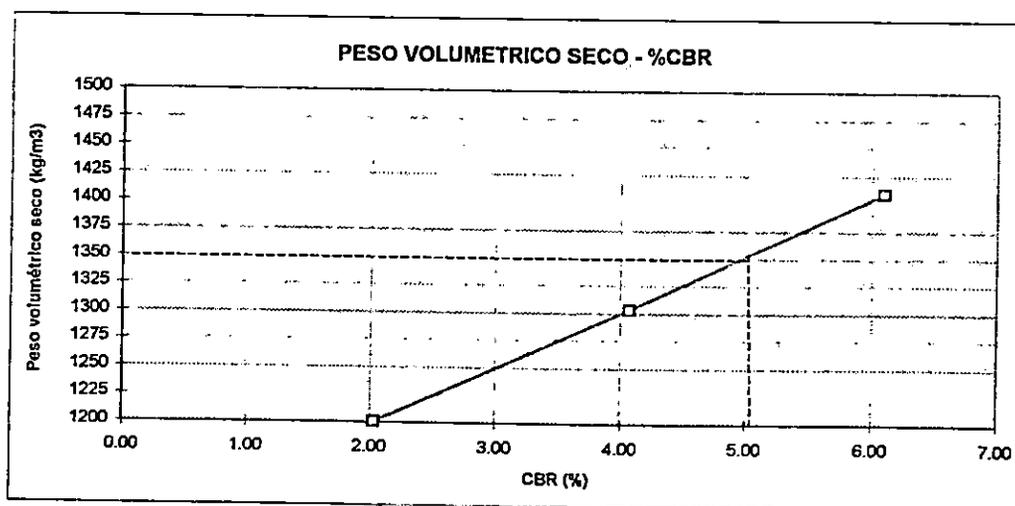
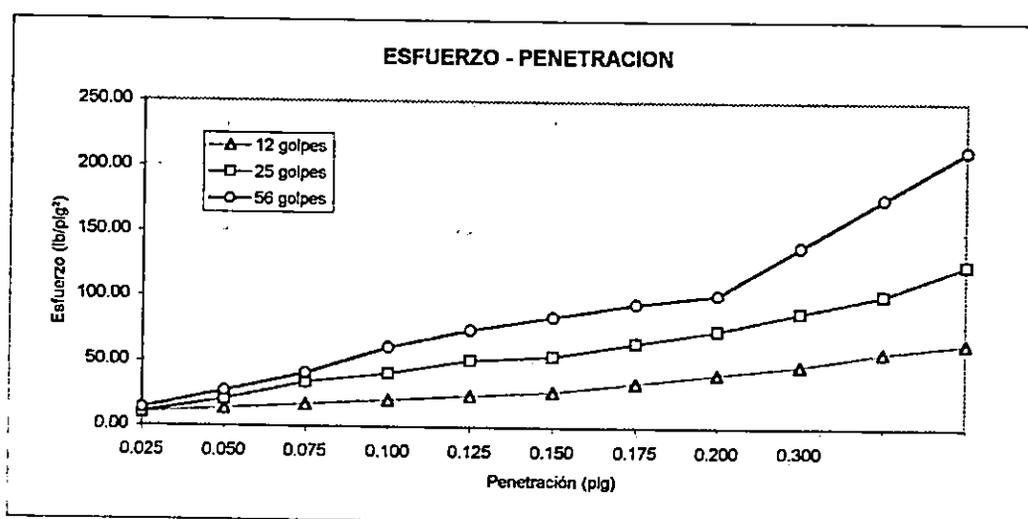
PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO	1490.94
------------------------------	----------------

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO SUELO CON ADITIVO A LOS 7 DIAS			 
			FECHA: 12/09/00
Molde #	3	5	7
Golpes	12	25	56
CONTENIDOS DE HUMEDAD			
Peso suelo húmedo + tara (g)	78.9	85.4	80.4
Peso suelo seco + tara (g)	63.5	68.3	64.6
Peso tara (g)	10.5	10.2	10.7
Contenido de humedad (%)	29.1%	29.4%	29.3%
PESOS VOLUMETRICOS			
Peso suelo húmedo + molde (kg)	7365	7718	7942
Peso molde (kg)	4095	4120	4090
Volumen molde (cm ³)	2111	2133	2114
Peso volumétrico seco (kg/m ³)	1200	1303	1409
Peso volumétrico seco máximo (kg/m ³)		1421	
Grado de compactación (%)	84.5	91.7	99.2
95% de Peso volum. seco máximo		1350	
ESFUERZO - PENETRACION			
Penetración	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)
0.025	10.18	10.18	13.57
0.050	13.57	20.36	27.15
0.075	16.70	33.93	40.70
0.100	20.36	40.70	61.80
0.125	23.75	50.87	74.53
0.150	27.15	54.23	84.70
0.175	33.93	64.40	94.83
0.200	40.70	74.53	101.60
0.300	47.47	88.07	138.80
0.400	57.63	101.60	175.97
0.500	64.40	125.10	213.07
%CBR a 0.1"	2.04	4.07	6.10
%CBR a 0.2"	2.71	4.97	6.77
HINCHAMIENTO (PULG)			
MOLDE	24 H	96 H	
3	0.010	0.0015	
5	0.007	0.011	
7	0.005	0.008	

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN
 TEMA: ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO
 SUELO CON ADITIVO A LOS 7 DIAS

FECHA: 12/09/00



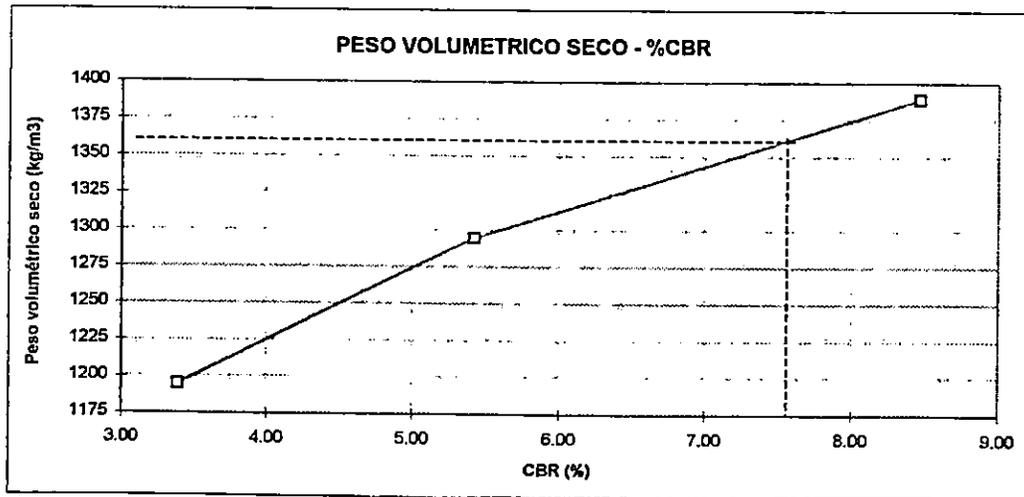
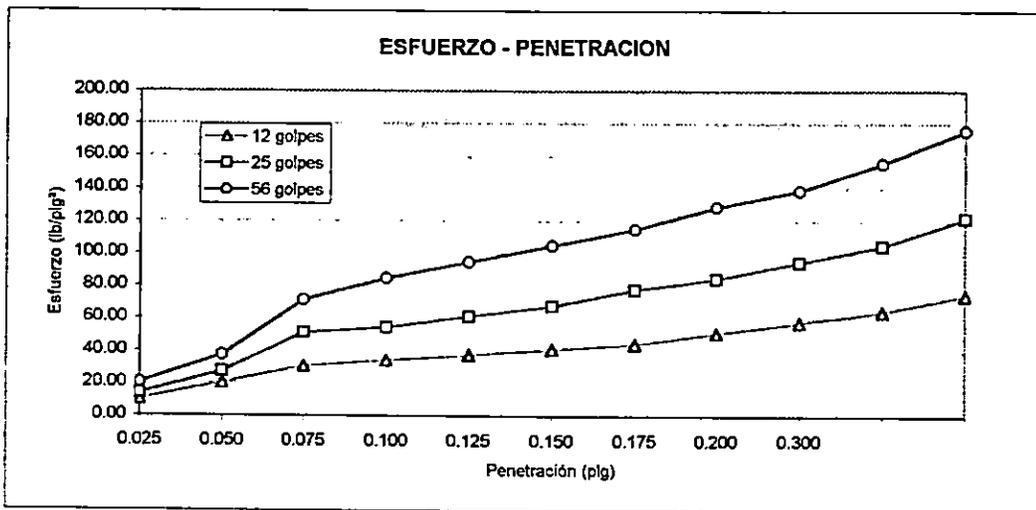
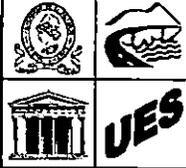
CBR (0.1") = 5%

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO SUELO CON ADITIVO A LOS 14 DIAS			
			FECHA: 19/09/00
Molde #	3	5	7
Golpes	12	25	56
CONTENIDOS DE HUMEDAD			
Peso suelo húmedo + tara (g)	52.6	65.2	58.3
Peso suelo seco + tara (g)	42.5	52.4	47.0
Peso tara (g)	9.1	9.8	10.1
Contenido de humedad (%)	30.2%	30.0%	30.6%
PESOS VOLUMETRICOS			
Peso suelo húmedo + molde (kg)	7379	7712	7925
Peso molde (kg)	4095	4120	4090
Volumen molde (cm3)	2111	2133	2114
Peso volumétrico seco (ka/m3)	1194	1295	1389
Peso volumétrico seco máximo (ka/m3)	1433		
Grado de compactación (%)	83.4	90.4	96.9
95% de Peso volum. seco máximo	1361		
ESFUERZO - PENETRACION			
Penetración	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)
0.025	10.18	13.57	20.36
0.050	20.36	27.15	37.32
0.075	30.54	50.85	71.15
0.100	33.93	54.24	84.68
0.125	37.30	61.00	94.83
0.150	40.70	67.77	104.98
0.175	44.10	77.92	115.14
0.200	50.87	84.68	128.67
0.300	57.63	94.83	138.81
0.400	64.40	104.98	155.71
0.500	74.53	121.90	175.95
%CBR a 0.1"	3.39	5.42	8.47
%CBR a 0.2"	3.39	5.65	8.58
HINCHAMIENTO (PULG)			
MOLDE	24 H	96 H	
3	0.007	0.008	
5	0.005	0.006	
7	0.003	0.004	

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN
 TEMA: ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO
 SUELO CON ADITIVO A LOS 14 DÍAS

FECHA: 19/09/00



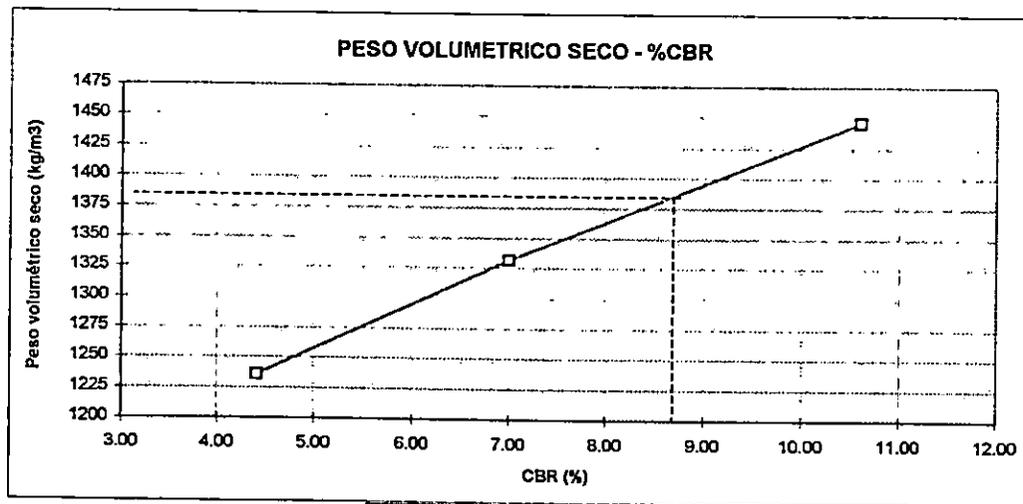
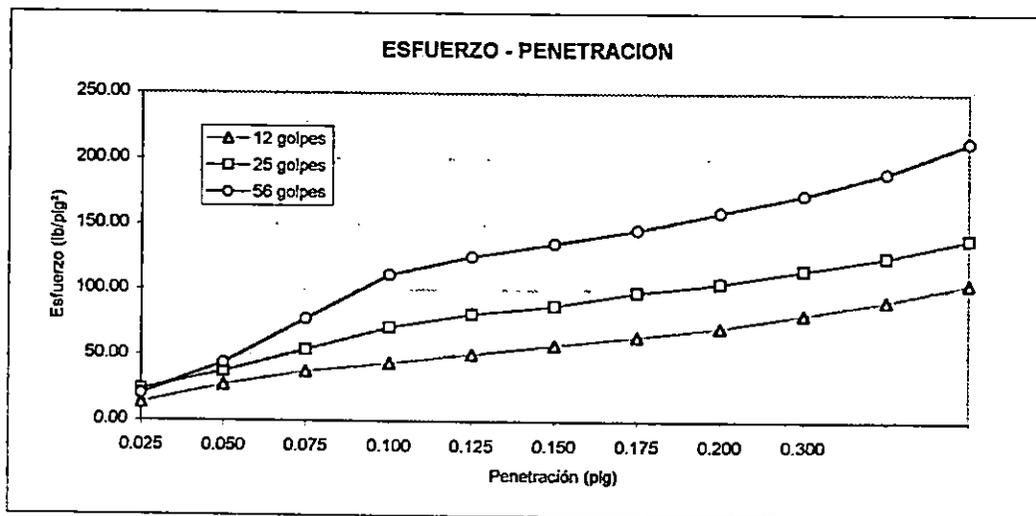
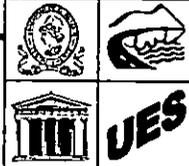
CBR (0.1") = 7.5%

