

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



**“GUIA BASICA PARA ESTABILIZACION DE SUELOS
CON CAL EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD
VEHICULAR EN EL SALVADOR”**

PRESENTADO POR:

**HEBER MANRIQUE HUEZO MALDONADO
ALBER CRISTIAN ORELLANA MARTINEZ**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2009

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :

MSc. ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN

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 :

**“GUIA BASICA PARA ESTABILIZACION DE SUELOS
CON CAL EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD
VEHICULAR EN EL SALVADOR”**

Presentado por :

**HEBER MANRIQUE HUEZO MALDONADO
ALBER CRISTIAN ORELLANA MARTINEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docentes Directores :

**ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES
ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA
ING. MARLON ORLANDO CÁRCAMO REYES**

San Salvador, Febrero de 2009

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. MARLON ORLANDO CÁRCAMO REYES

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS**, por habernos dado la fortaleza, todas las bendiciones y su iluminación en nuestros caminos para el logro de nuestras metas profesionales.

A la Universidad de El Salvador por habernos formado y brindado la oportunidad de crecer intelectualmente y a la vez forjarnos como personas de bien.

A las empresas e instituciones que nos colaboraron desinteresadamente durante el desarrollo de nuestro trabajo de graduación, con asesoría técnica, instalaciones y equipo de laboratorio. De manera muy especial, agradecemos a las siguientes instituciones que en su debido momento nos brindaron su valiosa colaboración:

Universidad de El Salvador (UES).

Frances Cansino S.A. de C.V. (F.C.)

Laboratorio de Suelos (HORCALSA)

A los diferentes profesionales que con su valiosa colaboración enriquecieron este trabajo brindándonos su apoyo para la elaboración del mismo, especialmente a:

Ing. Dilber Antonio Sánchez Vides. (UES)

Ing. Marlon Orlando Cárcamo Reyes. (FOVIAL)

Ing. Mauricio Ernesto Valencia. (UES)

Ing. José Miguel Landaverde. (UES)

Ing. Ignacio Frances Fadón. (FC)

Ing. Manrique Ludwinki. (HORCALSA)

Ing. Emilio Puente. (HORCALSA)

Ing. Ana Mirian Obregón. (HORCALSA)

Ing. William Olivero. (HORCALSA)

Tec. Carlos Edgardo Morataya (UES).

En general a todas las personas que contribuyeron de forma directa o indirecta a la realización del presente trabajo de graduación.

DEDICATORIA

A DIOS: Por darme la vida y por permitirme disfrutar a base de esfuerzo, logros tan importantes como este.

A MIS PADRES: Por ser mis motores impulsores, fundamentales para el logro de mis metas y por ser mi gran ejemplo de vida a seguir.

A todas las personas que incondicionalmente brindaron su ayuda para el logro de este triunfo profesional.

HEBER MANRIQUE HUEZO MALDONADO

DEDICATORIA

A DIOS: Por ser quien me permitió la vida y la oportunidad de realizar la presente investigación, así como la fuerza y la valentía para aguantar esas noches de desvelo.

A MI PADRE: Miguel Ángel Orellana, por ser quien me pago todos los años de estudio, hasta alcanzar la presente culminación.

A MI ABUELA: María de Carmen Martínez, por ser mi segunda madre, y que me apoyo con lo que podía.

A MIS HERMANOS MAYORES: Liseth Orellana, Alex Orellana y Arturo Orellana porque de alguna manera me ayudaron y apoyaron en algún momento, así también a todos mis hermanitos menores por ser mis hermanos.

A MIS ASESORES: Ing. Dilber Sánchez, Ing. Mauricio Valencia, Ing. Marlon Cárcamo, por su ayuda y colaboración en el desarrollo del tema, por forjarnos con sus conocimientos en nuestra formación académica y brindar todo su conocimiento sobre el tema.

A MI COMPAÑERO DE TESIS: Heber Manrique Huevo Maldonado por aguantar todas mis necesidades y compañía.

A MIS AMIGOS: Los que siempre me apoyaron y ayudaron.

A MI NOVIA: Sandra Rivas por siempre estar conmigo a lo largo de toda la investigación.

ALBER CRISTIAN ORELLANA MARTINEZ

INDICE

INTRODUCCION.....	XIV
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	5
1.4 ALCANCES.....	6
1.5 LIMITACIONES.....	6
1.6 JUSTIFICACION.....	7
CAPITULO II: PAVIMENTOS, SUELOS Y CAL.....	9
2.1 GENERALIDADES SOBRE LOS PAVIMENTOS.....	10
2.1.1 DEFINICION DE PAVIMENTO.....	10
2.1.1.1 Elementos que conforman la estructura del pavimento.....	10
2.1.2 LA RED VIAL DE EL SALVADOR.....	13
2.1.3 UTILIZACION DE CAMINOS DE TIERRA EN EL SALVADOR.....	13
2.2 GENERALIDADES SOBRE LOS SUELOS.....	14
2.2.1 Definición de suelo.....	15
2.2.2 Composición de los suelos.....	16
2.2.3 Definición de suelos plásticos.....	16
2.2.4 CLASIFICACION DE SUELOS EN BASE A NORMA AASHTO M 145.....	17
2.2.5 SISTEMA DE CLASIFICACION DE SUELOS SUCS (ASTM D 2487).....	20
2.3 CARACTERIZACION DE LOS SUELOS.....	23
2.3.1 PARAMETROS DE NATURALEZA.....	23
2.3.1.1 Variación volumétrica.....	23
2.3.1.2 Permeabilidad.....	23

2.3.1.3 Granulometría.....	23
2.3.1.4 Plasticidad.....	24
2.3.1.5 Límites de Atterberg.....	24
2.3.1.6 Índice de plasticidad.....	26
2.3.2 PARAMETROS DE ESTADO.....	27
2.3.2.1 Resistencia mecánica.....	27
2.3.2.2 La compactación (Ensayo Próctor).....	27
2.3.2.3 La capacidad portante (Ensayo CBR).....	28
2.4 GENERALIDADES SOBRE LA CAL.....	30
2.4.1 YACIMIENTO DE CALIZA.....	31
2.4.2 LA CAL COMO SOLUCION.....	32
2.4.3 ACCION DE LA CAL SOBRE SUELOS ARCILLOSOS.....	33
2.4.4 SUELOS ARCILLOSOS CON EXCESO DE HUMEDAD.....	34
2.4.5 SUELOS ARCILLOSOS SECOS.....	35
2.5 DIFERENTES TIPOS DE CAL.....	36
2.5.1 Cales aéreas.....	36
2.5.2 Cales Hidráulicas.....	36
2.6 CALES UTILIZADAS PARA LA ESTABILIZACION DE SUELOS.....	36
2.6.1 Cales vivas.....	36
2.6.2 Cales Hidratadas.....	37
2.6.3 Cal en forma de lechada.....	37
2.7 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES FISICAS DE LA CAL.....	38
2.8 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES QUIMICAS DE LA CAL.....	39
2.9 PROCEDIMIENTO DE HIDRATACION DE LA CAL.....	40
2.9.1 Hidratación al aire.....	41
2.9.2 Hidratación por aspersión.....	41
2.9.3 Hidratación por inmersión.....	41
2.9.4 Hidratación por fusión.....	41
2.9.5 Hidratación por Autoclave.....	41

CAPITULO III: ESTABILIZACION DE SUELOS PARA USO VIAL.....	42
3.1 ALGUNAS TECNICAS PARA ESTABILIZACION DE SUELOS.....	43
3.1.1 Estabilización con mezcla suelo-cemento.....	43
3.1.2 Estabilización con mezcla suelo-asfalto.....	45
3.1.3 Estabilización con mezcla suelo-cal.....	45
3.2 ESTABILIZACION DE SUELOS PLASTICOS OCUPADOS EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR.....	46
3.3 ANALISIS DE LOS MATERIALES A UTILIZAR EN UNA ESTABILIZACION CON CAL.....	47
3.4 PROPIEDADES DE LA MEZCLA SUELO-CAL.....	48
3.4.1 Granulometría.....	48
3.4.2 Plasticidad.....	49
3.5 TIPOS DE TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL.....	49
3.5.1 Secado de suelos.....	49
3.5.2 Mejora por modificación.....	50
3.5.3 Estabilización.....	50
3.5.4 Estabilización mixta.....	51
3.6 VENTAJAS DEL USO DE CAL COMO ESTABILIZADOR DE SUELO PARA CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR.	51
3.7 DISEÑO DEL TRATAMIENTO.....	52
3.8 ANALISIS PREVIO DE LOS SUELOS.....	53
3.9 FORMULA DE TRABAJO.....	53
 CAPITULO IV: ANALISIS DE SUELO NATURAL, PORCENTAJE OPTIMO DE CAL Y ENSAYOS A LA MEZCLA SUELO-CAL.....	 55
4.1 DESCRIPCION DE TRAMO DE PRUEBA.....	56
4.2 CARACTERISTICAS DEL SITIO DONDE SE EXTRAE EL SUELO ANALIZADO.....	58
4.3 PROCESO A SEGUIR PARA EL ANALISIS DE SUELO NATURAL	

PREVIO A SU ESTABILIZACION.....	58
4.3.1 Muestreo de suelo.....	59
4.3.2 Reducción de muestra de suelo a tamaño de ensayo.....	60
4.3.3 Determinación de límite líquido de un suelo.....	64
4.3.4 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.....	70
4.3.5 Materiales más finos que pasan el tamiz No 200 en agregado mineral por lavado.....	73
4.3.6 Análisis por tamizado de agregado grueso y fino.....	76
4.3.7 Clasificación de los suelos y mezclas de suelo-agregado para la construcción de carreteras.....	84
4.3.8 Clasificación de los suelos para fines de ingeniería mediante el Sistema de Clasificación de Suelos (SUCS).....	88
4.3.9 Determinación del contenido de humedad, ceniza y materia orgánica, turba y otros suelos orgánicos.....	92
4.4 SELECCION DEL AGENTE ESTABILIZADOR.....	98
4.4.1 ALTERNATIVAS Y CRITERIOS DE ESTABILIZACION DE SUELOS.....	98
4.5 PROPIEDADES DE COMPARACION DEL SUELO NATURAL.....	104
4.5.1 Determinación en laboratorio del contenido de agua de suelos y rocas a través de su masa.....	104
4.5.2 Relación Densidad-Humedad de los suelos (AASHTO T 99/T 180).....	108
4.5.3 Valor de Soporte de California (CBR).....	119
4.5.4 Resistencia de suelos a compresión simple confinada.....	130
4.5.5 Índice de expansión de los suelos.....	137
4.6 PROPIEDADES DEL MATERIAL EN ESTUDIO.....	143
4.7 METODO USANDO EL PH PARA ESTIMAR LA PROPORCION SUELO- CAL REQUERIDA PARA ESTABILIZACION DE SUELOS.....	145
4.8 DETERMINACION DE VALORES PH PARA MEZCLA SUELO-CAL UTILIZANDO PAPEL TORNASOL.....	151
4.9 PROCESO ALTERNATIVO UTILIZANDO LOS LIMITES DE	

ATTERBERG PARA SELECCIONAR EL PORCENTAJE OPTIMO DE CAL.....	154
4.10 ANALISIS DE LA MEZCLA SUELO-CAL.....	156
4.11 ESPECIFICACIONES PARA CAL VIVA Y CAL HIDRATADA EN LAS ESTABILIZACIONES DE SUELOS.....	156
4.12 ENSAYOS REALIZADOS A LA MEZCLA SUELO – CAL.....	156
4.12.1 Limites de Atterberg.....	156
4.12.2 Clasificación de la mezcla suelo –cal.....	160
4.12.2.1 Clasificación AASHTO M 145.....	160
4.12.2.2 Clasificación SUCS ASTM D 2487.....	164
4.13 PROPIEDADES DE COMPARACION DEL SUELO NATURAL Y LA MEZCLA SUELO-CAL.....	167
4.13.1 Relación Densidad–Humedad de la mezcla suelo-cal.....	167
4.13.2 Valor soporte de California (CBR) de la mezcla suelo-cal.....	173
4.13.3 Resistencia a la compresión inconfínada de la mezcla de suelo compactado con cal.....	182
4.14 Resultados obtenidos de la resistencia a la compresión inconfínada de la mezclas suelo-cal.....	187
4.15 Índice de expansión.....	190
CAPITULO V: PROCESO CONSTRUCTIVO Y CONTROL DE CALIDAD DE LA CAPA SUELO – CAL.....	194
5.1 REQUERIMIENTOS DE CONSTRUCCION.....	195
5.2 EQUIPO.....	195
5.3 CALCULO DE CANTIDAD DE CAL A UTILIZAR EN TRAMO DE PRUEBA.....	196
5.4 EJECUCION DE LA ESTABILIZACION.....	197
5.5 PROCESO CONSTRUCTIVO.....	199
5.5.1 Preparación de los suelos y almacenamiento de la cal.....	199
5.5.2 Extendido de la cal.....	201

5.5.3 Mezclado.....	203
5.5.4 Requisitos de campo de la mezcla suelo-cal.....	206
5.5.5 Compactación y terminación.....	206
5.6 CONDICIONES A TENER EN CUENTA.....	208
5.7 CONTROL DE CALIDAD EN LAS ESTABILIZACIONES CON CAL.....	209
5.7.1 Alcance del sistema de control de calidad.....	209
5.7.2 Sistema de control.....	209
5.7.3 Plan de control de calidad del contratista.....	210
5.7.4 Contenido del plan de control de calidad.....	210
5.7.5 Inspección preparatoria.....	211
5.7.6 Inspecciones inicial.....	212
5.7.7 Inspección de seguimiento.....	213
5.8 CONTROL DE LA EJECUCION.....	213
5.8.1 Preparación de los suelos.....	214
5.8.2 Extendido de la cal.....	214
5.8.3 Mezclado.....	214
5.8.4 Control final.....	217
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	219
6.1 CONCLUSIONES.....	220
6.2 RECOMENDACIONES.....	222
6.3 BIBLIOGRAFIA.....	225
6.4 ANEXOS.....	227
6.4.1 ANEXO 1: Lista de Chequeo para Control de Laboratorio.....	227
6.4.2 ANEXO 2:Lista de Chequeo para Control de Campo.....	241
6.4.3 ANEXO 3: Tabla completa para control de compresiones simples.....	245

INTRODUCCION.

Cuando en el ámbito de la construcción de caminos se encuentran suelos plásticos (arcillas), lo primero que se piensa es la manera de cómo solventar este problema y a menudo se soluciona con el desalojo de todo el material plástico generando así un mayor costo.

Un buen tratamiento de los suelos plásticos mediante una estabilización, permitirá utilizar los suelos del lugar donde se realizará una obra, bajando costos de préstamo y acarreo de material.

Con el diseño y técnica de construcción apropiado, el tratamiento con cal transforma químicamente los suelos plásticos en materiales utilizables como estructura de pavimento, mejorando características y propiedades del suelo entre estas la resistencia a la compresión y capacidad portante.

De ahí la importancia de desarrollar en base a una amplia investigación una “Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador”, la cual es presentada en tres grandes áreas:

La primera, generalidades sobre los suelos, pavimentos y cal; que corresponde a una investigación bibliográfica teórica referente al tema.

La segunda, el diseño de la mezcla suelo-cal, que corresponde a los ensayos de materiales en laboratorio, regidos bajo las especificaciones de normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y AASHTO (American Association of State Highway and Transport Oficial) correspondientes a cada ensayo.

La tercera, el proceso constructivo de la capa suelo-cal en proyecto de carretera realizando un tramo de prueba, y verificando la calidad de la capa terminada mediante ensayos. Además de presentar una serie de conclusiones y recomendaciones producto del desarrollo de esta investigación, así como la bibliografía utilizada para la misma.

CAPITULO I:

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES.

Del origen de la cal, se sabe que es producto de la descomposición de roca caliza por el calor a temperaturas entre 880 y 900°C, la cual es clasificada según la temperatura de calcinación y el porcentaje de arcilla que contenga la roca caliza.

La estabilización de la arcilla con cal en la construcción tiene más de 5.000 años de antigüedad. Las Pirámides de Shersi en el Tíbet fueron construidas con mezclas compactadas de arcilla y cal, en la China y la India a lo largo de la historia, se ha utilizado de varias maneras la estabilización con cal, sin embargo, fue en los EE.UU., a finales de 1940; cuando se aplicaron a las mezclas de cal y suelo las técnicas y ensayos de la mecánica de suelos que se desarrollaban en aquella época, el tratamiento de arcillas con cal comenzó en 1950, y la técnica aumentó su popularidad con gran rapidez. Se han construido miles de kilómetros de carreteras, así como aeropuertos principales como el de Dallas Fort Worth en EE.UU, sobre arcillas estabilizadas.

Esta técnica también se practica extensamente en Sudáfrica, Australia, Nueva Zelanda, Alemania, Suecia, Guatemala y Francia. Desde entonces, la estabilización de los suelos arcillosos con cal se ha convertido en una alternativa económicamente beneficiosa a los métodos tradicionales de construcción. Los proyectos típicos que se han beneficiado de la estabilización con cal, incluyen:

- Autopistas, carreteras principales y secundarias.
- Pistas de aterrizaje y de servicio en aeropuertos
- Estabilización de laderas
- Caminos vecinales, pistas forestales y caminos rurales
- Vías férreas
- Recuperación de muelles en desuso
- Recuperación de terrenos contaminados
- Rellenos estructurales.

En El Salvador, se pretende que la estabilización de suelos con cal sea una buena alternativa para caminos de baja intensidad vehicular, lo que podría disminuiría el déficit de recursos financieros en las municipalidades, Fondo de Conservación Vial (FOVIAL) y Ministerio de Obras Publicas (MOP).

En nuestro país existen diversos tramos de carreteras en los cuales se ha implementado la estabilización de los suelos con cal, uno de estos tramos donde se ha empleado esta alternativa es el que se realizó en el año 2001, en la carretera conocida con el nombre de “Anillo Periférico para la Asociación (Mancomunidad) La Montañona” ubicada en el Departamento de Chalatenango, teniendo esta como principal fin la conectividad de los sitios y municipios entre los cuales están: Concepción Quezaltepeque, Guarjila, Comalapa, La Laguna, Vainilla, El Carrizal, Ojos de Agua y las Vueltas entre otros.

Los porcentajes de cal utilizados en la estabilización del suelo que compone la subrasante de la carretera, estuvieron dentro del rango 3.5% a 5%, esto debido a la variación de plasticidad que presentaba el suelo del lugar, la información anterior fue proporcionada por el Ing. Felipe Siliezar (Planeamiento y Arquitectura S.A. de C.V).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Actualmente los costos de construcción de vías son bastante elevados y de igual manera el mantenimiento de las existentes, debido al rápido deterioro que sufren a causa de diferentes factores, principalmente climatológicos. El empedrado fraguado y balastrado de calles es comúnmente utilizado en vías de baja intensidad o caminos rurales, sin obtener resultados satisfactorios, debido a que cada año el invierno causa deterioros progresivos tanto en la superficie como en la estructura del mismo. Puede ayudar a resolver este problema la aplicación de cal siempre y cuando el suelo del lugar presente cierta plasticidad.

Una línea importante de la investigación consistirá en generar una dosificación de mezcla suelo-cal que cumpla con los requisitos establecidos (esta dosificación variará dependiendo de las características del suelo), mediante la aplicación adecuada de cal con el material a estabilizar.

Las condiciones meteorológicas, proceso constructivo, y los materiales ocupados en la construcción y otros, son factores que contribuyen a que una carretera de bajo o alto tráfico tenga un buen desempeño a lo largo de su vida útil; por lo cual el diseño, producción y colocación de la mezcla suelo-cal, involucra una serie de ensayos de laboratorio a fin de asegurar la calidad de la obra construida; tal es el caso del procedimiento que se sigue para establecer el diseño de una mezcla suelo-cal, en dicho proceso interviene la comprobación de la calidad de los materiales constituyentes de la misma como el suelo, el tipo de cal y agua, además se establecen sus proporciones respectivas para formar la mezcla, todo esto mediante una serie secuencial de ensayos, para llegar a establecer el proporcionamiento adecuado (formula de trabajo). También, es importante la producción de una adecuada mezcla suelo-cal, que cumpla con los requisitos específicos del proyecto a construir. La colocación y compactación de una mezcla suelo-cal también es un factor que incide mucho en la calidad de una capa, ya que todos los factores que intervienen en el diseño de la mezcla suelo-cal pueden

presentar la más alta calidad en el diseño; pero de no seguir los procesos adecuados en la colocación y compactación de esta mezcla, la capa puede sufrir deterioros considerables e incluso llegar a fallar.

Estos factores como el diseño, producción, colocación y compactación de una mezcla contemplan la realización de ensayos, los cuales deben ejecutarse correctamente y bajo las especificaciones de las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y AASHTO (American Association of State Highway and Transport Oficial) correspondientes, además deben de manejar claramente una serie de conceptos, especificaciones y procedimientos relacionados con las mezclas.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL:

- Elaborar una guía para la estabilización de suelos plásticos ($IP \geq 10$), mediante el diseño de una mezcla suelo-cal, para ser usada en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Recopilar los conceptos fundamentales y nociones generales que conciernen al diseño de mezclas suelo-cal.
- Determinar cuales son las especificaciones y normas que están involucradas para el diseño, control de producción y colocación de mezclas suelo-cal.
- Efectuar los ensayos de laboratorio a los suelos plásticos, agua y cal utilizando los procedimientos de las normas respectivas.
- Determinar un proceso adecuado para el control en la producción de la mezcla suelo-cal en obra y garantizar de esta manera que se cumpla con la calidad en base al diseño respectivo.
- Establecer los procedimientos eficaces que intervienen en la colocación y compactación de mezclas suelo-cal para contribuir a obtener buenos resultados.

- Dar seguimiento a un tramo de prueba construido con la proporción adecuada de cal para la estabilización del suelo.

1.4 ALCANCES.

- Elaborar una metodología que nos permita encontrar la dosificación de cal adecuada en una estabilización de suelos plásticos ocupados en caminos de baja intensidad vehicular, realizando para esto los estudios pertinentes de la cal como del material que será estabilizado (El porcentaje de cal a utilizar en una estabilización, dependerá de las características propias de cada suelo).
- Construcción de un tramo de prueba definido por el Fondo de Conservación Vial (FOVIAL).
- Se realizarán los procedimientos contemplados en las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y AASHTO (American Association of State Highway and Transport Oficial) referentes a los ensayos que se desarrollan para el diseño, control de producción y colocación de mezclas suelo-cal.
- La recopilación de información a través de visitas de campo, entrevistas a personas expertas en el diseño, control y colocación de mezclas y consulta bibliográfica.
- Esta guía se fundamenta para propósitos de investigación en suelos únicamente con $IP > 10$, debido a que estos suelos reaccionan químicamente mejor con la cal generando mejores resultados; suelos con un menor IP al anterior, se recomienda utilizar otro tipo de agente estabilizante.
- Se presentará un procedimiento de fácil ejecución para encontrar una dosificación adecuada de mezcla suelo-cal para suelos plásticos.

1.5 LIMITACIONES.

La generación de esta guía de estabilización de suelos plásticos con cal tiene una serie de limitaciones, entre las que podemos mencionar:

- Sólo se realizarán aquellos ensayos con el equipo disponible en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina” é instituciones que estén dispuestas a colaborar en esta investigación.
- Los ensayos a ejecutar serán los básicos y fundamentales para poder realizar el diseño de la mezcla suelo-cal en el laboratorio.
- Se tocará solamente lo que concierne al diseño y proceso constructivo de la mezcla suelo-cal.
- En esta investigación no se contemplan las estabilizaciones de suelos con cemento y asfalto y por consiguiente, estos temas se trataran en este documento de una manera muy general.

1.6 JUSTIFICACION.

Se pretende proveer al país de una alternativa que brinde soluciones a los problemas de suelos plásticos, que sea de bajo costo y de fácil aplicación, sin equipo sofisticado pero con toda la calidad requerida, para que el suelo que conforme la estructura del pavimento pueda tener larga vida.

El presente sistema es sumamente fácil de implementar en los caminos de tierra que pasen a ser pavimentados y que permitan una construcción modular, cosa que favorece a municipios de bajo ingreso para poder tener acceso al desarrollo a través de buenas vías de comunicación y preservando el medio ambiente con un proceso no dañino.

La utilización de cal se hará para suelos con $IP > 10$ (suelos plásticos), ya que la cal reaccionara químicamente de mejor manera con tales suelos para reducir significativamente el IP y crear así un material con resistencia estructural que no presente cambios volumétricos ante cambios en el contenido de humedad, que es lo que se busca.

Cuando la red vial sobrepasa los 20 o 30 años de uso, tiempo durante el cual, seguramente se le han aplicado tratamientos superficiales para mantenerla transitable

todo el año, se genera una problemática que ha empujado a los técnicos y responsables de gestionar y aplicar los recursos, a buscar y proponer diferentes alternativas de procedimientos constructivos que permitan optimizar al máximo la aplicación de asignaciones presupuestales y desarrollar la opción mas adecuada y eficaz, a fin de asegurar que las inversiones en infraestructura de carretera no pavimentadas o de bajo tránsito con tendencias al aumento del mismo perduren y que a su vez garanticen el flujo seguro y rápido de los bienes y personas que se trasladan a través de esta.

De igual manera, la carencia de materiales adecuados y cercanos a las obras ha contribuido en elevar los costos iniciales de construcción, generados por largas distancias de acarreo y altos costos de tratamiento de los materiales, obligando con esto a utilizar en ocasiones materiales de menor costo y que escasamente cumplen con las normas de calidad para construcción de carreteras, lo que origina la falla de los pavimentos en poco tiempo.

**CAPITULO II:
PAVIMENTOS,
SUELOS Y
CAL**

2.1 GENERALIDADES SOBRE LOS PAVIMENTOS.

Todos hemos tenido la oportunidad de observar un pavimento, ya sea en largas caminatas en la vía o simplemente al conducir nuestro automóvil, sin embargo solo vemos una inmensa capa asfáltica o de concreto, pero un pavimento no solo es esa capa externa y observable, es toda una estructura compleja, que necesita un diseño especial, aquí se pretende dar una visión muy simple de lo que es un pavimento, para que se conozca un poco de las capas que lo componen y se pueda entender los parámetros de diseño involucrados en la estabilización del suelo portante de un pavimento, mas adelante analizado como objeto de esta guía.

2.1.1 DEFINICION DE PAVIMENTO.

Un pavimento es una estructura conformada por una serie de capas, de diferentes espesores y materiales de diferentes calidades, las cuales al interactuar unas con otras ofrecen un grado de resistencia al paso de los vehículos.

2.1.1 Elementos que conforman la estructura del pavimento.

Según el Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos contemplado en SIECA (Secretaría de Integración Económica Centroamericana), estos se dividen en flexibles, semirígidos o semiflexibles, pavimentos rígidos y articulados (adoquines). Para fines del desarrollo de este trabajo de graduación se analizarán los tipos de pavimentos más comunes como lo son los pavimentos flexibles y pavimentos rígidos. A continuación se describen los elementos que conforman a cada uno de ellos:

PAVIMENTO FLEXIBLE.

Sub-rasante.

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno. El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe

cumplir con los requisitos de resistencia e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, entre otros parámetros.

Sub-base.

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento.

La sub-base debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento. Se utiliza además como capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

Sub- base estabilizadas.

Es la capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con material de relleno, mezclados con materiales o productos estabilizadores, preparada y construida aplicando técnicas de estabilización, para mejorar sus condiciones de estabilidad y resistencia, para constituir una base integrante del pavimento destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a la sub-rasante.

Base.

Es la capa de pavimento que tiene como función primordial, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la sub-base y a través de ésta a la subrasante, y es la capa sobre la cual se coloca la capa de rodadura. Las bases especificadas son las siguientes:

Base granular.

Material constituido por piedra de buena calidad, triturada y mezclada con material de relleno o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural. Todos estos materiales deben ser clasificados para formar una base integrante de la estructura de pavimento. Su estabilidad dependerá de la graduación de las partículas, su forma, densidad relativa, fricción interna y cohesión, etc.

Base estabilizada.

Al igual que en una sub-base estabilizada esta capa se forma de la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con material de relleno, mezclados con materiales o productos estabilizadores, preparada y construida aplicando diferentes técnicas de estabilización, esto con la finalidad de transmitir y distribuir las cargas originadas por el tránsito a la capa de sub-base.

Superficie de rodadura.

Capa superior de la estructura del pavimento construida de mezcla asfáltica.

PAVIMENTO RIGIDO.**Sub-rasante y sub-base.**

En los pavimentos Rígidos, la sub-rasante y sub-base cumplen las mismas funciones que en los Pavimentos Flexibles, y pueden ser generadas de igual manera, tal como se describió anteriormente.

Superficie de rodadura.

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la sub-base y sub-rasante, dado que no usan capa de base.

2.1.2 LA RED VIAL EN EL SALVADOR.

El Salvador posee un sistema de carreteras y caminos que cubren casi todo el país. Las vías terrestres ocupan un lugar primordial en la comunicación de regiones, poblados, etc. Generando de esta manera mayor conectividad y desarrollo a nivel nacional.

La totalidad de la red vial del país equivale aproximadamente a 30,000 Km.; pero sólo puede ser objeto de mantenimiento un aproximado de 20,000 Km., el resto, aproximadamente 10,000 Km., están en tales condiciones de precariedad que necesitan una inversión fuerte para su recuperación.

La responsabilidad de dar mantenimiento a esos 20,000 Km. es compartida casi en la misma proporción entre el gobierno central y las municipalidades.

La importancia de minimizar el número de caminos no pavimentados, es grande en nuestro país; y esto revela la necesidad de generar planes de gestión vial enfocados en los siguientes aspectos:

- Continuar la expansión de inversiones en caminos rurales
- Usar algunas estrategias de mantenimiento de caminos no pavimentados de fácil utilización.

2.1.3 UTILIZACION DE CAMINOS DE TIERRA EN EL SALVADOR.

A manera de ejemplo se puede decir que las carreteras rurales en la actualidad son utilizadas por vehículos de doble tracción, bicicletas, etc. Alcanzando velocidades muy bajas debido al alto grado de deterioro que presentan, sin mencionar la dificultad de transitar por ellas en la época lluviosa.

En El Salvador los caminos de tierra representan un buen porcentaje del total de la red vial existente, de los cuales la mayoría pertenecen a comunidades cantonales, generando así la necesidad de buscar alternativas que mejoren las condiciones actuales para el beneficio de población.

La utilización principal de estos caminos de baja intensidad vehicular, esta en función del sector agrícola del país, para tener una mejor conectividad con las ciudades urbanas donde es comercializado el producto. Departamentos como Chalatenango, donde los caminos de tierra son utilizados para transportar granos y vegetales, lo que los hace utilizables por un intervalo de poco tiempo a lo largo del año; y es debido a este poco uso, que no se brinda el tratamiento adecuado a estos.

2.2 GENERALIDADES SOBRE LOS SUELOS.

Dependiendo del origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos grandes grupos, que son los siguientes: *Suelos Residual*, cuando los productos de la descomposición de las rocas permanecen en el mismo lugar de origen aun afectadas por su degradación y *Suelos Transportados*, cuando los productos de la descomposición de las rocas son transportados hacia otro lugar generalmente lejos del origen.

A continuación se describen los suelos más comunes, con el nombre generalmente utilizados para su clasificación en el terreno.

Las Arenas y las Gravas: Son suelos de fragmentos granulares, redondos o angulosos, poco o nada alterados de rocas minerales. Estos suelos no poseen cohesión entre sus fragmentos.

Los limos: Son suelos de grano fino (material que pasa malla No 200), pero con plasticidad menor a la que presenta una arcilla, los cuales generalmente cuentan con materia orgánica finamente dividida. Algunas veces contienen fragmentos visibles de materia vegetal parcialmente descompuesta o de otros elementos orgánicos.

Las Arcillas: Son suelos formados de partículas derivadas de la descomposición química y mineralógica que sufren los constituyentes de las rocas, generalmente por

intemperismo. Son suelos plásticos cuando están húmedos y cuando están secos son muy duros, tienen además permeabilidad extremadamente baja.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Arcilla en términos granulométrico, abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 0.075mm.
- Desde el punto de vista de la ingeniería una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica.

Para identificar un suelo se utiliza el nombre del material predominante como sustantivo y el de menor proporción como adjetivo calificativo. Por ejemplo Arena Limosa, indica un suelo en el cual predomina la arena y contiene cierta cantidad de limo (según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS).

2.1.1 Definición de suelo.

Desde el punto de vista de la ingeniería, suelo es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas. Además se diferencia del término roca al considerarse específicamente bajo este término un sustrato formado por elementos que pueden ser separados sin un aporte significativamente alto de energía.

Se considera el suelo como un sistema multifase formado por:

- Fase sólida, que constituyen el esqueleto de la estructura del suelo.
- Fase líquida (generalmente agua).
- Fase gaseosa (generalmente aire) que ocupan los intersticios entre los sólidos.

2.2.2 Composición de los suelos.

Un suelo está constituido por tres partes, una parte sólida, otra líquida y otra gaseosa. La parte sólida está formada en su mayoría por minerales del suelo, la parte líquida está compuesta por el agua, aunque en el suelo puedan existir otros líquidos de menor significación, la parte gaseosa la comprende principalmente el aire, pero también pueden estar presentes otros gases (vapores sulfuros, anhídrido carbónico, etc.).

La siguiente figura representa un esquema de una muestra de suelo, con sus partes principales:

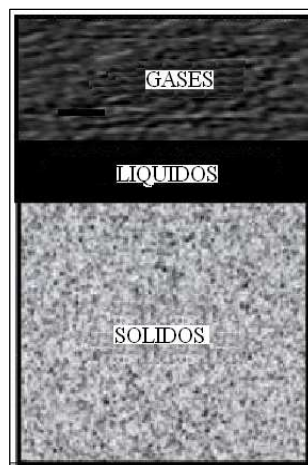


Figura 2.1 Composición de los suelos

Fuente: Fundamentos de la mecánica de suelos, Juárez Badillo, Tercera Edición

2.2.3 Definición de suelos plásticos.

Existen suelos que al cambiar su contenido de agua, adoptan una consistencia característica, que desde épocas antiguas se ha denominado plasticidad. Estos suelos han sido llamados arcillas. La plasticidad es, en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido para clasificar suelos en forma puramente descriptiva.

2.2.4 CLASIFICACION DE LOS SUELOS EN BASE A NORMA AASHTO M-145.

Se efectuará bajo el sistema AASHTO M-145 que ha sido concebido para estudios de caminos.