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)											
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO SUELO CON ADITIVO A LOS 21 DIAS			 								
			FECHA: 26/09/00								
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>Molde #</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>Golpes</td> <td>12</td> <td>25</td> <td>56</td> </tr> </table>				Molde #	3	5	7	Golpes	12	25	56
Molde #	3	5	7								
Golpes	12	25	56								
CONTENIDOS DE HUMEDAD											
Peso suelo húmedo + tara (g)	48.2	50.1	50.8								
Peso suelo seco + tara (g)	39.4	41.0	41.4								
Peso tara (g)	10.2	10.5	10.1								
Contenido de humedad (%)	30.1%	29.8%	30.0%								
PESOS VOLUMETRICOS											
Peso suelo húmedo + molde (kg)	12512	12775	13232								
Peso molde (kg)	7291	7145	7120								
Volumen molde (cm3)	3247	3256	3251								
Peso volumétrico seco (kg/m3)	1236	1332	1446								
Peso volumétrico seco máximo (kg/m3)		1421									
Grado de compactación (%)	87.0	93.7	101.7								
95% de Peso volum. seco máximo		1350									
ESFUERZO - PENETRACION											
Penetración	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)								
0.025	13.57	23.75	20.36								
0.050	27.15	37.30	44.09								
0.075	37.82	54.23	77.92								
0.100	44.09	71.17	111.75								
0.125	50.85	81.33	125.29								
0.150	57.62	88.07	135.43								
0.175	64.38	98.23	145.58								
0.200	71.15	105.00	159.08								
0.300	81.30	115.13	172.58								
0.400	91.45	125.10	189.46								
0.500	104.98	138.80	213.07								
%CBR a 0.1"	4.41	7.12	11.18								
%CBR a 0.2"	4.74	7.00	10.61								
HINCHAMIENTO (PULG)											
MOLDE	24 H	96 H									
3	0.004	0.003									
5	0.003	0.004									
7	0.002	0.003									

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN
 TEMA: ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 UBICACIÓN: CERRO PACHO, CHALATENANGO
 SUELO CON ADITIVO A LOS 21 DIAS

FECHA: 26/09/00



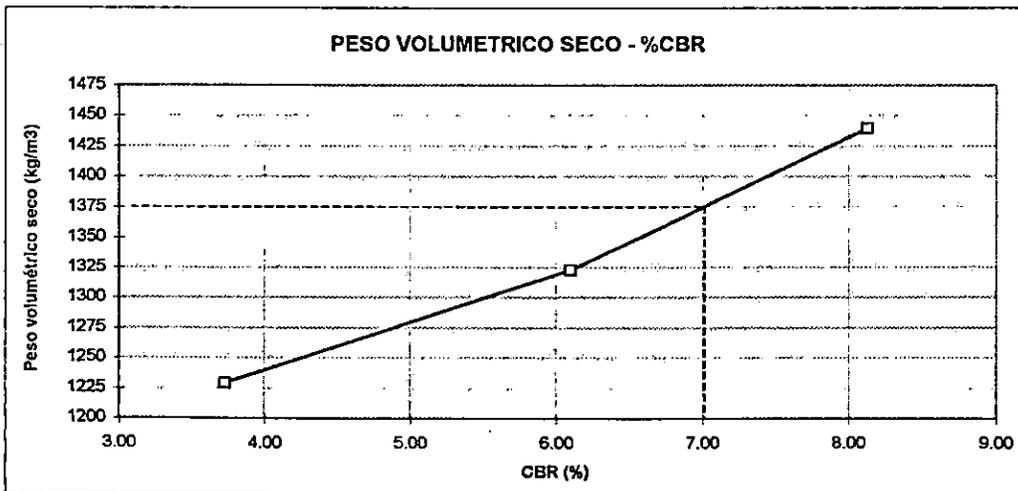
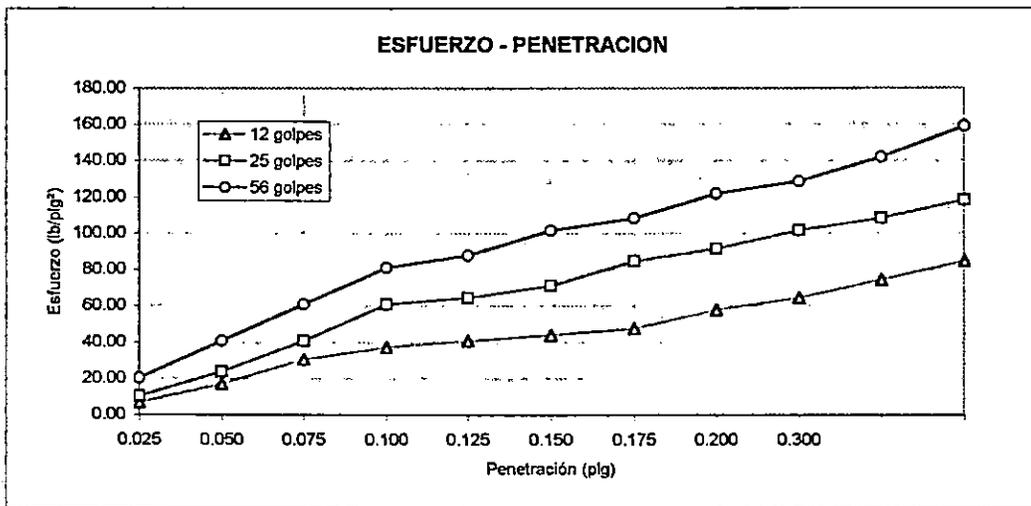
CBR (0.17) = 8.7%

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN SUELO CON ADITIVO A LOS 7 DIAS			 
			FECHA: 16/09/00
Molde #	3	5	7
Golpes	12	25	56
CONTENIDOS DE HUMEDAD			
Peso suelo húmedo + tara (g)	62.7	71.4	67.2
Peso suelo seco + tara (g)	51.9	58.9	55.5
Peso tara (g)	10.0	10.2	10.2
Contenido de humedad (%)	25.8%	25.7%	25.8%
PESOS VOLUMETRICOS			
Peso suelo húmedo + molde (kg)	9938	10210	10530
Peso molde (kg)	6675	6665	6700
Volumen molde (cm ³)	2111	2133	2114
Peso volumétrico seco (ka/m ³)	1229	1323	1440
Peso volumétrico seco máximo (ka/m ³)	1449		
Grado de compactación (%)	84.8	91.3	99.4
95% de Peso volum. seco máximo	1377		
ESFUERZO - PENETRACION			
Penetración	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)
0.025	6.79	10.18	20.36
0.050	16.97	23.75	40.70
0.075	30.54	40.70	61.00
0.100	37.30	61.00	81.33
0.125	40.70	64.40	88.07
0.150	44.09	71.17	101.60
0.175	47.47	84.70	108.37
0.200	57.63	91.47	121.90
0.300	64.40	101.60	128.67
0.400	74.53	108.37	142.20
0.500	84.70	118.52	159.08
%CBR a 0.1"	3.73	6.10	8.13
%CBR a 0.2"	3.84	6.10	8.13
HINCHAMIENTO (PULG)			
MOLDE	24 H	96 H	
3	0.015	0.019	
5	0.014	0.018	
7	0.011	0.016	

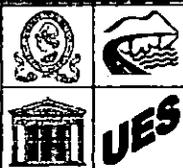
VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN
 TEMA: ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN
 SUELO CON ADITIVO A LOS 7 DIAS

FECHA: 16/09/00



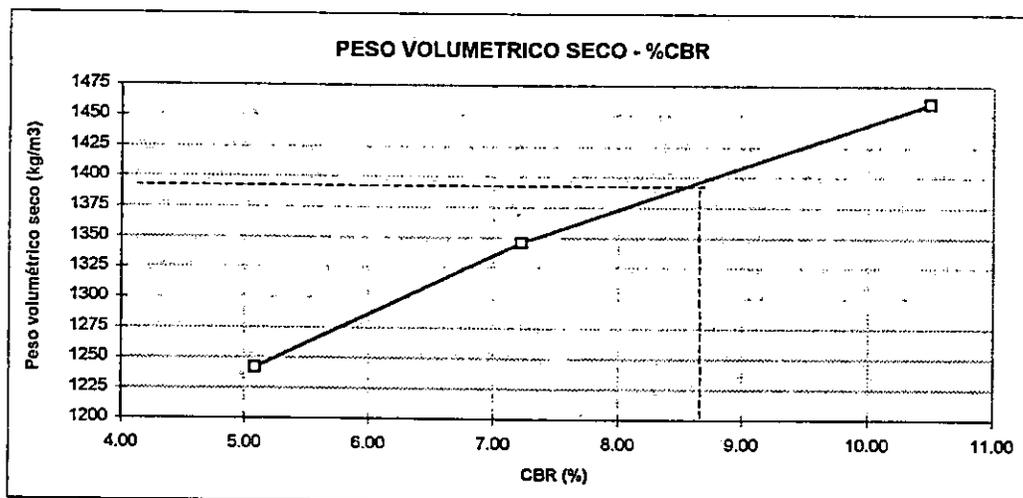
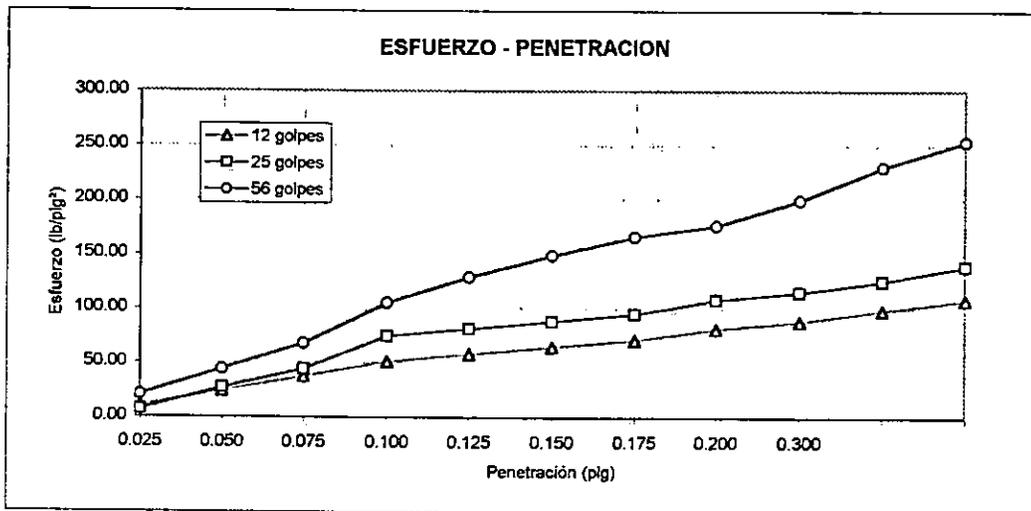
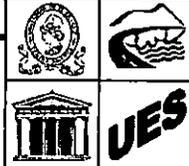
CBR (0.1") = 7%

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN SUELO CON ADITIVO A LOS 14 DIAS			
FECHA: 23/09/00			
			
Molde #	3	5	7
Golpes	12	25	56
CONTENIDOS DE HUMEDAD			
Peso suelo húmedo + tara (g)	45.7	52.8	57.1
Peso suelo seco + tara (g)	38.5	44.0	47.5
Peso tara (g)	10.5	10.0	10.1
Contenido de humedad (%)	25.7%	25.9%	25.7%
PESOS VOLUMETRICOS			
Peso suelo húmedo + molde (kg)	9970	10280	10580
Peso molde (kg)	6675	6665	6700
Volumen molde (cm ³)	2111	2133	2114
Peso volumétrico seco (kg/m ³)	1242	1346	1460
Peso volumétrico seco máximo (kg/m ³)		1468	
Grado de compactación (%)	84.6	91.7	99.5
95% de Peso volum. seco máximo		1395	
ESFUERZO - PENETRACION			
Penetración	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)
0.025	10.18	6.79	20.36
0.050	23.75	27.15	44.09
0.075	37.30	44.09	67.77
0.100	50.87	74.53	104.98
0.125	57.63	81.30	128.67
0.150	64.40	88.07	148.93
0.175	71.17	94.83	165.83
0.200	81.33	108.37	175.97
0.300	88.07	115.13	199.59
0.400	98.23	125.27	229.93
0.500	108.37	138.80	253.57
%CBR a 0.1"	5.09	7.45	10.50
%CBR a 0.2"	5.42	7.22	11.73
HINCHAMIENTO (FULG)			
MOLDE	24 H	96 H	
3	0.090	0.011	
5	0.070	0.090	
7	0.050	0.060	

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN
 TEMA: ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN
 SUELO CON ADITIVO A LOS 14 DIAS

FECHA: 23/09/00



CBR (0:1) = 8.6%

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)			
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN TEMA: ESTABILIZACION DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN SUELO CON ADITIVO A LOS 21 DIAS			FECHA: 30/09/00
			
			UES

Molde #	3	5	7
Golpes	12	25	56

CONTENIDOS DE HUMEDAD			
Peso suelo húmedo + tara (g)	74.4	82.8	72.5
Peso suelo seco + tara (g)	61.8	68.3	60.0
Peso tara (g)	10.2	9.6	10.5
Contenido de humedad (%)	24.4%	24.7%	25.3%

PESOS VOLUMETRICOS			
Peso suelo húmedo + molde (kg)	12399	12680	13152
Peso molde (kg)	7291	7145	7120
Volumen molde (cm ³)	3247	3256	3251
Peso volumétrico seco (kg/m ³)	1264	1363	1481
Peso volumétrico seco máximo (kg/m ³)		1491	
Grado de compactación (%)	84.8	91.4	99.4
95% de Peso volum. seco máximo		1416	

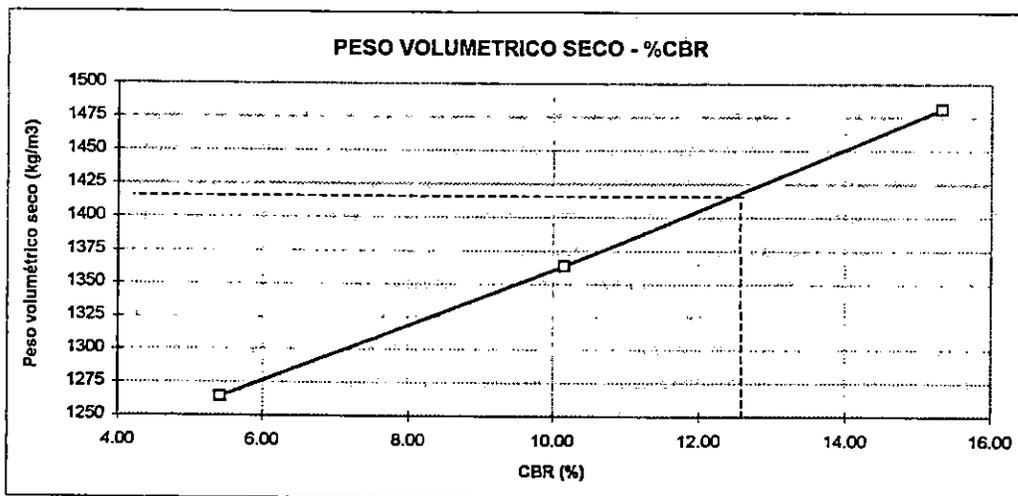
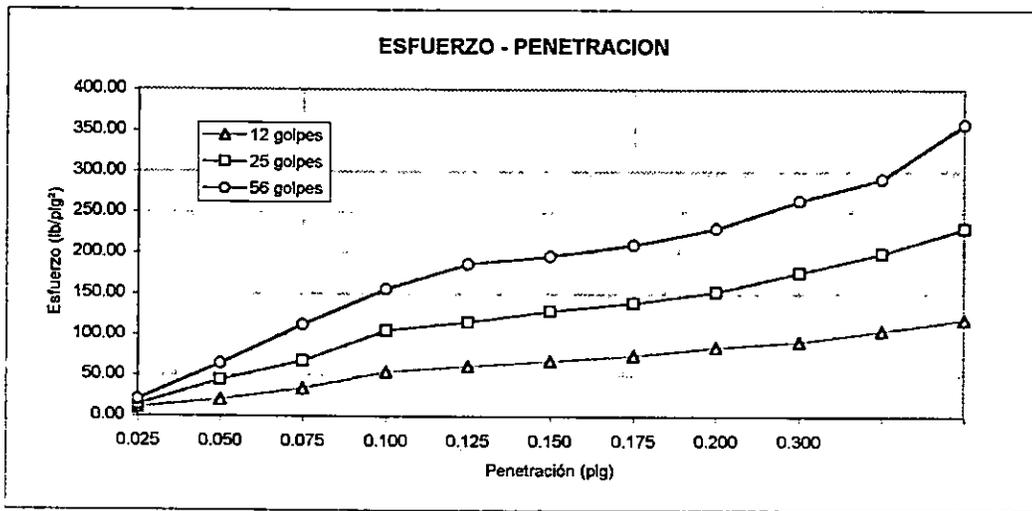
ESFUERZO - PENETRACION			
Penetración	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)	Esf. (lb/plg ²)
0.025	10.18	13.57	20.36
0.050	20.36	44.09	64.38
0.075	33.93	67.77	111.75
0.100	54.24	104.98	155.71
0.125	61.00	115.14	186.08
0.150	67.77	128.67	196.21
0.175	74.53	138.81	209.70
0.200	84.68	152.33	229.83
0.300	91.45	175.95	263.67
0.400	104.98	199.59	290.63
0.500	118.52	229.93	357.97
%CBR a 0.1"	5.42	10.50	15.57
%CBR a 0.2"	5.65	10.16	15.33

HINCHAMIENTO (PULG)		
MOLDE	24 H	96 H
3	0.080	0.090
5	0.070	0.080
7	0.060	0.070

VALOR DE SOPORTE RELATIVO (CBR)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN
 TEMA: ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 UBICACIÓN: CERRO CIRIMBA, MORAZAN
 SUELO CON ADITIVO A LOS 21 DIAS

FECHA: 30/09/00



CBR (0.1") = 12.2%

PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Proyecto : TRABAJO DE GRADUACION
 Tema : ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 Ubicación: CERRO PACHO CHALATENANGO



Fecha : 20-09-00
 SUELO : ADITIVO 7 DIAS
 TIPO DE SUELO : MH
 PVS : 1421 kg/m³
 HUMEDAD: 30.1%
 Ss : 2.51

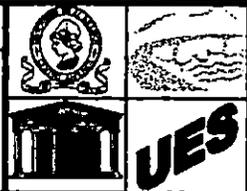
$$K = \frac{a \times l}{A \times \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Fecha	Hora	Carga (mt)
20-09-00	9:05	2.353
21-09-00	10:15	1.768
22-09-00	11:15	1.350

Variables	Datos	
a (cm ²)	0.281	0.281
l (cm)	11.668	11.668
A (cm ²)	80.72	80.72
Δt (seg)	90000	180000
h ₁ (mt)	2.353	2.353
h ₂ (mt)	1.368	1.350
K	2.4477 E-07	2.4009 E-07
K Promedio	2.4243 E -07	

PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Proyecto : TRABAJO DE GRADUACION
 Tema : ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 Ubicación: CERRO PACHO CHALATENANGO



Fecha : 26-09-00
 SUELO : ADITIVO 14 DÍAS
 TIPO DE SUELO : MH
 PVS : 1431 kg/m³
 HUMEDAD: 29.9%
 Ss : 2.51

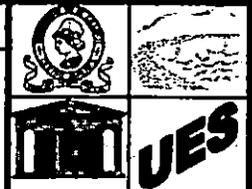
$$K = \frac{axl}{A \times \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Fecha	Hora	Carga (mt)
26-09-00	8:45	2.158
27-09-00	10:45	1.452
27-09-00	15:45	1.290

Variables	Datos	
a (cm ²)	0.281	0.281
l (cm)	11.668	11.668
A (cm ²)	80.72	80.72
Δt (seg)	93600	111600
h ₁ (mt)	2.158	2.158
h ₂ (mt)	1.452	1.290
K	1.7195 E-07	1.8728 E-07
K Promedio	1.7961 E -07	

PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Proyecto : TRABAJO DE GRADUACION
 Tema : ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 Ubicación: CERRO PACHO CHALATENANGO



Fecha : 4-10-00
 SUELO : ADITIVO 21 DIAS
 TIPO DE SUELO : MH
 PVS : 1455 kg/m³
 HUMEDAD: 30.1%
 Ss : 2.51

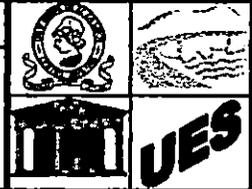
$$K = \frac{a \times l}{A \times \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Fecha	Hora	Carga (mt)
4-10-00	9:00	2.250
5-10-00	14:00	1.950
6-10-00	15:00	1.608

Variables	Datos	
a (cm ²)	0.281	0.281
l (cm)	11.668	11.668
A (cm ²)	80.72	80.72
Δt (seg)	61200	151200
h ₁ (mt)	2.250	2.250
h ₂ (mt)	1.95	1.608
K	9.4976 E-08	9.025 E-08
K Promedio	9.2613 E -08	

PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Proyecto : TRABAJO DE GRADUACION
 Tema : ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 Ubicación: CERRO CIRIMBA, MORAZAN



Fecha : 24-09-00
 SUELO : ADITIVO 7 DIAS
 TIPO DE SUELO : MH
 PVS : 1448 kg/m³
 HUMEDAD: 25.8%
 Ss : 2.47

$$K = \frac{a \times l}{A \times \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Fecha	Hora	Carga (mt)
24-09-00	9:30	2.287
24-09-00	17:30	1.851
25-09-00	11:00	1.162

Variables	Datos	
a (cm ²)	0.281	0.281
l (cm)	11.668	11.668
A (cm ²)	80.72	80.72
Δt (seg)	28.800	93.600
h ₁ (mt)	2.287	2.287
h ₂ (mt)	1.851	1.162
K	2.9907 E-07	2.9383 E-07
K Promedio	2.9645 E-07	

PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Proyecto : TRABAJO DE GRADUACION
 Tema : ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 Ubicación: CERRO CIRIMBA, MORAZAN



Fecha : 30-09-00
 SUELO : ADITIVO 14 DIAS
 TIPO DE SUELO : MH
 PVS : 1466 kg/m³
 HUMEDAD: 25.58%
 Ss : 2.47

$$K = \frac{a \times l}{A \times \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Fecha	Hora	Carga (mt)
30-09-00	14:30	2.250
01-10-00	09:30	1.425
02-10-00	11:00	0.725

Variables	Datos	
a (cm ²)	0.281	0.281
l (cm)	11.668	11.668
A (cm ²)	80.72	80.72
Δt (seg)	68400	162000
h ₁ (mt)	2.250	2.250
h ₂ (mt)	1.425	0.725
K	2.7124 E-07	2.8395 E-07
K Promedio	2.7760 E-07	

PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Proyecto : TRABAJO DE GRADUACION
 Tema : ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS CON ENZIMAS ORGANICAS
 Ubicación: CERRO CIRIMBA, MORAZAN



Fecha : 08-10-00
 SUELO : ADITIVO 21 DIAS
 TIPO DE SUELO : MH
 PVS : 1490 kg/m³
 HUMEDAD: 25.5%
 Ss : 2.47

$$K = \frac{a \times l}{A \times \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Fecha	Hora	Carga (mt)
08-10-00	9:30	2.250
09-10-00	14:30	1.345
10-10-00	17:30	0.835

Variables	Datos	
a (cm ²)	0.281	0.281
l (cm)	11.668	11.668
A (cm ²)	80.72	80.72
Δt (seg)	104400	201600
h ₁ (mt)	2.250	2.250
h ₂ (mt)	1.345	0.835
K	2.0019 E-07	1.9972 E-07
K Promedio	1.9995 E-07	

2.5.3 PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACION EN EL CAMPO.

a) Rompa, escarifique, y pulverice el camino. Si se requiere agregar suelo (gruesos o finos) agréguelo antes de escarificar. Trabaje y mueva el material hasta que este bien pulverizado a una profundidad total de 15 cm. Para asegurar la completa penetración y distribución pareja del tratamiento líquido. Remueva piedras mayores de 10 cm.

b) Calcule el volumen de concentrados del aditivo que se necesitará para tratar el volumen de material en la sección preparada del camino. En el anexo 2E, use la hoja de estimación en la línea E – para determinar el volumen. Se usa aditivo a razón de un litro concentrado 1X por cada 3 m³ de suelo.

Este paso aplica estrictamente a la determinación de la cantidad de aditivo necesario para el volumen de suelo a ser tratado. La cantidad de agua requerida para llevar el suelo a la humedad óptima es un cálculo separado.

c) Cantidad de agua requerida, para llevar el suelo a la humedad óptima para su compactación. La cantidad de agua calculada en este paso será combinada en el camión tanque con el volumen del aditivo calculado en el paso previo. La combinación se aplicará a la sección del camino antes de ser mezclado y compactado. La hoja de trabajo para "estimar los requerimientos de agua" está en el anexo 2F, y contiene instrucciones paso a paso.

Si no existe equipo adecuado para determinar el nivel de humedad óptima de la sección de demostración de suelo, use las instrucciones de "estimación en el campo del grado de humedad óptima" anexo 2G.

- d) Calcule en un camión tanque el volumen del aditivo. Con 90% del volumen de agua estimada. El aditivo se mezclara fácilmente con el agua en pocos minutos. La mezcla puede ser acelerada moviendo el camión hacia delante y atrás.

Distribuya la carga total de formulación diluida del aditivo, en varias pasadas uniformes del camión tanque sobre la sección preparada de 100 metros para permitir total penetración del líquido. El total volumen calculado y que está en el camión debe ser aplicado a la sección bajo construcción. Esta agua se requiere para llevar el suelo a la humedad óptima y para distribuir el aditivo uniformemente a través del suelo antes de ser compactado. Si menos de la cantidad del aditivo calculada para una sección particular de camino llegara a ser distribuida, se obtendrá una compactación menor que óptima.

- e) Mezcle bien la formulación del aditivo con el suelo. Después de mezclar totalmente con el arador rotatorio o por varias pasadas de la motoniveladora), compruebe que tenga suficiente contenido de humedad, tomando muestras en varios lugares a lo largo de la sección de camino y formando bolas de suelo agregue hasta un 10% de agua adicional. Sin aditivo, si fuera necesario, y vuelva a mezclar el suelo.

- f) Disperse el suelo tratado con aditivo en una capa de espesor uniforme en preparación de la compactación. Siga los métodos tradicionales para darle la curvatura y escurrimiento de agua necesarias al camino. Se conseguirá el mejor rendimiento cuando se prevenga al máximo posible que se puedan formar pozas de agua.
- g) Compacte la capa tratada con una aplanadora normal de rodillo. Puede emplearse vibración para que se asiente mejor la mezcla de suelo, pero solo en la primera pasada. Las pasadas de compactación deberían sobrelaparse en un 50% para evitar puntos débiles. Hoyos o irregularidades pueden ser rellenadas con una pala o usando una pasada ligera de una motoniveladora después de la primera pasada de compactación. La aplanadora deberá hacer 3 ó 4 pasadas finales sobre la sección sin usar vibración.

2.5.4 ESTIMACIÓN EN TERRENO DE REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA EL GRADO DE HUMEDAD ÓPTIMA.

Si no cuenta con equipo para determinar la humedad óptima, la humedad neta a ser agregada puede ser estimada en terreno.

- a) Mida 100 gramos de suelo de la sección preparada de camino.
- b) Agregue cantidades medidas de formulación diluida del aditivo (diluida en 1 parte del aditivo por 500 partes de agua) a la muestra de suelo, hasta que pueda formar con la muestra una bola en una mano. Cuando haya

alcanzado la humedad óptima, la bola húmeda de suelo retendrá su forma y dejara solo una breve película de humedad en la palma de la mano.

- c) Tome nota de la cantidad total de agua con el aditivo, expresada en mililitros, que haya agregado al suelo para que alcance su nivel de humedad óptima (paso 2).
- d) Divida el número de mililitros de agua por los 100 gramos de suelo. El porcentaje resultante se utiliza en la hoja de trabajo "Estimación de Requerimientos de Agua" línea I, como el estimado de agua necesaria para mojar adecuadamente la sección preparada de camino.

Herramientas utilizadas para estimar los requerimientos de agua para alcanzar el grado de humedad óptima en un camino de uso del aditivo.

- ✓ Un cuentagotas o gotero graduado (0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5 ml)
- ✓ Un litro de agua mezclado con 2 ml de aditivo.
- ✓ Un recipiente, de por lo menos medio litro, para mezclar.
- ✓ Un vaso de unos 100 ml (para contener 100 gramos de suelo)

CONCLUSIONES

- ✓ Se verificó que en la zona estudiada predominan los suelos limo-inorgánico altamente plástico (MH) y arcilla-inorgánica (CH) con presencia de materia orgánica en los estratos más superficiales, presentando en general un estado compacto.
- ✓ Una de las variables que más afecta la calidad de la compactación y que presenta grandes dificultades para su control en el campo es el contenido de humedad en el suelo. Los mejores resultados se dan al proporcionar al suelo una humedad cercana a la óptima, ya que esto asegura la obtención de los mayores pesos volumétricos al compactarlo. Los grados de compactación obtenidos en esta investigación no son los mayores que pueda presentar el suelo, ya que la humedad de compactación medida en el campo fue en la mayoría de los casos mayor que la humedad óptima calculada en el laboratorio.
- ✓ De lo observado en la prueba de permeabilidad, no se puede generalizar ningún grado de filtración en ambas muestras ensayadas con y sin enzimas orgánicas sin embargo, el suelo es lo suficientemente impermeable bajo cualquier condición de humedad.

RECOMENDACIONES.

- ✓ Es fundamental definir previamente las cargas a la que estará sometido el suelo a ensayar en laboratorio, para poder simular estas condiciones lo mejor posible, y obtener así resultados congruentes con el problema a solucionar.

- ✓ Cada tipo de suelo de cada proyecto específico debe ser estudiado detalladamente (debe conocerse su contenido óptimo de humedad, su comportamiento mecánico, su granulometría), ya que esta información, combinada con el conocimiento de la eficiencia y rendimiento de los equipos disponibles y la calidad de la mano de obra, proporciona el marco ideal para proporcionar las mejores soluciones a los problemas de mejoramiento del suelo para usos ingenieriles.