De acuerdo con el tamaño de las partículas que forman los suelos, la norma AASHTO M-145, los clasifica de la siguiente manera:

- Grava: de un tamaño menor a 76.2mm (3") hasta el tamiz No 10 (2mm).
- Arena Gruesa: de un tamaño menor a 2mm hasta el tamiz No 40 (0.425mm).
- Arena Fina: de un tamaño menor a 0.425mm hasta el tamiz No 200 (0.075mm).
- Limos y Arcillas: tamaños menores de 0.075mm

La norma AASHTO M-145, clasifica los suelos basándose en sus propiedades mecánicas principalmente, los divide en siete grupos diferentes, designados desde el A-1 hasta A-7, como a continuación se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2.1

Clasificación de suelos según AASHTO M-145

Clasificación General	Suelos Granulares 35% máximo que pasa por tamiz de 0.075mm							Suelos Finos mas del 35% pasa por el tamiz de 0.075mm			
Grupo de Clasificación	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% Que pasa por el tamiz de: 2mm (No10) 0.0425 (No 40) 0.075mm (No 200)	50 max 30 max 15 max	---- 50 max 25 max	---- 51 min 10 max	---- ---- 35 max	---- ---- 35 max	---- ---- 35 max	---- ---- 35 max	---- ---- 36 min	---- ---- 36 min	---- ---- 36 min	---- ---- 36 min
Características de fracción que pasa el tamiz 0.045mm (No 40) Límite Líquido Índice de Plasticidad	---- 6 max		---- NP	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min
Tipo de material	piedras, grava y arena		arena fina	gravas y arenas limosas o arcillosas				suelos limosos		suelos arcillosos	
Estimación general de suelo	Excelente a Bueno							De pobre a malo			

Fuente: Clasificación de suelos (Norma AASHTO M-145)

El suelo A-1, es un suelo de propiedades optimas para ser usado en las capas que conforman la estructura de un pavimento y en su orden ascendente de numeración, su comportamiento va decreciendo hasta llegar al suelo A-7, cuya aplicación en carreteras no es recomendable.

Descripción de los grupos y sub grupos contemplados en la norma AASHTO M-145:

- **Materiales Granulares.**

A-1 Son suelos bien graduados de tamaño grueso y finos, con un débil aglomerante plástico.

A-1-a En estos se incluyen materiales predominantes de fracción de rocas o grava, con o sin aglomerante.

A-1-b El material predominante es arena gruesa, con o sin un buen aglomerante. Algunos suelos del grupo A-1 carecen de finos, de manera que deberá agregar cierta cantidad de finos para formar una sub base de buena calidad.

A-2 Estos se componen por una amplia porción de materiales granulares que no pueden clasificarse en el grupo A-1 por su contenido de finos y plasticidad. Contienen materiales granulares con cantidades considerables de arcillas, los suelos del grupo A-2 son inferiores a los del grupo A-1 debido a su menor graduación y menos aglomerantes. En periodo seco los suelos A-2 son muy estables como superficie de rodamiento, pero esto depende de la clase de aglomerante, sin embargo en periodos húmedos se pueden ablandar y en periodos secos se pueden disgregar y formar polvaredas.

A-2-4 y A-2-5 incluyen diversos materiales granulares que contienen un 35 por ciento máximo de material que pasa el tamiz 0.075mm (No 200)

A-2-6 y A-2-7 Incluyen materiales similares a los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto que la porción fina suelo cuenta con arcilla plástica de características similares a los grupos A-6 o A-7.

A-3 Estos suelos están compuestos de arenas deficientes en aglomerantes, como la arena de las playas. Se encuentran a menudo y son muy inestables excepto cuando están húmedos. Cuando se encuentran confinados son apropiados como bases para cualquier tipo de pavimentos.

- **Materiales Limo- Arcillosos.**

A-4 Son suelos muy comunes, predominan los limos con ligeros porcentajes de material grueso y pequeñas cantidades de arcilla.

A-5 Estos suelos se encuentran en muy pocas ocasiones, son muy parecidos a los del grupo A-4, excepto porque contienen mica y diátomas que los vuelven muy elásticos e inestables aun en estado seco, lo que los hace tenaces a la compactación.

A-6 El típico material de este grupo es un suelo arcilloso plástico, que tienen el 35 por ciento o más de material que pasa el tamiz de 0.075mm (No 200). Los materiales de este grupo suelen tener gran cambio volumétrico, cuando se tiene presencia de humedades altas en el suelo, debido a la presencia de arcillas.

A-7 Estos suelos están compuestos principalmente de arcilla como son los del grupo A-6, pero se diferencian de estos por la presencia de partículas uniformes de limo, materia orgánica y mica, lo que los hace muy elásticos.

A-7-5 Estos suelos del grupo A-7 tienen índices de plasticidad moderados en relación con límites líquidos, y pueden ser elásticos y expansivos.

A-7-6 Son suelos expansivos con altos índices de plasticidad en relación a los límites líquidos.

2.2.5 SISTEMA DE CLASIFICACION DE SUELOS SUCS (ASTM D-2487).

Este sistema de clasificación de suelos al igual que la clasificación AASHTO M-145 describe los suelos para propósitos ingenieriles en base a la determinación en laboratorio del tamaño de partículas, generando así dos grandes grupos de suelos que a continuación se presenta.

Suelo de grano fino, si el 50% o más del peso seco de la muestra pasa por el tamiz No 200 (75 - μ m).

Suelo de grano grueso, si más del 50% del peso seco de la muestra se retiene en el tamiz N° 200 (75 μ m).

Aparte del tamaño de las partículas otro parámetro que sirve para generar la clasificación SUCS en un suelo de grano fino es el límite líquido que presente el suelo analizado.

A continuación se describe el significado de los grupos y siglas de la representación SUCS:

Tabla 2.2

Clasificación de suelos según ASTM D 2487

DIVISIONES PRINCIPALES		SIMBOLO	NOMBRES TÍPICOS
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS MAS DEL 50% ES RETENIDO EN LA MALLA 200	GRAVAS 50% O MAS DE LA FRACCION GRUESA SE RETIENE EN LA MALLA No 4	GRAVAS LIMPIAS	GW GRAVAS BIEN GRADUADAS. MEZCLAS DE GRAVAS Y ARENA CON POCO O NADA DE FINOS
		GRAVAS CON FINOS	GP GRAVAS MAL GRADUADAS. MEZCLAS DE GRAVA Y ARENA CON POCO O NADA DE FINOS
			GM GRAVAS LIMOSAS. MEZCLAS DE GRAVA ARENA Y LIMO.
			GC GRAVAS ARCILLOSAS. MEZCLAS DE GRAVA, ARENA Y ARCILLA
	ARENAS MAS DEL 50% DE LA FRACCION GRUESA PASA LA MALLA No 4	ARENAS LIMPIAS	SW ARENAS BIEN GRADUADAS. ARENAS CON GRAVA CON POCO O NADA DE FINOS
			SP ARENAS MAL GRADUADAS. ARENA CON GRAVA CON POCO O NADA DE FINOS
		ARENAS CON FINOS	SM ARENAS LIMOSAS. MEZCLA DE ARENA Y ARCILLA.
			SC ARENAS ARCILLOSAS. MEZCLAS DE ARENA Y ARCILLA
SUELOS DE GRANO FINO 50% O MAS PASA LA MALLA 200	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO LL < 50%	ML LIMOS INORGÁNICOS. ARENAS MUY FINAS, POLVO DE ROCA, LIMOS ARENOSOS O ARCILLOSOS LIGERAMENTE PLÁSTICOS.	
		CL ARCILLAS INORGÁNICAS DE BAJA A MEDIA PLASTICIDAD. ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS	
		OL LIMOS ORGÁNICOS. ARCILLAS LIMOSAS ORGÁNICAS DE BAJA PLASTICIDAD.	
	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO LL ≥ 50%	MH LIMOS INORGÁNICOS. LIMOS MICÁCEOS Y DIATOMÁCEOS. LIMOS ELÁSTICOS	
		CH ARCILLAS INORGÁNICAS DE ALTA PLASTICIDAD. ARCILLAS FRANCAS	
		OH ARCILLAS ORGANICAS DE MEDIA A ALTA PLASTICIDAD. LIMOS ORGÁNICOS DE MEDIA PLASTICIDAD	
SUELOS CON ELEVADA PROPORCION DE MATERIA ORGANICA		PT	TURBA Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS

Fuente: Cuadro resumen conforme a norma ASTM D-2487

2.3 CARACTERIZACION DE LOS SUELOS.

La caracterización de los suelos se lleva a cabo por medio de dos tipos de parámetros conocidos como parámetros de naturaleza y parámetros de estado. A continuación se describe cada uno de ellos:

2.3.1 PARAMETROS DE NATURALEZA.

Se caracterizan porque no varían ni con el tiempo ni a lo largo de las manipulaciones que puedan realizarse a los suelos durante los trabajos, los más importantes son:

2.3.1.1 Variación volumétrica.

Muchos suelos se expanden y se contraen debido a los cambios en su contenido de humedad. Las presiones de expansión se desarrollan debido a incrementos en la humedad, los cuales deben de ser controlados, ya que estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje, etc.; por lo cual, es de suma importancia detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado a seguir para evitar dichos problemas.

2.3.1.2 Permeabilidad.

Se consideran importantes las presiones de poro y los relacionados con el flujo de agua a través del suelo; ya que estos dos fenómenos provocan su debilidad en su resistencia o su estabilidad.

2.3.1.3 Granulometría.

Son los tamaños de los granos que participan (como porcentaje de peso total) de la composición del suelo que representan. Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos son función directa de su granulometría y su determinación es fundamental para establecer su comportamiento mecánico, principalmente cuando se someten a cargas directamente.

2.3.1.4 Plasticidad.

La plasticidad es la propiedad que tiene el suelo para cambiar de forma (dentro de un rango de humedad dado) y mantener sin perder volumen ni romperse cuando se someten a fuerzas de compresión.

2.3.1.5 Límites de A. Atterberg.

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de estos es debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg. (1846-1916).

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

Las propiedades de un suelo formado por partículas finamente divididas, como una arcilla no estructurada, depende en gran parte de la humedad. El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante para el comportamiento del material.

Para interpretar mejor estos límites se tomara de ejemplo una masa de arcilla. Cuando está tiene mucha cantidad de agua podríamos decir: se encuentra en estado líquido pues la arcilla se escurre con la facilidad de una masa líquida, pero a medida que se evapora el agua que contiene, va haciéndose un tanto plástica. Existe un momento en que la masa de arcilla pasa de estado “líquido” al estado “plástico”. Este límite entre los estados “líquido” y “plástico” se halla representado por el contenido de humedad del suelo y se llama límite líquido.

Si continua la evaporación de agua, la arcilla perderá plasticidad y llegar a secarse hasta adquirir una consistencia semisólida. Este paso del estado plástico al semisólido se le llama límite plástico, su valor esta dado por el contenido de humedad que tiene la arcilla en tal estado límite.

Para luego tener un último límite que se encuentra en la frontera del estado semisólido al estado solidó, conocido como limite de contracción.

- **Límite líquido (LL).**

Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

- **Límite plástico (LP).**

El límite plástico de un suelo es el más bajo contenido de agua en el que el suelo sigue presentando plasticidad.

- **Límite de contracción (Lc).**

Es el contenido de humedad por debajo del cual no se produce reducción adicional de volumen o contracción en el suelo.

En la siguiente figura se presenta los diferentes límites con los que puede contar un suelo, así como la transición de los estados en donde estos ocurren.

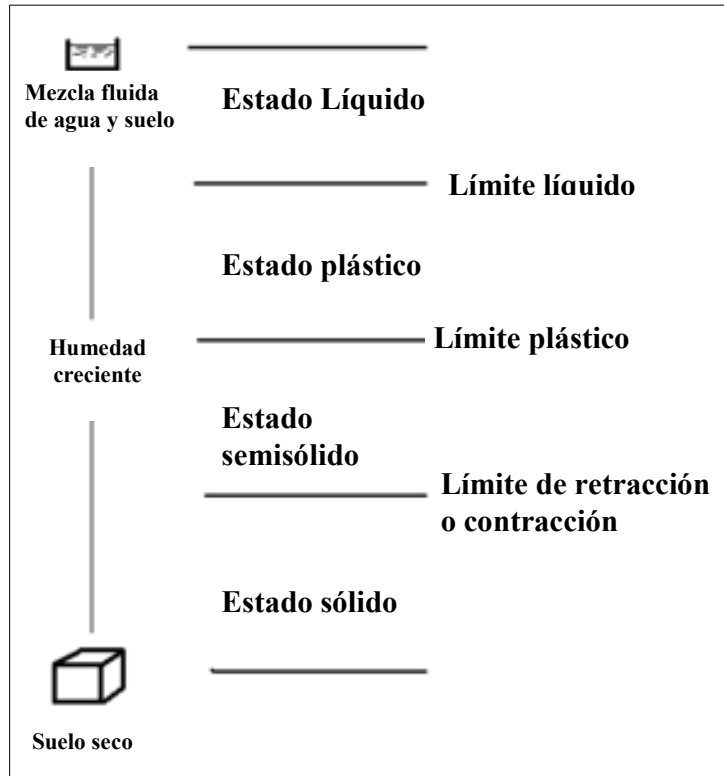


Figura 2.2 Representación de los Límites de Atterberg

2.3.1.6 Índice de plasticidad (IP).

El Índice de Plasticidad (IP) es una medida de cuanta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil. Generalmente la cal reacciona con suelos plástico que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural. Suelos con IP menores a 10, usualmente, no reaccionan tan fácilmente con la cal.

El IP se mide por dos pruebas simples en la mecánica de suelo: el límite líquido y el límite plástico; la diferencia entre los dos es el Índice de Plasticidad.

2.3.2 PARAMETROS DE ESTADO.

Estos parámetros no son propios de las características del suelo sino de las condiciones ambientales en que se encuentran. Para los suelos sensibles al agua, el parámetro de estado que determina todas las condiciones de los rellenos, terraplenes y explanadas en las redes viales es el ESTADO HÍDRICO. Su determinación no puede hacerse exclusivamente con el cálculo del contenido en agua natural, sino que es necesario relacionarlo con el contenido de agua específico de suelo al que le corresponde un comportamiento particular. El método más corriente para indicar el estado hídrico de un suelo es referirse a los valores de los ensayos PROCTOR y CBR, realizados sobre cada suelo o clase de suelo a estudiar.

2.3.2.1 Resistencia mecánica.

En los suelos la humedad es muy importante porque determinan la capacidad de estos para resistir las cargas y mantener su estructura en condiciones estables de trabajo hasta ciertas humedades, los suelos pueden mantener resistencias aceptables pero cuando hay excesos de agua se debilitan y pierden la resistencia, que se manifiestan en hundimientos, grietas, cuarteamientos, hinchamientos, etc.

En la época húmeda (invierno) los suelos se vuelven débiles, ya que el agua que absorben los hace perder resistencia hasta llegar a la saturación. En la época seca (verano) pierden humedad y se vuelven muy duros o muy resistentes pero en la superficie donde los vehículos circulan, la acción abrasiva de las llantas hace que se genere la soltura de las partículas de suelo abundantemente para producir capas de polvo, con lo cual el deterioro superficial llega a ser severo

2.3.2.2 La compactación (ensayo próctor).

Cuando se compacta un suelo con una energía de compactación dada, se comprueba que su densidad seca, referida al suelo en estado seco, varía en función del contenido en agua hasta alcanzar un máximo de densidad correspondiente a un contenido de humedad que

se denomina óptimo. Para alcanzar igual densidad con una humedad distinta a la óptima hay que emplear mayor energía de compactación.

2.3.2.3 La capacidad portante (ensayo CBR).

El ensayo CBR (California Bearing Ratio), consiste en medir la resistencia al punzonamiento de un suelo sobre las probetas confeccionadas por el procedimiento del ensayo proctor y comparar los valores obtenidos con un valor de referencia patrón.

Se mide así la capacidad portante del suelo o lo que es lo mismo su capacidad de soportar una carga para cada pareja de valores de densidad-humedad. Se expresa por el índice portante CBR en % del valor de referencia. Cuanto más elevado es el CBR más capacidad portante tiene el suelo.

En el siguiente cuadro se presenta la clasificación de suelos según AASHTO M-145 y su correlación con la clasificación de suelos SUCS (ASTM D 2487) y la capacidad portante CBR.

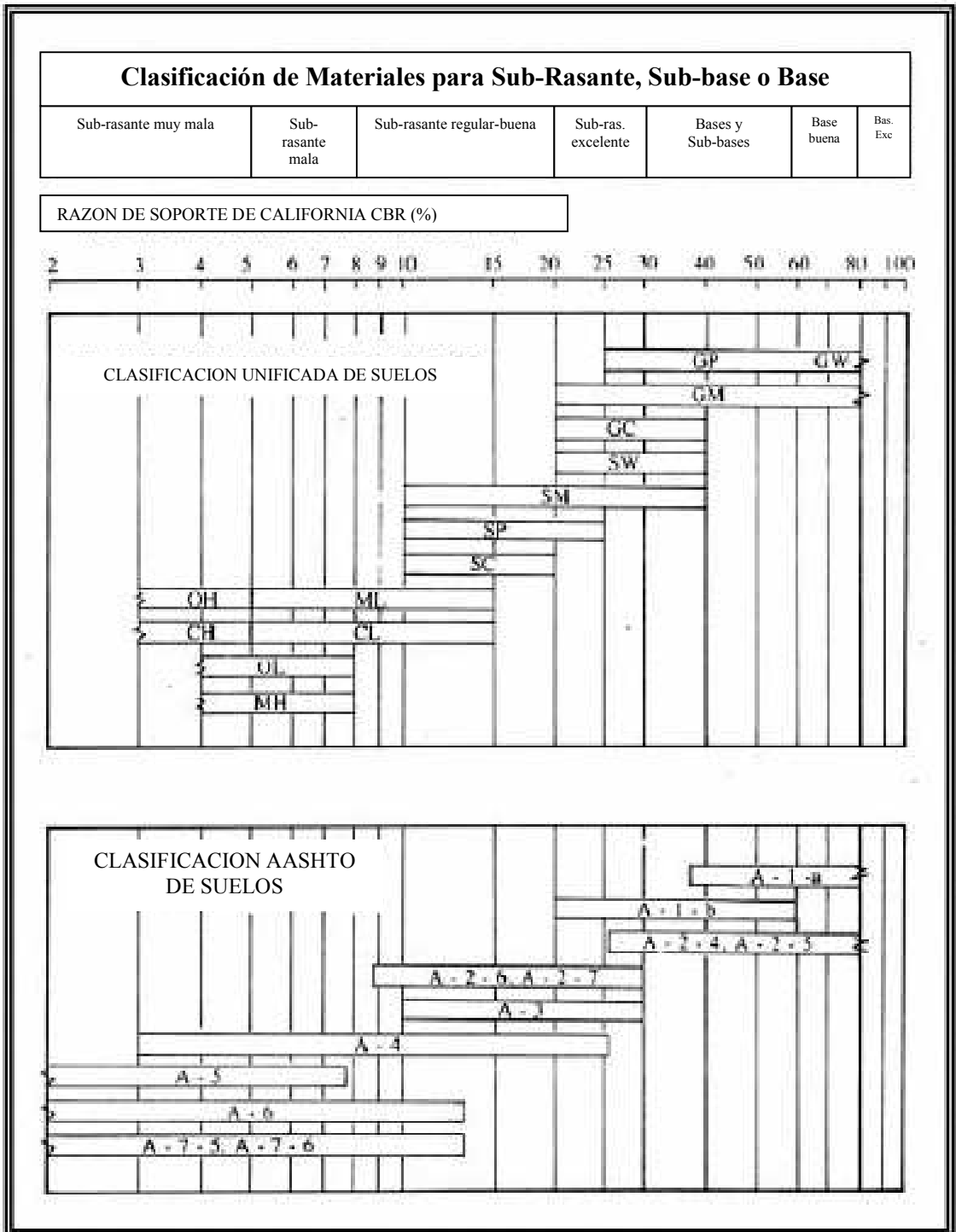


Figura 2.3 Correlación entre AASHTO M-145, clasificación SUCS y CBR

2.4 GENERALIDADES SOBRE LA CAL.

La cal es el producto de la calcinación de rocas calizas a temperaturas entre 880 y 900⁰C, constituido principalmente por óxido de calcio (CaO) y otros componentes. La adición de cal en los materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, sub-base y bases, por sus diferentes reacciones, en mayor y menor grado, produce aumento en su límite líquido y mayor incremento en su límite plástico para generar así una disminución en su índice plástico; aumentando la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos y la resistencia a la compresión simple y el CBR.

Para el tratamiento de suelos se puede utilizar: cal viva (óxido de calcio – CaO), cal hidratada (hidróxido de calcio – Ca [OH]₂) o una lechada de cal (es una suspensión de cal hidratada en agua, que puede elaborarse a partir de cal hidratada o de cal viva)

La cal viva; se produce de la transformación química del carbonato de calcio (piedra caliza – CaCO₃) en óxido de calcio.

La cal hidratada; se obtiene cuando la cal viva reacciona químicamente con el agua. La cal hidratada (hidróxido de calcio) es la que reacciona con las partículas arcillosas y las transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante.

La lechada de cal; es la suspensión de la cal hidratada en agua. Su empleo en tratamiento de suelo permite por un lado, evitar el polvo producido durante el extendido de cal y por otro, controla mejor la humedad de los suelos secos.

El uso más importante de la cal es el de estabilizar suelos, para estos fines se emplea la cal hidratada en polvo, que viene envasada en bolsas de papel facilitando de esta manera su manipuleo y transporte.

2.4.1 YACIMIENTO DE CALIZA.

La caliza es la materia prima para obtener la cal, esta se encuentra únicamente en una estrecha franja de la región Norte y Noreste de El Salvador constituyendo la mayor extensión, ubicadas en los alrededores de la ciudad de Metapán en el Departamento de Santa Ana.

Según su ubicación los yacimientos de caliza se han clasificados en cuatro zonas: La zona 1 se encuentra entre Río Angue, San Jerónimo la picarera y Hacienda El Espinal; la zona 2 se encuentra entre Hacienda La Esperanza y Hacienda El Carmen; la zona 3 entre Cerro El Picacho y casa de teja; la zona 4 en las cercanías de la Aldea El zapote, a continuación se describen estas zonas:

La Zona 1 corresponde al yacimiento de caliza existente en la quebrada el Chile, valle profundamente entallado con 2.5 Km. de largo, con rumbo N-S hasta NNE-SSW, situado a 6.5 Kms al oeste de Metapán. El estrato de caliza en esta zona tiene un espesor de 50 a 55 metros, con aumento de espesor hacia el Norte.

En la zona 4, las calizas del cerro El Calichal y de la loma El Camarón, están situadas a 9 Kms al Suroeste de Metapán y a una altitud entre 600 y 800 metros sobre el nivel del mar. El área es atravesada por una quebrada muy profunda de rumbo NE-SW que desagua hacia el río Tahuilapa; al sur de la quebrada, forma el yacimiento de la caliza de la loma El Camarón.

Los yacimientos de caliza en la aldea El zapote, están formados por rocas calizas de color generalmente gris oscuro; el espesor medio de capa es de 40 a 50 centímetros, pero también aparecen capas con espesor de hasta 3 metros, sobre todo en la parte superior de dicho estrato, el espesor total es aproximadamente 100 metros. Las calizas en Metapán, se extienden hacia el Este, hasta San Fernando en el río Sumpul.

Los depósitos ubicados en el Oeste de Metapán, están compuestos por calizas impuras, lo que de ninguna manera se puede considerar como un factor negativo, pues la presencia de arcilla y arena proporciona algo de Aluminio (Al_2O_3) y el Oxido de Sílice (SiO_2) que son de gran importancia para la producción de este material.

En el Cerro Calichal, al Norte de La Aldea El Zapote, se encuentra otro depósito de caliza masiva y de grano fino, de calidad muy buena (98% de Carbonato de Calcio). Medio kilómetro al Norte del Cerro El Calichal yacen las calizas de El Camarón, las cuales son también puras.

Los depósitos calizos ubicados al Norte y al Este de Metapán son bastantes puros, con un 98.5% de Carbonato de Calcio, en el lugar denominado el Naranja. Estas calizas se pueden considerar como reservas, ya que su ubicación y falta de acceso hacen poco probable su explotación.¹

2.4.2 LA CAL COMO SOLUCION.

En la construcción de carreteras, el aprovechamiento de los suelos naturales de la traza puede presentar dificultades debido a:

- El alto contenido de agua,
- La presencia de arcilla en los mismos,
- A la combinación de ambos elementos.

La importancia del contenido de agua es conocida por todos ya que, si es demasiado elevado, hace que la circulación de máquinas en obra sea difícil cuando no imposible y si es demasiado bajo la compactación resulta una operación difícil. Los materiales que tienen arcillas en su composición, son conocidos por sus mediocres propiedades geotécnicas que, además, varían según las condiciones climáticas.

¹Autor: Calderón, Gustavo A. Tesis UES 1995 (Procedimiento para la estabilización de caminos de tierra empleando cal, suelo cemento y residuo asfáltico).

La cal aporta una solución interesante a la vez de económica a estos problemas, ya que:

- La aportación de cal permite secar los suelos excesivamente húmedos.
- Utilizándola en sus diferentes formas (viva, hidratada o en lechada), mejora y estabiliza las características de los suelos arcillosos a corto y largo plazo.
- Permite utilizar los suelos de la traza reduciendo o evitando el impacto ambiental debido a la extracción de otros suelos o al vertido de los procedentes de las excavaciones de la traza

2.4.3 ACCION DE LA CAL SOBRE LOS SUELOS ARCILLOSOS.

Los efectos de la cal sobre los suelos arcillosos pueden ser divididos en dos grupos principales:

- a) Debido a reacciones rápidas (minutos/horas); es una estabilización por modificación.
- b) Provenientes de reacciones a largo plazo (semanas/meses); es una estabilización por cementación.

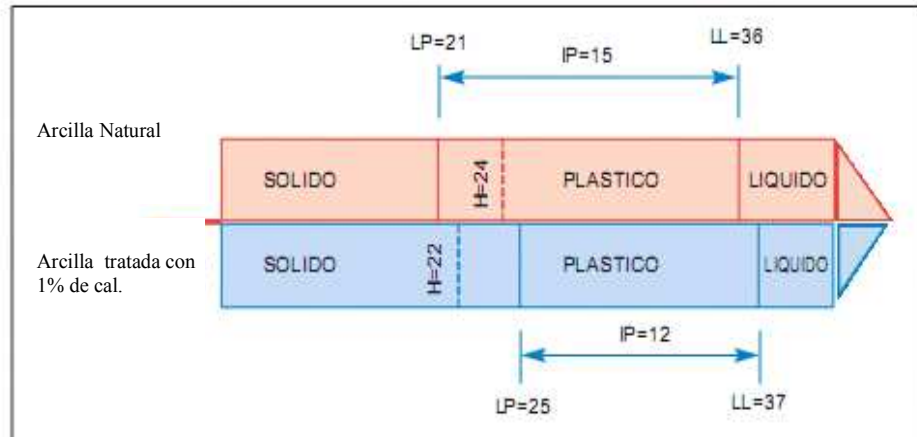


Figura 2.4

Acción de la cal sobre los límites de Atterberg.

Fuente: Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España ANCADE (www.ancade.es)

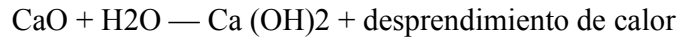
Como consecuencia de los anteriores efectos, la acción de la cal produce un notable incremento de la resistencia y rigidez del suelo que pierde plasticidad.

La permeabilidad del suelo, que inmediatamente después del tratamiento podría ser considerado como un árido maleable que va cementando progresivamente con el tiempo, aumenta considerablemente a corto plazo, pero progresivamente decrece a medida que van teniendo lugar las reacciones de cementación y, por tanto, se reduce la susceptibilidad al agua en gran manera, lo que es puesto en evidencia por la disminución Índice de Plasticidad y de la retracción e hinchamiento del suelo.

2.4.4 SUELOS ARCILLOSOS CON EXCESO DE HUMEDAD.

Estos suelos tienen la característica de absorber grandes cantidades de agua lo que provoca que se expanda, haciéndose difícil su manejo, por tal motivo se busca con el aporte de cal disminuir el contenido de agua favoreciendo así su utilización. Para ello, se utiliza cal viva que disminuye el contenido de agua por la acción combinada de:

- Aporte de producto seco.
- Consumo del agua necesaria para producir la reacción de hidratación de la cal viva.



- Evaporación del agua del suelo debida al calor producido en ésta reacción.

En teoría, el aporte de un 1% de cal viva disminuye el contenido de humedad en cerca del 1%. En la realidad, durante la operación del mezclado de la cal con el suelo se produce una importante aireación que suele acentuar la evaporación del agua. En algunos casos se ha comprobado que el contenido de agua puede bajar hasta el 4 ó 5% con la adición del 1% de cal viva si las condiciones meteorológicas son favorables durante la operación de mezclado (según Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España ANCADE (www.ancade.es)).

2.4.5 SUELOS ARCILLOSOS SECOS.

Mediante el tratamiento con cal, se adecuan los materiales arcillosos con contenidos de agua próximos a la humedad óptima Proctor. En éste caso, la utilización de cal viva puede no ser recomendable ya que estos suelos podrían necesitar un riego posterior al mezclado para compensar la pérdida de agua producida en la hidratación de la cal y seguir manteniendo las condiciones óptimas para su compactación.

En ciertos casos, éste riego puede ser costoso y difícil de realizar en obra por lo que se recomienda, en lugar de cal viva, la adicción de “cal hidratada” (disminuye considerablemente la humedad del suelo) o de lechada de cal (si se quiere aumentar la humedad natural del suelo). En general para suelos secos, la lechada de cal es más ventajosa ya que el aporte de cal y de agua se realiza en una sola operación.

En definitiva la selección de cal viva, cal hidratada o de lechada de cal deberá efectuarse en función del costo, función buscada y disponibilidad de equipo.

2.5 DIFERENTES TIPOS DE CAL.

La palabra cal es un término general con el que se designan formas físicas y químicas de las diferentes variedades en que pueden presentarse los óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio. A efectos de clasificación se distinguen los siguientes tipos de cal:

2.5.1 Cales aéreas.

Cales que se componen principalmente de óxido e hidróxido de calcio y magnesio, los cuales endurecen lentamente al aire por la acción del CO₂ de la atmósfera. No presentan propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con el agua y se obtienen a partir de rocas calizas con contenidos en carbonatos superiores al 95%.

2.5.2 Cales hidráulicas.

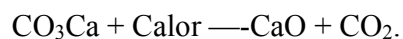
Endurecen en contacto con el agua, obtenidas a partir de calizas que contienen arcillas (Sílice y Alumina). Durante la calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos de propiedades hidráulicas.

2.6 CALES UTILIZADAS PARA LA ESTABILIZACION DE SUELOS.

Las cales utilizadas en la estabilización de suelos son CALES AÉREAS. Estas presentan las siguientes formas:

2.6.1 Cales vivas.

Son cales aéreas que se componen principalmente de óxido de calcio y óxido de magnesio producidas por calcinación de la caliza.



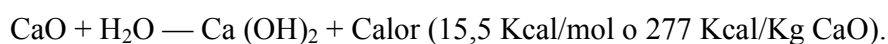
Se comercializan en grano (diferentes granulometrías) o molidas, incluso micronizadas. En contacto con el agua se hidratan siendo la reacción fuertemente exotérmica.

Cuando se utilizan calizas que también contienen en su composición carbonato de magnesio, una vez calcinadas se obtienen a la vez óxidos de calcio y de magnesio.

Si el porcentaje de óxido de magnesio es $> 5\%$, la cal se denomina “cal dolomítica o dolomía calcinada” (hay que tener en cuenta en la estabilización de suelos, que la hidratación de la cal dolomítica es más lenta que el de la cal viva con porcentaje de óxido de magnesio $<5\%$).

2.6.2 Cales hidratadas.

Son cales aéreas que se componen principalmente de hidróxido de calcio. Proviene de la hidratación controlada de cales vivas.



Este tipo de cal presenta menor reacción exotérmica que la cal viva al entrar en contacto con el agua.

2.6.3 Cal en forma de lechada.

Es la suspensión de cal hidratada en agua, también puede obtenerse a partir de la cal viva que al mezclarla con agua dará cal hidratada, formándose a continuación con el resto del agua la suspensión de lechada de cal.

La cal puede ser utilizada bajo forma de lechada en el tratamiento de los suelos cuando se quieran conseguir las siguientes ventajas:

- Supresión del polvo producido en el extendido de la cal,
- Humidificación de los suelos secos.

La lechada de cal puede ser preparada en la fábrica o in situ, en depósitos o cubos equipados de un sistema de agitación, a partir de cal viva o de cal hidratada. Una vez preparada la misma, ésta se aplica directamente sobre el suelo.

2.7 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES FISICAS DE LA CAL.

- **CARACTERISTICAS FISICAS.**

Finura.

Es una característica importante en la medida que interviene en las condiciones de almacenamiento, transporte y mezcla con el suelo. La hidratación de la cal viva con el agua produce la cal hidratada lo que lleva, además, una auto pulverización muy fina, incluso micronizada del producto. Además la finura puede intervenir en la reactividad de la cal.

- **PROPIEDADES FISICAS DE LA CAL.**

Color.

Las cales comerciales tienen color blanco o débilmente gris, a veces un color rojizo debido al óxido de hierro que se encuentra en el yacimiento.

Densidad.

Esta propiedad depende de la temperatura de calcinación, cuando mas alta es la temperatura de calcinación mayor será la densidad de la cal viva.

Dureza.

La dureza de las cales varia entre muy blandas y una dureza que se aproxima a la de la piedra original de donde se obtuvo, la dureza de la cal viva dependerá de la temperatura de calcinación.

Porosidad.

Depende del origen de la caliza y de las condiciones en que se lleve a cabo la calcinación. La porosidad en la cal viva es importante porque influye en la actividad química de la sustancia.

Plasticidad.

Es una propiedad física importante, la cual se define como la capacidad que posee una masa de cal para cambiar su forma cuando ésta es sometida a presión sin que se produzca la ruptura y para mantener la forma alterada.

2.8 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES QUIMICAS DE LA CAL.

- **CARACTERISTICAS QUIMICAS.**

El contenido en óxido de calcio (CaO).

Es el componente fundamental de la cal. Puede estar, en forma de óxido CaO en las calizas vivas, en forma de hidróxido Ca (OH)₂ en la cal hidratada.

El contenido en óxido de magnesio (MgO).

Es igualmente interesante, ya que el óxido de magnesio (MgO) posee en general una acción análoga a la del óxido de calcio (CaO). De igual manera puede estar en forma de óxido (MgO), o como hidróxido (Mg (OH)₂).

Reactividad de la cal viva.

Indica la velocidad ó cinética de la reacción de hidratación. Es función de las características físicas y químicas del producto y depende de la porosidad de la cal, del grado de calcinación, de la materia prima (caliza) utilizada y de la finura de la cal en el momento del ensayo.

El ensayo más empleado y conocido se basa en el carácter exotérmico de la reacción entre el CaO y el H₂O, otros componentes minoritarios de las cales son los carbonatos cálcico y magnesio que se evalúan mediante el contenido de CO₂ de las cales.

- **PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA CAL.**

Impureza.

La composición química y las propiedades de la cal, depende de la naturaleza y cantidad de impureza de la piedra original.

Reacción de la cal con agua.

La cal viva reacciona vigorosamente con el agua formando hidróxido de calcio y hay desprendimiento de calor; a este proceso se le conoce como hidratación o apagado de la cal. Utilizando la cantidad de agua exacta necesaria para la hidratación, se obtiene cal hidratada.

Recarbonatación.

La humedad del aire cataliza la reacción entre el óxido de calcio y el dióxido de carbono del aire. La reacción general se produce mediante la formación del hidróxido de calcio que luego reacciona con el dióxido de carbono.