CAPÍTULO III

**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN
DE RESULTADOS**

INTRODUCCIÓN.

Uno de los objetivos principales de la presente investigación es determinar las variaciones sustanciales en la estabilización de suelos arcillosos con enzimas orgánicas, analizando los datos a partir de resultados experimentales de gráficas y tablas, elaboradas para cada tipo de suelo para hacer una comparación de resultados con y sin enzimas orgánicas; se presenta un cuadro con los resultados que permiten evaluar los datos obtenidos al adicionar enzimas orgánicas a suelos cohesivos, obtenidos desde el punto de vista físico – mecánico en cada uno de los ensayos realizados a los dos tipos de suelo muestreados, estos ensayos fueron granulometría, hidrómetro, límites de consistencia, como parámetros utilizados para la clasificación del suelo. Al determinar los límites líquido y plástico bajo el efecto de la enzima orgánica se observó su variación, también se encontró la relación peso volumétrico seco-humedad para obtener los pesos volumétricos seco máximo y el porcentaje de humedades óptimas, realizando el ensayo de CBR para conocer la capacidad cortante de los suelos arcillosos, y a la vez poder comparar estos valores a diferentes edades después de haber empleado el estabilizante de enzimas orgánicas.

3.0 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

El fin primordial de este estudio de suelos arcillosos es determinar sus propiedades mecánicas naturales a partir de una serie de ensayos de laboratorios. Las pruebas de laboratorios se realizaron sin y con aditivo, en las muestras recolectadas en Chalatenango y Morazán respectivamente, presentando a continuación en forma de tablas y resúmenes el análisis e interpretación de esos resultados. El muestreo se realizó de acuerdo a los dos bancos de suelos arcillosos establecidos Cerro Pacho y Cerro Cirimba, seleccionando y recolectando muestras de suelo alteradas, estas se protegieron de la pérdida de humedad y del deterioro durante el transporte, para conservar las condiciones originales del sitio de donde fueron extraídas, en lo referente al uso del suelo para esta investigación que es para la base y sub-base de carreteras.

3.1 GRANULOMETRIA.

Los ensayos de laboratorio se realizaron a muestras alteradas obtenidas de la zona norte del país, obteniendo los porcentajes de los distintos diámetros de partículas que componen el suelo para su clasificación (ver Tabla 3.1). Se utilizó el método del análisis mecánico según la norma de la ASTM D422-90. El ensayo se realiza tamizando el suelo en mallas de diferentes diámetros (No. 4, 8, 16,30,50,100,200) con el cual se determina el porcentaje de suelo que pasa en cada una de ellas, esto define las curvas granulométricas obtenidas en la figura 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación de los suelos del Cerro Pacho y Cerro Cirimba de acuerdo al análisis granulométrico realizado, ASTM D 422 - 90 y la identificación de suelos.

Localización del proyecto	Tipo de muestra	Resultados de análisis granulométrico	Porcentaje de suelo retenido en la malla #200	Clasificación del suelo según resultados de la identificación del suelo y de análisis granulométrico *	Color de la muestra
Cerro Pacho Chalatenango	Suelo Natural	93.4% pasa la maya #200	6.6%	CH	Café rojizo
Cero Cirimba, Morazán	Suelo natural	93.1 % pasa la maya #200	6.9%	MH	Café claro

Ver la clasificación de los suelos arcillosos en la página 26 del capítulo II de este estudio.

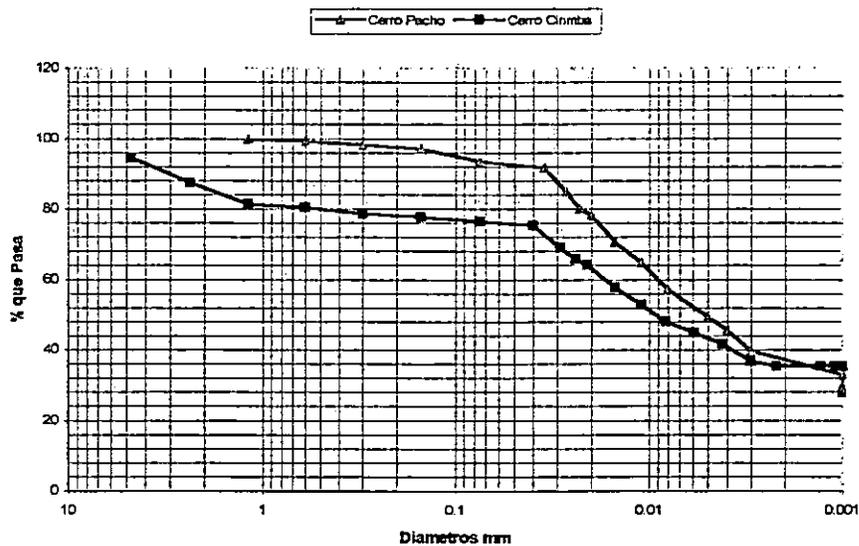
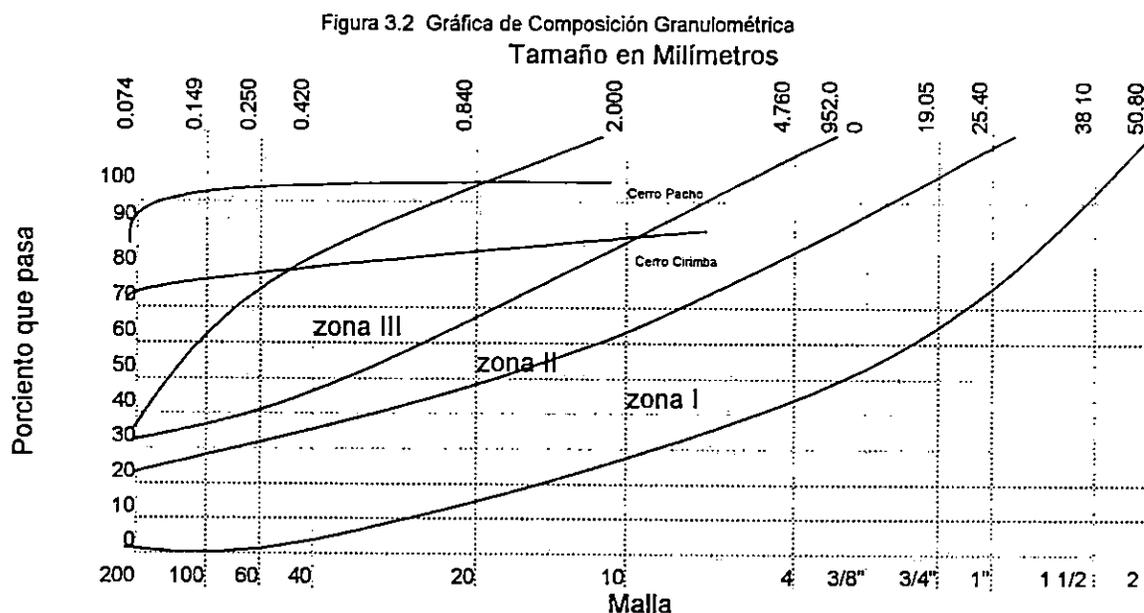


Fig. 3.1 Comparación de curvas granulométricas para ambos suelos (Chalatenango, Morazán)

Se determina que ambas muestras de suelos son Limo Inorgánico MH, y arcillas inorgánicas CH, que respecto al fenómeno de licuación no les afecta

debido a su compacidad, y la resistencia a la tubificación es de media a alta, y posee buena manejabilidad (ver anexo 3A).

Las especificaciones de granulometría para los suelos utilizables en base y sub-base de carreteras, que según la Secretaría de Asentamientos y Obras Públicas de México (ver figura 3.2), se refieren a los resultados de suelos que estén dentro de la zona I y que además tengan sensiblemente la misma curvatura que sus líneas límites. En este estudio de los suelos arcillosos MH y CH las líneas de las gráficas obtenidas del análisis granulométrico caen dentro de la zona III pero no tienen la misma curvatura que la de las líneas limítrofes de esa zona, indicando deficiencia para suelos utilizables en base y sub-base de carreteras.



Fuente: Tomado de Fernández Loiza, Carlos, Mejoramiento y Estabilización de Suelos, primera edición, México 1982

3.2 METODO DEL HIDROMETRO

En el análisis con el método del hidrómetro, se obtuvo un estimado de la gráfica del análisis granulométrico mecánico, teniendo como objetivo principal obtener el porcentaje de arcilla más fino que 0.002mm ya que la curva de distribución granulométrica por el método mecánico es poco confiable debido a que más del 12% del material pasa el tamíz N° 200. En las tablas 3.2a y 3.2b se muestran los valores para los dos tipos de suelo arcillosos del cerro Pacho y del Cerro Cirimba específicamente, donde se puede apreciar que el porcentaje de granos más finos corresponden al suelo de Chalatenango, ambas representaciones están graficadas anteriormente en la figura 3.1.

Tabla 3.2a Determinación de valores de la prueba del hidrómetro para Cerro Pacho, Chalatenango

Tiempo Transcurrido en min.	Temperatura °C	Porcentaje más fino	L/T	K	D(m)
1	27.0	99.80	8.100	0.01298	0.035
2	27.0	99.20	4.400	0.01298	0.027
3	27.0	98.10	3.070	0.01298	0.023
4	27.0	97.00	2.320	0.01298	0.020
8	27.0	93.40	1.250	0.01298	0.015
15	27.0	91.50	0.700	0.01298	0.011
30	27.0	84.80	0.370	0.01298	0.008
90	27.0	80.00	0.130	0.01298	0.005
150	27.0	78.10	0.080	0.01298	0.004
270	26.5	70.50	0.050	0.01000	0.003
1225	25.0	64.80	0.011	0.01327	0.001
1701	25.3	57.20	0.008	0.01323	0.001
2358	25.5	49.50	0.006	0.01320	0.001
2750	27.0	45.70	0.005	0.01318	0.001
3813	26.0	39.70	0.004	0.01312	0.001
4213	26.0	33.00	0.003	0.01312	0.001

Tabla 3.2b Determinación de valores de la prueba del hidrómetro para Cerro Cirimba, Morazán

Tiempo Transcurrido en min.	Temperatura °C	Porcentaje más fino	L/T	K	D(m)
1	27.0	94.40	8.8000	0.01333	0.0400
2	27.0	87.40	4.7000	0.01333	0.0290
3	27.0	81.30	3.2300	0.01333	0.0240
4	27.0	80.30	2.4800	0.01333	0.0210
8	27.0	58.60	1.3100	0.01333	0.0150
15	27.0	77.70	0.7400	0.01333	0.0110
30	27.0	76.30	0.3830	0.01333	0.0082
60	27.0	75.30	0.1980	0.01333	0.0059
120	27.0	68.90	0.1020	0.01333	0.0042
241	26.3	65.70	0.0530	0.01348	0.0030
482	25.4	64.10	0.0270	0.01363	0.0022
1292	26.0	57.70	0.0100	0.01348	0.0013
1784	25.2	52.90	0.0072	0.01363	0.0011
2750	26.3	48.00	0.0047	0.01348	0.0010

Por lo general es necesario medir el PH de los suelos para realizar el análisis granulométrico por el método del hidrómetro, ya que en consecuencia podrá juzgarse la aptitud de un suelo para que sea estabilizado mediante la intensidad de la acidez de una solución de suelo en agua. En el caso de las dos muestras arcillosas de Chalatenango y Morazán analizadas, se obtiene un PH de 5.0 para ambas, constituyendo los suelos arcillosos CH y MH con sustancias ácidas (ver tabla 3.3)

Tabla 3.3 Valores de PH para diferentes tipos de suelos

PH = 7	Sustancias neutras
$0 \leq \text{PH} < 7$	Sustancias ácidas
$7 < \text{PH} \leq 14$	Sustancias Básicas

Fuente: (Tomados de "Estabilización de Suelos", Baleato Torrento Manuel, 3ª Edición, España 1974)

De acuerdo a los diámetros de la tabla 3.2a y 3.2b y la forma de la curva mostrada en la figura 3.3, se tiene la idea inmediata de la distribución granulométrica del suelo, experimentando, que ambos suelos están constituidos por variedad de tamaños, indicando suelos bien graduados.

3.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA

Luego de sacar cada muestra del suelo al aire, este se tamizó a través de la malla No. 40 y se procedió a realizar el ensayo de límite líquido, con el suelo que pasó esta malla. Los resultados del ensayo del límite líquido y límite plástico para cada sitio es el que se muestra a continuación en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Resultados del límite líquido y límite plástico para cada muestra.

Localización	Cerro Pacho Chalatenango				Cerro Cirimba Morazán			
	Sin aditivo	Con Aditivo			Sin aditivo	Con Aditivo		
Tipo de Muestra								
Días	--	7	14	21	--	7	14	21
Límite Líquido	67.8%	67.6	65	61.5	66.5%	66.3	65.8	63.7
Límite Plástico	30.8%	31.1	32.5	34.5	34.5%	34.8	38.6	44.4
Índice de Plasticidad	37.0%	36.5	32.5	27.0	32.0%	31.5	27.2	19.3

Los suelos CH y MH son considerados altamente plásticos debido a que los índices de plasticidad, tabla 3.4, son mayores de 17% según Atterberg, sin

embargo al tratar suelos altamente plásticos existe propensión a padecer cambios de volumen en presencia de diferentes contenidos de humedad, tales efectos son reducidos con la adición de enzima orgánica; para el límite líquido de Chalatenango reduce de 67.8% a 61.5%, y en Morazán de 66.5% a 63.7% , mientras que el índice de plasticidad disminuye considerablemente de 37% a 27% en Chalatenango, y de 32% a 19.3% en Morazán sin llegar en ningún caso a 17%; los valores de los índice de plasticidad mostrados establecen un rango de disminución de volumen por los cambios en la humedad a edades de 17, 14 y 21 días, ambos suelos cambian de volumen de pequeño a moderado , y pasan de una región húmeda a una región árida, según se establece en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Suelos Susceptibles a cambios de volumen por cambios de humedad

Cambio de volumen	Índice Plástico	
	Región árida	Región húmeda
Pequeño	0 – 15	0 – 30
Pequeño a moderado	15 – 30	30 – 50
Moderado a severo	≥ 30	≥ 50

Fuente: Crespo Villalaz Carlos, Mecánica de los suelos y cimentación cuarta edición , México, Pág. 86

En función de los límites de consistencia, se determina la consistencia relativa, índice de liquidez y el número de actividad, tales características se analizan en la tabla 3.6; para estimar en que medida disminuye el esfuerzo de corte, tipo de consolidación y la actividad en ambos suelos arcillosos.

Tabla 3.6 Datos de la determinación de la consistencia relativa y la variación de volumen.

Localización	Cerro Pacho Chalatenango			Cerro Cirimba Morazán				
	Sin aditivo	Con Aditivo		Sin aditivo	Con Aditivo			
Días		7	14	21		7	14	21
Consistencia relativa* $CR = \frac{LL - W_s}{IP}$	-0.007	-0.005	-0.005	-0.003	-0.012	-0.003	-0.008	-0.015
Índice de liquidez* $I_L = \frac{W_s - LP}{IP}$	1.007	1.005	1.004	1.003	1.013	1.009	1.003	1.001
Número de actividad* $A = \frac{IP}{\%Part < 0.002mm}$	0.951	0.938	0.835	0.694	0.692	0.681	0.588	0.417
Como la consistencia relativa resulta negativa, esto indica que el amasado del suelo lo va transformando en un barro viscoso y que el esfuerzo de ruptura crece significativamente a medidas que transcurre la variación del tiempo con el aditivo empleado al suelo.								
Se considera que el suelo esta preconsolidado, porque los valores obtenidos son cercanos a uno, aumentando la preconsolidación en un mínimo porcentaje.								

Los suelos arcillosos clasificados como CH y MH, contienen valores del número de actividad entre 0.5 y 1, considerando que ambas muestras de suelo poseen actividad normal, con propensión a padecer cambios en su volumen en presencia de diferentes contenidos de humedad. Los valores del número de actividad disminuye relativamente, mientras transcurre el efecto de la enzima en las edades de 7, 14 y 21 días, experimentando cambios de arcilla activa a

* Ejemplo de cálculos aplicados en el suelo arcilloso de Chalatenango a los 21 días: $CR = (61.5-61.6)/27.0 = -0.003$; $I_L = (61.6-34.5)/27.0 = 1.003$; $A = 27.0/34.5 = 0.694$

inactiva(ver tablas 3.6 y 3.7).

Tabla 3.7 Medición de la actividad de la arcilla en función de (A)

$A < 0.50$	Arcilla relativamente inactiva, tipo caolinítico
$0.5 < A < 1.0$	Arcilla con actividad normal, ilítico
$A > 1.0$	Arcilla Progresivamente más activa, tipo montmorillonítico

Tomado de Crespo Villalaz, "Mecánica de suelos y cimentación", 4ª Edición, México (1991), Pág. 80

Los límites líquidos mostrados en la tabla 3.4 se define la consistencia a diferentes edades 7, 14, y 21 días y la cantidad de agua con enzimas orgánicas que contienen en el momento de pasar de una consistencia a otra. La figura 3.3, expresa gráficamente los sucesivos fenómenos que se presentan en ambos suelos arcillosos a medida que aumentan la variación del tiempo, además de comparar los dos tipos de suelo.

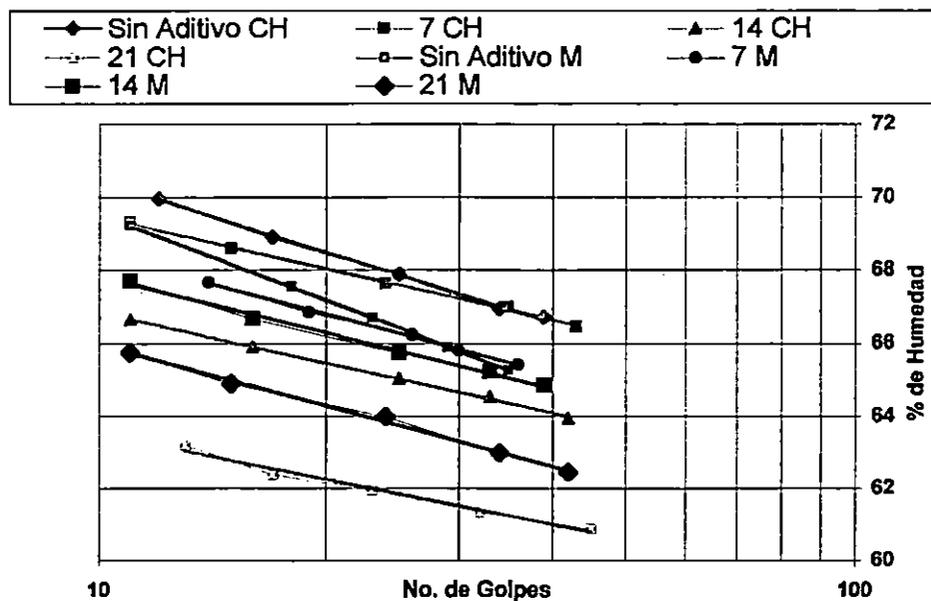


Figura 3.3 Comparación de límites de consistencia con y sin aditivos

En la representación de las curvas de los límites de consistencia mostradas en la figura 3.3 pueden observarse que el suelo con curva más plana necesita más números de golpes que el que tiene la curva más inclinada, de lo anterior se desprende que los suelos con curva plana poseen mayor resistencia al corte que aquellos que tienen curvas más pronunciadas; como en el caso del suelo sin enzimas orgánicas en Morazán que presenta la curva de los límites con pendiente más pronunciada comparada con la curva con enzimas a 21 días que es más plana; esto significa que aumenta la resistencia al corte, confirmándose más adelante con valores de CBR (ver tabla 3.8). Las curva de los límites de consistencia del suelo de Chalatenango varía de pronunciada a plana, pero en menor proporción que el suelo de Morazán.

3.4 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE , CBR.

El valor relativo de soporte, es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de humedad y densidad cuidadosamente controladas. Se expresa en porcentaje como la razón de la carga unitaria requerida para introducir un pistón dentro del suelo en estudio a una velocidad de 1.27 mm/min, respecto de la presión que hubiera sido necesaria, para introducir el mismo pistón, a la misma profundidad y velocidad en una muestra patrón, piedra partida, cuyos valores de carga unitaria de CBR edades 7,14, 21 días con enzimas orgánicas y suelo natural. Se puede observar en la tabla 3.8

que los valores de CBR cuando el suelo se ha tratado con enzimas orgánicas no se alejan con valores mayores que los CBR obtenidos en estado natural.

Tabla 3.8 Relación del Valor Relativo de Soporte aplicando enzimas orgánicas.

Tiempo	*	7	14	21
CBR (%) Cerro Pacho	5	5	7.6	8.7
CBR (%) Cerro Cirimba	6.8	7	8.6	12.4

* CBR en estado natural

En función a los valores de CBR obtenidos en ambos suelos CH y MH, se puede clasificar si son aptos para base y sub-base según las especificaciones mostradas en la tabla 3.8, de donde se extraen valores que al compararlos con los CBR, con y sin enzimas orgánicas se establece que el suelo arcilloso de Chalatenango mejora de 5% a 8.7% (CBR) considerando su clasificación de pobre a regular y su uso es subrasante y sub-base; de igual manera Morazán presenta la misma clasificación. Pero con valores de CBR de 6.8% a 12.4% mayores a Chalatenango.

Tabla N° 3.9 Calificación típica en función del CBR

Número de CBR(%)	Clasificación General	Usos	Clasificación
0-3	Muy Pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL
3-7	Pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL
7-20	Regular	Sub-Base	OL, CL, ML, SC, SM, SP
20-50	Bueno	Base, Sub-Base	GM, GC, SW, SM, SP, GP
> 50	Excelente	Base	GW, GM

Fuente: Normas y Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes FP-96, 1996, Washington, sección 703.03, pág. 668.

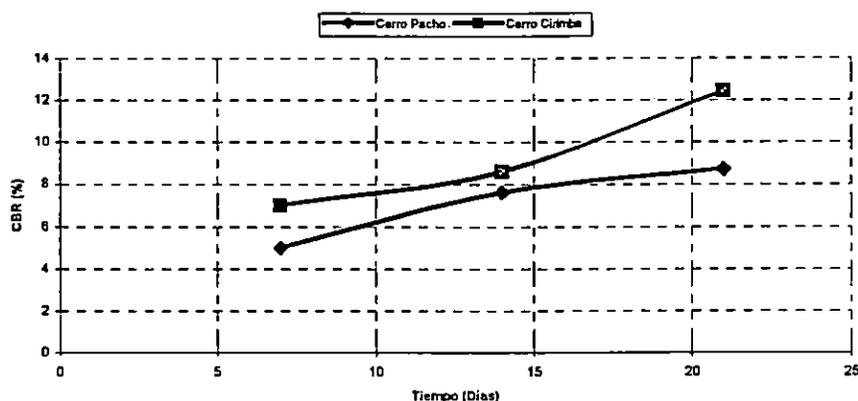


Figura 3.4 Comparación de graficas de CBR con enzimas orgánicas para ambos suelos.

Con los valores relativos de soporte calculados se construye una gráfica (ver figura 3.4), en cuyas abscisas se indica el tiempo transcurridos de 0 a 21 días de aplicada la enzima orgánica, y en las ordenadas los valores relativos de soporte correspondientes a cada tipo de suelo arcillosos. De los puntos obtenidos se gráficas curvas continua, que sirve para determinar la variación después de 7 días de empleado el estabilizante, obteniendo un aumento mayor en Morazán comparado con el de Chalatenango luego de transcurrir 14 días.

3.5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA PRUEBA PROCTOR

La prueba proctor indica el peso volumétrico seco máximo de un suelo y determina el efecto que la humedad le ocasiona a éste. Esta prueba tiene como objetivo generar una gráfica en la que se relaciona el peso volumétrico seco con la humedad del suelo, en la cual la ordenada más alta determina el peso

volumétrico seco máximo y el correspondiente contenido de humedad en el eje de la abscisas determina el contenido de humedad óptimo. En los suelos limos inorgánicos CH y MH, muestreados, se determinaron valores de pesos volumétricos seco de 1420.6 kg/m³ sin aplicar aditivo, para el proyecto de Cerro Pacho en Chalatenango y 1446.6 kg / m³ para el Proyecto de Cerro Cirimba en Morazán. Las humedades óptimas de compactación fueron de 29.8% y 25.9% respectivamente. También, se compactaron muestras de suelo de los dos lugares muestreados aplicándoles enzimas orgánica a diferentes edades (7,14,21 Días), obteniendo el peso volumétrico de 1454.61 kg/m³ para el Proyecto de Cerro Pacho en Chalatenango, y de 1489.51 kg/m³ para el proyecto de Cerro Cirimba en Morazán (Ver tabla 3.10).

Tabla No. 3.10 Valores de peso volumétrico seco máximo y contenidos de humedad óptima

Edad(Días)	Proyecto		Proyecto	
	Cerro Pacho Chalatenango		Cerro Cirimba Morazán	
	PVS máx.(kg/m ³)	Humedad óptima(%)	PVS máx.(kg/m ³)	Humedad óptima(%)
0	1420.6	29.8	1446.6	25.9
7	1421.12	30.11	1447	25.8
14	1431.48	29.91	1466.36	25.59
21	1454.61	30.1	1489.51	25.56

Con el ensayo proctor se determinan las humedades convenientes en las mezclas de suelo-enzima orgánica, en la dosificación se producen especímenes para cada muestra, experimentando acciones de carga debido al peso proporcionado de 10 lbs provocando movimientos en las partículas, en busca

de una posición de equilibrio, y ruptura de este cuando el contenido de agua aumenta, este razonamiento es contrarrestado según se ve en la tabla 3.11, ya que la humedad disminuye, evidentemente se obtienen menos probabilidad que al aumentar los valores de peso volumétricos secos, PVS máximo, la hes de ruptura.

Tabla 3.11 Relación de prueba Proctor con el tiempo, aplicando enzima orgánica.

Proyecto \ Tiempo	0	7	14	21
Cerro Pacho PVS max(kg/m ³)	1420.6	1421.12	1431.48	1454.61
Cerro Cirimba PVS max(kg/m ³)	1446.6	1447.5	1466.36	1489.51

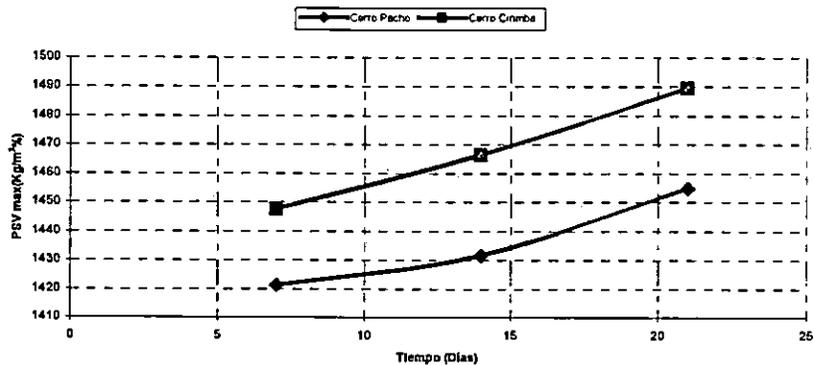


Figura 3.6. Variación de humedad y pesos volumétricos PVS máx.

Ambos gráficos de la figura 3.6 presentan la misma tendencia, ocurriendo alternativas de ascenso a partir de los 7 días de agregado el estabilizante enzimático, lo cual quiere decir que el beneficio obtenido a mayor tiempo, corresponde a una menor densidad alcanzable de 90%; pues por mucho que las partículas se compriman, a consecuencia del estabilizante y la compactación, el suelo será siempre menos denso de acuerdo al margen de tiempo analizado de 7 a 21 días.

3.6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD

El coeficiente de permeabilidad (k) es una constante de proporcionalidad de la velocidad con la que una sustancia atraviesa un medio poroso, la cual está basada en la aplicación de la ley de Darcy. Para poder efectuar la prueba de permeabilidad se usó como permeámetro el molde patrón de compactación de 4 pulgadas de diámetro, al cual se le pone en la base una piedra porosa para facilitar el flujo de agua a través de la muestra de suelo, posteriormente se sujetó en el templete - mástil una manguera para poder desarrollar una cabeza hidráulica diferencial a través de la muestra. De esta prueba se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.12

Tabla No. 3.12 Resultados obtenidos en la prueba de permeabilidad

Edad(Días) \ Proyecto	Cerro Pacho Chalatenango		Cerro Cirimba Morazán	
	PVS max(kg/m ³)	K x 10 ⁻⁷ (cm/s)	PVS max(kg/m ³)	K x 10 ⁻⁷ (cm/s)
0	1420.6	2.468	1446.6	2.942
7	1421.12	2.424	1447	2.964
14	1431.48	1.796	1466.36	2.776
21	1454.61	0.926	1489.51	1.999

Según los datos observados en la tabla anterior, los valores de permeabilidad obtenidos para el Cerro Pacho son mayores los porcentajes que los generados para Cerro Cirimba, además se analizan los valores de K encontrados observando resultados menores en proporción variable con el tiempo con la misma cantidad de enzimas orgánicas (ver tabla 13) que se presenta a continuación.

Tabla 3.13 Relación del coeficiente de permeabilidad con el tiempo, aplicando enzimas orgánicas.