2.9 PROCEDIMIENTO DE HIDRATACION DE LA CAL.

Al poner en contacto el Óxido de Calcio (CaO) con el agua, tiene lugar una reacción química con gran desprendimiento de calor, cuyo resultado final es el hidróxido de calcio o cal hidratada.

En la práctica, la hidratación de la cal se lleva a cabo mediante un proceso que consiste en agregar cantidades de agua al producto anhídrido según procedimientos tradicionales admitidos, como los siguientes:

2.9.1 Hidratación al aire.

Consiste en extender los terrones de cal viva sobre una superficie plana resguardada de la lluvia, poniendo en contacto con el vapor de agua de la atmósfera para que absorban la humedad. Para esta transformación se requiere un periodo de tres meses, y tiene el inconveniente que absorbe anhídrido carbónico, carbonatándose en parte, por lo cual no da buenos resultados como estabilizante de suelo.

2.9.2 Hidratación por aspersión.

Se utiliza un aspersor para rociar la cal extendida sobre una superficie, en capas, con una cantidad aproximadamente del 25% al 50% de agua del volumen total.

Si se recubre la cal mojada, con arena, esta se hidrata lentamente fuera del contacto del aire, y así se conservan sus propiedades físicas y mecánicas iniciales en perfectas condiciones por algún tiempo.

2.9.3 Hidratación por inmersión.

Luego que los terrones de cal viva se colocan en cestos de mimbre, se introduce durante un minuto en agua al tiempo (26^oC), hasta que se produzca un principio de efervescencia, luego se sacan los cestos y se vierten en montones para que se reduzca a polvo.

2.9.4 Hidratación por fusión.

Se introducen los terrones de cal viva en un cráter colocado sobre el montón de arena que ha de formar la mezcla y después se vierte unas tres veces su volumen de agua para obtener la pasta.

2.9.5 Hidratación de autoclave.

Consiste en introducir la cal viva en grandes recipientes de autoclave herméticamente cerrados, inyectando controladamente vapor de agua hasta obtener una cal de consistencia mucho más plástica.

**CAPITULO III:
ESTABILIZACION
DE SUELOS
PARA USO VIAL**

3.1 ALGUNAS TECNICAS PARA ESTABILIZACION DE SUELOS.

Como su nombre lo indica, con este proceso se pretende hacer más estable a un suelo. La razón primordial que acompaña a todas las estabilizaciones, es el de mejorar y cambiar las propiedades de un suelo. Existen muchas formas de estabilizar un material, un método muy usado de estabilización es la de mezclar a un material de granulometría gruesa, otro que carece de esa característica. Finalmente, está el recurso de estabilizar un suelo mezclándole cemento, cal, asfalto entre otros.

Los siguientes casos pueden justificar una estabilización:

- a) Un suelo de sub rasante desfavorable, o muy arenoso, o muy arcilloso.
- b) Materiales para base o sub base en el límite de especificaciones.
- c) Condiciones de humedad.
- d) Cuando se necesite una base de calidad superior, como en una autopista.
- e) Para el aprovechamiento de los materiales existentes del lugar de construcción de la obra.

Los agentes estabilizadores más usados para mezclarlos con suelo y formar capas de pavimento son: el cemento, la cal y el asfalto.

3.1.1 Estabilización con mezcla suelo cemento.

La estabilización de suelo con cemento, es la más utilizada en el mundo. Es muy sencilla de realizar y no se necesita equipo especial de construcción. El suelo-cemento consiste en mezclar suelo con cemento, y compactarlo en su contenido óptimo de humedad. La función del cemento es aglutinar el material y convertirlo en una masa endurecida de carácter estable. El agua hidrata el cemento y ayuda a obtener la máxima densidad lubricando los granos y partículas de suelo. Una vez que el suelo y el cemento han sido mezclados y compactado, inicia la acción del cemento la cual provoca el endurecimiento de la masa.

Al mezclar un suelo con cemento, se produce un nuevo material, duro, con mejores características que el usado como agregado. Esta estabilización no es tan sensible a la humedad como la hecha con asfalto. Pueden usarse todos los suelos para efectuarla, excepto los altamente orgánicos, aunque los más convenientes son los granulares, de fácil disgregado. Los limos, las arenas limosas y arcillas, todas las gravas y las arenas, son agregados adecuados para producir la mezcla suelo-cemento, que tienen excelentes cualidades, que respecto a la de los suelos granulares son:

- a) Tiene mayor módulo de elasticidad.
- b) Es más impermeable.
- c) Es muy resistente a la erosión del agua.
- d) En presencia de la humedad, en lugar de perder resistencia, la aumenta.
- e) Su resistencia aumenta con el tiempo.

La cantidad de cemento necesaria varía con el tipo de suelo, siendo menor si el suelo es poco arcilloso. El criterio de diseño de las mezclas suelo-cemento es para obtener un material de mayor resistencia. No sólo se debe pensar en disminuir plasticidad. La resistencia a la compresión, es uno de los parámetros primordial de análisis en la estructura de un pavimento, el cual se determina mediante la realización de probetas cilíndricas elaboradas con una energía de compactación determinada según sea la especificada y su respectiva humedad óptima. El procedimiento de construcción consta de las fases siguientes:

- a) Mezclado de cemento y suelo a estabilizar.
- b) Colocación de agua, hasta llegar a obtener la humedad optima dentro de la mezcla suelo-cemento.
- c) Compactación
- d) Curado de unos 7 días.

3.1.2 Estabilización con mezcla suelo-asfalto.

En algunos casos conviene estabilizar un material usando algún producto asfáltico para elaborara capas base o sub base. A estas bases asfálticas también se los conoce como base negras. El uso de algunos productos asfálticos (asfaltos rebajados, emulsiones asfálticas y cemento asfálticos) está limitado a suelos granulares o de partículas gruesas. Es muy difícil estabilizar un material arcilloso, por los grumos de esos suelos. La estabilización con asfalto puede tener dos fines:

- a) Reducir la absorción de agua del material, usando poca cantidad de asfalto
- b) Incrementar la resistencia de un material usando mayor cantidad de asfalto, como en las bases asfálticas.

3.1.3 Estabilización con mezcla suelo-cal.

El uso de cal para mejorar suelos con plasticidad, aparte de conseguir ese fin, aumenta también su resistencia a la compresión en función del tiempo.

La cantidad de cal variara en función de la necesidad que se tenga y de las propiedades del suelo utilizado en la estabilización. Generalmente los porcentajes de cal utilizados en una estabilización variaran de un 2 a 8% en peso. Para que la cal reaccione adecuadamente se necesita que el suelo presente plasticidad ($IP > 10$), y se pueda lograr así la acción puzolánica, que aglomerará adecuadamente las partículas del suelo. El suelo-cemento adquiere su resistencia rápidamente, ya que solo se necesita que el cemento se hidrate adecuadamente. En cambio el suelo-cal, necesita la reacción química de los iones calcio y los minerales arcillosos, que lentamente adquieren resistencia. Una ventaja del suelo cal es que su periodo de curado puede iniciarse más tarde, en cambio, el suelo-cemento requiere curado inmediato.

Por lo general, las arenas no reaccionan favorablemente con la cal y no pueden estabilizarse con ella.

El éxito de la estabilización con cal, no solo para disminuir plasticidad, sino para adquirir resistencia, es el tipo de suelo o el tipo de mineral arcilloso que contenga.

El criterio para diseñar en el laboratorio las mezclas suelo-cal, depende del papel que vaya a desempeñar la cal:

- a) Modificador de plasticidad o humedad.
- b) Proporcionador de resistencia.

3.2 ESTABILIZACION DE SUELOS PLASTICOS OCUPADOS EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR.

Es indispensable antes de comenzar cualquier trabajo con un suelo, tener el conocimiento más preciso posible sobre las características de los materiales que lo componen, de los problemas que estos materiales van a generar y de las soluciones que pueden adoptarse (por ejemplo el tratamiento de estabilización con cal).

La utilidad de la cal es para aquellos casos en los que no se necesite pronta resistencia. Este aglomerante es muy adecuado para bajar la plasticidad de los suelos plásticos o para contrarrestar el alto contenido de humedad en terracerías, bases, sub bases o sub rasante, siempre que éstas no sean muy arenosas.

Como norma general, se puede señalar que, para que la estabilización con cal sea eficaz, los suelos deben ser plásticos, y en este sentido se considera que, a partir de un Índice de Plasticidad, IP, igual o mayor de 10, el suelo es adecuado para reaccionar satisfactoriamente a su estabilización con cal, ya que esto es la clave para las reacciones químicas que proporcionan mejoras en las propiedades del suelo de forma inmediata y a largo plazo, y no contar con mas del 1% de materia orgánica; esto porque suelos que contengan cantidades superiores al 1% de materia orgánica puedan requerir porcentajes de cal adicional considerables y/o procedimientos de construcción especiales.

3.3 ANALISIS DE LOS MATERIALES A UTILIZAR EN UNA ESTABILIZACION DE SUELOS CON CAL.

Suelo.

Los suelos que componen la mezcla suelo – cal deben ser del propio camino o provenir, en todo o en parte, de préstamos seleccionados. Los sitios de préstamo deberán contar con suelos que cumplan con las propiedades requeridas por las normas AASHTO y ASTM para formar parte de la estructura de un pavimento.

Los suelos que se usen para la elaboración de mezcla suelo-cal deben estar limpios y recomendable que estos no deban tener mas de uno por ciento (1%) de su peso de materia orgánica. Además la fracción del suelo que pasa la malla No 40 debe tener un índice de plasticidad no menor de 10.

El tamaño máximo del agregado grueso que contenga el suelo no debe ser mayor de 50 mm ó 1/3 del espesor de la capa compactada de suelo-cal. El espesor total de la capa de suelo estabilizado con cal, será variable según se especifique en el proyecto.

Cal.

La cal que se use para la construcción de suelo-cal puede ser cal viva ó cal hidratada y debe satisfacer los requisitos establecidos bajo las especificaciones de la norma ASTM C-977.

Agua.

El agua que se use para la construcción de mezcla suelo – cal debe estar limpia, no debe contener materia orgánica y debe estar libre de sales, aceites, ácidos y álcalis perjudiciales.

Mezcla suelo-cal.

Los ensayos para determinar el porcentaje de cal y los demás requisitos que debe satisfacer la mezcla de suelo-cal deben ser ejecutados con los materiales que se vayan a usar, incluyendo el agua de mezclado, de acuerdo a la norma ASTM D 6276 (Método de ensayo estándar, usando el pH para estimar la proporción suelo-cal requerida para la estabilización de suelos).

El porcentaje óptimo de cal requerido en la estabilización del suelo, se determina mediante la estimación del pH, o determinando el índice de plasticidad mas bajo requerido, como resultado de varias mezclas de suelo-cal con diferentes porcentajes de cal, respecto al peso seco del suelo.

Cuando la mezcla de suelo-cal se use para la construcción de capas estructurales debe tener los valores C.B.R. requeridos. Se deberá mostrar una fórmula de trabajo, donde se indique las cantidades y tipo de cal, el volumen de agua y los procesos que se deben seguir para obtener los requerimientos estructurales solicitados.

3.4 PROPIEDADES DE LA MEZCLA SUELO-CAL.

Las mezclas suelo-cal sufren una serie de modificaciones en sus propiedades índices, las cuales se mejoran y hacen que el suelo se comporte de diferente manera al suelo natural, estas modificaciones se dan con más frecuencia en las siguiente propiedades:

3.4.1 Granulometría.

Los suelos con gran proporción de partículas finas, con plasticidad alta, son mas sensibles a la adición de cal que los suelos compuestos de arenas y limos, debido a la floculación de las partículas finas y su aglutinación posterior, lo que hace en algunos casos que pasados algunos días de hecha la mezcla, el análisis granulométrico del suelo, presente un incremento notable de arena fina y limo, así como una reducción en los tamaños que pasan por el tamiz No 200.

3.4.2 Plasticidad.

La adición de cal eleva el límite plástico de los suelos y reduce el límite líquido, principalmente en suelos muy plásticos, y puede tener el efecto contrario en los suelos de menor plasticidad.

3.5 TIPOS DE TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL.

Hay varios tipos posibles de tratamientos de suelos con cal, en función de los objetivos a conseguir: el secado, la modificación y la estabilización propiamente dicha.

3.5.1 Secado de suelos:

En el caso de suelos arcillosos con exceso de humedad, la adición de cal viva o cal hidratada disminuye el contenido de agua por la acción combinada de:

- a) aporte de producto seco,
- b) consumo del agua necesaria para hidratarse y formar hidróxido cálcico,
- c) y evaporación de agua debida a la reacción anterior, fuertemente exotérmica.

De esta forma, el aporte de un 1 % de cal viva puede disminuir el contenido de humedad del suelo en un 4 ó 5 %. Si a ello le sumamos el efecto de aireación y mezclado del material, el valor de la disminución puede llegar al 7 %.

La mezcla del suelo con cal permite, debido a la conjunción de los efectos anteriormente señalados, elevar la temperatura del suelo y reducir inmediatamente el exceso de humedad.

Por el contrario, si la humedad de los suelos se encuentra por debajo de la óptima, puede ser aconsejable aplicar la cal en forma de lechada o cal hidratada, aportando la cal y el agua necesarias en una sola operación.

3.5.2 Mejora por modificación:

Se trata de una modificación inmediata de las propiedades geotécnicas, reduciendo en un corto periodo de tiempo (minutos/horas) la cantidad de agua retenida por la arcilla y mejorando su trabajabilidad.

La mezcla de cal con el suelo provoca reacciones rápidas que originan cambios físico-químicos producidos por cambios iónicos, neutralización y floculación. Las partículas finas de arcilla se aglomeran en elementos más gruesos y friables. Estas reacciones se producen siempre que el suelo tenga un cierto porcentaje de finos.

En los suelos plásticos donde se aplica cal, se aprecia que el suelo pierde su carácter pegajoso y toma un aspecto arenoso, mejorando enormemente su trabajabilidad y compactibilidad, mejorando también la capacidad portante.

La modificación actúa tan rápidamente como se hace la mezcla de cal con el terreno. En general, para conseguir estas modificaciones, la dosificación necesaria de cal oscila entre el 1% y el 3%.

3.5.3 Estabilización:

La estabilización propiamente dicha consiste en una mejora a largo plazo (meses/años) por cementación, en función de la temperatura ambiente y de la naturaleza de la arcilla, aumentando la capacidad portante del suelo con el fin de poder emplearlo en capas más solicitadas. De esta forma pueden obtenerse bases, sub bases y sub rasantes con buenas propiedades estructurales que van incrementándose en el tiempo, a la vez que hace insensible la capa estabilizada al agua.

El objetivo principal de la cal en un suelo, es elevar su valor de pH hasta un valor de 12.4, de esta forma se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos portland, incrementan la resistencia mecánica. Esta

reacción de tipo puzolánico es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado. Los porcentajes necesarios de cal para garantizar la permanencia de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo oscilan entre el 2% y el 8%.

El mecanismo de estabilización es mucho más complejo que el de modificación, debido a las dos variables que influyen en su desarrollo. Por un lado, su desarrollo en el tiempo, y por otro, la reacción cal-arcilla. Es aconsejable, por lo tanto, basar el proyecto de una estabilización determinada en un estudio más en detalle de cómo mejora la cal los parámetros resistentes del suelo a medio y largo plazo.

3.5.4 Estabilización mixta:

Cualquiera de los efectos anteriores, conjunta o separadamente, pueden aprovecharse para mejorar el efecto de las cales sobre ciertos suelos cuando se van a tratar con otros ligantes, como suele ser el caso del cemento.

En el caso que los suelos a tratar con cemento, para su colocación de bases, sub bases o sub rasante, presenten humedades excesivas y/o tengan cierta plasticidad, la corrección previa de estos problemas mediante un leve tratamiento con cal (porcentajes en 1 por ciento), permite optimizar la acción del cemento sobre el suelo, reduciendo su dosificación necesaria y bajar los costos de la obra.

3.6 VENTAJAS DEL USO DE CAL COMO ESTABILIZADOR DE SUELO PARA CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR.

El tratamiento de suelos plásticos con cal viva, hidratada o cal en forma lechada en cualquier obra de movimiento de tierras (laderas, terraplenes, bases etc.), correspondiente a cualquier tipo de estructura (viales, aeropuertos, ferrocarriles, etc.), permiten obtener una serie de ventajas técnicas y económicas que se citan a continuación.

- a) Posibilidad de reutilización de los suelos disponibles del lugar, disminuyendo la necesidad de préstamo. Este aspecto, además de disminuir las afecciones

medioambientales, disminuye los costos de movimientos de tierra, incidiendo principalmente en el transporte de materiales y en el tiempo de ejecución.

- b) El empleo de la cal incrementa la capacidad portante de los suelos aumentando su CBR.
- c) Otra ventaja muy importante de la estabilización con cal frente al empleo de otros conglomerantes, es que no presenta un fraguado rápido, lo cual permite una gran flexibilidad en la organización de las distintas fases de ejecución: extendido, mezclado y compactado.
- d) Permite consistencia estable de los suelos bajo el efecto de las lluvias prolongadas.
- e) Favorece al secado de los suelos muy húmedos.
- f) Reduce la plasticidad.
- g) Beneficia la compactación de los suelos con humedades muy altas.
- h) Reducción de cambios volumétricos.

No obstante, para evitar la recarbonatación previa de la cal, debe realizarse el mezclado con el suelo antes de 8 horas, desde el momento del extendido. Además, con el fin de evitar la recarbonatación de la cal y su arrastre por el viento, conviene mezclar lo antes posible la cal extendida.

3.7 DISEÑO DEL TRATAMIENTO.

El objetivo ya una vez analizada la aptitud de los suelos al tratamiento con cal, será el de diseñar la dosificación de la mezcla suelo-cal óptima, en función de las características particular del suelo y de los objetivos a lograr.

Dependerá, por tanto, del efecto perseguido, ya sea el secado de suelos con humedad natural excesiva, una modificación instantánea del suelo y/o una estabilización de la capa a largo plazo.

3.8 ANALISIS PREVIO DE LOS SUELOS.

El primer paso será identificar completamente las características de los suelos a emplear para decidir si su estabilización con cal es la solución más recomendable.

En este sentido, los ensayos recomendados de realizar serán las siguientes:

- **Ensayos de identificación de suelos:**

(Límites Atterberg, granulometría, expansión, humedad natural, materia orgánica, entre otros.), y con los resultados obtenidos se podrán clasificar los suelos.

- **Ensayos de comportamiento:**

Los dos factores fundamentales son el de la compactación (Proctor normal o modificado) y la capacidad portante (C.B.R. y/o resistencia a compresión simple).

En función de los resultados de estos ensayos y de los objetivos a conseguir, se valorará la aptitud de los suelos a su tratamiento con cal. A este respecto, cabe mencionar que el tratamiento con cal será más beneficioso para un suelo cuanto mayor sea su proporción de finos y su plasticidad. En general, puede decirse que aquellos suelos con un índice de plasticidad igual o superior a 10, son susceptibles de mejorar sus propiedades por acción de la cal.

3.9 FORMULA DE TRABAJO.

Una vez considerado que el suelo es apto para su tratamiento con cal, se pasa a determinar la fórmula de trabajo para la mezcla suelo-cal que permita conseguir los objetivos propuestos.

Para ello, la fórmula de trabajo se obtiene a partir del análisis de diferentes parámetros del suelo a estabilizar mediante una serie de ensayos, los cuales serán determinados bajo las especificaciones de las normas ASTM y AASHTO respectivas para cada uno. Los

suelos serán analizados con diferentes porcentajes de cal a fin de encontrar un porcentaje óptimo de la misma, para el suelo en particular estudiado.

En el caso de buscar una estabilización a largo plazo, deberá de analizarse una serie de parámetros más detalladamente, como la resistencia a la compresión inconfiada con probetas confeccionadas con moldes utilizados para el ensayo proctor, y las cuales son ensayadas a diferentes edades y la capacidad portante de la mezcla suelo-cal.

Un método muy útil por su rapidez y fiabilidad es basar el estudio para la estabilización en el método del PH, el hecho por Eades y Grim (1966), especificado en la norma ASTM C 977 (preparación de muestra) y el desarrollo del ensayo regido por la norma ASTM D 6276.

Este procedimiento se basa en el hecho de que la adición de cal necesaria para estabilizar un suelo es aquella que garantiza el mantenimiento de un elevado pH que permita el desarrollo de las reacciones puzolánicas. Para ello, se ensayan muestras con distintos porcentajes de cal, midiéndose el pH en determinadas condiciones. El porcentaje óptimo es aquel que permite alcanzar el valor de 12.4.

**CAPITULO IV:
ANALISIS DEL SUELO
NATURAL,
PORCENTAJE
OPTIMO
DE CAL Y ENSAYOS
A LA MEZCLA
SUELO-CAL**

4.1 DESCRIPCION DE TRAMO DE PRUEBA.

El tramo de prueba que sirve de estudio para el desarrollo de este trabajo de graduación y para el cual se diseña la proporción de mezcla suelo-cal esta ubicado en caserío La Lima, jurisdicción de Huizucar, Departamento de La Libertad.

Este municipio está ubicado al sur de los municipios de Nuevo Cuscatlán, Antiguo Cuscatlán y San Marcos, colinda al sur con el municipio de La Libertad, al este con Panchimalco y Rosario de Mora y al oeste con el municipio de San José Villanueva.

El tramo de prueba estabilizado con cal cuenta con las siguientes características:

- Ubicación: Departamento de La libertad, Municipio de Huizucar.
- Ruta: LIB 12
- Estacionamiento: 5 + 140 a 5 + 290.
- Longitud de tramo de prueba: 150mts.
- Ancho: 5mts.
- Espesor de capa (mezcla suelo-cal): 0.30mts.



Fotografía 4.1

Tramo de prueba, ubicado en el Departamento de La Libertad, Municipio de Huizucar (previo a la estabilización con cal)

A continuación se detallan los ensayos realizados al tramo de prueba en estudio, basados en las especificaciones de las normas respectivas.

Análisis previo del suelo natural:

Tabla 4.1		Lista de Ensayos que se desarrollan en esta sección:
Ensayo Numero	Norma	Título
1.	AASHTO T 2-91 (2000)	Muestreo de suelos
2.	AASHTO T 248-02	Reducir muestras de suelo a tamaño de ensayo
3.	AASHTO T 89-02	Determinación del límite líquido del suelo
4.	AASHTO T 90-03	Determinación de límite plástico e índice de plasticidad
5.	AASHTO T 11-97 (2000)	Materiales más finos que pasan el tamiz de 75 µm (No. 200) en suelos minerales por lavado
6.	AASHTO T 27-99	Análisis por tamices de suelo fino y grueso
7.	AASHTO M 145-91 (2000)	Método de ensayo estándar para clasificación de los suelos y mezclas de suelo-agregado para la construcción de carreteras
8.	ASTM D 2487-00	Norma estándar de Clasificación de Suelos para fines de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS))
9.	ASTM D 2974-00	Método de ensayo para determinar el contenido de humedad, ceniza y materia orgánica de turba y otros suelos orgánicos
10.	ASTM D 2216-03	Método de ensayo para la determinación en laboratorio del contenido de agua (Humedad) de suelos y rocas a través de su masa
11.	AASHTO T 99-03	Ensayo relación densidad – humedad de suelos usando un apisonador de 2.5kg. (5.5 lb.) y una caída de 305mm (12pulg)
12.	AASHTO T 180-03	Ensayo relación densidad – humedad de suelos usando un apisonador de 4.55kg. (10 lb.) y una caída de 457mm (18pulg)
13.	AASHTO T 193-99 (2003)	Método de ensayo para determinar el Valor de Soporte de California (CBR)
14.	ASTM D 4829-03	Método de ensayo estándar para encontrar el índice de expansión de suelos
15.	ASTM D-2166-03	Método de ensayo para determinar la resistencia de suelos a la compresión simple inconfina
16.	ASTM D 6276-03	Ensayo para la determinación de la proporción suelo-cal mediante la utilización de pH
17.	ASTM D 5102 – 04	Métodos de prueba estándar para resistencia a la compresión inconfina de mezclas de suelo compactado con cal.

Ensayos a suelo natural para determinar si este es apto para ser estabilizado con cal y determinación del porcentaje de cal a utilizar en tramo de prueba:

- Método de ensayo para determinar el contenido de humedad, ceniza y materia orgánica de turba y otros suelos orgánicos ASTM D 2974-00
- Determinación del límite líquido del suelo AASHTO T 89-02
- Determinación de límite plástico e índice de plasticidad AASHTO T 90-03
- Especificación estándar para cal hidratada en estabilización de suelos
- ASTM C 977-03
- Ensayo para la determinación de la proporción suelo-cal mediante la utilización de pH ASTM D 6276-03

En base a las normas y especificaciones de los ensayos antes mencionados a continuación se presenta una guía paso a paso del proceso seguido para analizar los materiales que conformaran la mezcla suelo-cal, y el procedimiento realizado para encontrar la dosificación adecuada de cal para lograr la estabilización del suelo en estudio.

4.2 CARACTERISTICAS DEL SITIO DONDE SE EXTRAE EL SUELOS ANALIZADO.

El material que se analizó para fines de investigación en este trabajo se obtuvo del muestreo sobre la calzada de la carretera rural que de Nuevo Cuscatlán conduce hacia San José Villanueva, a la altura del kilómetro 5+140, comunidad La Lima, Municipio de Huizucar, Departamento La Libertad.

4.3 PROCESO A SEGUIR PARA EL ANALISIS DEL SUELO NATURAL PREVIO A SU ESTABILIZACION.

Involucra todos aquellos ensayos necesarios, que permita una identificación y descripción del tipo de material, para su posterior clasificación que permita los análisis previos antes de estabilizarlo con cal y su análisis en una mezcla suelo-cal.

4.3.1 Muestreo de suelos.

Lo primero que se debe realizar es el “muestreo de suelo” objeto de estudio, conforme a la norma **AASHTO: T 2-91 (2000)**, (Para mayor información consultar norma)

El muestreo es igualmente importante como cualquier otro ensayo, y por lo cual el encargado de realizarlo tendrá mucho cuidado para obtener muestras que exhiban la naturaleza y condición de los suelos que representan.

En la construcción de carreteras, para materiales a utilizarse en bases, sub-base, sub-rasante, etc. muestrear las unidades seleccionadas por un método aleatorio, de acuerdo a las especificaciones **AASHTO T 2-91 (2000)**. Obtenga al menos tres porciones aproximadamente iguales, seleccionados al azar de la unidad que esta siendo muestreada y combínelas para formar una sola muestra de campo. En la carretera tome cada porción completa de la capa del suelo, teniendo que excluir cualquier suelo que no pertenezca a la capa. Marque claramente las áreas específicas desde las cuales será removida cada porción: el uso de una plantilla metálica colocada sobre el área es de una gran ayuda para asegurar que las porciones sean aproximadamente de la misma masa.



Fotografía 4.2

Muestreo de suelo en tramo de prueba

Fotografías tomadas en tramo de prueba ubicado en el municipio de Huizucar.

4.3.2 Reducción de muestras de suelos a tamaño de ensayo.

Luego de realizar un adecuado muestreo en campo, lo siguiente es reducir la muestra a tamaño de ensayo en base a norma **AASHTO: T 248-02**, (Para mayor información consultar norma), de tal manera que la selección sea representativa de todo el material.

NOTA: Refiérase al ANEXO 1 “Lista de chequeo para control de laboratorio”, para tener una idea de la cantidad de material mínima necesaria para la realización de todos los ensayos que impliquen el diseño de una mezcla suelo-cal.

Selección del método.

Existen tres métodos para realizar una reducción de muestra: Método A (Cuarteador Mecánico), Método B (Cuarteador Manual) y Método C (Apilamiento Miniatura).

Suelo Fino- Reduzca el tamaño de las muestras de suelo fino que están en una condición de saturados superficialmente seca por un partidador mecánico de acuerdo al Método A.

Reduzca el tamaño de las muestras que tengan humedad libre en la superficie de las partículas por cuarteo de acuerdo al Método B, o tratado como un apilamiento miniatura, como se describe en el Método C.

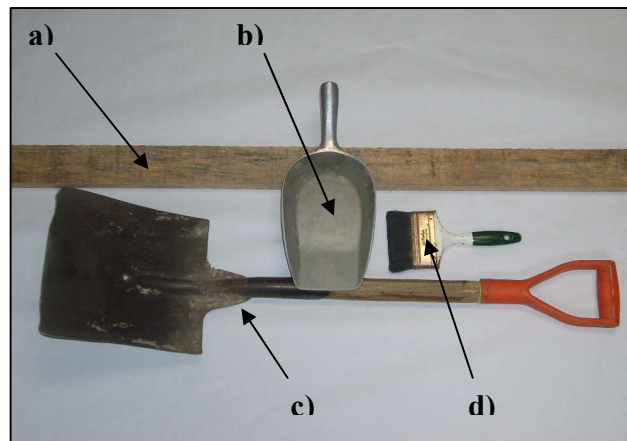
Si se desea usar el Método B o Método C, y la muestra no tiene humedad superficial en la partícula, la muestra puede ser humedecida para lograr esta condición, mezcle completamente, y entonces efectúe la reducción de la muestra.

Si se desea usar el Método A y la muestra tiene humedad libre en la superficie de las partículas, la muestra entera puede ser secada para lograr la condición saturada superficialmente seca, usando temperaturas que no excedan las especificaciones para cualquiera de los ensayos contemplados, y entonces se realiza la reducción de la muestra.

Suelo grueso y mezclas de suelo grueso y fino. Reduzca la muestra usando un cuarteador mecánico de acuerdo con el Método A (método preferido) o por cuarteo de acuerdo con el Método B. El apilamiento miniatura, del Método C no es permitido para suelo grueso o mezclas de suelos grueso y fino.

En nuestro caso por ser un suelo en su mayoría de grano fino y por contar con humedad ambiente, la reducción de muestra a tamaño de ensayo se realizó por el método B (cuarteo manual) tal como se describe a continuación.

El equipo consistirá de una regla, un cucharón de fondo plano y borde recto, pala o cuchara de albañil, una escoba o brocha y una lona de aproximadamente 2x2.5m (6x8 pies).



Fotografía 4.3

Equipo: a) Regla b) Cucharón c) Pala
d) Brocha

Fotografía tomada en FC S. A. DE C. V. Laboratorio de Suelos y Materiales.

Para lo cual:

Coloque la muestra original en una superficie dura, limpia y nivelada donde no se produzcan pérdidas de suelo ni adición accidental de material extraño.

Mezcle el material completamente, traspaleando la muestra entera al menos tres veces.

En el último traspaleo forme con la muestra un apilamiento cónico, depositando cada palada en la parte superior del apilamiento.

Aplane cuidadosamente el apilamiento presionado con una pala la parte superior del cono hasta obtener un espesor y diámetro uniforme, de tal forma, que se divida en cuatro partes, de manera que cada cuarto del apilamiento contenga el suelo que originalmente se encontraba en la muestra original.

El diámetro deberá ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor. Ya sea con una pala o cuchara, divida en cuatro partes iguales la masa aplanada y remueva los cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el suelo fino que se encuentre entre los espacios divididos, limpiando con una brocha. Mezcle sucesivamente formando el cono y divida en cuartos el material restante hasta que la muestra se reduzca al tamaño deseado (siguiendo el procedimiento anteriormente descrito).

Cuando la superficie del piso está irregular, la muestra de campo puede ser colocada en una manta de lona y puede mezclarse con una pala o levantando alternamente cada esquina de la lona y llevándola sobre la muestra hacia la esquina diagonalmente opuesta provocando que el suelo se revuelva; luego aplane el apilamiento.

Divídala y si la superficie bajo la manta está irregular, introduzca una regla o un tubo bajo la lona pasando por el centro del apilamiento y entonces levante ambos extremos del tubo, dividiendo la muestra en dos partes iguales.

Retire el tubo dejando un pliegue en la lona entre las porciones divididas. Inserte de nuevo el tubo perpendicularmente bajo el centro del apilamiento a la primera división y otra vez levante a ambos lados del tubo, divida la muestra en cuatro partes iguales. Remueva dos cuartos diagonalmente opuestos, siendo cuidadoso en limpiar las partes finas de la lona. Sucesivamente mezcle y divida en cuartos el material remanente hasta que la muestra se reduzca al tamaño deseado.



Fotografía 4.4

Cuarteo Manual:

- a) Disgregue las partículas y tamice .
- b) Seleccione una cantidad apropiada para la reducción.
- c) Con la pala forme un cerrito del material.
- d) Con la brocha divida los finos hacia los extremos.
- e) Con la pala divida la otra mitad formando los cuartos.
- f) Seleccione dos cuartos opuestos .

Fotografía tomada en FC S. A. DE C. V. Laboratorio de Suelos y Materiales.

Se busca con este procedimientos reducir la muestra total obtenida en campo o producida en el laboratorio a un tamaño conveniente para realizar un número de ensayos que describan al suelo y medir su calidad de tal manera que la porción más pequeña de la muestra sea representativa de la muestra total suministrada.

Las diferencias sustanciales entre las muestras de ensayos seleccionadas algunas veces no pueden ser evitadas, como por ejemplo, en el caso de un suelo que tenga relativamente pocas partículas alargadas en la muestra.

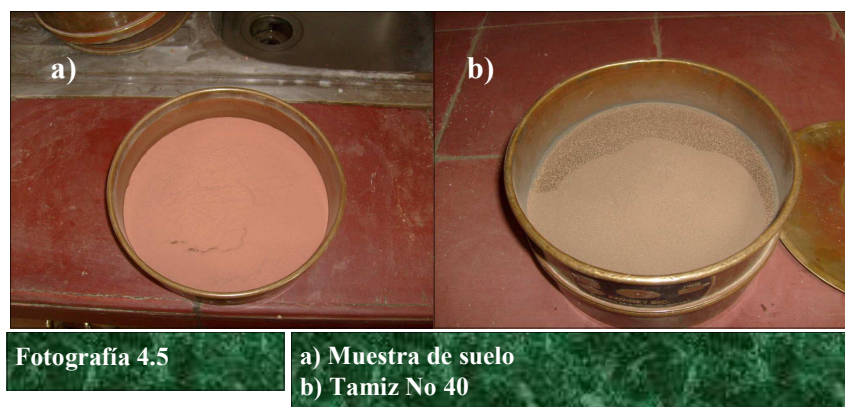
Hay posibilidad de inclusión o exclusión de una sola o dos partículas en la muestra seleccionada para el ensayo y puede influenciar importantemente en la interpretación de las características de la muestra original. En estos casos la muestra original completa debe ser ensayada.

4.3.3 Determinación del límite líquido del suelo.

Una vez que se tiene una muestra representativa del material selecto, se procede a determinar el límite líquido de la muestra, que es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico, en base a la norma **AASHTO T 89-02**, (Para mayor información consultar norma), valor que servirá para clasificar el suelo.

El procedimiento a seguir será el que se describe a continuación:

Tomar una muestra de 100g del material que pasa el tamiz de 0.425mm (No 40).



Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

El dispositivo para límite líquido será objeto de una inspección para determinar si el está en buen estado de funcionamiento.

La herramienta de ranurador será inspeccionada para determinar que las dimensiones son las apropiadas (para mayor información verificar apartados en norma ASTM T 89-02).