Proyecto \ Tiempo	0	7	14	21
Cerro Pacho (K x 10 ⁻⁷)	2.468	2.424	1.796	0.926
Cerro Cirimba (K x 10 ⁻⁷)	2.942	2.964	2.776	1.999

Con los valores calculados se construyen las gráficas de figura 3.7, en cuyas abscisas se indican los valores del coeficiente de permeabilidad (k) y en las ordenas los valores correspondiente al tiempo transcurrido en días.

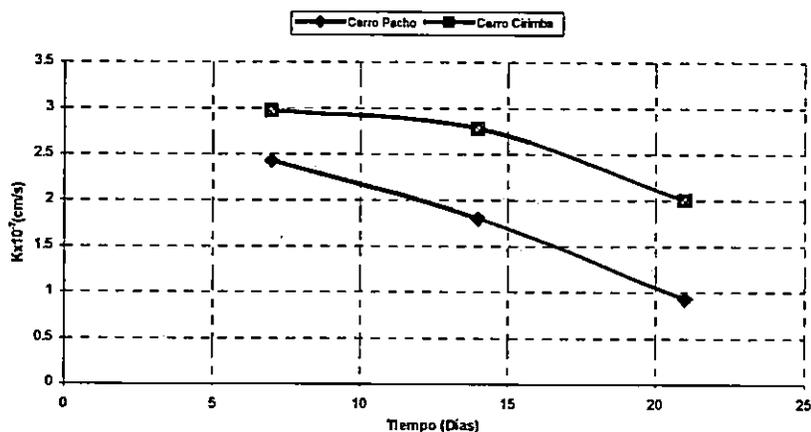


Figura 3.7 Gráfica de resultados de la prueba de permeabilidad

Ambas gráficas presentan los resultados obtenidos en el laboratorio experimentando que tanto el suelo arcilloso o MH de Chalatenango como el de Morazán presentan reducción de cavidades, o una disminución a las edades de 7 a 21 días de aplicado el estabilizante, esto significa que los valores de los coeficientes de permeabilidad sufren descensos hasta los 21 días estipulados en ambas muestras.

3.7 ANALISIS GENERAL

Al observar los resultados proporcionados por las pruebas de laboratorio para los dos sitios estudiados donde se encuentran los bancos de suelos arcillosos CH y limos inorgánicos MH, se pueden establecer lo siguiente:

- ✓ Según las curvas granulométricas y las pruebas de identificación, de los suelos del Cerro Pacho en Chalatenango y del Cerro Cirimba en

Morazán, son en general suelos bien graduados que pueden clasificarse como CH y MH, altamente plásticos.

- ✓ La prueba Proctor indicó que la densidad máxima seca del suelo en el banco del Cerro Pacho en Chalatenango con aditivo se redujo de 1421.12 kg/m³ a 1454.61 kg/m³, determinando el efecto de la humedad en el peso volumétrico de este.
- ✓ Las pruebas realizadas son detalladas en el cuadro de "información sobre el número de pruebas para cada sitio" ver anexo 3B; y en resumen para cada lugar puede explicarse que existen variables que pueden ser
- ✓ controladas en el campo³⁴, y que no se han verificado en el laboratorio, tal es el caso del análisis de muestra de suelos compactados en campo de donde pueden existir cambios en la composición granulométrica al ser compactados; en efecto si se aplica demasiada energía de compactación, el suelo puede cambiar significativamente su granulometría al pulverizarse, y degradarse sus partículas. De la información obtenidas en el laboratorio y de las características mostradas en ambos suelos, se procede a establecer las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

³⁴ Ver descripción de procedimientos utilizado en el campo página 107, cap II, tomado del folleto técnico de Terrazyme, Teknova S.A. de C.V.,

CONCLUSIONES

- ✓ Según el análisis volumétrico de los dos tipos de suelos ensayados, se determina que son arcilla inorgánica CH y limo inorgánico MH, y de acuerdo con las normas ASTM D421 90 y ASTM D422 90, estos suelos no reúnen las condiciones necesarias para el empleo en base y sub-base de carreteras, debido a que no cumplen las especificaciones de la norma ASTM D-1883, según la guía de diseño de pavimento³⁵
- ✓ Los suelos arcillo-limosos inorgánicos CH y MH del Cerro Pacho en Chalatenango y del Cerro Cirimba en Morazán, se determina que a los 7, 14 y 21 días de haber sido tratados con enzimas orgánicas, la humedad fue reducida en un 12% experimentando reducción de volumen.
- ✓ En los ensayos de límites de consistencia, se experimentó que las muestras con suelo natural y las tratadas con enzimas orgánicas, registraron disminuciones al cabo de tres semanas de 36.5% a 27% con enzimas orgánicas en Chalatenango, y de 31.5% a 19.3% con enzimas orgánicas en Morazán; las variaciones que se registraron podrían ser ventajosas y dependerá del rango de plasticidad establecido en cada proyecto, sin embargo este resultado no represento mejora sustancial.

³⁵ Guía de diseño de pavimento, publicaciones AASHTO USA, 1993, pág. 1-21A

- ✓ Se comprobó en el laboratorio los efectos de la enzima orgánica sobre los suelos cohesivos con resultados en la disminución de la expansión al someter las muestras a saturaciones para el CBR, al cabo de 21 día de aplicar la enzima orgánica obteniendo de 5% a 8.7% (Chalatenango), y de 7% a 12.4% (Morazán) sin que está mejora represente efecto sustancial de resistencia para tal fin.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda analizar en investigaciones posteriores que los suelos experimentan cambios en su granulometría después de realizados los ensayos de compactación, de esta forma se podría realizar ensayos granulométricos complementarios después compactar.
- ✓ En base a los resultados obtenidos en los dos tipos de suelo con y sin enzima orgánica, se recomienda para futuras investigaciones que se profundice en lo siguiente:
 - a) Efectos de la compactación en la granulometría de los suelos.
 - Determinar la variación de la granulometría antes y después de haber sido mezclado en suelo natural con enzimas orgánicas.

- b) Verificar el grado de compactación del suelo al aumentar el tiempo de 3 semanas. determinar alternativas de compactación de campo.
 - Las densidades máxima de compactación obtenidas en campo, comparadas con las proporcionadas, con las pruebas típicas de laboratorio.
- ✓ Se recomienda realizar un muestreo en otros sitios y realizar un mayor número de ensayos, para que se puedan analizar estadísticamente y que generen una tendencia más exacta, en la determinación de parámetros que se involucran en la obtención de las propiedades mecánicas de los suelos, ya que los datos obtenidos del presente estudio no pueden ni deben tomarse como generalidad en todos lo tipos de suelos sino más bien de forma particular para los suelos de Cerro Pacho y Cerro Cirimba de Chalatenango y Morazán respectivamente como datos experimentales.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

INTRODUCCION

De la información obtenida del trabajo del laboratorio, y de las características mostradas por los dos tipos de suelos con y sin enzimas orgánicas, en este capítulo se establecen las conclusiones y recomendaciones, las cuales hacen referencia a la comparación entre los dos tipos de suelo recolectados en el Cerro Pacho, Chalatenango y el Cerro Cirimba, Morazán, ambos suelos se analizan adicionándoles enzimas orgánicas para determinar el rango de variación en los parámetros calculados, límites de consistencia, proctor, CBR y permeabilidad. Los valores obtenidos en los ensayos aunque reflejan diferencias incrementales, éstas, no son suficientes para considerar que son sustanciales en el mejoramiento de esos parámetros, observados después de tres semanas de haber tratado los suelos con enzimas orgánicas.

Estos suelos arcillo-limosos inorgánicos CH y MH, siendo homogéneos, poseen baja resistencia y son plásticos, lo cual permite un mejor estudio de cómo son sus características físico-mecánicas en estado natural para ser tratados con enzimas orgánicas.

CONSIDERACIONES

- a) Sobre la estabilización de arcillas con enzimas orgánicas del Cerro Pacho en Chalatenango y Cerro Cirimba en Morazán de la zona norte del país, para el uso en base y sub-base de carreteras; se considera que las propiedades de las arcillas pueden estar alteradas de muchas formas como por acción de medios mecánicos, drenaje, medios eléctricos, cambios de temperatura, también pueden ser alteradas por acción química con enzimas orgánicas como en este caso experimental. Debe tenerse presente que debido a la gran variedad de suelos, en el país cada método de estabilización de suelo resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos. Ya que a cortas distancias el suelo cambia, de tal manera que aplicando un sistema de estabilización para suelos que no cumplen con la resistencia para la aportación de carga, durabilidad o funcionamiento, se debe dar un tratamiento apropiado. La estabilización es una forma que ayuda a mejorar las propiedades físico-mecánicas de un suelo, por consiguiente se debe tener apreciación específica de las propiedades que se desean mejorar.

Este estudio se hizo para dos lugares específicos, el Cerro Pacho en Chalatenango y el Cerro Cirimba en Morazán, en cada uno se obtuvieron muestras y se realizaron ensayos de granulometría, límites de consistencia, Proctor, CBR y permeabilidad; con la finalidad de obtener los parámetros necesarios para evaluar la comparación de resultados con y sin

enzimas orgánicas; a partir de los resultados obtenidos y del análisis comparativo entre los dos tipos de suelo y la adición de enzimas orgánicas en ambos suelos, siendo cada uno de estos estratos de suelo aproximadamente homogéneos y con una baja resistencia, lo cual permite un mejor estudio de cómo afecta sus características física – mecánicas, dado lo susceptibles que son a deformarse.

- b) Para la estabilización de suelos con enzimas orgánicas, es importante realizar una minuciosa clasificación y conocer el pH, dado que estos elementos constituyen la base para seleccionar la proporción y cantidad del estabilizador, para el caso de estos suelos CH y MH se utilizó un litro de agua mezclado con 2 mililitros de enzimas orgánicas; y va a depender del uso que se pretenda dar al suelo.
- c) La base y la sub-base de las vías no revestidas están expuestas a factores naturales como, humedad, resequedad, y otros como el incremento de tráfico, exigiendo un mantenimiento más continuo; este último se ve fuertemente disminuido por la prioridad en las vías de menor categoría principalmente en el área rural y las que llegan a cantones y caseríos más alejados, de las cuales se extraen muchos beneficios como el traslado de café, caña y granos básicos, etc.

CONCLUSIONES

1. Según el análisis visual realizado en el laboratorio a las muestras de suelos arcillosos de Chalatenango y Morazan, presentan color café rojizo y café claro, indicando un grado de intemperismo avanzado debido a la descomposición de minerales como silicio, hierro y su oxidación con el agua. Esto es característico de la zona norte llevando a esperar condición físico-mecánicas desfavorables al uso en estado natural para base y sub-base.
2. Al comparar las curvas granulométricas para ambos suelos del Cerro Pacho en Chalatenango y el Cerro Cirimba en Morazán, se determina que el mayor porcentaje de finos corresponde al suelo del Cerro Pacho en Chalatenango con un porcentaje de 93.4%, y de 91.3% para el suelo del Cerro Cirimba en Morazán, de donde se determina que ambos suelos son CH y MH pero con diferente granulometría, experimentando mayor cantidad de gruesos correspondientes al suelo de Morazán.
3. Los suelos arcillo-limosos inorgánicos CH y MH analizados de Chalatenango y Morazán, no cumplen con los requisitos granulométricos establecidos para base y sub-base de carreteras, ya que ambas curvas granulométricas no caen dentro de la zona requerida, según las gráficas tipo de la figura 3.2 de la Secretaría de Asentamientos Humanos Obras Públicas de México, lo cual indica que ambos suelos arcillosos deben ser mejorados, con la adición de enzimas orgánicas.

4. Los suelos estudiados de Chalatenango y Morazán tienen un pH de 5, por lo que se utiliza silicato de sodio como defloculante, indicando que ambas muestras de suelo tienen un pH entre 0 y 7 determinando que son sustancias ácidas, lo cual significa que la acidez siempre es desfavorable para la estabilización.
5. Al comparar las graficas de límites líquidos con y sin enzimas orgánicas de los dos tipos de suelo analizados, se observó que en las gráficas 3.3 del suelo de Chalatenango se necesitó de un mayor número de golpes comparado con el suelo de Morazán; indicando que el suelo de Chalatenango tiene mayor viscosidad ya que retuvo menor porcentaje de humedad.
6. La energía de compactación inducida fue de 56,200 lb/pie³ sobre las dos muestras de suelo CH y MH tratadas con enzimas orgánicas, determinando que los mayores pesos volumétricos secos (PVS_{máx}) obtenidos fueron de 1454.61 Kg/m³ en Chalatenango y 1489.51 Kg/m³ para Morazán, tres semanas después de aplicar enzimas orgánicas, determinando un incremento en el peso volumetrico del suelo respecto a los valores menores de PVS máx de 1420.60 Kg/m³ y 1446.60 Kg/m³ en estado natural; en efecto las reacciones generadas por la enzima orgánica mejoran ambos suelos arcillosos pero no de forma sustancial.
7. Los CBR máximos con enzimas orgánicas obtenidos, para los suelos del Cerro Pacho en Chalatenango y del Cerro Cirimba en Morazán, son de 8.7%

y 12.4% después de 21 días de aplicada la enzima orgánica respectivamente. Los valores de CBR de 5% y 7% corresponden al estado natural, sin agregar enzimas orgánicas; en ambos suelos arcillosos aumento el CBR indicando mejora. Por lo que corresponderá también a la resistencia a los esfuerzos cortantes del suelo estabilizado después de 21 días de tratamiento.

8. Considerando que ambos suelos arcillosos CH y MH con enzimas orgánicas tienen una clasificación general de regular, según la clasificación típica en función del CBR en la tabla 3.9; los resultados experimentales 8.7% y 12.4% a los 21 días, para cada muestra, estos son muy menores al 20% ó más requerido para base y sub-base. Por lo tanto los suelos analizados del Cerro Cirimba Morazán y el Cerro Pacho en Chalatenango al agregarle enzimas orgánicas, solo pueden ser usados para la estabilización de subrasante de caminos.
9. La permeabilidad obtenida de ambas muestras de suelos compactadas en el laboratorio indicó que el coeficiente de permeabilidad pasó de 2.46×10^{-7} cm/seg a 0.92×10^{-7} cm/seg. en el Cerro Pacho Chalatenango y de 2.94×10^{-7} cm/seg. a 1.99×10^{-7} cm/seg. en el Cerro Cirimba, después de 21 días de saturación, lo que disminuye la posibilidad de circulación de agua a través de éstos; por lo que no sería justificable gran cantidad de tiempo en la realización de estas pruebas con y sin enzimas orgánicas.

10. En las pruebas realizadas en la presente investigación no se alcanzó a demostrar sustancialmente que la muestra de suelo-enzima orgánica supere valores al 90% de compactación; ya que en los ensayos los suelos CH y MH, con enzimas orgánicas se alcanzaron porcentajes menores al especificado por la norma AASHTO T-180.

RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda inspeccionar las propiedades del suelo, y las condiciones ambientales, que son de gran importancia en el uso del suelo ingenieril, y en particular de los suelos a estabilizar; tomando como factor muy importante el contenido de humedad en estado natural, así como el color, textura y composición granulométrica.
2. El análisis granulométrico por el método mecánico y por el método del hidrómetro se realizaron sólo a suelos en estado natural o sea sin enzima orgánica, pero sería recomendable realizar ensayos a suelos con enzimas orgánicas a investigaciones o proyectos específicos para verificar cualquier variación que tienda a cambiar el estado de composición granulométrica u otras propiedades físico-mecánicas.
3. La gráfica de comparación de límites de consistencia con y sin enzimas orgánicas, figura 3, puede ser perfeccionada al realizar mayor número de

pruebas en los suelos finos, para obtener más datos depurados de los límites líquido y límite plástico.

4. Realizar ensayos de carga considerando los asentamientos como factor crítico, definiendo antes, las cargas a las que estará sometido el suelo a ensayar en laboratorio, para poder simular estas condiciones lo mejor posible, y obtener así resultados congruentes.
5. Usar la estabilización como medida correctiva así como preventivamente para la seguridad contra condiciones adversas que se desarrollen durante la construcción o durante la vida de la carretera, por ejemplo inundación, desgaste del rodaje, etc.
6. Al estabilizar suelos, utilizar agua en condiciones ambientales no contaminada ya que provocaría cambios en la reacción de la enzima orgánica y los datos de los ensayos de campo no coincidirían con los datos de las pruebas en el laboratorio.
7. Investigar más sobre los suelos finos del país ya que cada uno presenta sus propias características a fin de obtener y generar gráficas o tablas disponibles para poder definir el tipo de aditivo y/o su proporción entre los diferentes estabilizadores que se encuentran comercialmente.
8. Se recomienda que ambos suelos arcillo-limosos CH y MH, de Chalatenango y Morazán sean usados solamente en subrasante.
9. Seguir experimentando en el área de estabilización de los suelos con materiales estabilizados de diversos tipos tradicionales y no tradicionales así

con los varios tipos de suelos en carreteras y caminos para mejorar su portación de carga y vida útil, y poder reducir los costos de mantenimiento de las vías del país.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aquino Cerna, M. (1999). Comportamiento del Cemento como estabilizador de distintos suelos. Trabajo de graduación, Ing. Civil, FIA-UES.
2. Barahona Melendez, M; y otros (1996). Análisis de las Propiedades Mecánicas del Suelo Compactado en el Area Metropolitana de San Salvador. Trabajo de Graduacion, Ing. Civil, FIA-UES.
3. Bosoain, Eduardo. (1985). Mineralogía de las arcillas. 1ª Edición. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. San José, Costa Rica.
4. Crespo Villalaz, Carlos. (1994). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. 4a. Edición. Editorial Limusa, S.A de C.V. México.
5. Departamento de Transporte U.S. (1996), FP-96, Normas y Especificaciones para Construcción de Puentes y Carreteras. Washington D.C. EE.UU.
6. Fernández Loaiza, C. (1982). Mejoramiento y Estabilización de Suelos. 1a. Edición. Editorial Limusa, México.
7. Gochez, Ricardo Antonio (1969). La Arcilla Estabilizada como Material de Construcción. Trabajo de Graduacion, Ing. Civil, FIA-UES.
8. Guerrero, L. y otros (1992). Estudio Experimental de las arcillas negras de Pasaquina, para su utilización como material de construcción. Trabajo de graduación, Ing. Civil, FIA-UES.

9. Graux, Daniel. (1975). Fundamentos de Mecanica de Suelos. Proyecto de Muro y Cimentaciones. 2ª. Edicion. Maignon Barcelona Espana.
10. Jeuffroy, Georges (1977). Proyecto y Construccion de Carreteras. Tomo II. Editores Técnicos Asociados S.A. Madrid, España.
11. John M. Wood (1974). Las Enzimas y el Medio Ambiente. 1ª Edición. Editorial Limusa Mexico.
12. Manual Técnico del Sistema TERRAZYME (1999), Teknova S.A de C.V.
13. Navarro Alvar Jose M, (1982). Tecnologia de las tierras de moldeo para fundicion, 1ª Edicion, Editorial Montecorvo, Madrid, España.
14. Torrento Baleato Manuel (1974), Estabilizacion de Suelos, 3ª Edicion, Editores Tecnicos Asociados S.A. Madrid, España.
15. Roodyn, D.B (1975). Analisis Automatizado de Enzimas. 1ª Edicion. Editorial El Manual Moderno, S.A. Mexico D.F. Vides Tobar, Amado. (1981).

ANEXOS

CLASIFICACION DE LOS SUELOS

El objetivo de clasificar los suelos para la construcción de carreteras es predecir el comportamiento de un suelo dado, basándose en algunos ensayos simples realizados con muestras alteradas tomadas en sitios de la subrasante de proyecto. Con base en los resultados obtenidos y su correlación con la experiencia, se les identifica correctamente y se les coloca en un grupo de suelos con características y propiedades similares; esto con el fin de ampliar el conocimiento del comportamiento del suelo en estudio.

Los sistemas de clasificación de suelos más utilizados en nuestro medio son:

- 1- Sistema de Clasificación de Suelos de la AASHTO.
- 2- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS

1.7.1. SISTEMA DE LA AASHTO DE CLASIFICACION DE SUELOS

En el Sistema de Clasificación de la AASHTO, los suelos se agrupan de acuerdo a características generales de capacidad de carga y servicio, formando siete grupos básicos, designados desde A-1 hasta A-7. En general, los mejores suelos para subrasante de carreteras están clasificados como A-1, a medida que aumenta el número del grupo su comportamiento va decreciendo llegando al grupo A-7, el cual no es recomendable utilizarlo en la construcción de carreteras.

La clasificación de suelos se realiza con base en los resultados obtenidos de los siguientes ensayos:

1. Análisis de tamizado de agregado fino y grueso designación AASHTO T 27, ASTM C 136.
2. Análisis mecánico de suelos designación AASHTO T 88, ASTM D 422.

3. Límite líquido de suelos designación AASHTO T 89, ASTM D 423.
4. Límite plástico e índice plástico de suelos designación AASHTO T 90, ASTM D 424.

De acuerdo a estas propiedades, la AASHTO ha denominado a los suelos de la siguiente manera:

Suelos Granulares.

A-1; son suelos bien graduados de tamaños gruesos y finos con un débil aglomerante plástico.

A-1-a; en estos se incluye materiales predominantes de fracciones de roca o gravas, con o sin un buen conglomerante.

A-1-b; el material predominante es arena gruesa, con o sin aglomerante. Algunos suelos del grupo A-1, carecen de finos, de manera que se deberá agregar cierta cantidad de finos para su uso en sub-bases obteniendo una buena calidad de estos.

A-2; estos comprenden una amplia porción de materiales granulares que no pueden clasificarse como en el grupo A-1 por su contenido de finos y plasticidad.

A-2-4 y A-2-5; estos contienen materiales granulares con muchos finos.

A-2-6 y A-2-7; son suelos granulares con una cantidad elevada de arcillas.

Los suelos del grupo A-2 son de menor graduación que los A-1; siendo muy estables como superficie de rodamiento en períodos secos, dependiendo del tipo de aglomerante; sin embargo pueden ablandarse en períodos húmedos y en períodos secos tienden a disgregarse y formar polvaredas.

A-3; son suelos compuestos por arenas deficientes en aglomerantes. Se encuentran a menudo y son muy inestables excepto cuando están húmedas. La condición de confinamiento los convierte en bases estables de buena calidad.

Suelos finos.

A-4: son suelos comunes, predominan los limos con porcentajes pequeños de material grueso y pequeñas cantidades de arcilla coloidal firme.

A-5; son suelos raramente encontrados en la corteza terrestre, muy parecidos a los del grupo A-4, excepto porque contienen mica y diátomeas que los vuelven muy elásticos e inestables aún en estado seco, lo que los hace tenaces a la compactación.

A-6: son suelos compuestos de arcilla con un porcentaje pequeño de material grueso, poseen buena capacidad de carga al compactarse a la densidad óptima, inestables al saturarse se recomienda no compactarse a humedades por debajo de la óptima.

A-7; son suelos muy elásticos compuestos principalmente de arcillas, con presencia partículas firmes de Limos, materia orgánica y mica.

A-7-5; son suelos del grupo A-7, poseen índices de plasticidad moderados en relación con los límites líquidos, y pueden ser elásticos y expansivos.

A-7-6; son suelos expansivos con relación a los límites líquidos.

En la tabla 1.5 se muestran los grupos y subgrupos de clasificación del sistema de la AASHTO.

1.7.2. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS

Este método se basa en las características de la textura de los suelos con cantidades pequeñas de material fino. Se fundamenta en las características que determinan el comportamiento cuando son usados como material de construcción; estas características son:

1. Porcentaje de grava, arena y fracción de material menor que pasa por el tamiz número 200.
2. Curva granulométrica.
3. Características de plasticidad y compresibilidad.

La clasificación de los suelos por el tamaño de sus partículas esta dado por la tabla 1.5 que muestra la distribución de límites de fracciones de tamaño.

El SUCS asigna una letra y un nombre descriptivo para indicar sus características principales y reconoce tres divisiones principales que son: a) Partículas gruesas. b) Partículas finas. c) Partículas altamente orgánicas.

Las partículas gruesas son aquellas que al efectuar el ensayo granulométrico, el 50 por ciento o más de la muestra se retiene en el tamiz No 200. Las partículas finas son aquellas en que más del 50 por ciento pasa el tamiz No 200. Las partículas altamente orgánicas, pueden identificarse con un examen visual y están constituidos por materia orgánica en proceso de descomposición, humus, etc.

Tabla .B.1. Distribucion de Limites de Tamaños de Granos para Clasificación de Suelos

COMPONENTES	LIMITES DE TAMANO	
Canto Rodado	Sobre 75 mm	Sobre 3 plg
Grava	75 mm a 4.75 mm	3 plg a tamiz No 4
Grava gruesa	75 mm a 19.0 mm	3 plg a ¾ plg
Grava fina	19.0 mm a 4.75 mm	¾ plg a tamiz No 4
Arena	4.75 mm a 75 µ m	No 4 a No 200
Arena gruesa	4.75 mm a 2.00 mm	No 4 a No 10
Arena media	2.00 mm a 425 µ m	No 10 a No 40
Arena fina	425 µ m a 75 µ m	No 40 a No 200
Finos (arcilla o limo)	Debajo de 75 µ m	Debajo de No 200

EL SUCS reconoce 15 grupos de suelos y utiliza siglas para su identificación de acuerdo a sus propiedades físicas, las siglas utilizadas se muestran en la tabla 1.2

Los suelos de partículas gruesas están constituidos por las gravas y las arenas; mientras que los suelos finos lo conforman los limos y las arcillas. Los suelos orgánicos son formados por partículas de su mismo origen, hojas, pasto, ramas o cualquier material fibroso.

Tabla. B.2 Siglas para Identificar los Suelos de Acuerdo con sus Propiedades Físicas

COMPONENTE	SIMBOLOGIA
Canto rodado	No tiene
Guijarros	No tiene
Grava	G
Arena	S
Limo	M
Arcilla	C
Suelos orgánicos	O
Turba	Pt
Bien graduado	W
Mal graduado	P
LL alto	H
LL bajo	L

A continuación se presenta una tabla comparativa entre los sistemas de clasificación de suelos utilizados en el país, el método de la AASHTO Y EL SUCS.

Tabla B.3. Comparación de las Clasificaciones de Suelo por el Metodo de la Aashto y el Sucs

GRUPO AASHTO	GRUPO SUCS
A-1	GW, GM, GP Y SW
A-2	SC
A-3	SP Y SM
A-4	ML
A-5	CL, OL Y MH
A-6	CH
A-7	OH Y PT

PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE LAS CARRETERAS EN EL SALVADOR Y CLASIFICACION TECNICA

A. Carreteras Especiales

Son aquellas que están capacitadas para un tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) superior a 3000 vehículos, equivalente a un tránsito Horario Máximo Anual (THMA) de 360 vehículos o más, con una sección transversal de 30.80 metros de ancho de vía, con 7.30 metros de ancho de rodaje y 8.50 metros de ancho de rodamiento para puentes.

Para una carretera especial se espera un nivel de servicio con flujo libre, con velocidad de operación igual o mayor a 95 Km./h y designada a la circulación vehicular de pasajeros y de tipos livianos¹.

B. Carreteras Primarias

Son aquellas que están capacitadas para un TPDA de 2000 a 3000 vehículos, equivalentes a un THMA de 180 a 360 vehículos; con 12 metros de ancho de vía, 7.30 metros de ancho de rodaje y un mínimo de 7.90 metros de rodaje en los puentes. Una carretera primaria se espera que tenga un nivel de servicio con flujo estable, con una velocidad de operación igual o mayor al rango de 80 Km./h, y está designada a la intercomunicación entre departamentos con un flujo mixto.

C. Carreteras Secundarias

Son aquellas que están capacitadas para un TPDA de 500 a 2000 vehículos, equivalente a un THMA de 60 a 180 vehículos con una sección transversal de 9.50 metros de vía, 6.50 metros para ancho de rodaje y un mínimo de 7.40 metros de rodaje en los puentes.

En una carretera secundaria se tiene un nivel de servicio con flujo estable, está destinada a la intercomunicación entre ciudades y poblados con flujo mixto, con una velocidad aproximada de 80 Km./h.

D. Carreteras Terciarias Modificadas

Son las que están capacitadas para un TPDA de 50 a 200 vehículos, que es equivalente a un THMA de 6 a 24 vehículos; con una sección transversal de 8.0 metros de ancho de vía, 6.0 metros de ancho de rodaje y con 7.4 metros de rodaje en puentes.

Una carretera terciaria modificada posee un nivel de servicio estable, con una velocidad aproximada de 70 Km./h, está designada a la intercomunicación de poblados y su flujo es mixto.

E. Carretera Terciarias

Son las que están capacitadas para un TPDA de 50 a 200 vehículos, equivalente a un THMA de 6 a 24 vehículos; con una sección transversal de 8.0 metros de ancho de vía y 6.0 metros de ancho de rodaje y 6.5 metros de rodaje en los puentes.

Para carreteras terciarias con superficie de rodamiento de tierra se tiene un flujo de tránsito estable, una velocidad aproximada de 60 Km./h y es destinada para la comunicación entre poblados.

F. Camino Rural A

Son aquellos que están capacitados para un TPDA de 10 a 50 vehículos, equivalente a un THMA de 1 a 6 vehículos; con 5.0 metros de ancho de vía y 3.0 metros de ancho de rodamiento en puentes.