Luego ajustar la altura de caída de la copa de modo que el punto de la copa que entra en contacto con la base se eleve a una altura de $10.0 \pm 0.2\text{mm}$.

La muestra de suelo se colocará en la copa casagrande, mezclar bien con 15 a 20ml de agua destilada o agua desmineralizada; añadir agua, amasar la mezcla y remover con una

espátula. Otras adiciones de agua se harán en incrementos de 1 a 3ml. Cada incremento de agua se mezclará con el material de ensayo. Una vez que han comenzado los ensayos, no añadir mas suelo seco a la mezcla humedecida.

La copa del dispositivo de límite líquido no se utilizará para mezclar el suelo con el agua. Si demasiada humedad, se ha añadido a la muestra, se descartara la muestra, o mezclar y amasar hasta que la evaporación natural disminuya el punto de cierre en un rango aceptable.

Cuando obtengamos una mezcla suelo-agua homogénea y de consistencia apta, una cantidad suficiente de ésta mezcla se colocará en la copa hasta el nivel de base de la misma, mediante el uso de una espátula, al mismo tiempo recortar hasta una profundidad de 10mm en el punto de espesor máximo.

El exceso de la mezcla colocarla en un recipiente y cubrirlos para retener la humedad en esta. El suelo en la copa del dispositivo deberá ser dividido por un firme golpe de ranurador a lo largo del diámetro de la copa a través de la línea central con el ranurador a modo de formar una limpia ranura en la mezcla de adecuadas dimensiones como se muestra en la fotografía 4.6.

El número de choques necesaria para cerrar la ranura 1/8" se registrará.



Fotografía 4.6

Dispositivo de Límite Líquido y muestra de suelo

Fotografía tomada en FC S. A. DE C. V. Laboratorio de Suelos y Materiales.

Para la humedad tome un trozo de suelo de aproximadamente del ancho de la espátula, que se extiende de borde a borde de la mezcla del suelo en ángulo recto a la ranura e incluyendo la parte del cierre de la ranura.

El suelo que queda en la copa será transferido a la mezcla de plato. La copa y la herramienta de ranurador se lavan y se secan para prepararlas para el próximo punto.

La anterior operación se repetirá por lo menos para dos muestras con suficiente agua añadida para poner el suelo en una condición más fluido. El objeto de este procedimiento es obtener muestras con coherencia tal que al menos un punto que se haga este dentro de los siguientes rangos de numero de golpes para cerrar la ranura: 25-35,20-30,15-25, por lo que el rango en los tres puntos no debe diferir en menos de 10 golpes.

Plotee la relación entre el contenido de agua (%w) y el número correspondiente de golpes de la copa en un grafico. El contenido de agua en las ordenadas (Y), y el numero de golpes en las abscisas (X). Luego dibuje la mejor línea recta para unir lo mejor posible los tres o más puntos ploteados. Tome el contenido de agua de la intersección de la línea de las abscisas correspondiente a 25 golpes con la línea que une la dispersión de los

valores registrados que se proyecta hasta cortar con una línea horizontal a las ordenadas, como el límite líquido.

Para efectos de encontrar parámetros de conformidad con las especificaciones según norma, un valor observado o un valor calculado se redondeará "a la unidad más cercana" en la última cifra a mano derecha empleadas para expresar la delimitación del valor.

En base al procedimiento de la norma AASHTO T 89-02 método A, y para el suelo muestreado según la norma AASHTO T 2-91(2000) sobre la calzada de la carretera LIB 12, se determinó su límite líquido, obteniéndose el siguiente resultado:



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO LIMITE LIQUIDO
AASHTO T -89, ASTM D-4318

Solicitante: Universidad de El Salvador Material: Del Lugar
Proyecto: Trabajo de Graduación Estacionamiento: 5+140 a 5+290
Procedencia: LIB 12 Fecha de recibido: Junio/2008
Ubicación: HUIZUCAR Fecha de ensayo: Junio/2008

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO

Número de golpes	15	22	27
Tara	29	30	31
Peso Tara	15.09	14.92	14.97
Muestra humedad + tara	47.02	62.72	46.52
Muestra seca + tara	38.16	49.84	38.19
% de humedad	38.4%	36.9%	35.9%

LIMITE LIQUIDO	36.3% ~ 36%
----------------	--------------------

Observaciones: 3 puntos de análisis; el valor del limite liquido se aproximara al entero mas próximo

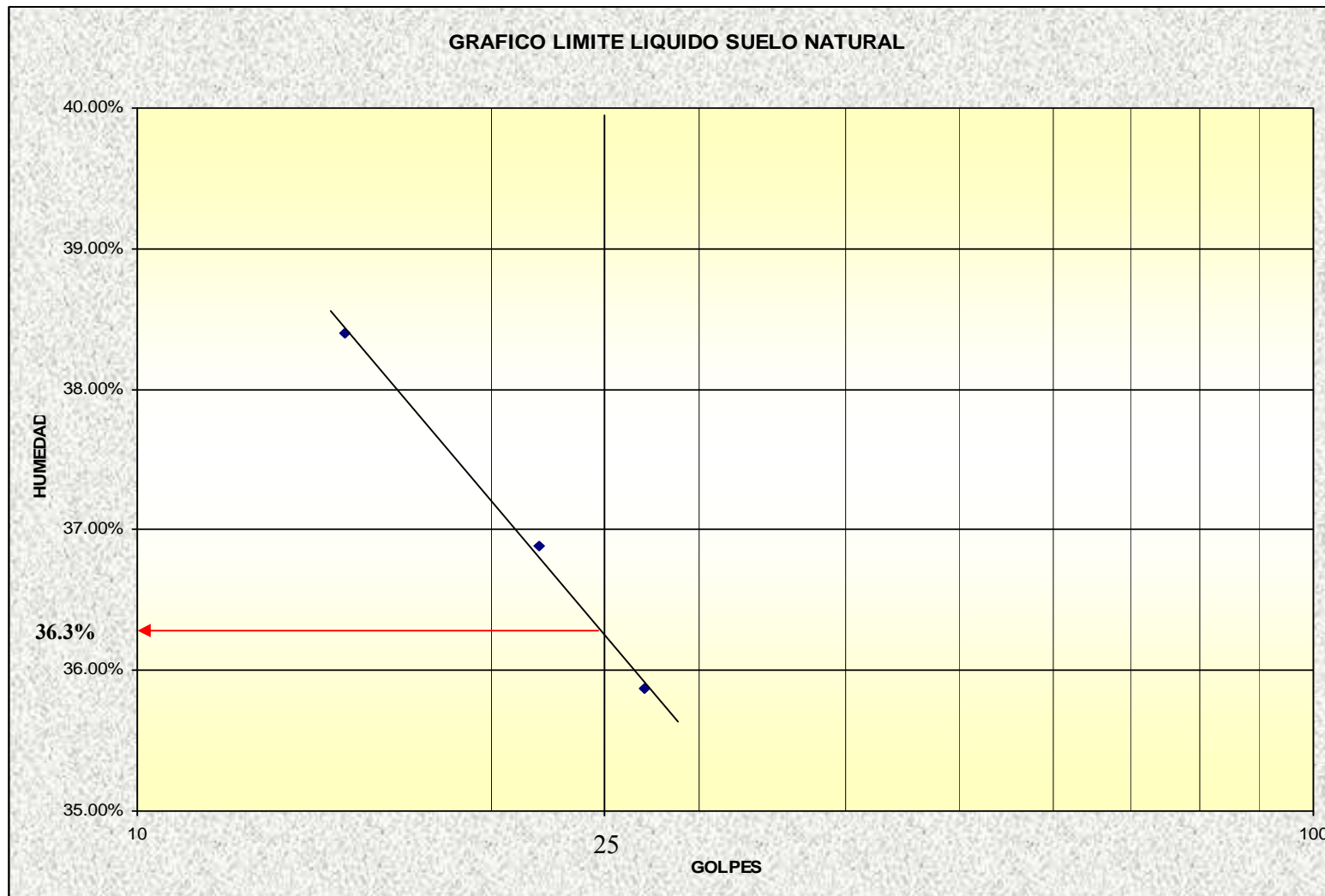


Gráfico 4.1 **Determinación del valor del límite líquido**

De graficar las humedades vrs el numero de golpes obtenemos un valor de limite liquido de 36.3%. Basados en lo expuesto por la norma que rige este ensayo, el valor del límite líquido deberá aproximarse al entero más próximo obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 4.2		Determinación del Límite Líquido		
Numero de golpes		15	22	27
% de humedad		38.0%	37.0%	36.0%
Valor de Límite Líquido		36.3%~36%		

Luego de calcular el límite líquido se necesita conocer la plasticidad del suelo, para poder clasificar el tipo de material con su respectivo nombre.

4.3.4 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

Seguido de la determinación del límite líquido de la muestra, se necesita conocer el límite de plasticidad del suelo y con ello el índice de plasticidad, en base a la norma **AASHTO T 90-03**, (Para mas información consultar norma).

Preparación de la muestra.

Si solo es necesario el límite plástico, obtener una cantidad de suelo con masa de unos 20g de la parte del material que pasa por el tamiz de 0.425mm, y mezclarla hasta obtener homogeneidad en la mezcla. Coloque el suelo secado al horno en un recipiente y mezclar a fondo con agua destilada o agua desmineralizada hasta que la masa se convierte en lo suficientemente plástica como para ser fácilmente la forma de una pelota.

Tomar parte de esta pelota con una masa de alrededor de 8g de la muestra.

Si el límite plástico y los demás límites son necesarios, tomar una muestra de prueba con una masa de alrededor de 8g, del sobrante del límite líquido realizado bajo la norma AASHTO T 89.

Tome la muestra y mezclar la masa hasta que esta se convierta lo suficientemente plástico como para hacerla fácilmente en forma de una bola sin que se pegue en los dedos cuando se apreté demasiado.

Si la muestra tomada durante la prueba de límite líquido esta demasiado seca para permitir rodarla y hacer un rolito de 3mm, añadir más agua y repetir el procedimiento.

Luego seleccione un porción de 1.5 a 2.0g de la masa de suelo.

Ruede la masa del suelo hasta obtener un rollito de 3 mm de diámetro, a un ritmo de 8 a 90 rodaduras por minuto, contando como una rodadura completa cuando se lleve la muestra con la mano hacia adelante y luego hacia atrás a la posición de suelo ensayada.

Con la muestra en la palma de la mano y sobre la placa de vidrio (o un trozo de papel, donde este sobre una superficie suave y horizontal), ejercer muy poca presión para rodar la muestra con un diámetro uniforme en toda su longitud. Hasta formar un rollito donde su diámetro llega a 3mm y en el cual se empiece a presentar grietas en toda su longitud. La cantidad de presión necesaria ejercida por la mano puede variar, según el tipo de superficie donde se realice el ensayo.

El desmoronamiento puede manifestarse de diferente forma con distintos tipos de suelo.

Reunir las partes de la muestra laminada o que se derrumbó, colocarla en un contenedor y luego pesarla. Inmediatamente cubrir el recipiente para no producir pérdida de humedad.

Repetir las operaciones descritas anteriormente, hasta obtener una muestra representativa del suelo, para determinar su humedad, el valor promedio de estas humedades se reportara como el límite plástico

Determinar el contenido de humedad del suelo en los contenedores de conformidad con la norma ASTM D 2216, y registrar los resultados.

El valor de Límite de Plasticidad se reportará al entero más próximo.

El límite plástico de un suelo es el más bajo contenido de agua en el que el suelo sigue presentando plasticidad. El índice de plasticidad de un suelo es el rango en el contenido de agua, expresado como porcentaje de la masa de suelo secada en horno, dentro del cual el material se encuentra en un estado plástico; siendo la diferencia numérica entre el límite líquido y límite plástico del suelo.

Para el suelo objeto de estudio se obtuvo el siguiente resultado:

Tabla 4.3		Resultados del Límite Plástico		
DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO				
Tara	32	33	34	
Peso tara	15.2	14.8	14.8	
Muestra húmeda + tara	32.3	32.8	32.1	
Muestra seca + tara	29	29.2	28.7	
% de humedad	24.0%	25.0%	24.0%	
Límite Plástico	24.4%-24%			

Tabla 4.4		Resultados de Índice de Plasticidad	
DETERMINACIÓN DEL INDICE DE PLASTICIDAD (IP)			
Índice de Plasticidad (IP)=	Limite Liquido – Limite Plástico		
Índice de Plasticidad (IP)=	36% - 24%		
Índice de Plasticidad (IP)=	12%		

Los resultados muestran que el suelo es apto para estabilizarse con cal (ver criterios para estabilización de suelos con el uso de cal en capítulo IV, sección 4.4.1), es importante tomar en cuenta que la plasticidad de un suelo puede variar por diferentes factores que perjudique o cambien las características y propiedades reales del mismo. En nuestro caso es importante aclarar que la muestra se tomó directamente de la calzada donde el efecto de transición de los vehículos, así como de las escorrentías de agua producidas por lluvias han contribuido al traslado de materiales de otro sitio, contaminando la zona del muestreo, alterando así las propiedades y características del mismo; y pudiendo disminuir en cierto grado la verdadera plasticidad que presenta el suelo del lugar.

NOTA: Para fines de este trabajo la muestra analizada corresponde a la calzada de la vía, ya que será este mismo material el que se ocupara dentro del proceso constructivo de la mezcla suelo-cal, por lo cual los resultados que se presentan corresponden a esta situación en particular.

Seguido de esto, se procede a determinar el tamaño de las diferentes partículas que conforman este suelo, realizando una granulometría completa en base a la norma AASHTO T 27-99, si el material posee demasiados finos incrustados en partículas mas grandes que dificulten una granulometría en seco, tal es el caso presentado con el material de carretera LIB 12, lo primero que se efectúa es un desprendimiento del material mas fino en base a la norma AASHTO T 11-97(2000) (granulometría por lavado), usualmente esto se da en muestras de materiales alterados, fenómeno que no se presenta en agregados gruesos producidos en plantas donde se controlan las graduaciones de tamaños de partículas, la granulometría por lavado se presenta a continuación:

4.3.5 Materiales mas finos que pasan el tamiz de 75 μm (no. 200) en agregado mineral por lavado.

Esta procedimiento cubre la determinación de la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm (No. 200) en suelo por lavado en base a la norma **AASHTO T 11-99** (Para mayor información consultar norma). Partículas de arcilla y otras partículas de agregado que se dispersan por el agua de lavado, así como materiales solubles en agua, pueden ser removidas del suelo durante este ensayo.

El suelo más fino que el tamiz de 75 μm (No. 200), puede ser separado de partículas mayores eficazmente y completamente por el tamizado en húmedo, que por el tamizado en seco. Por consiguiente, cuando se desean determinaciones exactas de material más fino que 75 μm en suelo fino y grueso, se utiliza este método de ensayo en la muestra antes del tamizado en seco de acuerdo con la especificación AASHTO T 27 (análisis por tamizado de suelo grueso y fino).

Los resultados de este método de ensayo son incluidos en el cálculo de la especificación

AASHTO T 27, y el cálculo total de suelo más fino que $75\mu\text{m}$ por lavado, más la cantidad obtenida por tamizado seco en la misma muestra, es reportado con los resultados de AASHTO T 27.

El agua de grifo es adecuada para separar el suelo más fino que $75\mu\text{m}$ del suelo más grueso en la mayoría de suelos.

El porcentaje de material pasante por malla No 200, se realiza bajo el siguiente procedimiento.

Secar la muestra de ensayo hasta alcanzar una masa constante, a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ($230 \pm 9^\circ\text{F}$). Determinar la masa con una precisión del 0.1 por ciento de la masa de la muestra de ensayo.

La cantidad de material a utilizar en este ensayo dependerá del tamaño máximo nominal de la muestra (consultar norma AASHTO T 11), y usar esta como la masa seca original de la muestra.



Fotografía tomada en FC S. A. DE C. V. Laboratorio de Suelos y Materiales.

Después de secar y determinar la masa, colocar la muestra de ensayo en el contenedor y agregar suficiente agua para cubrirla. Ningún detergente, agente dispersante, u otra sustancia se añadirá al agua. Agitar la muestra con suficiente vigor para que haya una separación completa de todas las partículas más finas que el tamiz de $75\text{-}\mu\text{m}$ (No. 200) de las partículas más gruesas, y que el material fino quede en suspensión. El uso de una

cuchara grande u otra herramienta similar para revolver y agitar el suelo en el agua de lavado tiene resultados satisfactorios. Inmediatamente vierta el agua de lavado conteniendo los sólidos suspendidos y disuelva sobre el tamiz No 200. Esfuércese por evitar, tanto como sea posible, la decantación de partículas más gruesas de la muestra.

Añada una segunda cantidad de agua a la muestra en el recipiente, agitar, y decantar como antes. Repetir esta operación hasta que el agua de lavado salga clara.



Fotografía 4.8

Material Siendo lavado por la malla No 200

Fotoerapia tomada en FC S. A. DE C. V. Laboratorio de Suelos y Materiales.

Regresar todo el suelo retenido en el tamiz No200, limpiando con un chorro de agua la muestra lavada. Secar el suelo lavado hasta obtener masa constante a una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F) y determinar la masa con una precisión del 0.1 por ciento de la masa original de la muestra.

Los resultados obtenidos en la realización de este ensayo utilizando agua de chorro para el suelo en estudio son los que a continuación se presentan:

Tabla 4.5	Material más fino que pasa el tamiz No 200 por lavado
Peso neto	435.9g
Peso retenido en malla No 200	217.1g
% que se retiene en el tamiz No 200	49.8%
% que pasa el tamiz No 200	50.2%

Con esto se procede luego a determinar la granulometría del material retenido en la malla No 200, para obtener la distribución de tamaños de partículas del material en análisis.

4.3.6 Análisis por tamizado de suelo grueso y fino.

Este método es primordialmente para determinar la graduación de suelos y materiales propuestos para ser usados en carreteras o están siendo usados como agregados, en base a la norma **AASHTO T 27-99** (Para mayor información consultar norma).

Los resultados se usan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas, según los requisitos especificados y para proporcionar información necesaria en el control de la producción de agregados y mezclas que contienen agregados. Un chequeo rápido para el control de este ensayo puede llevarse a la mano utilizando el listado de chequeo del ANEXO 1.

Procedimiento:

Si la muestra de ensayo no ha sido sujeta al ensayo AASHTO T 11, seque la muestra a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F) y determine la masa con una aproximación a 0.1 por ciento del total de la masa de la muestra seca original.

Seleccione los tamices con aberturas adecuadas para proveer la información requerida por las especificaciones que cubre el material a ser ensayado. Use tamices adicionales según sea necesario para proporcionar otra información, tal como el módulo de finura, o para regular la cantidad de material en un tamiz. Se colocan los tamices en orden decreciente de tamaño de abertura de arriba hacia abajo y coloque la muestra en el tamiz superior

hasta que llegue al fondo, ó la porción de la muestra si debe ser tamizada en más de una porción. Agite los tamices a mano o con el equipo mecánico por un periodo suficiente, establecidos por ensayos o controlado por medición en la muestra actual de ensayo.

Limite la cantidad de material en un tamiz dado tal que todas las partículas tengan oportunidad de alcanzar las aberturas del tamiz en varias ocasiones durante la operación del tamizado.

Para tamices con aberturas de 4.75mm (No. 4) y mayores, la cantidad retenida en Kg. no excederá el producto de 2.5 x (abertura de tamiz, mm x (área efectiva del tamiz, m²)).

Prevenga una sobrecarga de material en un tamiz individual por uno de los siguientes métodos:

1-Inserte un tamiz adicional con abertura de tamaño intermedia entre el tamiz que puede ser sobrecargado y el tamiz inmediatamente por encima de ese tamiz, en el conjunto original de tamices.

2-Parta la muestra en dos o más porciones, tamizando cada porción individualmente. Combine las masas de las porciones retenidas en un tamiz específico antes de calcular el porcentaje de la muestra en el tamiz.

3-Use tamices que tengan un marco de tamaño grande y que provea un área de tamizado mayor.

4-En caso de mezclas de suelo grueso y fino, la porción de la muestra más fina que el tamiz 4.75mm (No 4) puede ser distribuido en dos o más juegos de tamices para prevenir sobrecargar los tamices individuales.

Continúe tamizando por un periodo suficiente de tal manera que después de completado, no más del 0.5 % de la masa del total de la muestra pase cualquier tamiz durante un minuto continuo de tamizado manual, realizado bajo el siguiente procedimiento:

Mantenga el tamiz individual con una mano, provista con un fondo y tapa, las cuales deben ajustarse de forma cómoda, en una posición ligeramente inclinada. Golpee el lado del tamiz con rapidez y con un movimiento ascendente en contra de la palma de la otra mano a una razón de alrededor de 150 veces por minuto, se gira el tamiz alrededor de un sexto de una revolución en intervalos de 25 golpes. En la determinación eficiente del tamizado para tamaños mayores que el tamiz de 4.75mm (No. 4), se limita el material en el tamiz a una simple capa de partículas. Si la cantidad de los tamices para el ensayo hacen impráctico el movimiento de tamizado descrito, use tamices de diámetro de 203.2mm (8 pulg.) para verificar la eficiencia del tamizado.

A menos que un agitador mecánico de tamices sea usado, se deben tamizar manualmente las partículas mayores de 75mm (3pulg.) para determinar la abertura del tamiz más pequeño a través del cuál cada partícula pasará, si es necesario girar las partículas, en orden para determinar si atravesarán una abertura en particular; sin embargo, no fuerce las partículas para que pasen a través de una abertura.

Determine la masa de cada porción de tamaño en una báscula o balanza con aproximación del 0.1% del total de la masa de la muestra seca original. La masa total del material después de tamizado debe verificarse minuciosamente con la masa original de la muestra colocada sobre los tamices. Si las cantidades difieren por más de 0.3 % basados en la masa de muestra seca original, los resultados no podrán ser usados para propósitos de aceptación.

Si la muestra ha sido previamente ensayada por el Método de Ensayo AASHTO T 11, añada la masa del material más fino que el tamiz 75 μ m (No. 200) determinada por este método a la masa que retiene el tamiz 75 μ m (No. 200) por tamizado seco de la misma muestra en éste método.

Una determinación exacta del material más fino que el tamiz de 75 μ m (No.200) no puede ser realizada utilizando solamente éste método. El Método de ensayo AASHTO T 11 para material más fino que el tamiz 75 μ m por lavado debe ser empleado.

Reporte los porcentajes al número entero más próximo, excepto si el porcentaje que pasa el tamiz de 75 μ m (No. 200) es menor que el 10 %, será reportado con una aproximación de 0.1%

Del material que sobre del lavado en base a la norma AASHTO T-11, se toma toda la cantidad, donde la muestra de suelo seco de masa conocida y que será separada a través de una serie de tamices de aberturas de distintas graduaciones, para la determinación de la distribución de tamaño de las partículas.

Para el material muestreado de la calzada de la carretera LIB12, en el tramo comprendido de los estacionamientos 5+140 hasta 5+290, Municipio de Huizucar luego del tamizado por vía húmeda, el remanente de material que sobró para realizar la granulometría regida bajo la norma AASHTO T 27-99 fue muy poco, debido a las características del suelo del lugar, y por ser una muestra con alto contenido de fino, presenta una menor distribución en cuanto a tamaños.

Los resultados obtenidos bajo este procedimiento son:



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO GRANULOMETRICO
DE SUELO FINO
AASHTO T 27, ASTM C 136

Solicitante: Universidad de El Salvador Material: Del lugar
Proyecto: Trabajo de Graduación Estacionamiento: 5+140 a 5+290
Procedencia: LIB 12 Fecha de recibido: Junio/2008
Ubicación: HUIZUCAR Fecha de ensayo: Junio/2008

Peso inicial sin lavar: 435.9g

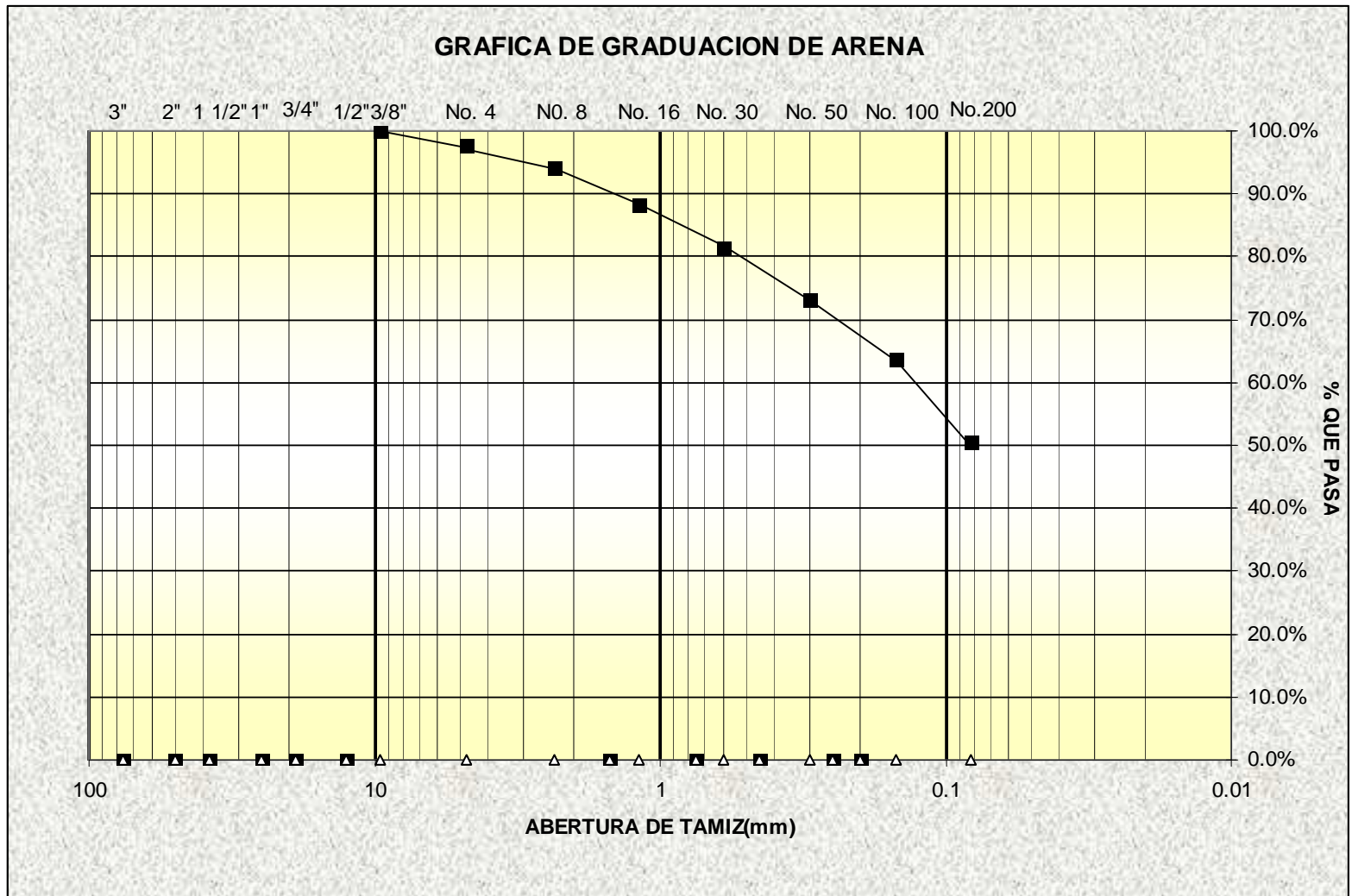
Material fino por lavado 218.8g

Peso inicial lavado: 217.1g

MALLA	PESO		% RETENIDO		% ACUMULADO
	RETENIDO (g)	RETENIDO AJUSTADO	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
3/8	0.0	0.0	0.0	0.0	100
No.4	10.2	10.2	2.4	2.4	98.0
No.8	15.6	15.6	3.6	6	94.0
No.16	25.1	25.1	5.8	11.8	88.0
No.30	30.2	30.2	6.9	18.7	80.0
No.50	35.1	36.1	8.3	27	73.0
No.100	40.6	41.6	9.5	36.5	64.0
No.200	57.3	58.3	13.3	49.8	50.0
Pasa No. 200	218.8	218.8	50.2	100	
Σ	432.9	435.9	100		

Observaciones:

Se tomo una cantidad de 500g para un tamizado completo, efectuando un lavado completo a toda la muestra para determinar el porcentaje de finos que pasa el tamiz No 200, luego el material retenido en la malla No 200 se le realiza su granulometría en base a la norma AASHTO T 27.





**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



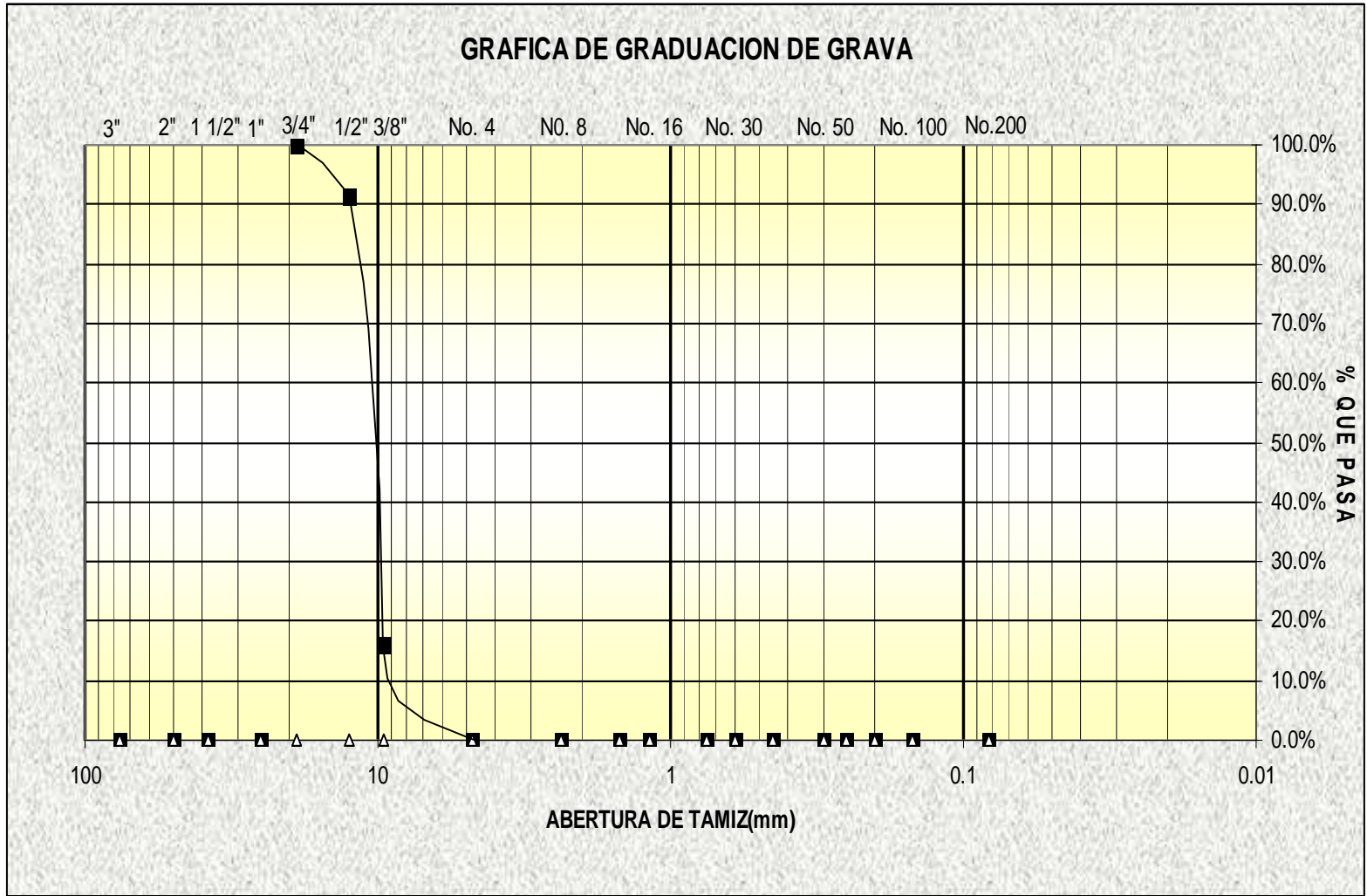
**ENSAYO GRANULOMETRICO
DE SUELO GRUESO
AASHTO T 27, ASTM C 136**

Solicitante: Universidad de El Salvador Material: Del lugar
 Proyecto: Trabajo de Graduación Estacionamiento: 5+140 a 5+290
 Procedencia: LIB 12 Fecha de recibido: Junio/2008
 Ubicación: HUIZUCAR Fecha de ensayo: Junio/2008

Peso inicial: 500g Peso que pasó el tamiz No 4: 435.9g Peso de material grueso: 64.1g

MALLA	PESO		% RETENIDO		% ACUMULADO
	RETENIDO (Kg.)	RETENIDO AJUSTADO	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
3/4	0.0	0.0	0.0	0.0	100
1/2	5.6	5.6	8.7	8.7	91.3
3/8	48.1	48.3	75.4	84.1	15.9
No.4	10.2	10.2	15.9	100	
No.8	-	-	-	-	-
No.16	-	-	-	-	-
No.30	-	-	-	-	-
No.50	-	-	-	-	-
No.100	-	-	-	-	-
No.200	-	-	-	-	-
Pasa No. 200	-	-	-	-	-
Σ	63.9	64.1	100		

Observaciones:



Gráfica 4.3

Gráfica de distribución de tamaño para agregado grueso

Aunque la distribución de tamaños de partículas no sea un factor utilizado para la clasificación de un suelo de grano fino, en agregados gruesos es de vital importancia ya que se utilizan diferentes granulometrías para conformar diseños de mezclas en base a una distribución específica de tamaños de partículas; para ésta guía bastaría únicamente con la granulometría por lavado donde se obtiene la cantidad de finos que pasan el tamiz No 200; conocido este porcentaje se procede a la clasificación del suelo mediante la norma AASHTO M 145 y ASTM D 2487, como se describe a continuación:

4.3.7 Clasificación de los suelos y mezclas de suelo-agregado para la construcción de carreteras.

Una vez que se tiene una muestra representativa del material selecto, se procede a clasificar el suelo, en base a la norma **AASHTO M 145-91(2000)** (Para mayor información consultar norma), esto debido a que las normas AASHTO están más enfocadas en análisis de suelos para uso en carreteras.

Se describe un procedimiento para clasificar los suelos en siete grupos, basada en datos de laboratorio y determinación de la distribución del tamaño de partículas, límite líquido, e índice de plasticidad. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un "índice de grupo," que es un valor calculado a partir de una fórmula empírica. El grupo de clasificación, incluido el índice de grupo debe ser útil para determinar la calidad relativa de los suelos ocupados en la construcción de estructuras con movimientos de tierra, especialmente terraplenes, bases, sub-bases.

La clasificación se realiza mediante grupos determinados por la prueba de límites, valores de índice de plasticidad y análisis de porcentajes de material que pasan algunos tamices de diferentes tamaños. Además se detalla una subdivisión de los grupos en base a estos mismos parámetros.

Tabla 4.6

Clasificación de suelos según AASHTO M-145

Clasificación General	Suelos Granulares 35% máximo que pasa por tamiz de 0.075mm (No 200)							Suelos Finos Mas del 35% pasa por el tamiz de 0.075mm (No 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo de Clasificación	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% Que pasa por el tamiz de: 2mm (No10) 0.0425 (No 40) 0.075mm (No 200)	50 máx 30 máx 15 máx	50 máx 25 max	51 min 10 max	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de fracción que pasa el tamiz de 0.045mm (No40) Limite Liquido Índice de Plasticidad	6 máx.		NP	40max 10 máx	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min
Tipos de materiales	Piedras, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Estimación general de suelo	Excelente a Bueno							De pobre a malo			

En base al cuadro antes mostrado extraído de la norma AASHTO M 145-99(2000), se sigue el siguiente procedimiento para realizar la clasificación del material.

Procedimiento de clasificación.

1-Analizando el material que pasa el tamiz No 200=50.2%

50.2%>35% OK, Suelo de Grano Fino

2- Analizando % que pasa por el tamiz No 200: 36%min., OK

3-Analizar las características de la fracción que pasa el tamiz 0.045mm (No 40)

LL= 36% y IP=12%

Analizando el límite líquido es menor de 40%, por lo cual se toma la nota de 40max.

Analizando el IP es mayor de 11%, por lo cual se toma la nota de 11min.

Clasificación: **A-6 Suelo Arcilloso**

Índice de grupo.

El Índice de grupo se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de Grupo} = (F-35) [0.2 + 0.005 (LL - 40)] + 0.01 (F-15) (IP-10)$$

Donde:

F = porcentaje de material que pasa el tamiz de 0.075mm (No 200), expresado como un número entero.

LL =límite líquido.

IP = índice de plasticidad.

$$\text{Índice de Grupo} = (50-35) [0.2 + 0.005 (36 - 40)] + 0.01 (50-15) (12.0-10)$$

Índice de Grupo= 4

Cuando se calcule el índice de grupo para suelos A-2-6 y A-2-7 mediante la formula, solo se tomara en cuenta el IP. Es decir la formula será:

$$\text{Índice de Grupo} = 0.001(F-15) (PI-10).$$

El índice de grupo debe expresarse al número entero más cercano.



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



CLASIFICACION DE SUELOS

AASHTO M 145

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación,	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Mayo 2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Mayo 2008

DATOS DE ENTRADA PARA LA CLASIFICACION

Muestra :	LIB 12
Peso inicial :	100g
Límite líquido:	36%
Pasa el tamiz No 200:	50.2%
Índice de plasticidad:	12%

CLASIFICACION DEL SUELO

Muestra LIB 12 (suelo natural): A-6 (4) (Suelo arcilloso)

Observaciones:

Para obtener una descripción mas amplia de cada grupo, consultar norma AASHTO M 145-99 (2000).

El suelo analizado presenta poca plasticidad, como puede apreciarse según el calculo de su índice de plasticidad (IP=12%), la clasificación bajo esta norma esta regida para suelos ocupados en carreteras, la norma ASTM D-2487, que clasifica los suelos para propósitos ingenieriles puede también usarse tal como se detalla mas adelante en este capitulo.

Los resultados obtenidos de este ensayo son los que a continuación se presentan:

Tabla 4.7	Clasificación AASHTO M-145
Clasificación	A-6 (4)
Tipo de material	Suelo Arcilloso
Estimación general	De pobre a malo

A continuación se presenta el marco conceptual concebido para este grupo de suelo, según norma AASHTO M 145-99(2000).

A-6: El material típico de este grupo es un suelo arcilloso plástico, por lo general se tiene el 75 por ciento o más que pasa el tamiz de 0.075mm (No 200). Materiales de este grupo suelen tener gran cambio volumétrico, cuando se tiene presencia de humedades altas en el suelo y luego estas se pierden.

4.3.8 Clasificación de suelos para fines de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)).

La clasificación del suelo de acuerdo al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ASTM D 2487-00 (Para mayor información consultar norma), basa la clasificación de los suelos para propósitos ingenieriles; mediante el análisis de diferentes parámetros como lo son el límite líquido e índice de plasticidad; a continuación se describe el procedimiento a seguir para realizar esta clasificación:

Este procedimiento describe un sistema de clasificación de suelos minerales y órgano-mineral para propósitos de ingeniería, mediante la determinación en laboratorio del tamaño de partículas, usando características como: el límite líquido e índice de plasticidad que son indispensables para la clasificación.

El uso de esta norma dará lugar a un único símbolo de grupo de clasificación y el nombre del grupo, excepto cuando el suelo contiene de un 5 a 12% de finos o cuando la intersección del límite líquido e índice de plasticidad cae en la zona restringida de la carta

de plasticidad. En estos dos casos, un doble símbolo se usa, por ejemplo, CL-ML. Cuando los resultados de las pruebas de laboratorio indican que el suelo está cercano a otro grupo de la clasificación, la condición de frontera puede ser indicada con dos símbolos separados por una barra, por ejemplo, CL/CH, ML/SM, SC/CL. Símbolos de frontera son especialmente útiles cuando el valor de límite líquido de los suelos arcillosos está cercano a 50.

El grupo símbolo de este sistema se basa en pruebas de laboratorio realizadas en muestras de suelo que pasa el tamiz de 3 pul. (75mm).

La clasificación bajo esta norma ASTM D-2487, plantea:

Clasificar como suelo de grano fino, si el 50% o más del peso seco de la muestra de análisis pasa el tamiz N° 200 (75µm).

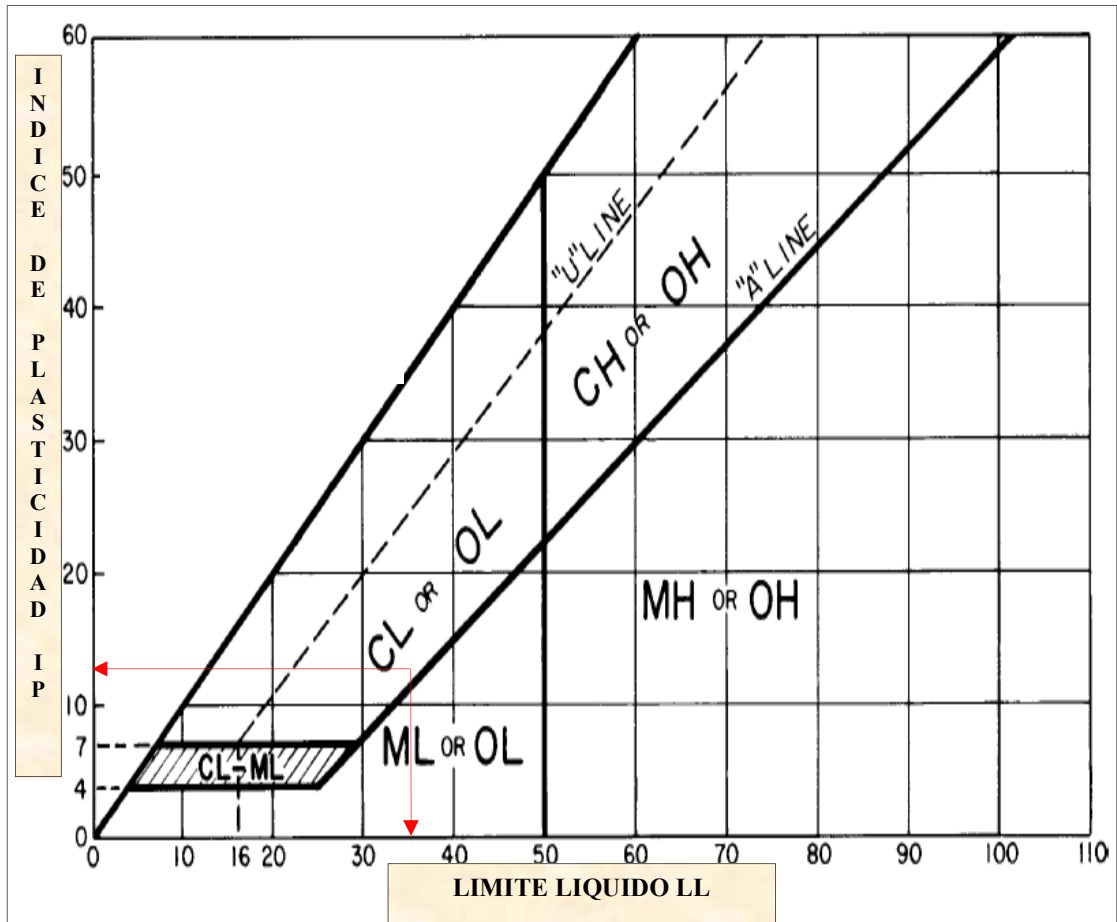
Clasificar como suelo de grano grueso, si más del 50% del peso seco de la muestra de análisis se retiene en el tamiz N° 200 (75µm) (ver norma anexa 8).

Cuando el material presenta más del 50% pasante de la malla No 200, puede usarse únicamente la carta de plasticidad para determinación de su clasificación.

Con los datos previamente calculados (índice de plasticidad y límite líquido), plotarlos en carta de plasticidad y obtener de esta manera el símbolo asignado al suelo, tal como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 4.1

PLASTICIDAD PARA SUELO NATURAL



Ubicar el valor del limite liquido en las abscisas de la carta de plasticidad (eje X), y el índice de plasticidad en las ordenadas (eje Y). Luego proyectar una línea perpendicular a los valores de límite líquido e índice plástico previamente ubicados en la carta. El punto donde se intersece corresponderá al símbolo de grupo para ese suelo.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



CLASIFICACION DE SUELOS SUCS

ASTM D 2487

Solicitante: Universidad de El Salvador Material: Del lugar
Proyecto: Trabajo de Graduación, Estacionamiento: 5+140 a 5+290
Procedencia: LIB 12 Fecha de recibido: Mayo 2008
Ubicación: HUIZUCAR Fecha de ensayo: Mayo 2008

DATOS DE ENTRADA PARA LA CLASIFICACION SUCS

Muestra :	LIB 22
Peso inicial :	100g
Límite liquido:	36%
Cantidad de Arena	49.8%
Pasa el tamiz No 200:	50.2%
Índice de plasticidad:	12%

CLASIFICACION DEL SUELO

Muestra : **CL** (Arcilla de baja a mediana plasticidad)

Observaciones:

La descripción o significado de símbolo puede verse mas detalladamente en norma ASTM 2487-00

Tabla 4.8		Clasificación ASTM D 2487 suelo sin cal	
% de material que pasa malla No 200			50.2%
Límite líquido			36%
Clasificación			CL
Tipo de material			Suelo de grano fino
Nombre de la clasificación			Arcilla de baja a mediana plasticidad

Es importante conocer los diferentes parámetros y características con las que debe contar un suelo previo a su estabilización.

La Secretaria de Integración Económica Centroamericana SIECA, ente encargado de normar las disposiciones reglamentarias de carreteras a nivel centroamericano recomienda que para estabilizar suelos con cal, éste no posea un porcentaje mayor al 1% de materia orgánica, ya que valores superiores a este porcentaje necesitarían mayor adicción de cal debido a que parte de cal reaccionaria con el orgánico, disminuyendo el porcentaje óptimo calculado para el tipo de suelo en particular.

En base a estos criterios a continuación se plantea los resultados obtenidos para el material en análisis.

4.3.9 Determinar del contenido de humedad, ceniza y materia orgánica de turba y otros suelos orgánicos.

Este procedimiento puede ser usado para determinar el contenido de humedad, contenido de ceniza y el porcentaje de materia orgánica en un suelo basándose en las especificaciones de la norma **ASTM D 2974-00** (Para mayor información consultar norma).

El porcentaje de materia orgánica es importante en la clasificación de turbas y otros suelos orgánicos.

El contenido de ceniza de una turba o muestra de suelo orgánico es determinado por ignición en un horno de mufla a 440°C (Método C) ó a 750°C (Método D).

La materia remanente después de la ignición es ceniza. El contenido de ceniza es expresado como un porcentaje de la muestra secada al horno. La materia orgánica es determinada de restar de 100 el contenido de ceniza.

Procedimiento.

Preparar la muestra de ensayo:

Coloque una muestra obtenida de campo y mézclela completamente.

Reduzca por cuarteo la muestra a la cantidad requerida para el ensayo.

A) DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

Método A de Ensayo:

Registre el peso de 2 recipientes evaporadores de porcelana con una adecuada cubierta de papel aluminio en una balanza de 0.01g de precisión.

De la muestra previamente obtenida, coloque 2 especímenes de ensayo de no menos de 50g cada uno en los recipientes evaporadores de porcelana.

Tape inmediatamente con la cubierta de aluminio los especímenes de ensayo y registre su peso con aproximación de 0.01g en la hoja de trabajo de este ensayo.

Coloque al descubierto los especímenes de ensayo al horno por lo menos 16 horas o hasta que no haya cambio en su peso mas allá del periodo en exceso de 1h.

Remueva del horno los especímenes, cúbralos ajustadamente y enfríe en un desecador.

Registre su peso con aproximación de 0.01g

B) DETERMINACION DEL CONTENIDO DE CENIZA.

Método C de ensayo.

Registre el peso del recipiente de porcelana en una balanza de 0.01g de precisión.



Fotografía 4.9 **Peso de recipiente de porcelana**

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Coloque una muestra o la totalidad de la muestra (secada al horno). Utilizada en la determinación del contenido de humedad.



Fotografía 4.10 **Muestra en recipiente de porcelana**

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Determine el peso del recipiente y la muestra. Posteriormente coloque el conjunto en el horno mufla.



Fotografía 4.11 **Peso de muestra extraída del horno**

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Lleve gradualmente la temperatura en el horno a 440°C y mantenga hasta que el espécimen este cenizado completamente (esto se da cuando ya no existe cambio de la masa).



Fotografía 4.12

Muestra colocada en horno mufla

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Para determinar el contenido de ceniza seguir el siguiente procedimiento:

a) Determinación del Contenido de Humedad.

Calcule el contenido de humedad como sigue:

$$\% \text{ Contenido de Humedad (H)} = (B - C) / (C - A) * 100$$

Donde:

A= Peso de tara (gr).

B= Peso de suelo húmedo + tara (gr).

C= Peso de suelo seco + tara (gr).

H= contenido de humedad, expresado en porcentaje.

b) Determinación del contenido de Ceniza.

Calcule el contenido de ceniza como sigue:

$$\% \text{ Contenido de Ceniza (F)} = (E / D) * 100$$

Donde:

F= contenido de ceniza, expresado en porcentaje.

E= peso de ceniza + cápsula expresado en gramos.

D= peso de suelo seco + cápsula expresado en gramos.

c) Determinación del porcentaje de materia orgánica.

Determine la cantidad de materia orgánica como sigue:

$$\% \text{ Contenido de Materia Orgánica (L)}=100-F$$

Donde.

F= contenido de ceniza en porcentaje

A continuación se presentan los resultados obtenidos al material analizado para fines de esta investigación:



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



**"METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL
CONTENIDO DE HUMEDAD, CENIZA Y MATERIA
ORGANICA DE TURBA Y OTROS SUELOS ORGANICOS."**

ASTM D-2974

Solicitante: Universidad de El Salvador Material: Del lugar
Proyecto: Trabajo de Graduación Estacionamiento: 5+140 a 5+290
Procedencia: LIB 12 Fecha de recibido: Junio/2008
Ubicación: HUIZUCAR Fecha de ensayo: Junio/2008

METODO UTILIZADO: C

Muestra	1	2
Capsula No	3	4
Peso tara (g) (A)	54.48	53.12
Suelo húmedo + tara (g) (B)	70.63	70.87
Suelo seco + tara (g) (C)	70.61	70.85
Contenido de humedad (%) $(B-C)/(C-A)*100$	0.12	0.11
Suelo seco + capsula (D)	91.33	92.55
Ceniza + capsula (g) (E)	89.57	91.38
Contenido de ceniza % $F=(E/D)*100$	98.1	98.7
Materia orgánica (%), $100 - F$	1.3%	1.3%

Observaciones:

Resumen de resultados obtenidos para este ensayo.

Tabla 4.9	Porcentaje de orgánico del suelo en estado natural	
Muestra	1	2
Contenido de humedad (%)	0.12	0.11
Contenido de ceniza %	98.7%	98.7%
Materia orgánica (%)	1.3%	1.3%

Los resultados muestran un porcentaje mayor al 1% de materia orgánica, y basándonos en lo expuesto por la Secretaria de Integración Económica Centroamericana SIECA, este porcentaje orgánica puede afectar adversamente a la mezcla suelo-cal, pudiéndose generar con esto resultados erróneos o un mayor porcentaje de cal para ejecutar la estabilización.

4.4 SELECCION DEL AGENTE ESTABILIZANTE.

Una vez conocido e identificado el material, se procede a estudiar el posible candidato que servirá como agente estabilizador, para lo cual se presentan las alternativas y criterios de estabilización de suelo siguientes.

4.4.1 ALTERNATIVAS Y CRITERIOS PARA ESTABILIZACION DE SUELOS.

La selección del mejor agente para la estabilización de un suelo en base a algunas de sus propiedades es de mucha importancia, esto garantiza una mejor adecuación del mismo con respecto al tipo de suelo, evitando la utilización de un estabilizante inadecuado que pueda producir una mala estabilización y con resultados desfavorables. El siguiente procedimiento servirá en la selección del mejor agente estabilizador de acuerdo a los criterios para la ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA PAVIMENTO, Technical Manual No. 5-822-14. Air Force Manual No. 32-1019. Headquarters, Departments of the Army, and the Air Force Washington, D.C. 25 October 19.

De los factores que se consideran en la selección del estabilizante, el más importante es el tipo de suelo con el cual se realizara este proceso.

La selección del agente estabilizante se hace usando la figura 4.2 y la tabla 4.10. El triángulo de la granulometría del suelo en la figura 4.2 está basado en las características de tamaño de partículas de los suelos y en las características de pulverización. El proceso de selección del estabilizante se continúa con la tabla 4.10 como se indica para cada área mostrada en la figura 4.2.

Las restricciones se basan en la granulometría y en el índice de plasticidad (IP), se usa la segunda columna de la tabla 4.10; en ésta, se enlistan los símbolos para la clasificación de suelos que se aplica para cada área determinada por la figura 4.2, esto se hace para verificar que el área seleccionada es la apropiada, y debido a ello, la distribución granulométrica y los límites de Atterberg son usados para iniciar el proceso de selección.

Los datos que se requieren para entrar a la figura 4.2 son:

Porcentaje de material que pasa la malla No 200 y el porcentaje de material que pasa la malla No 4 pero que se retiene en la malla No 200.

Al triángulo se entra con estos dos valores y donde se intercepten esa es el área (1A, 2A, 3, etc.)

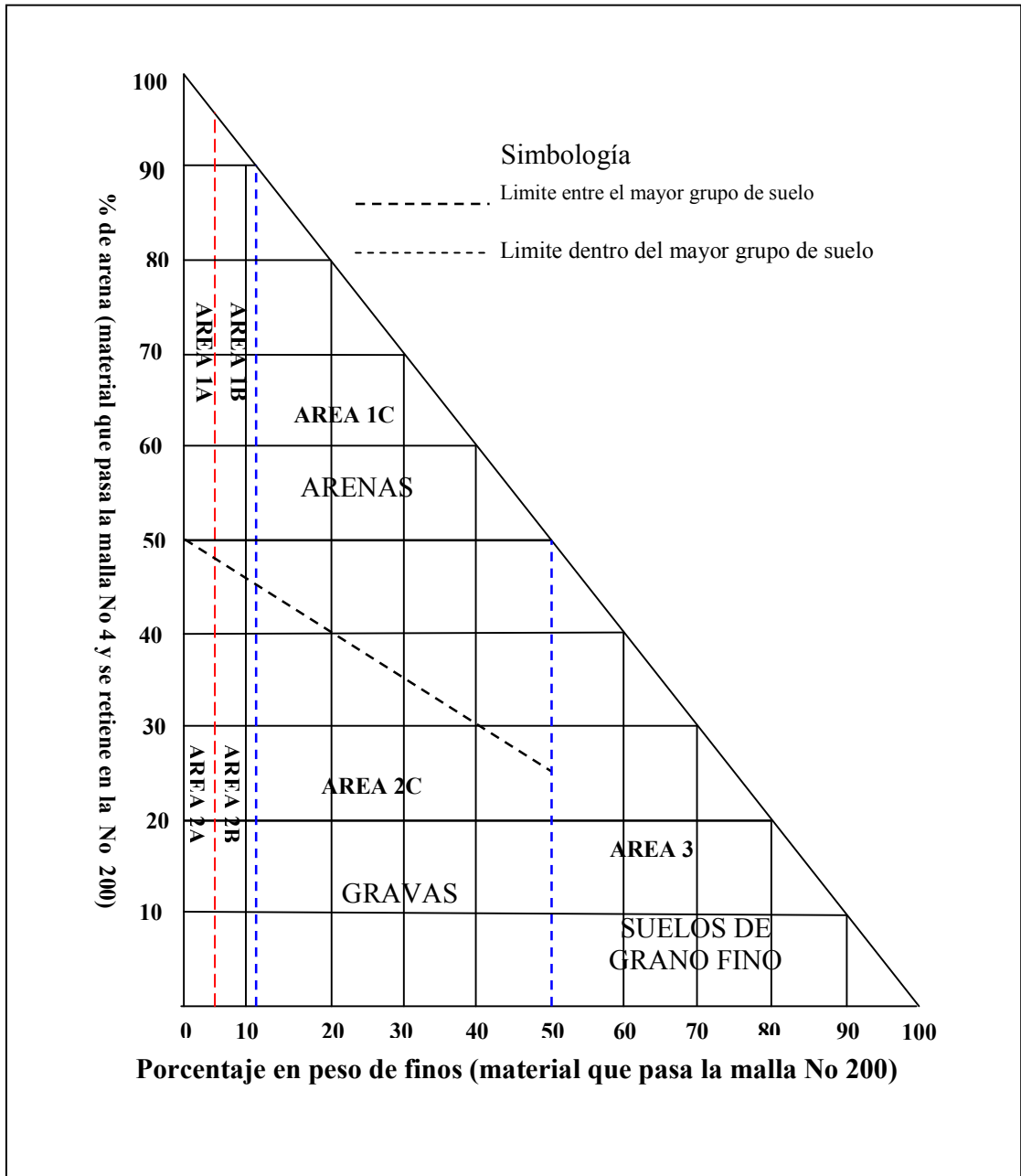


Figura 4.2

Triángulo de graduación para seleccionar el agente estabilizante más apropiado.

Fuente: SOIL STABILIZATION FOR PAVEMENTS, Technical Manual No. 5-822-14, Air Force Manual No. 32-1019, Headquarters, Departments of The Army, and the Air Force Washington, D.C. 25 October 1994.

El área determinada por la figura 4.2 y el suelo clasificado se encuentra en la segunda columna de la tabla 4.10.

El posible agente estabilizador del suelo se encuentra en la tercera columna y las restricciones para el uso del agente estabilizante considerado se encuentran en columna 4 y 5 del mismo cuadro informativo.

Por ejemplo, para el suelo de análisis en esta investigación clasificado como CL, con 97.7% que pasa la malla No.4 y 50.2% que pasa la malla No.200, con un límite líquido de 36% y límite plástico de 24%. Se tiene que el 47.4% del material está entre la malla No.4 y la malla No. 200 y el índice plástico es 12%.

Entrando a la figura 4.2 con los valores de 50.2% que pasa la malla No.200 y 47.4% entre la No.4 y No.200, la intersección de estos valores se encuentra en el área 3.

Con esto se va a la columna de la tabla 4.10 y se encuentra el área 3 y se verifica la clasificación del suelo, CL, en la segunda columna.

En la tercera columna se encuentran los agentes estabilizantes que se pueden usar para ese suelo en particular.

A demás de tomar en cuenta las restricciones que se presentan en las siguientes columnas.

NOTA: *En nuestro caso el tipo de agente estabilizador seleccionado es la cal, la cual para ser usada deberá cumplir con las especificaciones de la norma ASTM C 977.*

En el tipo de estabilización a realizar, habrá que decidir cual es la capa más conveniente a tratar de acuerdo con la disponibilidad de los materiales, su calidad y costo. La siguiente etapa sería la elección del método de estabilización más adecuado.

El tipo de pavimento regirá como un primer punto a esta elección pues en unos casos la resistencia puede ser la que revista mayor importancia (base de pavimentos flexible por ejemplo), mientras que en otros lo puede ser la adherencia o unión de las partículas (caso de sub-bases de pavimentos rígidos para evitar el bombeo), o inclusive la permeabilidad.

Los factores ambientales pueden influenciar a la resistencia última del suelo estabilizado, tanto como la calidad de los materiales a emplear en la estabilización; una cantidad excesiva de lluvia puede alterar la efectividad de una estabilización pues podría por ejemplo lavar la cal adicionada a un suelo, o bien la existencia de aguas ácidas puede anular los efectos estabilizantes de un aditivo alcalino al quedar ambos en contacto.

Por otro lado, la temperatura ejerce también influencia en la velocidad de las reacciones químicas, razón por la cual debe tomarse en cuenta al elegir los métodos de estabilización en ciertas épocas del año.

El perfecto conocimiento del funcionamiento y limitaciones del equipo disponibles es de suma importancia, pues esto permitirá que el ingeniero pueda priorizar en sus procesos, eliminar ciertos productos que no resulten de aplicación práctica; pues, por ejemplo, no sería de esperar un buen trabajo de estabilización si se requiere mezclar una arcilla plástica no muy húmeda con cal si para ello se cuenta solamente con motoniveladora, ya que en este caso sería indispensable contar con sistemas de riego para la hidratación de la mezcla.

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

4.5 PROPIEDADES DE COMPARACION DEL SUELO NATURAL.

Luego de conocer el tipo de suelo y de seleccionar el tipo de agente estabilizador que se aplicará, el siguiente paso sería conocer algunas propiedades del material en estado natural, analizar sus resistencia, sus cambios volumétricos, la capacidad de carga etc.; que presenta el suelo previo a la adicción de cal, para luego comparar estos mismos propiedades con el suelo ya estabilizado con el porcentaje de cal óptima , y analizar de esta manera los resultados obtenido con la mezcla suelo-cal.

Como control rápido para los ensayos que se detallarán a continuación, se recomienda la utilización del ANEXO 1 “Lista de chequeo para control de laboratorio”

Aquí se calculan aquellas propiedades específicas que presenta el suelo en estado natural, las cuales se pretenden mejorar con la adicción de cal.

4.5.1 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y rocas a través de su masa.

Lo primero para seguir con el análisis del suelo en estado natural es poder calcular el contenido de humedad de muestras de suelo en base a la norma **ASTM D 2216-03** (Para mayor información consultar norma), ya que esta labor se repetirá en todos los ensayos que precede al estudio de los mismos.

La determinación del contenido de humedad es un ensayo rutinario para determinar la cantidad de agua presente en un suelo en términos de su peso seco.

Podría definirse el contenido de humedad como la relación de la masa de agua contenida en los espacios porosos de un suelo o roca a la masa sólida de partículas en ese material, expresado como un porcentaje.

No es muy práctico hacer varias medidas del peso para determinar si se ha obtenido un estado de peso constante en la muestra; lo que se hace comúnmente es suponer en algunos casos que después de un periodo de secado de 12 a 16 horas (a menudo durante la noche), la muestra se encuentra en estado de peso constante y dicho peso se registra como el del suelo seco, la experiencia indica que este método de secado de muestra es bastante adecuado para trabajo rutinario de laboratorio en muestras pequeñas.

Procedimiento.

Tamaño del espécimen del ensayo.

Seleccione el tamaño de la muestra para determinar el contenido de humedad en base a las especificaciones del ensayo que se desee realizar.

Debido a que el suelo analizado para fines de investigación consta de una muestra alterada, utilizar el método que a continuación se describe:

- a) Es posible la manipulación sin pérdida de humedad y sin segregación.
 - Tome material con una cuchara grande y mézclelo completamente
 - Reduzca al tamaño requerido por medio del cuarteo o separación.
- b) Si no es posible la manipulación ni el mezclado y/o separado: con una cuchara
 - Mezcle el material tanto como sea posible y forme una pila (apilamiento).
 - Tome por lo menos 5 porciones al azar, utilizando un tubo de muestreo, una pala, una cuchara, o un instrumento similar apropiado para el tamaño máximo de partículas presentes en el material.
 - Combine todas las porciones completamente para obtener la muestra del ensayo.

c) Si no puede formarse un apilamiento:

- Tome varias muestras de material como sea posible al azar que representen mejor la condición de humedad.
- Combine todas las porciones para formar el espécimen de ensayo.

Ejecución.

1. Determine y registre el peso del recipiente (o tara) del espécimen limpio y seco (y su tapadera si se utilizara).
2. Coloque el espécimen de ensayo húmedo en el recipiente. Determine el peso del recipiente y el material húmedo utilizando una balanza de 0.01g. de precisión, para especímenes con masa hasta 200g. o una balanza de precisión de 0.1g. para especímenes mayores de 200g.



Fotografía tomada en FC S. A. DE C. V. Laboratorio de Suelos y Materiales.

3. Coloque el recipiente con material húmedo en el horno de secado, seque el material hasta que alcance una masa constante. Manteniendo el horno de secado a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. (El tiempo requerido para que alcance un peso constante la muestra húmeda es de 12 a 16 horas).
4. Retire el recipiente del horno después de secar el material (coloque la tapadera si la utilizo). Déjelo enfriar junto con el material a temperatura ambiente o hasta que

el recipiente pueda ser manejado cómodamente sin necesidad de utilizar guantes y así esto no afecte el funcionamiento de la balanza (por corrientes de convección o por calentamiento).

5. Determine el peso del recipiente y del material secado al horno. Registre este valor (Utilice tapas bien ajustadas si aparentemente el material esta absorbiendo humedad antes de la determinación de su peso seco).
6. Calcule el valor de humedad en base a la siguiente formula.

$$W = \frac{(A - B)}{(B - D)} * 100 = \frac{C}{E} * 100$$

Donde:

W= Contenido de agua (%)

A= Peso del recipiente y del espécimen húmedo (g)

B= Peso del recipiente y del espécimen secado al horno (g)

D= Peso del recipiente o tara (g)

C= Peso del agua (g)

E= Peso del suelo seco (g).

Ejemplo:

Tabla 4.11	Determinación de humedades					
No de tara	1	2	3	4	5	6
Peso suelo humedad + tara	81.7	88.7	83.2	98	95.9	77.2
Peso suelo seco + tara	70.6	75.1	69.2	79.5	76.5	61
Peso de tara	14.5	14.4	14.4	14.6	14.4	14.4
% de Humedad	19.8%	22.4%	25.6%	28.5%	31.2%	34.8%

La determinación de humedad de un suelo, juega un papel muy importante en el análisis del mismo, pues es, prácticamente indispensable el calculo de ella para la realización de los diferentes ensayos que nos ayuden a determinar las características y propiedades de estos. Una de estas propiedades muy importante a conocer en el suelo natural analizado, es relación Densidad-Humedad (Próctor). Usualmente para carreteras donde las especificaciones demandan mayores exigencias de capacidad de carga se recomienda realizar este ensayo bajo las especificaciones de la norma AASHTO T-180, debido a que presenta una mayor energía de compactación, alcanzando así mayores Pesos Volumétricos Secos a una menor humedad que el Próctor AASHTO T-99, que usualmente es mas utilizado para obras donde las exigencias son menores.

4.5.2 Relación densidad – humedad de suelos usando un apisonador de 2.5 kg. (5.5lb), o de 4.5 kg. (10lb) y una caída de 305mm. (12 pulg.) o de 457mm (18pulg), según sea el método indicado.

Para propósitos de investigación y comparación de resultados se analizan datos obtenidos utilizando los métodos regido bajo las normas **AASHTO T 180-03** y **AASHTO T 99-03** (Para mayor información consultar normas).

Se sabe que el suelo esta formado por partículas de tamaño y forma variada, y que entre estos existen espacios intergranulares llamados vacíos, que se hallan llenos a la vez por aire, agua o ambos.

Así mismo, sabemos que cuando una masa de suelo se encuentra en estado suelto ocupa mayor volumen, porque tiene mayor numero de vacíos. En cambio, cuando comprimimos esta masa de suelo se hace mas compacta y observamos un decrecimiento del volumen total, a causa de la disminución del volumen de vacíos. Esta operación de “comprimir” una masa de suelo, se llama “compactación”.

Al compactar un suelo, se obtienen las siguientes ventajas:

- a) Se establece un contacto mas firme entre las partículas

- b) Las partículas de menor tamaño son forzadas a ocupar los espacios formados por los de mayor dimensión.
- c) Cuando un suelo es compacto, aumenta su valor de soporte y se hace más estable.
- d) Como las partículas se encuentran firmemente adheridas después de la compactación, la masa de suelo será más densa y su volumen de vacíos quedara reducido a un mínimo, por lo tanto, la capacidad absorbente de agua de un suelo, quedara grandemente reducida por efecto de la compactación.

Para obtener una adecuada lubricación y disminuir así la resistencia a la fricción existente entre partículas, deberá de controlarse debidamente la cantidad de agua al compactar un suelo. Si es insuficiente, no habrá buena lubricación, y si es excesiva, las fuerzas hidrostáticas empujaran y tenderán a separarse las partículas.

Por lo tanto, se hace necesario calcular debidamente la cantidad de agua para generar la “humedad óptima” que ha de tener un suelo, a fin de obtener una buena lubricación que permita al compactarlo, alcanzar la mayor densidad posible, es decir la “densidad máxima”.

Muchas veces al desconocer de los requerimientos de compactación que tiene un proyecto, se plantea realizar todas las compactaciones con la energía AASHTO T-180 ya que de esta manera se garantiza una mejor compactación, pero por otro lado se incrementan los gastos, siendo necesarias mayor grado de compactación implicando mas recursos; al presupuestar algunas empresas formulan sus costos en base a la energía AASHTO T-99, para regular gastos ya que el grado de densidad se alcanza con menos proceso de compactación y en un menor tiempo.

La comparación que aquí se hará, esta en función de analizar resultados por ambos métodos y poder conocer la energía de compactación mas ideal para el suelo que compone la carretera analizada en este trabajo de graduación, de poco trafico vehicular; comparando resultados y descubriendo si ambas energías de compactación cumplen los

requisitos específicos que debe tener el tipo de material, y definir así la energía mas apropiada para compactar ese tipo de suelo en particular.

NOTA: *El procedimiento a emplear para la Norma AASHTO T 99, fue método A, debido a que el material pasó en mas del 50% por el tamiz No 4, además que no se contaba con un método específico.*

A continuación se presenta el procedimiento a seguir para determinar la relación Densidad- Humedad de un suelo, basado en la norma AASHTO T 180.

NOTA: *El procedimiento a seguir para la relación Densidad – Humedad basado en la norma AASHTO T 99, será igual al que a continuación se presenta, la única variación será el numero de capas y el peso del martillo utilizado para esta norma.*

DETERMINACION DEL VOLUMEN Y PESO DEL MOLDE DE COMPACTACION.

Método lineal de medida:

Medir el diámetro del molde de compactación de (4") con vernier, seis veces en la parte superior y seis veces en el fondo, cada medida debe hacerse espaciada alrededor de la circunferencia tanto el parte superior como en el fondo del molde. Registrar los valores lo mas cercano a 0.001 pulgadas (0.02mm).