Los caminos rurales A, poseen un nivel de servicio estable con velocidades aproximadas de 50 Km./h y no son aptas para flujo mixto.

G. Caminos Rurales B

Son aquellos que están capacitados para un TPDA de 0 a 10 vehículos, equivalente a un THMA de 0 a 1 vehículos; con una sección transversal de 5.0 metros de ancho de vía y 3.0 metros de ancho de rodamiento en puentes.

Los caminos rurales B tienen un nivel de servicio estable y una velocidad aproximada de 50 Km./h y no son aptas para flujo mixto.

VISCOSIDAD DEL AGUA

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD DEL AGUA (v) (POLSE = GR/CM*SEG)
16	0.01111
17	0.01083
18	0.01056
19	0.01030
20	0.01005
21	0.00981
22	0.00958
23	0.00936
24	0.00914
25	0.00894
26	0.00874
27	0.00855
28	0.00836
29	0.00818
30	0.00801

150 años

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR^{2B}
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA

Noviembre 19 de 1850 - 2000



LABORATORIO DE AGUAS
RESULTADO DE ANALISIS

Solicitado por: Sr. Oscar Romero
Tipo de muestra: Suelo
Recepción de muestra: 12 de septiembre 2000
Fecha de análisis: 13 de septiembre 2000
Procedencia de la muestra: CHALATENANGO

DETERMINACION	RESULTADO
pH	5.0

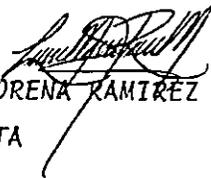
Fundamento de la Determinación:

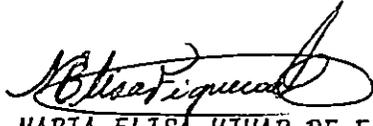
La propiedad química más importante de un suelo, como medio destinado al cultivo de plantas, es el valor de su pH o "Actividad de los iones hidrógeno". La actividad que tienen en los suelos los otros doce ó más iones que intervienen en la nutrición vegetal depende en gran medida de la del ión hidrógeno. Por lo cual, el valor del pH del suelo es la medida del potencial de la actividad de los iones hidrógeno, medido mediante un electrodo.

San Salvador, 13 de septiembre 2000.


LIC. ODETTE RAUDA ACEVEDO
ANALISTA


LIC. NANCY ZUELIMA GONZALEZ SOSA
ANALISTA


LIC. LORENA RAMIREZ MERCADO
ANALISTA


LIC. MARIA ELISA VIVAR DE FIGUEROA
JEFE DEL DEPARTAMENTO
ANALISIS QUIMICO E INSTRUMENTAL



150 años

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR^{2C}
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA



Noviembre 19 de 1850 - 2000

LABORATORIO DE AGUAS
RESULTADO DE ANALISIS

Solicitado por: Sr. Oscar Romero

Tipo de muestra: Suelo

Recepción de la muestra: 12 de septiembre 2000

Fecha de análisis: 13 de septiembre 2000

Procedencia de la muestra: GOTERA

DETERMINACION	RESULTADO
pH	5.0

Fundamento de la Determinación:

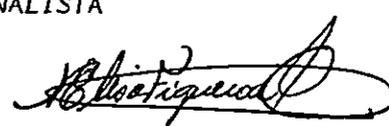
La propiedad química más importante de un suelo, como medio destinado al cultivo de plantas, es el valor de su pH o " Actividad de los iones hidrógeno ". La actividad que tienen en los suelos los otros doce o más iones que intervienen en la nutrición vegetal depende en gran medida de la del ión hidrógeno. Por lo cual el valor del pH del suelo es la medida del potencial de la actividad de los iones hidrógeno, medido mediante un electrodo.

San Salvador, 13 de septiembre 2000.


LIC. ODETTE RAUDA ACEVEDO
ANALISTA

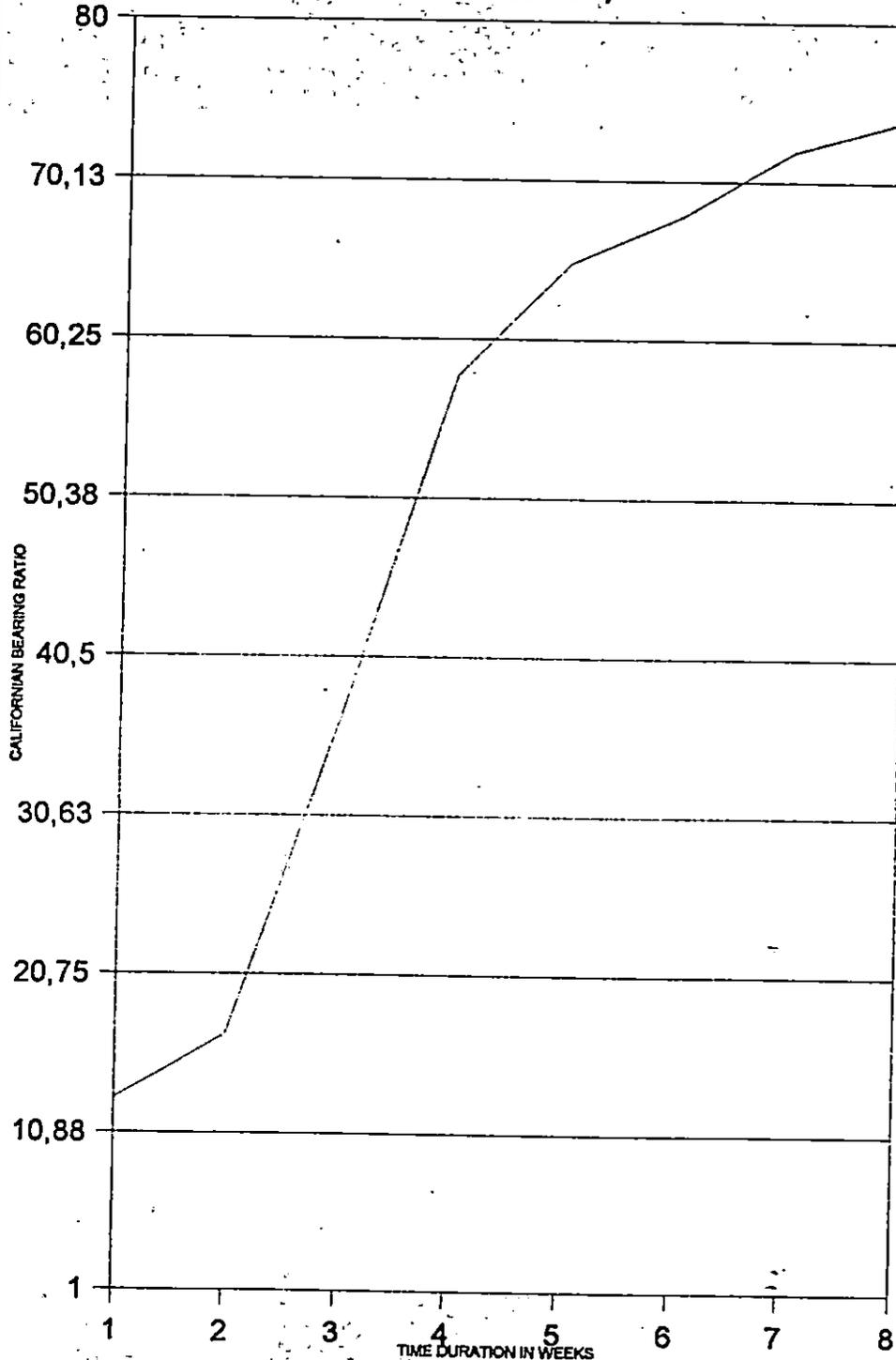

LIC. NANCY ZULEIMA GONZALEZ SOSA
ANALISTA


LIC. LORENA RAMIREZ MERCADO
ANALISTA


LIC. MARIA ELISA VIVAR DE FIGUEROA
JEFE DEL DEPARTAMENTO
ANALISIS QUIMICO E INSTRUMENTAL



**STRENGTH-TIME CURVE RELATIONSHIP
(AFTER STABILISATION)**



Strength
Continues to
Increase to
Perpetualy

TYPICAL CURVE FOR LATERITIC CLAY

COMO ESTIMAR REQUERIMIENTOS DE CONCENTRADO 1X DE TERRAZYME

Dimensiones Métricas

Nombre del Proyecto _____ Fecha : _____

	<u>Ejemplo 1</u>	<u>Ejemplo 2</u>	<u>Ejemplo 3</u>
A. Ancho del camino (metros)	4 metros	6 metros	6 metros
B. Ancho del camino (1Km = 1,000 m)	100 metros	100 metros	1000 metros
C. Profundidad de la base (15 cm = 0.15 m)	0.15 metros	0.15 metros	0.15 metros
D. Volumen de la base = A. *B. *C.	60 m ³	90 m ³	900 m ³
E. TerraZyme 1X = D/3 (L / 3 m ³)	20 litros TZ1X	30 litros TZ1X	300 lts.TZ1X

Estimación de Volumen de TerraZyme

		<u>Sección 1</u>	<u>Sección 2</u>
A. Ancho del camino	(metros)	_____ m	_____ m
B. Ancho del camino	(1Km=1,000m)	_____ m	_____ m
C. Profundidad de la base	(15 cm=,015m)	_____ m	_____ m
D. Volumen de la base	= A. *B. *C	_____ m ³	_____ m ³
E. TerraZyme 1X	=D/3 (L/3 m ³)	_____ L TZ1X	_____ L TZ1X

COMO ESTIMAR REQUERIMIENTOS DE AGUA

Dimensiones métricas

Nombre del proyecto _____ Fecha: _____

	<u>ESTIMADO</u>	<u>EJEMPLO</u>
G. Tipo de camino	_____	Sand Clay
H. Densidad del Suelo (Kg/m3)	<input type="text"/> Kgs/m3	1600 Kgs/m3
I. Porcentaje de agua requerida por paso % (Del paso #4 de Estimación en el campo de Grado de Humedad Optima) El porcentaje de agua requerida es igual a la diferencia entre el porcentaje	<input type="text"/> %	10%
J. Kg. de agua requerida por metro cubico. = J / (1Kg/m3)	_____	160 Kgs/m3
K. Litros de agua requerida por metro cubico	_____ Kgs/m3	160 Kgs./m3
D. Volumen de Suelo preparado en la sección m3 (Del paso D) = D.*K.	<input type="text"/> M3	90 M3
L. Agua requerida para la sección de camino	_____ L**	14400 L **
90% del agua requerida	<input type="text"/> L	12960 L
M. TZ 1X por cada 1.00 litro de agua	<input type="text"/> L	2,05

** (Cantidad de agua a ser colocada en el camino junto con la cantidad de TerraZyme 1X estimada en la sección previa).

Suelos de Cimentación

Clase de suelo	suelos gruesos limpios (WG, GP, SW, SP)	suelos gruesos con finos (GM, GC, SM, SC)	Suelos Finos (MH, ML, CH, CL, OL)
Permeabilidad	Permeables. Las pruebas de permeabilidad en el campo son las únicas representativas	Semipermeables a impermeables. Las pruebas de permeabilidad de campo son las más adecuadas para un contenido de finos menor del 25 por ciento.	Suelos impermeables en caso de no ser fisurados. La determinación del coeficiente de permeabilidad durante una prueba de consolidación es adecuada.
Comprensibilidad y expansibilidad	Los asentamientos son pequeños cuando los materiales son compactos y la magnitud de los esfuerzos reducida. Si los depósitos son heterogéneos pueden dar lugar a irregularidades importantes en la comprensibilidad	La comprensibilidad varía considerablemente según la compacidad del depósito. Las arenas finas limosas pueden presentar asentamientos bruscos en caso de saturarse bajo carga.	Es indispensable efectuar pruebas de consolidación en el laboratorio. Los suelos limosos no saturados pueden presentar asentamientos bruscos al saturarse bajo carga. Los suelos arcillosos en estado seco pueden presentar expansión al aumentar su contenido de agua.
Resistencia la corte	Muy variable dependiendo de la compacidad de los depósitos y su homogeneidad. Se relaciona salvo en el caso de arenas sueltas saturadas, con el número de golpes en una prueba de penetración estándar.	Es indispensable estudiarla en laboratorio efectuando pruebas triaxiales con especímenes inalterados. Se han de tomar en consideración las posibles variaciones del contenido de agua y la heterogeneidad del manto al definir las condiciones de las pruebas.	Es indispensable estudiarla en laboratorio efectuando pruebas de triaxiales con especímenes inalterados. Puede ser útil en ciertos casos efectuar una prueba de veleta
Tubificación	Salvo los materiales de los grupos SW y SP, presentan buena resistencia a la tubificación. Es muy importante en este aspecto la heterogeneidad de los depósitos.	Las arenas limosas presentan una resistencia a la tubificación media a baja, mientras los otros materiales de este grupo tiene una resistencia a la tubificación de alta a media. Es muy importante en este aspecto la heterogeneidad de los depósitos	Los limos presentan baja resistencia a la tubificación y las arcillas de media a alta. Es muy importante en este aspecto la heterogeneidad de los depósitos.
Licuación	Las arenas sueltas finas y saturadas son muy susceptibles a la licuación. Los otros materiales de este grupo son, por lo general, poco sensibles a la licuación.	Las arenas finas lomosas, uniformes y en estados suelto son muy sensibles.	Susceptibles prácticamente nula.

Fuente: Crespo Villalaz Carlos, Mecánica de los suelos y cimentación cuarta edición, México, Pág. 91

Información sobre el número de pruebas realizadas para cada sitio

-Pruebas	Muestra	Cantidad de ensayos		Ensayos realizados	Total de ensayos	Tiempo De Muestra
		Cerro Pacho Chalatenango	Cerro Cirimba Morazán			
1. Análisis Granulométrica	Sin Aditivo	1	1	2	2	Muestra de suelo natural alterada
	Con Aditivo	0	0	0		muestra de suelo alterada con aditivo
2. Método de Hidrómetro	Sin Aditivo	1	1	2	2	Muestra de suelo natural alterada
	Con Aditivo	0	0	0		muestra de suelo alterada con aditivo
3. Límites de Consistencia	Sin Aditivo	1	1	2	8	Muestra de suelo natural alterada
	Con Aditivo	3	3	6		muestra de suelo alterada con aditivo
4. CBR (Valor Relativo de Soporte)	Sin Aditivo	1	1	2	8	Muestra de suelo natural alterada
	Con Aditivo	3	3	6		muestra de suelo alterada con aditivo
5. PROCTOR	Sin Aditivo	1	1	2	8	Muestra de suelo natural alterada
	Con Aditivo	3	3	6		muestra de suelo alterada con aditivo
6. Permeabilidad	Sin Aditivo	1	1	2	8	Muestra de suelo natural alterada
	Con Aditivo	3	3	6		muestra de suelo alterada con aditivo