Medir la altura en el interior del molde haciendo tres medidas espaciadas alrededor de la circunferencia del molde. Registrar los valores lo mas cercano a 0.001 pulgadas (0.002mm).

Calcular el diámetro y la altura promedio del molde de compactación.

Calcular el volumen del molde y registre el resultado a lo mas cercano a 0.0001 pie³ (1cm³)

Luego pesar el molde de compactación sin incluir el collarín lo más cercano a 0.01lb (1g), y anotar el dato en la casilla correspondiente de la hoja de registro.

PREPARACION DE LA MUESTRA.

Secar la muestra al aire o en un aparato de secado que no exceda los 60 °C, hasta que pueda ser desmenuzable con una pala, de tal manera que no queden grumos. Cuando se desmenuce los grumos del suelo, se hará de manera que se evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Tamizar una cantidad adecuada y representativa de suelo desmenuzado por la malla No 4 (4.75mm) lo suficiente para realizar 5 pruebas y descartar el material grueso sobrante retenido en dicho tamiz.

Tomar 3 muestras representativas de no menos de 500g para obtener el contenido de humedad natural del espécimen. Pesar 5 cantidades de la muestra tamizada de 3Kg o más. Calcular el agua a agregar para cada una de las muestras a compactar, a la humedad requerida (de prueba), calculándola de la siguiente manera.

$$\text{Agua a agregar (cm}^3\text{)} = Km \frac{(w_2 - w_1)}{(1 + w_2)}$$

Donde:

Km= Peso de la muestra de suelo secado al aire, a ser compactado (en gramos).

w₁= Contenido de humedad al que se requiere la compactación de la muestra (en cifras decimal).

w₂= Contenido de humedad presente en la muestra de ensayo (en cifra decimal).

Mezcle completamente cada una de las muestras en una charola o recipiente adecuado, agregando el agua calculada para humedecerla y llevarla hasta la humedad requerida de compactación (humedad de prueba), anotar el agua agregada y la humedad de prueba dentro de la hoja de registro.



Fotografía 4.14

Humedeciendo el material, para luego ser mezclado.

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

COMPACTACION:

Ajustar firmemente al molde, el collarín y la base.

Colocar material suficiente hasta llegar a $\frac{1}{3}$ del volumen del molde.

Acomodar el suelo suavemente para distribuirlo en una capa de espesor uniforme hasta que no este esponjoso, luego apisonar esta capa hasta completar 25 golpes distribuidos uniformemente.



Fotografía 4.15

Apisonamiento de cada capa de suelo en molde

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Compactar las siguientes capas, con el cuidado, que la tercera capa llegue como máximo a 10mm arriba de la parte superior del molde.

Remover el material adherido en el collarín y retirar el collarín con el cuidado de no desprender material de una ultima capa compactada.



Fotografía 4.16

Remoción de collarín



Fotografía 4.17

Enrasado de material sub-rasante

Fotografías tomadas en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Enrasar cuidadosamente el suelo compactado hasta nivelar la base superior del molde por medio de la regla enrasadora (como se indica en fotografía anterior).

Luego limpiar exteriormente el molde y pesar el molde con la base y la muestra compactada con aproximación de 1g, anotar este dato en la hoja de registro

Remover el material del molde y rebanarlo a través del centro, tome dos muestras para contenido de humedad de 500g cada una según norma ASTM D 2216 "determinación en laboratorio del contenido de humedad".

Calcular el porcentaje de agua y el peso unitario seco de la muestra compactada.



Fotografía 4.17

Registro de humedades de material compactado

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Repetir este mismo procedimiento para los 5 especímenes de este ensayo.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el suelo natural estudiado para fines de esta investigación con ambas energías de compactación AASHTO T-180 y AASHTO T-99:



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**“ENSAYO RELACION DENSIDAD – HUMEDAD
DE SUELOS USANDO UN APISONADOR DE
4.55 Kg (10.0 lbs.) Y UNA CAIDA DE 457mm
(18pulg).”**

AASHTO T-180

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
No de tara	7	8	9	10	11	12
Peso suelo húmedo + tara	114.6	116.8	129.2	129.4	130.4	112.3
Peso suelo seco + tara	101.4	101	109.2	107.1	105.6	89.6
Peso de tara	14.4	14.7	14.7	14.5	14.5	14.5
% de humedad	15.20%	18.30%	21.20%	24.10%	27.20%	30.20%

DETERMINACION DEL PESO VOLUMETRICO SECO						
Peso muestra húmeda + molde	3564	3681	3783	3738	3688	3646
Peso del molde	1978	1978	1978	1978	1978	1978
Capacidad del molde	937.5	937.5	937.5	937.5	937.5	937.5
Peso Volumétrico Seco	1468.9	1535.4	1589.1	1513	1433.7	1366.2

CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	21.2%
------------------------------------	-------

PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1930 Kg/m ³
---------------------------------------	------------------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO (PVSmax)	1590 Kg/m ³
--	------------------------

Observaciones:

Resultados de próctor AASHTO T 180 realizado al suelo en estado natural, la densidad máxima en kilogramos por metro cúbico se deberá aproximar a la decima más cercana ó 10kg/m3.

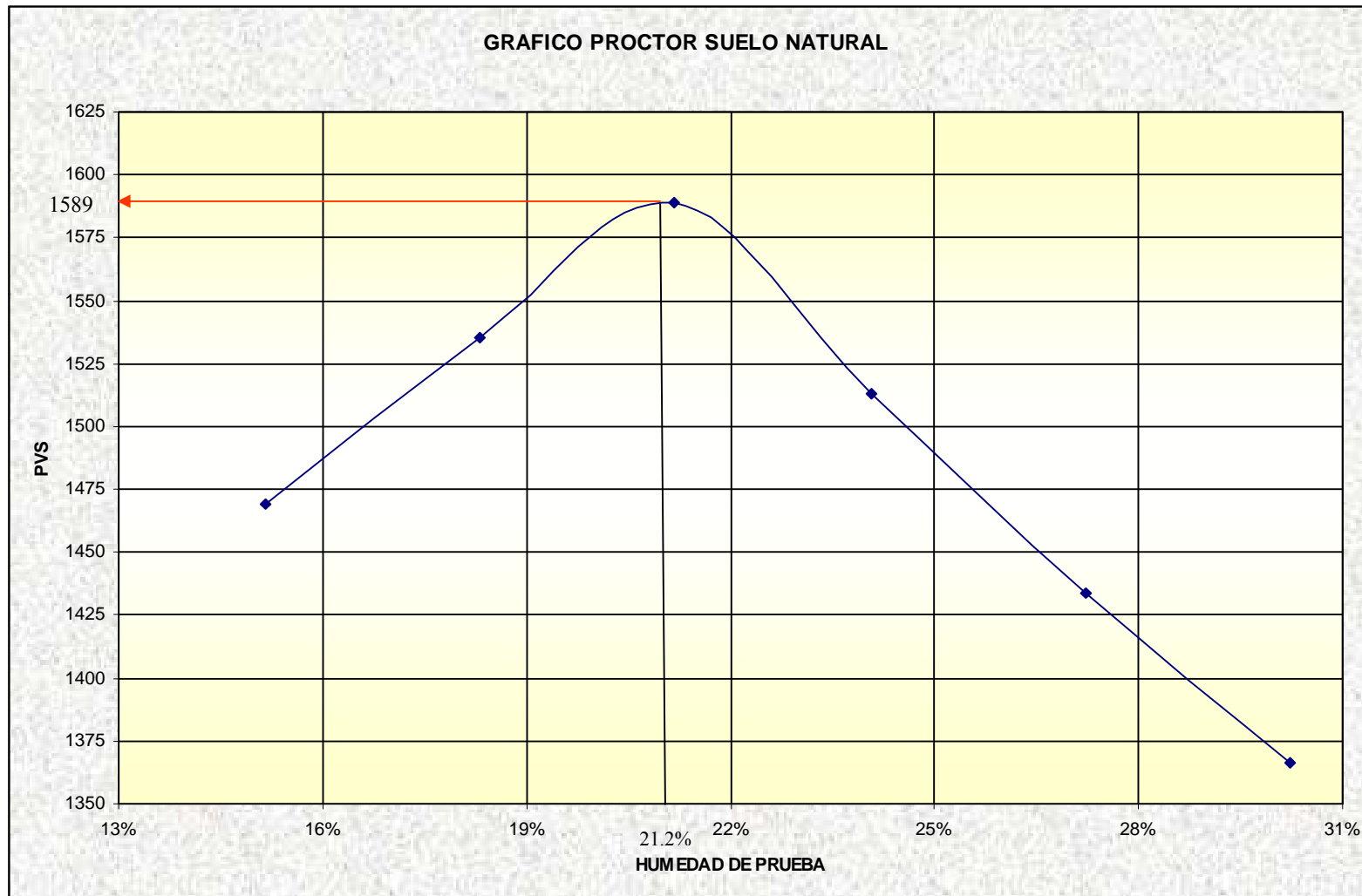


Grafico 4.4

Grafico Relación Densidad-Humedad (AASHTO T 180) Suelo Natural



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**“ENSAYO RELACION DENSIDAD – HUMEDAD
DE SUELOS USANDO UN APISONADOR DE
2.5Kg (5.5lbs) Y UNA CAIDA DE 305mm (12pulg.)”**

AASHTO T-99

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
No de tara	1	2	3	4	5	6
Peso suelo húmedo + tara	110.50	123.11	120.17	115.31	105.75	108.23
Peso suelo seco + tara	97.60	106.05	101.34	95.12	85.56	85.98
Peso de tara	11.31	11.26	11.25	11.23	11.15	11.30
% de humedad	15.0%	18.0%	20.9%	24.1%	27.1%	29.8%

DETERMINACION DEL PESO VOLUMETRICO SECO						
Peso muestra húmeda + molde	3458	3578	3687	3768	3700	3634
Peso del molde	1981.00	1981.00	1981.00	1981.00	1981.00	1981.00
Capacidad del molde	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Peso Volumétrico Seco	1370.6	1443.6	1505.2	1536.3	1442.3	1358.5

CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	23.8%	PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1900 Kg/m ³
------------------------------------	-------	---------------------------------------	------------------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO (PVSmax)	1540 Kg/m ³
--	------------------------

Observaciones:

Resultados de próctor AASHTO T 99 realizado al suelo en estado natural, la densidad máxima en kilogramos por metro cúbico se deberá aproximar a la decima más cercana ó 10kg/m3.

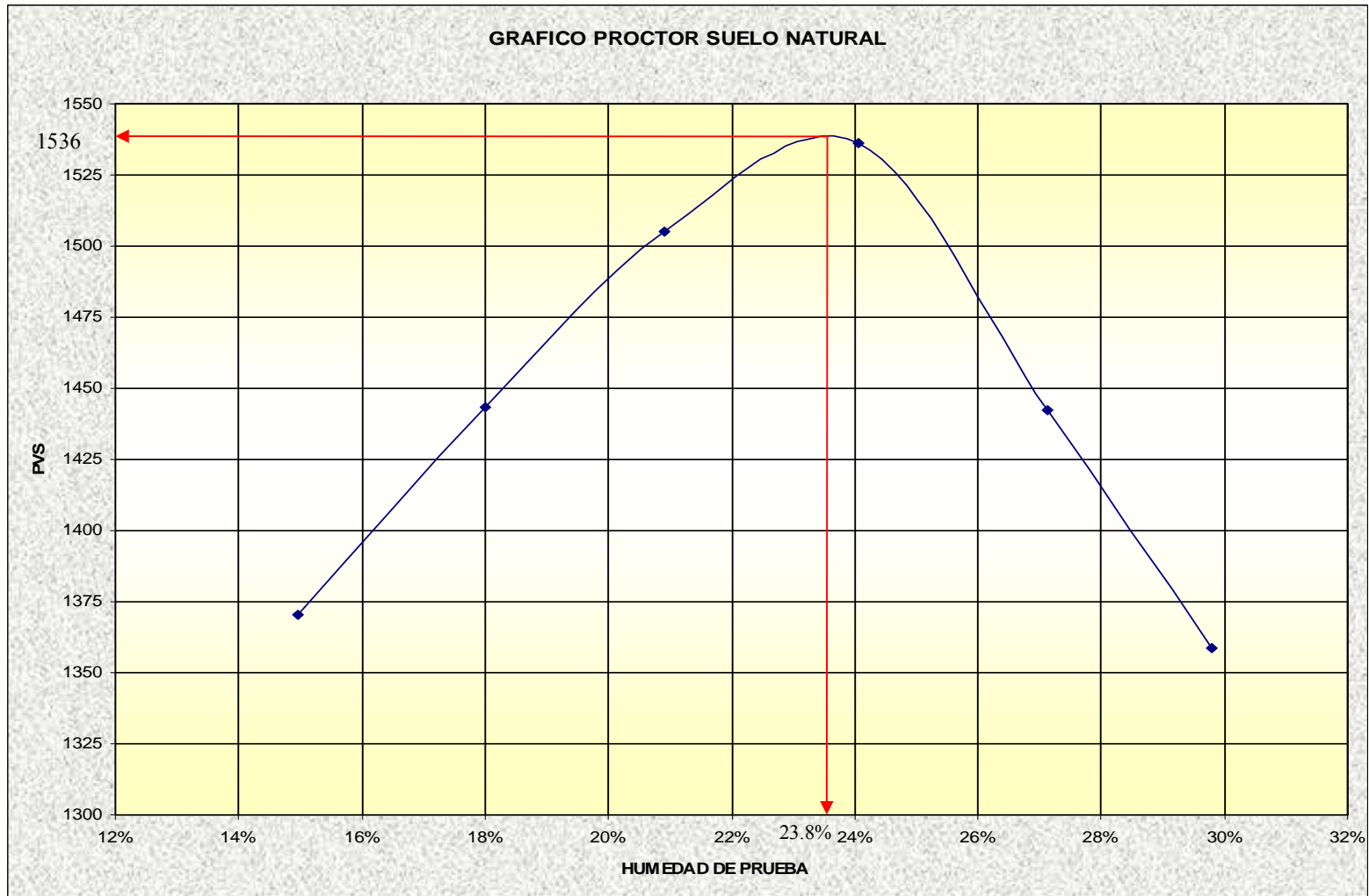


Gráfico 4.5

Grafico Relación Densidad-Humedad (AASHTO T 99) Suelo Natural

Tabla 4.12	Energías de compactación	
AASHTO T-180	Peso volumétrico seco máximo (PVSmáx.)	1590 Kg/m ³
	Peso volumétrico húmedo máximo (PVH)	1930 Kg/m ³
	Humedad óptima	21.2%
AASHTO T-99	Peso volumétrico seco máximo (PVSmáx.)	1540 Kg/m ³
	Peso volumétrico húmedo máximo (PVH)	1900 Kg/m ³
	Humedad óptima	23.8%

4.5.3 Valor de Soporte de California (CBR).

Este procedimiento se aplica para la determinación del Valor de Soporte de California (CBR) en materiales de pavimento para sub-rasantes, sub-bases y bases a partir de especímenes de laboratorio compactados según la norma **AASHTO T 193-99(2003)** (Para mayor información consultar norma). El método de ensayo se destina principalmente para la evaluación de la fuerza cohesiva de materiales que tengan un tamaño máximo de partículas inferior a 19mm (3/4 pulg.).

Se utiliza para evaluar el potencial de fuerza en sub-rasantes, sub-base y base con el material del sitio, incluyendo materiales reciclados para su uso en carretera y el derecho de aceras. El valor de CBR obtenido, forma parte integrante del pavimento para varios métodos en el diseño del mismo, proceder de la siguiente manera para su determinación:

La muestra se compactaran de acuerdo con los procedimientos indicados en la AASHTO T 99 o T 180 para la compactación en un molde de 152.4mm (6pulg.) con excepción de lo siguiente:

Si todo el material pasa a el tamiz de 19.0mm (3/4pulg.), toda la graduación se utilizará para la preparación de especímenes para la compactación sin modificaciones. Si hay materiales retenidos en el tamiz de 19.0mm, los materiales retenidos en el tamiz de

19.0mm será removido y sustituido por una cantidad igual de material que pasa por el tamiz de 19.0mm y de retenerse en el tamiz de 4.75mm (No. 4) obtenida por separación de porciones de la muestra no utilizarse de otra forma para la prueba.

Capacidad de soporte con el contenido óptimo de agua. A partir de una muestra con una masa de 35kg (75lb) o más, seleccionar una parte representativa con una masa de aproximadamente 11kg (25lb) para una prueba del grado de humedad/densidad y dividir el resto de la muestra para obtener tres porciones representativas con una masa de aproximadamente 6.8kg (15lb) cada uno en base a la norma AASHTO T 248.

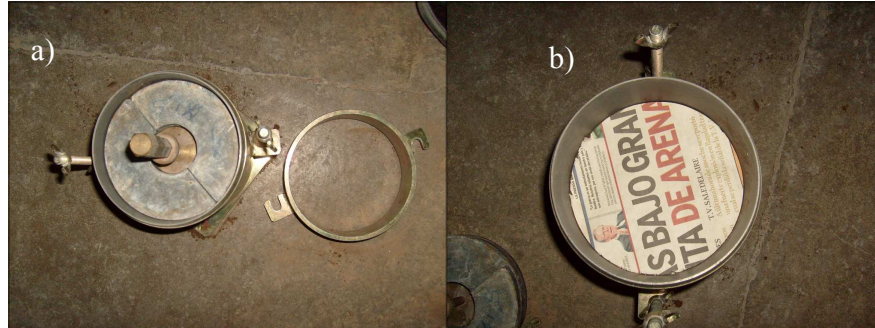
Relación humedad/densidad.

Capacidad de soporte al óptimo contenido de agua. Use una porción de 11kg (25lb), determinar el contenido óptimo de humedad y densidad seca máxima de acuerdo con el método de compactación especificado, ya sea AASHTO 99 o AASHTO T 180.

Procedimiento.

Normalmente, tres especímenes deben ser compactados de manera que se logre una gama de densidades al 95 por ciento (o inferior) y el 100 por ciento de la densidad seca máxima.

Fije el molde a la placa de base, adjuntar la extensión al cuello y pesar con la precisión mas cercana a 5g (0.01lb). Inserte el disco espaciador en el molde y coloque un filtro de papel grueso en la parte superior del disco.



Fotografía 4.18

a) Molde, contrapesos y collar de extensión b) Colocación del espaciador y papel separador

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Angel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Mezclar cada una de las tres porciones de 6.8kg (15lb) preparadas con agua en cantidades suficiente para obtener el óptimo contenido de humedad.

Compactar la primera de las tres porciones de suelo-agua-mezcla en el molde, utilizando tres capas iguales, si la máxima densidad se determinó según el método AASHTO T 99 ó cinco capas iguales, en caso de que la máxima densidad se determinó por el método AASHTO T 180, para dar un total compactado de unos 125mm.

Determinar el contenido de humedad del material compactado al principio y al final de la compactación del procedimiento (dos muestras). Cada muestra de humedad tendrá una masa de al menos 100g para suelos de grano fino y de 500g para suelos de grano grueso.

La determinación del contenido de humedad se llevará a cabo de conformidad con el método AASHTO T 2216, "Determinación en laboratorio del contenido de humedad de los suelos".



Fotografía 4.19

Muestras para humedad antes y después del

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S

Luego retire el collar de extensión, y utilizando una regla enrazadora, recortar el suelo compactado hasta nivel superior del molde. Superficies con irregularidades debe ser nivelada con el material compactado del recorte. Retire el disco espaciador, coloque un filtro grueso de papel en la placa base perforada, invertir el molde y la tierra compactada y colocar otro papel de filtro para que el suelo compactado esté en contacto con el papel de filtro. Sujetar la placa base perforada para el molde y adjuntar el cuello. Determinar la masa del molde y el modelo con la precisión más cercana a 5g (0.01lb).

Compactar las otras dos muestras de 6.8kg (15lb) para los golpes restantes ya sea 10, 25 o 56, salvo que un número intermedio de golpes por capa debe ser utilizado para compactar la segunda muestra y el mayor número de golpes por capa será utilizado para compactar la tercera muestra.

Saturación de la muestra.

Colocar contrapesos de ajuste en la muestra de suelo con el molde y los necesarios para simular una intensidad de carga igual a la masa de la sub-base y base por encima de la superficie y el material ensayado. La masa total será de un mínimo de 4.54kg. Adicionales en masa, se añade en incrementos de 2.26kg.

Coloque el trípode con el indicador dial en la parte superior del molde y hacer una primera lectura de marcación.

Sumergir el molde en agua para permitir el libre acceso de agua a la parte superior e inferior de la muestra. Durante la saturación, mantener el nivel de agua en el molde y el tanque de remojo aproximadamente 25mm (1pulg.) por encima de la parte superior de la muestra. Remoje la muestra 96 horas (cuatro días).

Al término de 96 horas, hacer una última lectura de marca en el espécimen empapado y calcular el cambio como un porcentaje de la muestra inicial de longitud:

$$\text{Porcentaje hinchamiento} = \left(\frac{\text{“Cambio de longitud en mm durante el remojo”}}{116.43\text{mm}} \right) \times 100$$

Sacar las muestras del lugar de saturación, elimine el agua de la parte superior y permitir un escurrimiento de los especímenes durante 15 minutos. Se tendrá cuidado de no perturbar la superficie de los especímenes durante eliminación del agua. Después de retirar los sobrepesos y placas perforadas.

Prueba de penetración.

Aplicación de sobrepesos: Coloque sobrepesos de ranuras anulares y pesos en los especímenes igual a la utilizada durante la saturación, para prevenir el desplazamiento de materiales blandos en el agujero, en la penetración del pistón de 44N (10lb) de carga; después procurar asentar el pistón de carga a la muestra compactada y a continuación, someter todo el pistón.

Asiento del pistón: Después de asentar el pistón de penetración 44 N (10lb) de carga, establezca el indicador de penetración de marcación y el indicador de carga a cero.



Fotografía 4.20

Ajustando el Pistón para aplicar la carga

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S

Aplicación de carga. Aplicar las cargas de penetración del pistón a una tasa de penetración uniforme de 1.3mm (0.05pulg.)/min. Registre la carga cuando la penetración sea de 0.64, 1.27, 1.91, 2.54, 3.81, 5.08 y 7.62mm (0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.150, 0.200 y 0.300 pulg.). Lecturas de carga a penetraciones de 10.16 y 12.70mm (0.400 y 0.500pulg.) se puede obtener, si lo desea ó usar otro rango de lecturas apropiado.

Cálculos.

Registrar lo valores obtenidos en la penetración, en unidades de psi, y tabularlos a fin de generar la Curva tensión-deformación.

El CBR es generalmente la carga seleccionado a 2.54mm (0.10pulg.) de penetración cuando el valor es mayor a la relación de 5.08mm (0.20pulg.) para cada rango de golpes, de darse lo contrario, el ensayo se vuelve a realizar. Si el ensayo de control da un resultado similar, la relación a 5.08mm (0.20pulg.) de penetración, se utilizará.

Plotee la curva esfuerzo-deformación (resistencia a la penetración en profundidad de penetración) para cada espécimen, como a continuación se muestra:



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**ENSAYO VALOR DE SOPORTE DE
CALIFORNIA (CBR)
AASHTO T -193**

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del Lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

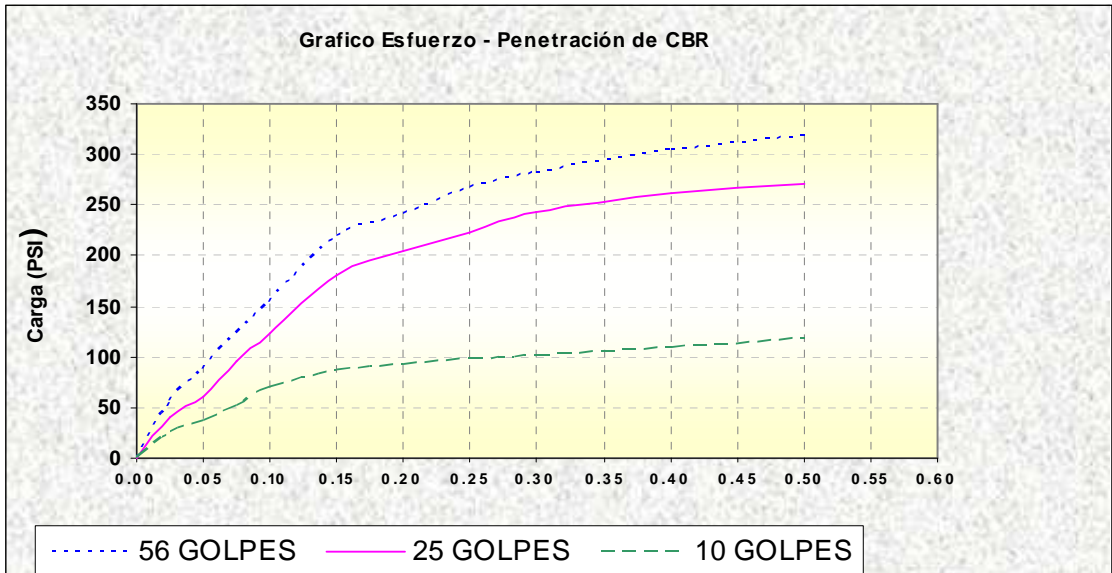
DENSIDAD

Molde No.	3	2	1
Numero de Golpes / capa	56	25	10
Peso molde + suelo compactado Inicial (g)	10,539	10,258	10,014
Peso molde + suelo compactado Final (g)	10,714	10,435	10,296
Agua Absorbida (Wab)	175	177	282
Peso molde (g)	6,462	6,336	6,341
Suelo compactado Inicial (Whi) (g)	4,077	3,922	3,673
Dens. Hum. Inicial $D_{hi}=W_{hi}/V_i$ (g/cm ³)	2,015	1,939	1,816
Densidad Seca Inicial	1,665	1,598	1,501
Peso Suelo seco $W_s=W_i \cdot D_i$ (g)	3,368	3,234	3,037
Dens. Seca final : $D_f=D_i/(1+E)$ (g/cm ³)	1,661	1,595	1,496

PENETRACIONES-CARGAS-CBR

Penetración (pulg.)	Carga Est. (PSI)	Molde (56 golpes)				Molde (25 golpes)				Molde (10 golpes)			
		Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR
			lb	psi			lbs	psi			lbs	psi	
0.000													
0.025			174	58.0			123	41.0			78	26.0	
0.050			266	88.7			185	61.7			108	36.0	
0.075			369	123.0			290	96.7			155	51.7	
0.100	1000		462	154.0	15.4		370	123.3	12.3		210	70.0	7.0
0.150			655	218.3			542	180.7			261	87.0	
0.200	1500		725	241.7	16.1		615	205.0	13.7		279	93.0	6.2
0.250			800	266.7			666	222.0			293	97.7	
0.300			845	281.7			730	243.3			306	102.0	
0.400			910	303.3			785	261.7			326	108.7	
0.500			958.0	319.3			812.0	270.7			355.0	118.3	

Observaciones: CBR suelo sin cal y 96 horas de saturación Método AASHTO T 180



Densidad Max. Próctor (Kg/m ³):	1,590 Kg/m ³
Humedad óptima	21.2%
Densidad al 95%	1,510 Kg/m ³
CBR 95%	7.8%~8%

Gráfico 4.6

CBR con método de compactación AASHTO T-180, suelo sin cal



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO VALOR DE SOPORTE DE
CALIFORNIA (CBR)
AASHTO T 193

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del Lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

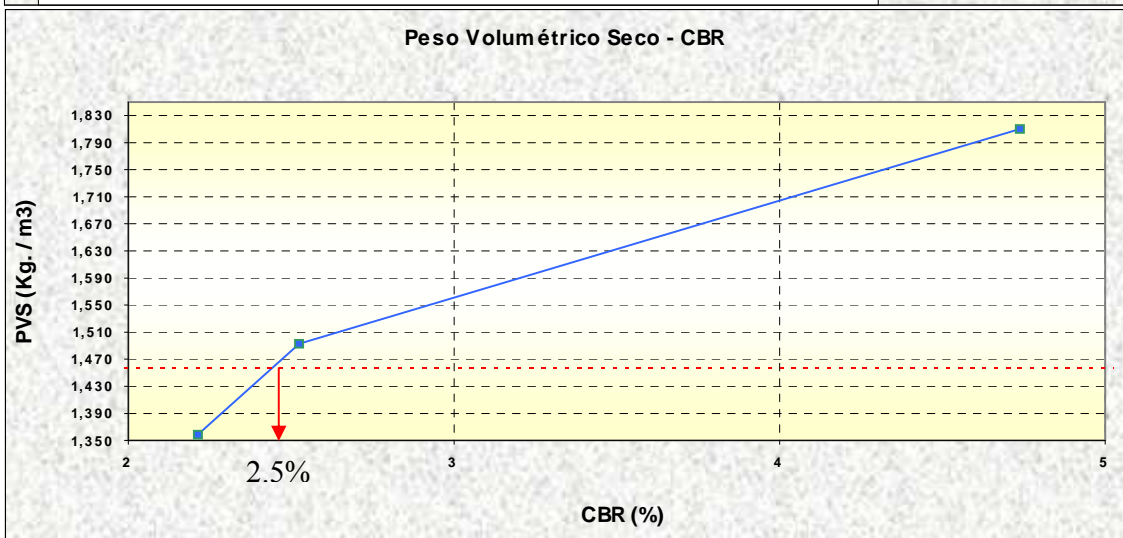
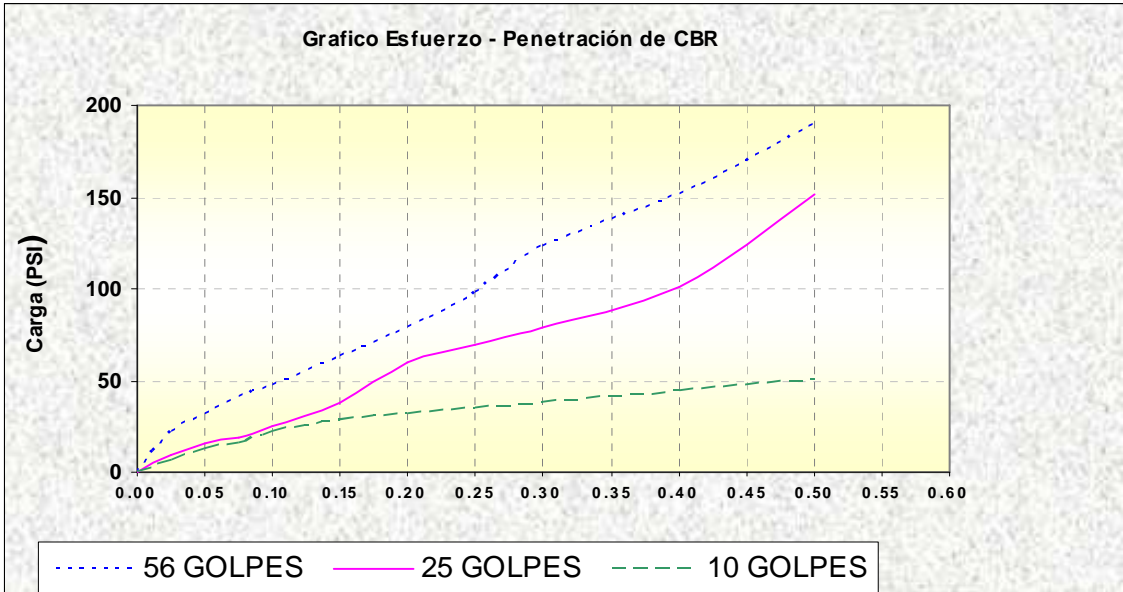
DENSIDAD

Molde No.	3	2	1
Numero de Golpes / capa	56	25	10
Peso molde + suelo compactado Inicial (g)	10,674	10,480	10,164
Peso molde + suelo compactado Final (g)	10,825	10,689	10,416
Agua Absorbida (Wab)	151	209	252
Peso molde (g)	6,024	6,644	6,670
Suelo compactado Inicial (Whi) (g)	4,650	3,836	3,494
Dens. Hum. Inicial $D_{hi} = W_{hi}/V_i$ (g/cm ³)	2,246	1,853	1,688
Densidad Seca Inicial	1,814	1,497	1,363
Peso Suelo seco $W_s = V_i * D_i$ (g)	3,756	3,099	2,820
Dens. Seca final : $D_f = D_i / (1 + E)$ (g/cm ³)	1,810	1,493	1,358

PENETRACIONES-CARGAS-CBR

Penetración (pulg.)	Carga Est. (PSI)	Molde (56 golpes)				Molde (25 golpes)				Molde (10 golpes)			
		Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR
			lb	psi			lbs	psi			lbs	psi	
0.000													
0.025		7	66.3	22.1		3	28.4	9.5		2	18.9	6.3	
0.050		10	94.7	31.6		5	47.3	15.8		4	37.9	12.6	
0.075		13	123.1	41.1		6	56.8	19.0		5	47.3	15.8	
0.100	1000	15	142.1	47.4	4.7	8	75.8	25.3	2.5	7	66.3	22.1	2.2
0.150		20	189.5	63.2		12	113.7	37.9		9	85.2	28.4	
0.200	1500	25	236.9	79.0	5.3	19	180.0	60.0	4.0	10	94.7	31.6	2.1
0.250		31	293.7	97.9		22	208.4	69.5		11	104.2	34.7	
0.300		39	369.5	123.2		25	236.9	79.0		12	113.7	37.9	
0.400		48	454.8	151.6		32	303.2	101.1		14	132.6	44.2	
0.500		60	568.6	189.5		48	454.8	151.6		16	151.6	50.5	

Observaciones: CBR suelo sin cal y 96 horas de saturación Método AASHTO T 99



Densidad Max. Próctor (Kg/m ³):	1,540 Kg/m ³
Humedad óptima	23.8%
Densidad al 95%	1,460 Kg/m ³
CBR 95%	2.5%~3.0%

Gráfico 4.7

CBR con método de compactación AASHTO T-99, suelo sin cal

NOTA: Aproximar el Valor de Soporte de California al valor del entero más próximo.

Para el suelo perteneciente a la carretera LIB 12, sobre el Caserío La Lima en Huizucar, se calculó su valor de CBR utilizando ambas humedades óptimas de compactación de los próctor antes mencionadas y las edades a las cuales se ensayaron estas probetas de CBR fueron a los 4 días obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 4.13	Valor de Soporte de California	
AASHTO T-180	Densidad máxima próctor (Kg/m ³):	1590 Kg/m ³
	Densidad al 95%:	1510 Kg/m ³
	CBR al 95%:	8%
AASHTO T-99	Densidad máxima próctor (Kg/m ³):	1540 Kg/m ³
	Densidad al 95%:	1460 Kg/m ³
	CBR al 95%:	3%

El Valor de Soporte de California se calcula para valores de 2.54 y 5.08mm (0.10 y 0.20pulg.) de penetración los cuales se plotean el eje “X” versus la densidad de peso seco alcanzadas en la compactación bajo el numero de golpes referido(10, 25, 56 golpes por capa), obteniendo el 95% del valor de peso seco máximo del próctor, se traza sobre el eje de las ordenadas y donde intercepte el ploteo de los valores de CBR a 2.54 y 5.08mm (0.10 y 0.20pulg.) de penetración versus la densidad de peso seco alcanzadas en la compactación bajo el numero de golpes referido, corresponde al valor de CBR al 95% del Peso Volumétrico Seco Máximo PVS del próctor.

Los Valores de Soporte de California se obtienen al dividir la carga en los valores de 2.54 y 5.08mm (0.10 y 0.20 pulg.) por la carga estándar de 6.9 y 10.3 MPa (1000 y 1500psi), respectivamente, y la multiplicación de estos coeficientes por 100 para obtener un porcentaje.

CBR= (Valor de carga /Carga estándar) x100

De la anterior ecuación se puede despejar el Valor de carga con los datos siguientes:

CBR=7.70~8.0% y CBR= 2.50~3.0%

Para Carga Estándar =1000psi

Obteniendo para el próctor AASHTO T-180:

Valor de carga= (CBR/100) x Carga Estándar

Valor de carga= (8/100) x 1000

Valor de carga= 80 psi= 240lb

NOTA: Para convertir un valor de psi a lb, deberá de multiplicarse este por un factor de 3.

Obteniendo para el próctor AASHTO T-99:

Valor de carga= (CBR/100) x Carga Estándar

Valor de carga= (3/100) x 1000

Valor de carga= 30psi=90lb

Ambos valores no podrían definir que próctor es más conveniente. Efectuando un levantamiento de intensidad vehicular sobre la carretera de diseño pueden obtenerse los valores de carga a los cuales es sometida la estructura del pavimento con los cuales pueden compararse ambos CBR y ver cual satisface la demanda de carga, unido a los resultados de la compresión simple ASTM D-2166; por otro lado esta investigación pretende mejorar esa capacidad de carga al adicionar cal y comprobar de esa manera las mejoras en estas propiedades del suelo al utilizar ese agente estabilizante.

4.5.4 Resistencia a la compresión inconfiada.

Para el suelo natural en estudio, la compresión simple, se realizó utilizando ambos métodos de compactación AASHTO T-180 y AASHTO T-99 y en base a la norma **ASTM D 2166-00**.

Por lo general la energía de compactación la define las especificaciones del proyecto, y es con esta con la cual se realiza los especímenes para ser ensayados a la compresión simple.

Este procedimiento es aplicable solo a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados. Los suelos secos friables, los materiales fisurados, laminados, las turbas y las arenas no pueden ser analizados por este método para obtener valores significativos de la resistencia a la compresión no confinada.

Para la resistencia a la compresión simple se contó con una unidad de registro que tiene un programa integrado, que permite al usuario ejecutar pruebas automáticamente, incluye el control automático de los esfuerzos axiales y de la presión de confinamiento así como la generación automática de reportes y resultados, etc.

Elaboración de especímenes.

A continuación se explica el procedimiento que se siguió en la elaboración de las probetas para su posterior ensayo.

Preparación de probetas para los ensayos.

Tomar en cuenta que la muestra sea representativa del material en bruto, esto en base a la norma AASHTO T-2, igual contenidos de agua y procurando un cuidado absoluto en la preparación se realizó el siguiente procedimiento:

Preparación de las muestras.

Tamaño de las muestras. Los especímenes deben tener un diámetro mínimo de 30mm y la partícula mayor contenida dentro del espécimen de ensayo debe ser menor que 1/10 del diámetro del espécimen.

Para muestras que tengan un diámetro de 72mm o mayores, el tamaño mayor de partícula debe ser menor que 1/6 del diámetro del espécimen.

Procedimientos descritos según la norma ASTM D 5102 (Ensayo a la compresión simple inconfiada de mezclas suelo-cal):

Procedimiento A: Se describen los procedimientos para la preparación de pruebas de especímenes de suelo-cal, las muestras compactadas deberán tener una relación de altura frente al diámetro de 2.0 a 2.5.

Este método de ensayo proporciona la medida estándar de resistencia a la compresión.

Procedimiento B: Se describen los procedimientos para la preparación de pruebas de especímenes en suelo compactado utilizando el método de ensayo AASHTO T 180 ó AASHTO T 99, con equipos de compactación y moldes comúnmente disponibles en la mayoría de los laboratorios de ensayos de suelo.

Debido a la menor relación de altura-diámetro (1.15), de los cilindros, la resistencia a la compresión determinada de en procedimiento B normalmente será mayor que la del procedimiento A.

Los resultados de resistencia inconfiada a la compresión utilizando pruebas en el procedimiento B no debe compararse directamente con los obtenidos utilizando el procedimiento A.

Determine la altura promedio y el diámetro de la muestra para el ensayo utilizando los instrumentos apropiados.

Tome un mínimo de 3 mediciones de la altura (separadas 120°), y por lo menos tres mediciones del diámetro espaciadas igualmente a lo largo de la generatriz del cilindro.

Debido al uso del molde de 4" del próctor y en base a la norma ASTM 2166 se tiene el siguiente procedimiento para muestras compactadas:

Muestras compactadas. Las muestras deben ser preparadas con un contenido de agua predeterminada y con la densidad prescrita por la persona que solicita el ensayo.

Después de preparada la muestra recorte los extremos perpendicularmente al eje longitudinal, retírela de la formaleta y determine su masa y sus dimensiones.

Procedimiento.

Coloque el espécimen en el aparato de carga de tal manera que quede centrado en la platina inferior.

Ajuste el instrumento de carga cuidadosamente de tal manera que la platina superior apenas haga contacto con el espécimen.

Lleve a ceros el indicador de deformación.

Aplique la carga de tal manera que se produzca una deformación axial a una velocidad de 2 a 2.5% por minuto.

Registre los valores de carga, deformación y tiempo a intervalos suficientes para definir la curva esfuerzo-deformación (normalmente son suficientes 10 a 15 puntos).

La velocidad de deformación debe escogerse de tal manera que el tiempo necesario para la falla no exceda de 15 minutos.

Continúe aplicando carga hasta que los valores de carga decrezcan al aumentar la deformación o hasta que se alcance una deformación igual a 15%.

Registre la velocidad de deformación en el informe de los datos de ensayo.

Determine el contenido de agua de la muestra de ensayo utilizando todo el espécimen a menos que se hayan obtenido cortes representativos para este fin, como en el caso de las muestras inalteradas.

Indique en el informe del ensayo si la muestra para contenido de humedad fue obtenida antes o después del ensayo de compresión.

Al final haga un diagrama o tome una fotografía de la muestra en las condiciones de falla, mostrando el ángulo de inclinación de la superficie de rotura, si dicho ángulo es mensurable.

Las probetas se trabajaron dentro de energía de compactación próctor estándar AASHTO T-99 y próctor modificado AASHTO T-180.

La cantidad de suelo que se preparó para cada muestra fue de 1500g, el cual se homogeneizó para los diferentes contenidos de humedades correspondientes.

Las muestras se dejaron curar 24 horas dentro de un recipiente hermético a fin de generar una homogeneidad de humedad en las mismas, y posteriormente se compactaron.

Tiempo de curado.

Una de las variables en el procedimiento de preparación de probetas, es el tiempo de curado del material, el cual es el lapso comprendido entre el momento en que se añade el agua a la muestra y el momento de compactación del mismo, lo que permite una distribución uniforme del agua.

Se recomienda para la mayoría de los suelos fijar como tiempo de curado 24 horas para suelos natural sin adicción de cal ya que para resistencia de mezclas de suelo compactado con cal especímenes se curan en base a la norma ASTM D-5102.

Tiempo de reposo.

Al lapso transcurrido entre el momento de la compactación y el inicio de la prueba, se le denomina tiempo de reposo.

Los tiempos de reposo fijados para resistencia a la compresión de suelo natural, fueron 3, 7, 28 y 90 días.

En base al procedimiento B y bajo un curado estándar según norma ASTM D 2166, los valores obtenidos para el suelo objeto de estudio al entero próximo y bajo los métodos de compactación AASHTO T 180 y AASHTO T-99 son los siguientes:

Para una mayor información de los valores registrados de la compresión simple de esta investigación ver ANEXO 3 “Tabla completa de registro de compresión simple”

Tabla 4.14

Compresión simple Inconfinada de Suelo Natural

Método de compactación	# Probeta	Edad	Humedad de compactación %	Peso, g	Alto, cm	Diámetro cm	Peso volumétrico, g/cm ³	Área, cm ²	Resistencia a la compresión, Kn	Esfuerzo Kg/cm ²	Esfuerzo Promedio Kg/cm ²
AASHTO T-180	1A	3días	21	1844	11.50	9.91	2.1	77.1	9	11	11
	1A		21	1812	11.51	9.90	2.0	77.0	8	11	
	1B	7días	21	1650	11.52	9.88	1.9	76.7	9	12	11
	1B		21	1648	11.52	9.90	1.9	77.0	8	11	
	1C	28días	21	1526	11.52	9.80	1.8	75.4	10	13	13
	1C		21	1518	11.49	9.91	1.7	77.1	10	13	
	1D	90días	21	1498	11.50	9.90	1.7	77.1	10	13	13
	1D		21	1482	11.50	9.91	1.7	77.0	10	13	
AASHTO T-99	2A	3días	24	1756	11.50	9.90	2.0	77.0	7	9	9
	2A		24	1700	11.51	9.90	1.9	77.0	6	8	
	2B	7días	24	1624	11.50	9.91	1.8	77.1	7	9	9
	2B		24	1612	11.50	9.93	1.8	77.4	7	9	
	2C	28días	24	1586	11.49	9.90	1.8	77.0	7	10	9
	2C		24	1591	11.49	9.91	1.8	77.1	7	9	
	2D	90días	24	1452	11.49	9.90	1.6	77.0	7	9	9
	2D		24	1477	11.49	9.89	1.7	76.8	7	9	

Los valores de Resistencia a la Compresión Simple en Kn fueron obtenidos en esas unidades directamente de la maquina de ensayo utilizada; para obtener el Esfuerzo en Kg/cm² basta con multiplicar (Resistencia a la compresión en Kn por 1000 para obtener Newton “N” luego Dividir entre 9.81 debido a que 1Kg= 9.81N, para obtener Kg; por ultimo dividir la Fuerza entre el área para obtener un Esfuerzo.

Ejemplo: (9 Kn x1000)=9000N esto 9000N/ 9.81=917.43Kg y luego Fuerza/Area=917.43Kg / 77.1cm²=11.9 Kg/cm² lo que se puede reportar como 12 Kg/cm² reportar el valor del entero próximo.

Los resultados obtenidos pueden compararse para conocer las diferencias existentes entre especímenes realizados bajo métodos AASHTO T 99 y AASHTO T 180. Las edades de prueba seleccionadas fueron de 3, 7, 28 y 90, debido a que un suelo natural no gana resistencia con el tiempo en condiciones de curado sin tener un agente estabilizador, para el suelo analizado los resultados muestran claramente como la resistencia de los suelos arcillosos no presenta una ganancia de resistencia significativa respecto al tiempo, debido que pasa de un valor de esfuerzo de 11 Kg/cm² a los tres días a un valor de 13 Kg/cm² para los 28 días, generando un valor máximo a los 28 días de 13 Kg/cm² razón que pudo deberse a la pérdida de humedad en el proceso de curado; lo mismo puede interpretarse para los especímenes compactados por el método AASHTO T 99.

Conocer los valores de resistencia de suelos sin cal puede dar un parámetro de cuanto se mejora ésta misma propiedad con la adición de cal, y ver su factibilidad de estabilizar ese tipo de suelo con este agente estabilizador.

A continuación se analizan otras propiedades del suelo, únicamente como investigación general, ya que no son un parámetro determinante dentro de la estabilización con cal.

4.5.5 Índice de expansión de suelos (IE).

Para las pruebas de presión y porcentaje de expansión puede utilizarse el consolidómetro de expansión libre con anillo fijo según la norma **ASTM D 4829-03** (Para mayor información consultar norma).

Para determinar el índice de expansión de un suelo primero tamizar una cantidad adecuada de suelo en el tamiz de 4.75mm (No 4). Registrar el porcentaje de material grueso retenido en el 4.75mm (N ° 4) y el que paso el tamiz.

Ejemplo. Seleccionar una muestra representativa del suelos con una masa de aproximadamente 1.0kg (2.2lb).

PREPARACION DEL ESPECIMEN.

Ajuste el contenido de agua. Mezcle bien la muestra representativa con suficiente agua hasta obtener una humedad próxima al 50% de saturación.

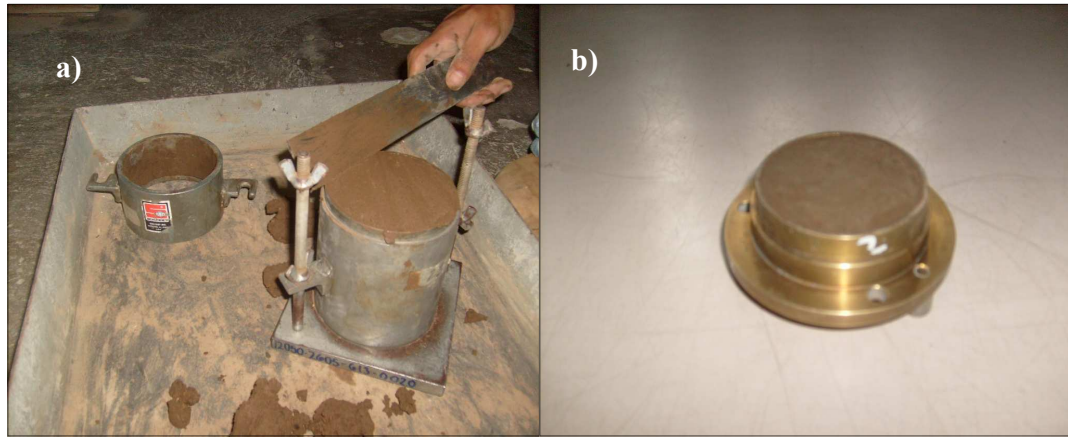
Después de esta mezcla, usar una muestra representativa de material para la determinación de humedad y tapar el resto de los suelos en un primer recipiente hermético adecuado por un período de por lo menos 16 horas (o durante la noche).

Pesar la muestra húmeda inmediatamente, y secar en un horno a 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F) durante al menos 12 h, o de conformidad con el método de ensayo ASTM D 2216, hasta obtener una masa constante para determinar el contenido de agua. La muestra húmeda tendrá una masa de por lo menos 100g conforme método de ensayo con ASTM D 2216.

Moldeo de especímenes. Formar un espécimen por compactación, con el suelo curado, de 101.9mm (4.01in.) de diámetro del molde en dos capas iguales para dar una profundidad compactada de aproximadamente 50.8mm (2pulgadas).

Compactar cada capa con 15 golpes uniformemente distribuidos por caída libre desde una altura de 305mm (12pulgadas) por encima de la parte superior de la tierra cuando un tipo de peso se utiliza, o de 305mm por encima de la elevación de cada capa compactada, finalmente cuando un tipo de peso estacionario se utiliza, primero escarificar la primera capa compactada antes de añadir material de la segunda capa utilizando un cuchillo u otro objeto adecuado.

La compactación se hará en un molde rígido uniforme montado en una fundación dura como la proporcionada por un cubo de concreto con una masa de no menos de 90kg (200libras).



Fotografía 4.21

a) Moldeo de pastilla en molde de 4pul. b) Pastilla labrada y colocada en el molde del consolidómetro

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Cuidados del Espécimen. Al finalizar la compactación del espécimen, retire las partes superior e inferior del molde del anillo interior y recortar cuidadosamente la muestra y asegurarse que quede a ras con la parte superior e inferior de la anillo con un borde recto.

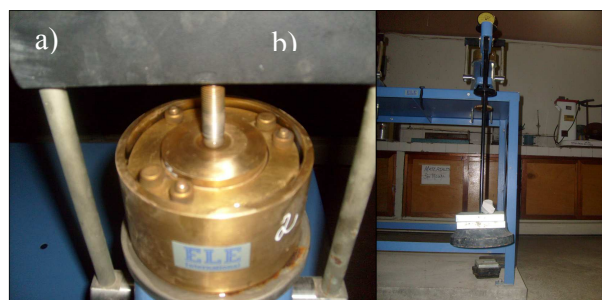
Determinar la altura inicial (H₁). De la muestra con aproximación de 0.03mm (0.01pulgadas) o asumir la altura de la muestra anillo.

Ajuste del Contenido de Agua. Ajustar el contenido de agua hasta lograr un grado de saturación de $50 \pm 1\%$. Solo si el grado de Saturación no está entre el 49 y el 51%, luego retire el suelo del molde y ajustar el contenido de agua mediante la adición de agua.

Procedimiento.

Coloque la muestra de suelo, que se ha compactado en el anillo de 101.9 mm (4.01 in.) de diámetro, en un consolidómetro ó en un dispositivo equivalente con discos porosos para entrada de aire seco en la parte superior y en el fondo.

Coloque a la muestra una presión total de 6.9 kPa (1.0lbf/in.²), incluido el peso de la parte superior del disco poroso, evite cualquier desequilibrio en el peso de la máquina de carga. Deje que el espécimen se consolide bajo esta presión por un período de 10 minutos, después de éste tiempo registre la lectura inicial (D1) en el indicador dial del consolidómetro con una precisión de al menos 0.03mm (0.001 pulgadas).



Fotografía 4.22

a) Colocación de la pastilla en el consolidómetro
b) aplicación de carga

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, UES.

Cubra la muestra con agua, durante el período de lecturas en el indicador dial, por un período de 24 horas o hasta que la tasa de expansión no sea mayor de 0.005 mm/h (0.0002 pulg/h). Sin embargo, en ningún caso cubra la muestra y tome lecturas sin haber pasado por lo menos 3 h para registrar valores de D2.



Fotografía 4.23

Cubriendo el material con agua

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, UES.

Remueva la muestra de la máquina después de la carga y de haber registrado la lectura final (D2) y determinar el cambio en la altura de ΔH como la diferencia entre la lectura inicial y final del indicador dial. Determine la masa con una aproximación de 0.1 g.

A continuación se hace mención de algunos aspectos significativos de estos procedimientos. En cuanto al consolidómetro, señala que el diámetro del anillo no debe ser menor de 2 pulgadas y la altura no mayor de tres décimos del diámetro ni menor de $\frac{3}{4}$ de pulgada, para especímenes de diámetro pequeño y de menores alturas introducen errores causados por la magnitud del remoldeo en la superficie, mientras que alturas grandes causan fricción excesiva.

El diámetro de los anillos utilizados en el experimento es de 63.5mm y con una altura de 19.7mm aproximadamente, con lo cual se observa que cumplen con las especificaciones por la norma. El aparato debe permitir el movimiento vertical en la parte superior e inferior de la pastilla, a medida que la expansión se desarrolla.



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**“METODO DE ENSAYO ESTANDAR PARA ENCONTRAR
EL INDICE DE EXPANSION DE SUELOS”
ASTM D-4829**

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

INDICE DE EXPANSION SUELO NATURAL USANDO UN CONSOLIDOMETRO

**DATOS INICIALES DE LA
PASTILLA**

Diámetro Inicial, Do	6.1000cm
Altura Inicial, H1	2.000cm
Área Inicial, Ao	0.0029m ²
Peso Inicial, Wo	113.7000g
Peso de Anillo, W	64.5000g
Peso de Carga	40.3300lbs

**HUMEDAD DE COMACTACION Y
SATURACION**

	Compactación	Saturación
Tara	1	2
Peso Tara	10.60	10.70
Muestra humedad + tara	40.70	123.40
Muestra seca + tara	35.60	86.30
% de humedad	20.40%	49.07%

CALENDARIO DE REGISTRO DE LECTURAS

	LECTURA, mm	OBSERVACION	FECHA
Hora de carga	9.15a.m.	0.0000	Sin Carga
Reposo 10mm, d1	9.25a.m.	3.4000	Compresión
Inicio de Lecturas a 3h, d2	12.15m.d.	3.4225	Compresión
Lectura a las 6h, d2	3.15p.m.	3.3875	Compresión
Lectura a las 24h, d2	9.15a.m.	3.35000	Expansión

CALCULOS DE INDICE DE EXPANSION

Grado de Saturación:	
Altura Inicial, H1	20.00
Lectura D1	16.60
Lectura D2	16.65
Cambio de Altura, ΔH	0.05
Índice de Expansión:	0.25
Expansión Potencial, 0-20	Muy Baja

Observaciones: Las Lecturas D1 y D2 resultan de la resta de H1 menos d1 y d2

Los resultados obtenidos para el material de estudio son:

Tabla 4.15		Índice de Expansión del Suelo
Método del consolidómetro	Altura Inicial, H1	20 mm
	Lectura D1	16.6 mm
	Lectura D2	16.7 mm
	Cambio de Altura, ΔH	0.1 mm
	Índice de Expansión:	0.3-0.0
	Expansión Potencial, 0-20	Muy baja

Los valores de la expansión potencial se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.16	Expansión Potencial
Índice de Expansión (IE)	Expansión Potencial
(0-20)%	Muy Baja
(21-50)%	Baja
(51-90)%	Madia
(91-130)%	Alta
(>130)%	Muy Alta

La norma ASTM D 4829-03, clasifica la expansión potencial de un suelo en base al índice de expansión de este, tal como se muestra en la tabla 4.16

4.6 PROPIEDADES ANALIZADAS DEL MATERIAL DE ESTUDIO.

Resumen de los resultados obtenidos en los estudios realizados al suelo en estado natural, previo a su estabilización con cal:

Tabla 4.17 **Propiedades del suelo en estudio sin cal**

Clasificación	SUCS ASTM D 2487	CL	Arcilla de baja a mediana plasticidad
	AASHTO M 145	A-6 (4)	Suelo Arcilloso
Próctor	AASHTO T-180	PVS=1590 kg/m ³	%Wopt=21.2%
	AASHTO T-99	PVS=1540 kg/m ³	%Wopt=23.8%
CBR	AASHTO T-180	8%	
	AASHTO T-99	3%	
Compresión Simple (suelo natural)	AASHTO T-180	3días	Esfuerzo= 11 Kg/cm ²
		7días	Esfuerzo= 11 Kg/cm ²
		28días	Esfuerzo= 13 Kg/cm ²
		90días	Esfuerzo=13 Kg/cm ²
	AASHTO T-99	3días	Esfuerzo= 9 Kg/cm ²
		7días	Esfuerzo= 9 Kg/cm ²
		28días	Esfuerzo= 9 Kg/cm ²
		90días	Esfuerzo= 9 Kg/cm ²
Orgánicos	Prom.=1.3%		
LL	36%		
LP	24%		
IP	12%		
IE	0.3%		

Delimitando todas aquellas propiedades que sirven para identificar el tipo de material, y parámetros de diseño que a la vez servirán de comparación para mezclas suelo-cal, el siguiente paso es obtener el porcentaje óptimo de cal necesario para estabilizar el suelo, en las siguientes secciones se describirá el proceso para encontrar el porcentaje de cal óptimo en base a la norma ASTM D 6276, comparando estos mismos resultados con papel tornasol medidor de pH; también se encontrará el porcentaje de cal óptimo en base a los límites de Atterberg del suelo en estudio.

NOTA: ANEXO 1 “Lista de chequeo para control de laboratorio” muestra algunos aspectos importantes sobre el proceso a seguir en este ensayo.

4.7 METODO USANDO EL pH PARA ESTIMAR LA PROPORCION SUELO-CAL REQUERIDA PARA LA ESTABILIZACION DE SUELOS.

Métodos para encontrar el porcentaje óptimo de cal pueden haber muchos y la eficacia de cada uno depende de la experiencia del que lo practique, muchos de estos no están normalizados por la ASTM, para nuestro caso se utilizara el procedimiento **ASTM D-6276-03** el cual se describe a continuación (Para mayor información consultar norma).

Este procedimiento proporciona los medios para estimar el requisito de la proporción del suelo-cal para la estabilización de un suelo plástico. Se realiza en suelos que pasan el tamiz de 425µm (No. 40). La proporción óptima del suelo-cal para la estabilización de suelos plásticos, será aquella que brinde un mejoramiento en las características propias del suelo, determinadas principalmente por la resistencia a la compresión ó el índice de plasticidad.

Se utiliza para determinar el porcentaje más bajo de la cal que genere un pH de 12.4 en un suelo a estabilizar.

Una serie de especímenes son preparados conteniendo un rango de porcentajes de cal en una muestra de suelo. Las medidas del pH se hacen en las mezclas de los especímenes en

suspensión para determinar el contenido mínimo de la cal de la mezcla del suelo-cal para obtener un pH de por lo menos 12.4.

Preparación del suelo.

El suelo puede ser secado al horno a temperatura menor o igual a 60 grados centígrados (con humedad higroscópica).

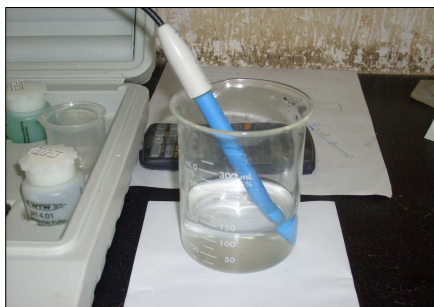
Obtenga 350 gramos de material que pase por tamiz No. 40.

Mezcle bien el material que pasa el tamiz de los 425 μ m (No. 40).

Determine el contenido en agua, de acuerdo con el método ASTM D 2216 de la prueba, en un espécimen representativo del material para verificar que el material se encuentra totalmente seco.

La calibración y la estandarización.

Calibrar el contador de pH de acuerdo con las instrucciones del fabricante usando solución búfer de pH 4,7 y 10 a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$



Fotografía 4.24

Proceso de estandarización



Fotografía 4.25

Calibración de electrodo dentro de solución búfer

Fotografías tomadas en Laboratorio "Cemento Progreso" Guatemala.

Procedimiento.

Preparación de Especímenes:

Con la muestra secada al horno, obtenga cinco especímenes, con un equivalente de 25.0g de suelo.



Fotografía 4.26

Muestras de suelo y cal

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Determine la masa de cada espécimen de 25.0g de suelo secado al aire ó al horno de acuerdo a la siguiente formula:

$$M_a = 25X (1.0 + W/100)$$

Donde:

M_a = masa del espécimen de suelo secado al aire o al horno, y

W = contenido de agua, de la muestra seca determinado.

Ponga cada espécimen en las botellas de plástico y tapar herméticamente.



Fotografía 4.27

Suelo dentro de recipiente hermético.

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Obtenga seis muestras representativas de cal que cumpla los requisitos de la especificación C 977. Cinco especímenes con cantidades de de 2, 3, 4, 5, y 6 % de la masa de suelo secado en el horno de 25g. El sexto espécimen de 2.0g de cal representa una solución saturada de la cal. Coloque los 2.0g de cal en una botella plástica y tape herméticamente.

Agregue a uno de los primeros cinco especímenes de suelo la cal en las botellas plásticas, tape firmemente, marque el porcentaje en la botella, y homogeneizar por agitación. Repita este procedimiento para los cuatro especímenes restantes de suelo y cal y el espécimen de cal saturada.



Fotografía 4.28

Colocación de cal dentro de recipiente hermético con suelo

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Agregue 100 ml de agua a cada uno de las mezclas de la suelo-cal y a la botella que contiene la cal de 2.0 g.



Fotografía 4.29

Colocación de agua dentro de recipiente con suelo y cal.

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Sacuda cada una de las mezclas suelo-cal-agua, por un mínimo de 30s o hasta que los especímenes se mezclen homogéneamente. Continúe sacudiendo los especímenes por 30s cada 10 minutos durante 1 h.



Fotografía 4.30

Agitación de mezcla suelo-cal-agua

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

En caso de ser necesario, caliente o enfríe el espécimen para mantener la temperatura del espécimen a $25 \pm 1^\circ\text{C}$.

Dentro de los 15 minutos siguientes de terminado el proceso de mezclado de 1 hora, determine el PH en cada mezcla suelo-cal-agua y de la mezcla del cal-agua de 0.01 unidad del PH. Mantenga la temperatura de la mezcla en $25 \pm 1^\circ\text{C}$ al determinar el PH.

Registre el valor de PH para cada mezcla del suelo-cal-agua y para la mezcla de la cal-agua.

El ensayo fue realizado para muestras con contenidos de cal del 1 al 12% para fines de esta investigación, obteniéndose los resultados que a continuación se muestran:



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



**METODO DE ENSAYO ESTANDAR, USANDO EL PH
PARA ESTIMAR LA PROPORCION SUELO-CAL
REQUERIDA PARA LA ESTABILIZACION DE SUELOS."**

ASTM D-6276

Solicitante: Universidad de El Salvador Material: Del lugar
Proyecto: Trabajo de Graduación Estacionamiento: 5+140 a 5+290
Procedencia: LIB 12 Fecha de recibido: Junio/2008
Ubicación: HUIZUCAR Fecha de ensayo: Junio/2008

**TIPO DE CAL:
CAL HIDRATADA BAJO ESPECIFICACIÓN ASTM C-977**

No de muestra	% Cal	Peso de Suelo	Peso de Cal	Cantidad de agua	Valor de PH
1	1%	25g	0.25g	100ml	8
2	2%	25 g	0.50 g	100 ml	12
3	3%	25 g	0.75 g	100 ml	12.2
4	4%	25 g	1.00 g	100 ml	12.4
5	5%	25 g	1.25 g	100 ml	12.5
6	6%	25 g	1.50g	100 ml	12.6
7	7%	25 g	1.75g	100 ml	12.6
8	8%	25 g	2.00g	100 ml	12.6
9	9%	25 g	2.25g	100 ml	12.7
10	10%	25 g	2.50g	100 ml	12.7
11	11%	25 g	2.75g	100 ml	12.8
12	12%	25 g	3.00g	100 ml	12.8
Condición saturada			2.0 gr.	100 ml	12.7
Agua					6.7

Observaciones: Estabilizar el suelo con 4% de Cal

Variación del pH con respecto a las diferentes mezclas suelo-cal:

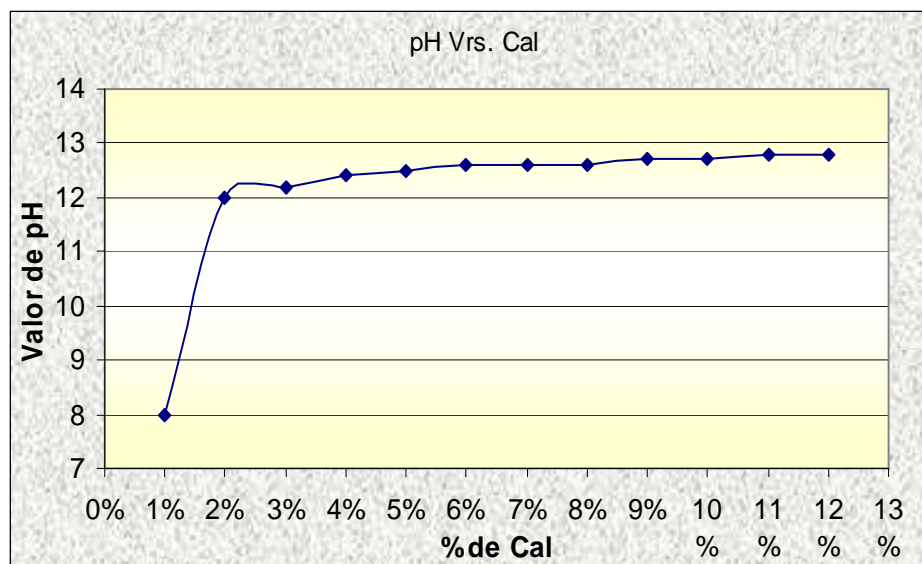


Gráfico 4.8 Variación de pH vs. % de cal

Los datos muestran que para el tipo de suelo analizado, un 4% de cal es el porcentaje óptimo para estabilizar ese material en particular, ya que cumple la especificación ASTM D-6276 para un pH de 12.4, los resultados para las demás mezcla de suelo-cal presentados son únicamente para ver el comportamiento del valor de pH, no siendo necesario determinarse en la practica de diseño.

A medida que se incrementa el contenido de cal el valor pH se vuelve constante en valor cercano a 12.4, lo que es un parámetro que indica que el suelo esta estabilizado.

4.8 DETERMINACION DE VALORES DE pH PARA MEZCLA SUELO-CAL UTILIZANDO PAPEL TORNASOL.

La utilización de la norma ASTM D-6276 para encontrar el porcentaje óptimo de cal, talvez no sea bien conocida por muchos, para efectos de análisis, en esta sección se determinará el valor de pH utilizando papel tornasol, éste procedimiento no esta normado y su uso no debe tomarse como un estándar, solo puede ocuparse a nivel de chequeo en campo, por otro lado el papel no presenta un rango de colores con decimales y encontrar el valor de pH =12.4 seria mediante aproximaciones.

El procedimiento de preparación de las mezclas es el mismo que para la determinación del valor de pH regido bajo las especificaciones de la norma ASTM D 6276. El proceso para este ensayo se detalla a continuación:

Este tipo de papel viene en dos colores, el papel de color naranja se utiliza cuando el porcentaje de pH buscado se encontrara dentro del rango de 1 a 12, y el papel de color azul cuando se buscan pH de 12.5 a 14.

A continuación se presenta una guía muy útil del significado correspondiente a cada color.



Color de papel utilizado para encontrar valores de pH de 1 a 12, este papel cambiara de color según el pH que contenga la mezcla analizada, como se indica a continuación.



pH =1



pH =2



pH =3



pH =4



pH =5



pH =6



pH =7



pH =8



pH =9



pH =10



pH =11



pH =12



Color de papel utilizado para encontrar pH que están dentro de un rango de 12.5 a 14.



pH = 12.5



pH = 13

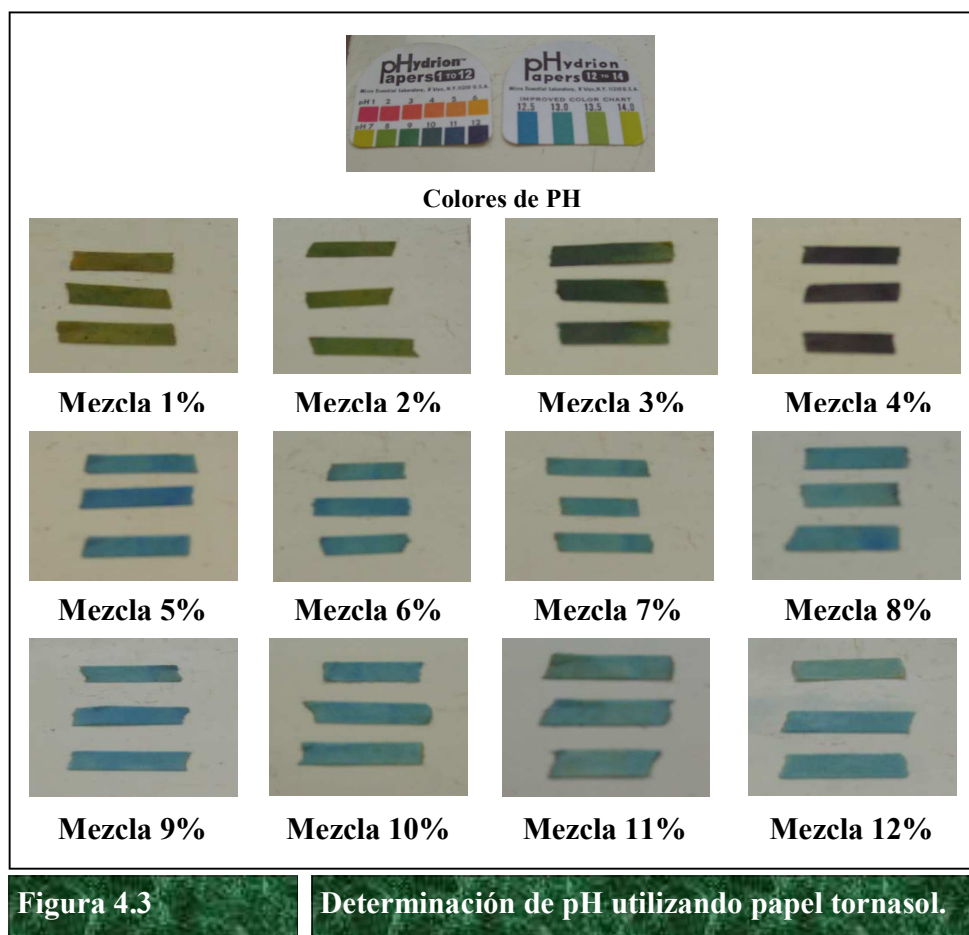


pH = 13.5



pH= 14

Para el suelo muestreado en la carretera LIB12 se tienen los siguientes resultados:



Comparando los resultados para las mezclas con los colores estándar que trae papel pH puede deducirse lo siguiente:

- 1-El primer rango de valores encontrados en los porcentajes de cal del 1% a 4% cae en la escala del papel que va de un valor de pH 1 a 12.
- 2-El segundo rango de porcentajes de cal utilizados que van de 5% a 12% está dentro del rango de valores pH de 12.5 a 14.

3-Comparando los resultados y colores con los estándar del papel pH, puede notarse que hay un incremento de colores ascendente de las mezclas 1%-4%, que al llegar al color que representa el pH de 12.0 pareciera estabilizarse.

4-Se nota en los colores de las siguientes mezclas 5% a 12%, que el color parece no variar de un pH 12.0 a 12.5, esto según la comparación de los colores.

5-La anterior deducción puede entenderse ó analizarse que a medida que la mezcla se acerca a un valor de pH de 12.0 (según el color para la mezcla de 4%), esta se estabiliza tendiendo a formar un rango de valores que van de pH=12 a pH=12.5 debido a que las comparaciones con colores de las mezclas con mayores porcentajes de cal, en ningún caso se llega al color verde claro que representa el valor de pH=13.0.

6-La selección bajo este procedimiento es mas intuitiva que practica, ejemplo de esto es que puede tomarse el porcentaje de cal de 4% en el inicio del rango constantes de color, o el siguiente porcentaje de cal que presenta otro rango de color constante en que es el de 5%, ó tomar un valor promedio de 4.5%.

7-Debido a que el papel no da margen para delimitar colores que representen valores de pH decimal de 12.0 a 13.0, la practica es poco razonable y carece de exactitud, por lo que su aplicabilidad no se recomienda para encontrar el porcentaje óptimo de cal para estabilizar un determinado tipo de suelo, solo como control de calidad en el proceso constructivo donde se utilice la mezcla suelo-cal.

4.9 PROCESO ALTERNATIVO UTILIZANDO LOS LIMITES DE ATTERBERG PARA SELECCIONAR EL PORCENTAJE OPTIMO DE CAL.

Un proceso alternativo y que al igual que el papel pH no esta normado para la determinación de cal optima en una estabilización, consiste en encontrar los límites de Atterberg y ver como baja la plasticidad en mezclas de suelo-cal.

El procedimiento es el mismo que para los límites de Atterberg comunes utilizando las normas AASHTO T-89 para límite líquido y AASHTO T-90 para limite de plasticidad e índice de plasticidad, con el único cambio de agregar porcentaje de cal en distintos porcentajes.

El valor óptimo de cal que estabiliza el suelo será aquel cuyo valor de IP tienda a cero, los resultados siguientes corresponden al suelo analizado en esta investigación:

Tabla 4.18		Variación de IP en mezclas de Suelo Cal		
N° de muestra	% Cal	Valor de Límite Líquido	Valor de Límite de Plasticidad	Valor de IP
2	2%	32.1	23.9	8.1
3	3%	31.3	27	4.3
4	4%	31	No Practicable	NP
5	5%	30.8	No Practicable	NP
6	6%	Valor innecesario		

Como puede apreciarse los valores de IP disminuyen conforme se incrementa los porcentajes de cal, bajando totalmente la plasticidad a partir del 4% de cal en este suelo en particular.

A continuación se presentan los porcentajes de cal óptima para el suelo analizado, mediante los tres métodos detallados anteriormente:

Tabla 4.19		Porcentaje óptimo de Cal	
Método		Resultado	
ASTM D-6276		4%	
Papel PH		4% a 5%	
Límites de Atterberg		4%	

A continuación se analizan los resultados de laboratorio obtenidos de mezclas suelo-cal para generar así una comparación de resultados con los obtenidos del suelo natural y ver el comportamiento que se presenta, así como las mejoras que se tienen en resistencia a especímenes ensayados a la compresión simple.

Todos los ensayos se realizarán con el porcentaje óptimo de cal previamente determinado por el ensayo ASTM D 6276 de 4%.

4.10 ANALISIS DE MEZCLA SUELO-CAL.

Estabilizar el suelo significa lograr aumentar su capacidad portante incidiendo en las mejoras de sus propiedades índices, tales como las detalladas en las secciones anteriores para suelo natural.

En la estabilización con cal se persigue como fin primordial aumentar la capacidad portante y hacer que ésta capacidad se mantenga invariable en función del tiempo bajo cualquier condición climática o evento natural, como ya se destacó anteriormente la estabilización se hace ventajosa cuando tenemos un índice de plasticidad mayor a diez ($IP > 10$) y mediante la utilización de cal hidratada.

La cal a emplearse debe cumplir con la especificación ASTM C-977 como se detalla a continuación:

4.11 ESPECIFICACIONES PARA CAL VIVA Y CAL HIDRATADA PARA LA ESTABILIZACION DE SUELOS.

Las especificación para cal viva y cal hidratada, ya sea con elevado contenido de calcio, dolomítica, o cal con magnesio, para su uso en la estabilización de los suelos, son contempladas en la norma ASTM C 977 (Para mayor información consultar norma).

4.12 ENSAYOS REALIZADOS A LA MEZCLA SUELO – CAL.

4.12.1 Límites de Atterberg.

Influencia de la cal en los límites de Atterberg.

La cal ejerce gran influencia en la plasticidad de un suelo, porcentajes apropiados de cal puede reducir la plasticidad en su totalidad, lo que vendría a reducir los cambios volumétricos dañinos para cimentaciones de vías para uso vehicular.

NOTA: *ANEXO 1 “Lista de chequeo para control de laboratorio también puede usarse para llevar un seguimiento de los ensayos realizados a la mezclas suelo-cal.*

Aplicando el porcentaje óptimo de cal de 4% (determinado en este capítulo, apartado 4.7) al suelo en estudio, se le realizaron nuevamente los ensayos para la determinación de los límites de Atterberg, y verificar así la influencia que tiene la cal en este suelo.

Los ensayos se realizaron siguiendo el procedimiento de la norma AASHTO T-89 y norma AASHTO T-90, obteniéndose los siguientes resultados:



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**ENSAYO LIMITE LIQUIDO AASHTO T -89 Y
LIMITE DE PLASTICIDAD AASHTO T-90**

Solicitante:	<u>Universidad de El Salvador</u>	Material:	<u>Del Lugar</u>
Proyecto:	<u>Trabajo de Graduación</u>	Estacionamiento:	<u>5+140 a 5+290</u>
Procedencia:	<u>LIB 12</u>	Fecha de recibido:	<u>Junio/2008</u>
Ubicación:	<u>HUIZUCAR</u>	Fecha de ensayo:	<u>Junio/2008</u>

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO CON 4% DE CAL

Numero de golpes	27	22	18
Tara	13	14	15
Peso Tara	12.73	9.59	9.92
Muestra humedad + tara	64.96	55.61	52.77
Muestra seca + tara	52.68	44.55	42.20
% de humedad	30.7%	31.6%	32.7%

DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO CON 4% DE CAL

No Practicable

LL	31%	LP	----	IP	NP
----	------------	----	------	----	----

Observaciones: 3 puntos de análisis

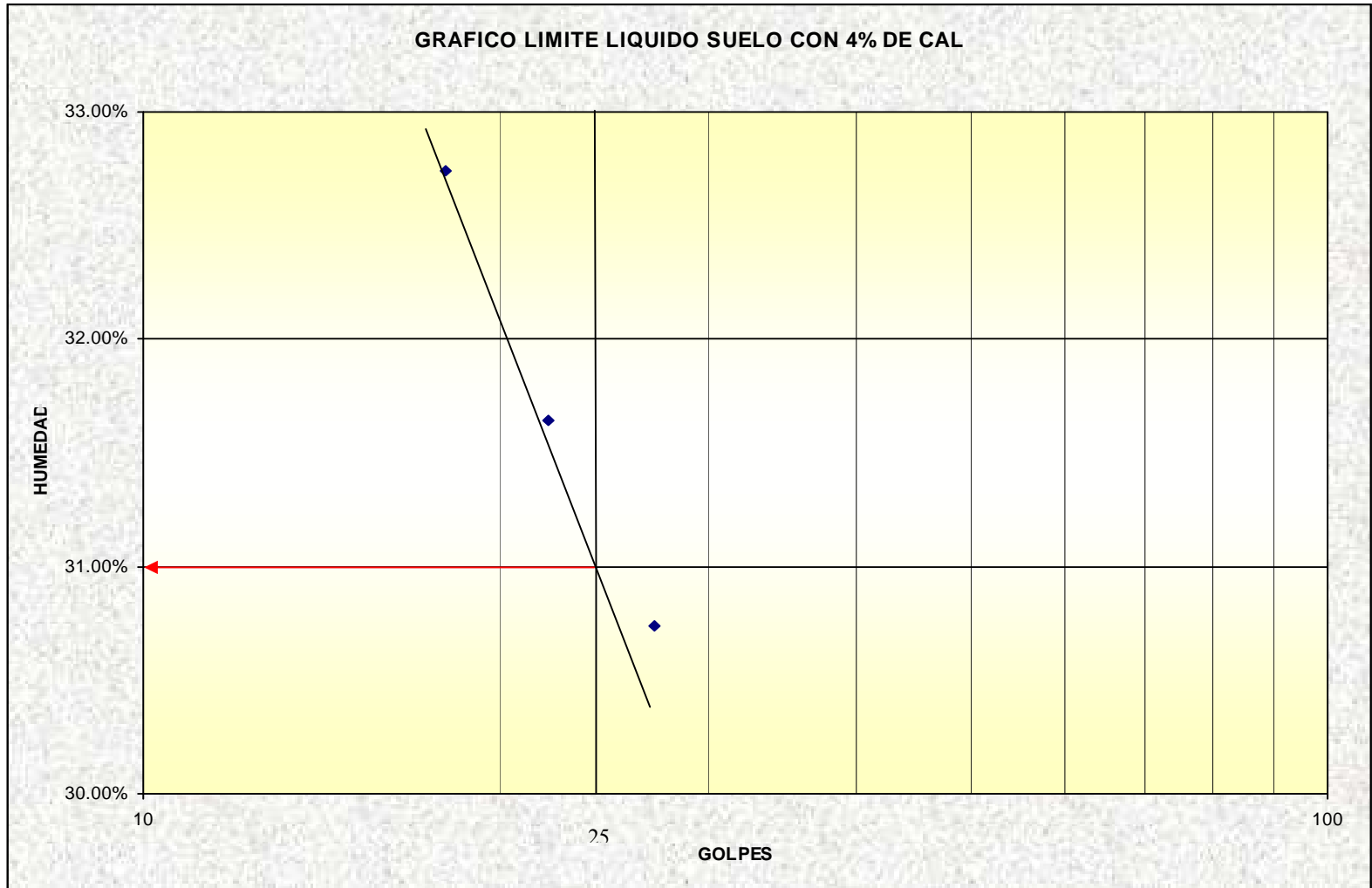


Gráfico 4.9

Determinación del limite liquido para la mezcla suelo-cal

Los valores muestran como la adición de cal redujo considerablemente la plasticidad del suelo desde un IP=12% a IP= NP (No Plástico) con 4% de cal, lo que es considerado como óptimo para fines de esta investigación.

Tabla 4.20		Comparación de Límites de Atterberg		
Suelo Natural	LL= 36%	LP= 24%	IP=12%	
Suelo con 4% de cal	LL=31%	LP= ---	IP= NP	

En la sección 4.9 del capítulo IV se muestra como a mediada que se incrementa el contenido de cal en el suelo estudiado, la plasticidad se reduce a cero.

4.12.2 Clasificación de la mezcla suelo-cal.

Una vez definida la nueva plasticidad del suelo, veamos como se comporta su clasificación; la granulometría se ve alterada significativamente con la adición de cal debido a que la cal presenta un tamaño constante material fino que pasa la malla No 200.

El porcentaje de material pasante de la malla No 200 para la mezcal suelo-cal, determinado bajo la norma AASHTO T 11 es de 61.0%.

4.12.2.1 Clasificación AASHTO M-145.

Utilizando los datos obtenidos en la sección 4.12.1 para la mezcla suelo-cal y realizando el procedimiento como se indica a continuación en base a la norma AASHTO M 145, se obtiene lo siguiente:

Tabla 4.21

Clasificación de suelos según AASHTO M-145

Clasificación General	Suelos Granulares 35% máximo que pasa por tamiz de 0.075mm(No 200)							Suelos Finos Mas del 35% pasa por el tamiz de 0.075mm(No 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo de Clasificación	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% Que pasa por el tamiz de: 2mm(No10) 0.0425(No 40) 0.075mm(No 200)	50 máx 30 máx 15 máx	— 50 máx 25 máx	— 51 min 10 máx	— 35 máx	— 35 máx	— 35 máx	— 35 máx	— 36 min	— 36 min	— 36 min	— 36 min
Características de fracción que pasa el tamiz 0.045mm (No40) Limite Liquido Índice de Plasticidad	— 6 máx.		— NP	40max 10 máx	41 min 10 máx	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 máx	41 min 10 máx	40 max 11 min	41 min 11 min
Tipos de materiales	Piedras, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Estimación general de suelo	Excelente a Bueno							De pobre a malo			

Procedimiento de clasificación.

1-Analizando el material que pasa el tamiz No 200=61.0%

61.0%>35% OK, suelo de grano fino

2- Analizando % que pasa por el tamiz No 200: 36%min., OK

3-Analizar las características de la fracción que pasa el tamiz 0.045mm (No 40)

LL= 31% IP=0.0%

El valor de límite líquido es menor de 40%, por lo cual se toma la nota de 40max.

Analizando el IP es menor de 10%, por lo cual se toma la nota de 10max.

Clasificación: **A-4**, Suelos Limosos.

Índice de grupo.

Índice de Grupo = (F-35) [0.2 + 0.005 (LL - 40)] + 0.01 (F-15) (IP-10)

Índice de Grupo = (61.0-35) [0.2 + 0.005 (31.0 - 40)] + 0.01 (61.0-15) (0.1-10)

Índice de Grupo=-0.52= **0**



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



CLASIFICACION DE SUELOS

AASHTO M 145

Solicitante:	<u>Universidad de El Salvador</u>	Material:	<u>Del lugar</u>
Proyecto:	<u>Trabajo de Graduación,</u>	Estacionamiento:	<u>5+140 a 5+290</u>
Procedencia:	<u>LIB 12</u>	Fecha de recibido:	<u>Junio 2008</u>
Ubicación:	<u>HUIZUCAR</u>	Fecha de ensayo:	<u>Junio 2008</u>

DATOS DE ENTRADA PARA LA CLASIFICACION AASHTO M 145

Muestra: **LIB 12**

Peso inicial: **100g**

Limite liquido: **31%**

Pasa el tamiz No 200: **61.0%**

IP: **NP**

CLASIFICACION DEL SUELO

A-4 (0) Suelo Limoso

Observaciones:

El cambio de clasificación se genera por la perdida total de plasticidad que sufre el suelo con el
4% de cal adicionado.

Comparación de los resultados para suelo natural y suelo con 4% de cal en la siguiente tabla:

Tabla 4.22	Comparación de Clasificación AASHTO M-145
Clasificación para Suelo Natural	A-6 (4)
Tipo de material	Suelo Arcilloso
Clasificación para Suelo con 4% de cal	A-4 (0)
Tipo de material	Suelo Limoso

Puede verse como la adición de cal transforma un suelo de un **A-6** donde el material típico de este grupo es un suelo arcilloso plástico, en el que se tiene el 35 por ciento o más que pasa el tamiz de 0.075mm (No 200), y los cuales suelen tener gran cambio volumétrico; a un material **A-4** que son suelos muy comunes en los cuales predominan los limos con ligeros porcentajes de material grueso y pequeñas cantidades de arcilla.

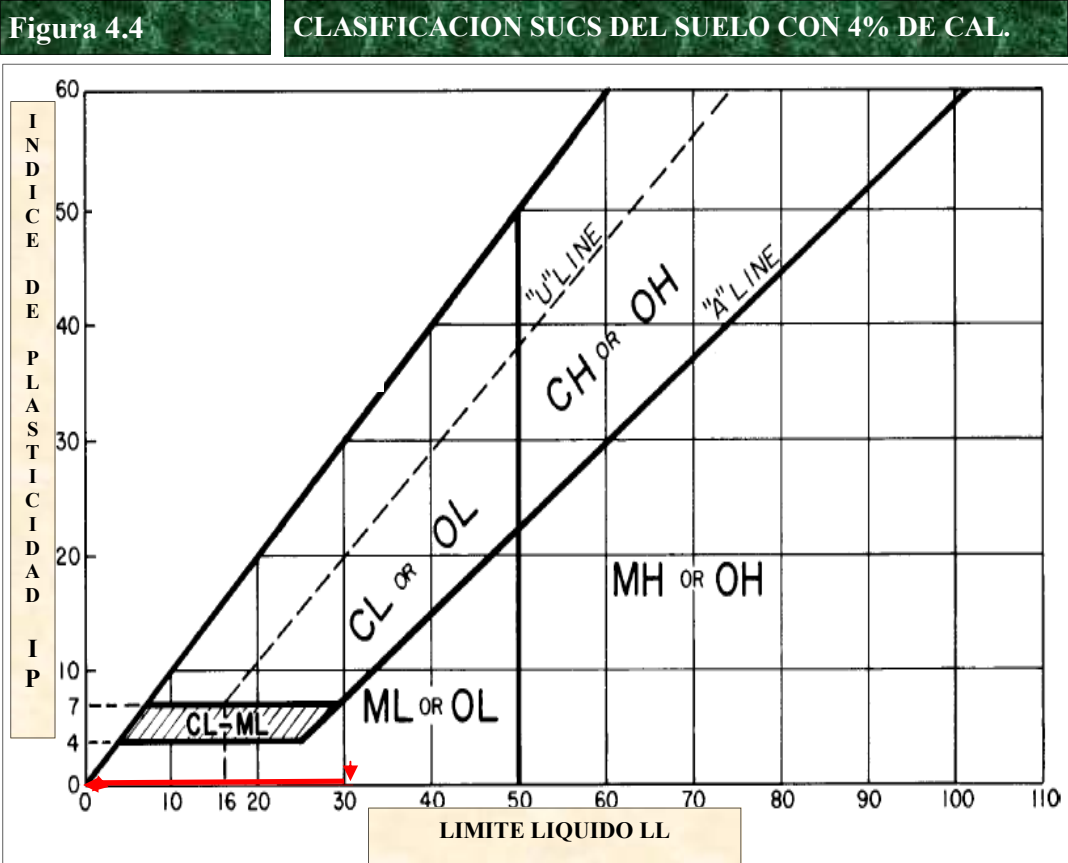
4.12.2.2 Clasificación ASTM D 2487-00 (SUCS).

Nuevamente se realizó la clasificación de suelos mediante el Sistema de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual es realizado bajo las especificaciones de la norma ASTM D 2487 (Para mayor información consultar norma), y que al igual que la clasificación AASHTO M 145, será determinado para la mezcla suelo – cal.

Siguiendo el procedimiento regido bajo la norma ASTM D 2487 y utilizando el límite líquido y porcentaje de material que pasa la malla No 200 para la mezcla suelo-cal, determinado en la sección 4.12.1 de este capítulo, se tienen los siguientes resultados:

Nota: Para clasificar suelos de grano fino (cuando más del 50% en peso pasa el tamiz No 200) en base a la norma ASTM D 2487, únicamente se deberá de plotear el límite líquido vrs el porcentaje de material que pasa la malla No 200 en la “carta de plasticidad” que presenta dicha norma.

En la siguiente figura se muestra el ploteo de de el valor de Límite Líquido vrs. El Índice de Plasticidad, para el suelo tratado con cal.



En la figura anterior se ploetearon los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a la mezcla suelo-cal (IP= 0 y LL=31%).



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



CLASIFICACION DE SUELOS SUCS

ASTM D 2487, AASHTO M 145

Solicitante:	<u>Universidad de El Salvador</u>	Material:	<u>Del lugar</u>
Proyecto:	<u>Trabajo de Graduación,</u>	Estacionamiento:	<u>5+140 a 5+290</u>
Procedencia:	<u>LIB 12</u>	Fecha de recibido:	<u>Junio 2008</u>
Ubicación:	<u>HUIZUCAR</u>	Fecha de ensayo:	<u>Junio 2008</u>

DATOS DE ENTRADA PARA LA CLASIFICACION SUCS

Muestra:	LIB 12
Peso inicial :	100g
Límite líquido:	31%
Pasa el tamiz No 200:	61%
Índice de plasticidad:	NP

CLASIFICACION DEL SUELO

ML, Limo no plástico

Observaciones:

La descripción o significado de símbolo puede verse mas detalladamente en norma ASTM D 2487

-03.

En el siguiente cuadro se muestran los resultados obtenidos para la clasificación del suelo con 4% de cal y suelo natural.

Tabla 4.23	Comparación de Clasificación ASTM D-2487
Clasificación para Suelo Natural	CL
Tipo de material	Arcilla de baja a mediana plasticidad
Clasificación para Suelo con 4% de cal	ML
Tipo de material	Limo ligeramente plástico

Debido a la adición de cal, la plasticidad del suelo desapareció; cambiando totalmente su clasificación.

4.13 PROPIEDADES DE COMPARACION DEL SUELO NATURAL Y LA MEZCLA SUELO – CAL.

Luego de conocer el tipo de suelo ya estabilizado con 4% de cal, lo siguiente sería determinar algunas propiedades de la mezcla suelo-cal, analizar su resistencia, sus cambios volumétricos, la capacidad de carga, etc. Para luego comparar estas mismas propiedades con las obtenidas de los ensayos realizados al suelo natural, y verificar de esta manera las mejoras producidas mediante la utilización de cal en la estabilización del suelo.

A continuación se determinan aquellas propiedades específicas que se esperan mejorar en un suelo con la utilización de cal.

4.13.1 Relación densidad – humedad de la mezcla suelo – cal.

La densidad del suelo con adición de cal debido a las modificaciones producidas por la aglomeración de las partículas y reacciones químicas que se presentan, genera un aumento del peso volumétrico seco máximo de la mezcla suelo-cal respecto a la del suelo natural, esto según los resultados obtenidos en esta investigación.

De igual manera se genera un incremento en la humedad óptima de la mezcla suelo-cal, respecto a la del suelo natural, esto por la demanda de agua que genera la hidratación de este agente estabilizador (cal).

Desde que la densidad seca se emplea como parámetro de control en obra, estos aspectos resultan de gran importancia. Por lo que es importante que se emplee la curva (PVS vrs Humedad) apropiada para cada condición de control.

NOTA: PVS (Peso Volumétrico Seco) del material analizado.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de la Relación Densidad-Humedad para ambos métodos de compactación AASHTO T-180 y AASHTO T-99, realizados a la mezcla suelo-cal.



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**“ENSAYO RELACION DENSIDAD – HUMEDAD DE
SUELOS USANDO UN APISONADOR DE
4.55 KG. (10.0LB.) Y UNA CAIDA DE 457mm (18 PULG).”
AASHTO T 180**

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio 2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio 2008

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
No de tara	1	2	3	4	5	6
Peso suelo húmedo + tara	110.2	111.5	112.3	110.5	111.9	112.6
Peso suelo seco + tara	97.8	96.6	95.3	92.0	91.2	89.9
Peso de tara	14.5	14.5	14.4	14.4	14.4	14.6
% de humedad	14.9%	18.2%	21.0%	23.9%	27.0%	30.2%

DETERMINACION DEL PESO VOLUMETRICO SECO CON 4% DE CAL						
Peso muestra húmeda + molde	3515	3637	3751	3831	3696	3581
Peso del molde	1978.00	1978.00	1978.00	1978.00	1978.00	1978.00
Capacidad del molde	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Peso Volumétrico Seco	1427.0	1497.8	1562.8	1595.0	1443.5	1313.8

CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	23.3%	PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1970 Kg/m ³
-----------------------------	--------------	--------------------------------	------------------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO (PVS)	1600Kg/ m ³
------------------------------------	------------------------

Observaciones: Suelo con 4% de cal.

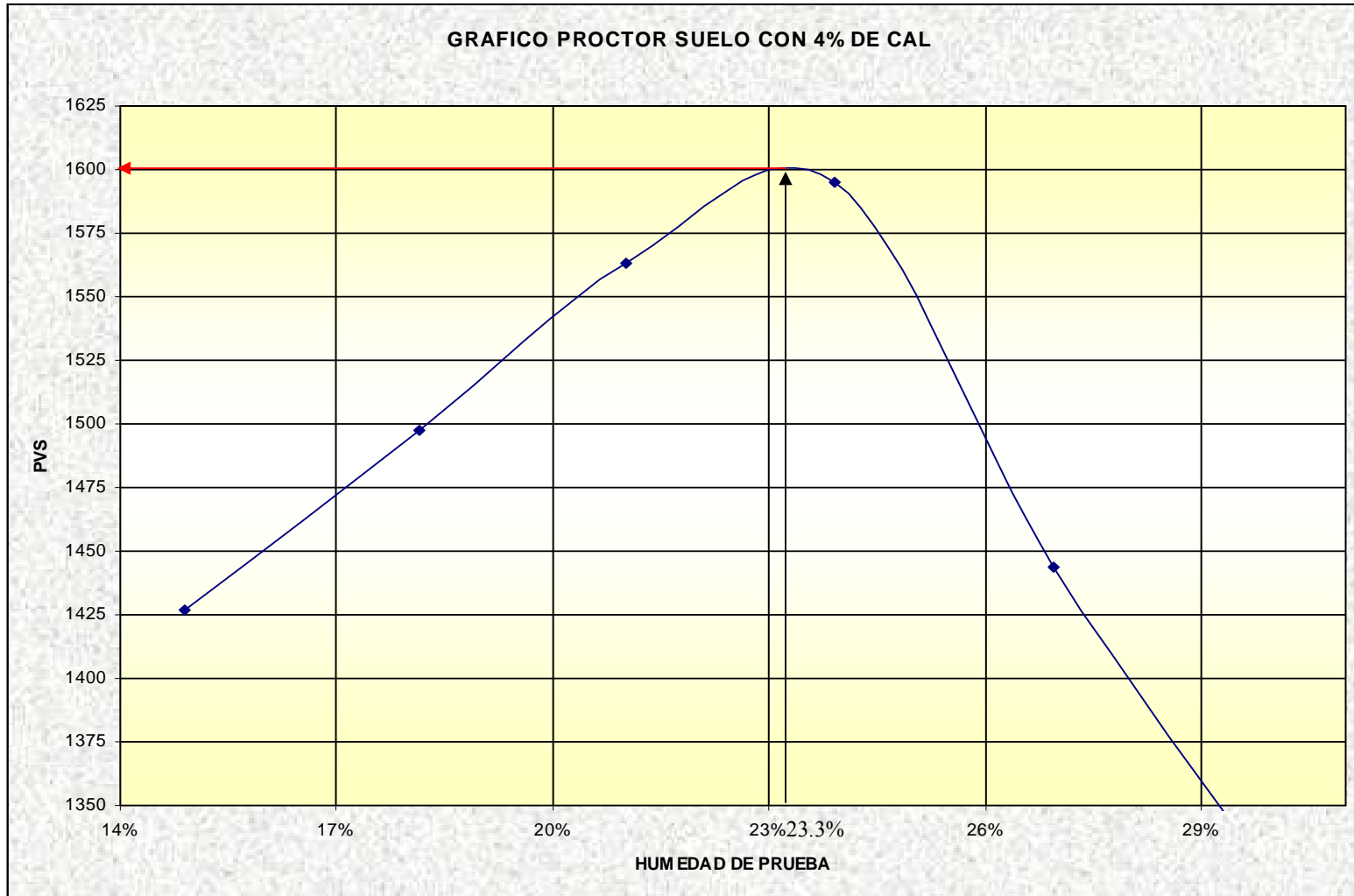


Gráfico 4.10

Grafico Relación Densidad-Humedad (AASHTO T 180) Suelo-Cal



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**“ENSAYO RELACION DENSIDAD – HUMEDAD
DE SUELOS USANDO UN APISONADOR DE
2.5 KG. (5.5 LB.) Y UNA CAIDA DE 305mm (12
PULG).”**

AASHTO T 99

Solicitante:	<u>Universidad de El Salvador</u>	Material:	<u>Del Lugar</u>
Proyecto:	<u>Trabajo de Graduación</u>	Estacionamiento:	<u>2+140 a 5+290</u>
Procedencia:	<u>LIB 12</u>	Fecha de recibido:	<u>Junio/2008</u>
Ubicación:	<u>HUIZUCAR</u>	Fecha de ensayo:	<u>Junio/2008</u>

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
No de tara	1	2	3	4	5	6
Peso suelo húmedo + tara	112.50	113.60	115.80	116.28	111.62	113.26
Peso suelo seco + tara	99.32	98.00	97.56	95.95	90.15	89.72
Peso de tara	11.00	11.10	11.10	11.10	11.12	11.11
% de humedad	14.9%	18.0%	21.1%	24.0%	27.2%	30.0%

DETERMINACION DEL PESO VOLUMETRICO SECO CON 4% DE CAL						
Peso muestra húmeda + molde	3490	3577	3678	3775	3816	3796
Peso del molde	1981.00	1981.00	1981.00	1981.00	1981.00	1981.00
Capacidad del molde	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Peso Volumétrico Seco	1400.6	1443.3	1494.7	1543.7	1539.1	1489.8

CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA	25.0%	PESO VOULMETRICO HUMEDO MAXIMO	1930 Kg/m³
-----------------------------	--------------	--------------------------------	------------------------------

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO (PVS)	1550 Kg/m³
------------------------------------	------------------------------

Observaciones: Suelo con 4% de cal

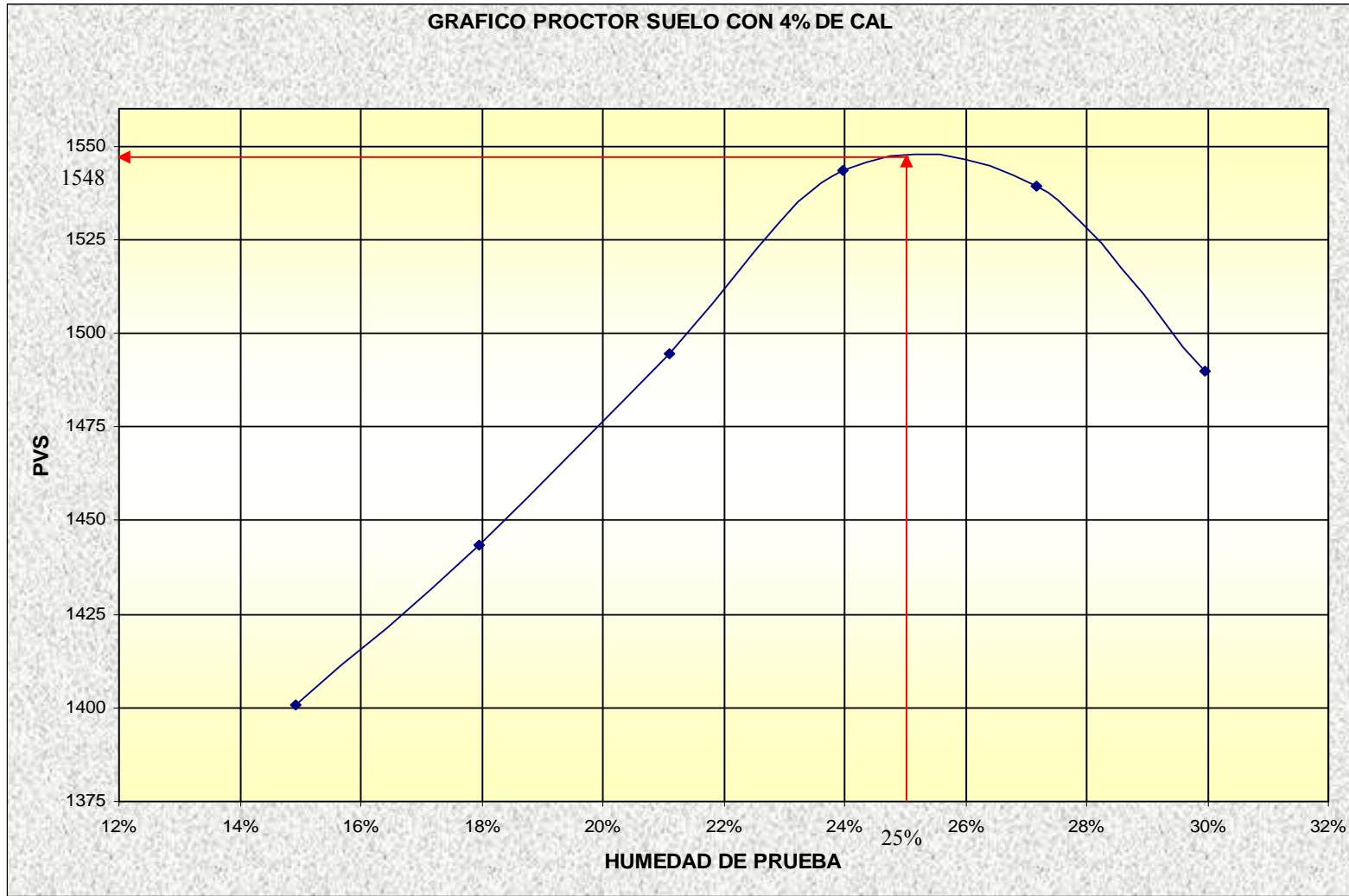


Gráfico 4.11

Grafico Relación Densidad-Humedad (AASHTO T 99) Suelo-Cal

A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos empleando ambos métodos (AASHTO T 180 y AASHTO T 99), para la mezcla suelo – cal y para el suelo natural:

Tabla 4.24		Comparación de los métodos de compactación	
AASHTO T-180	Suelo Natural	Peso volumétrico seco máximo (PVSmax)	1590 Kg/m ³
		Humedad óptima	21.2%
	Suelo-cal	Peso volumétrico seco máximo (PVSmax)	1600 Kg/m ³
		Humedad óptima	23.3%
AASHTO T-99	Suelo Natural	Peso volumétrico seco máximo (PVSmax)	1540 Kg/m ³
		Humedad óptima	23.8%
	Suelo-cal	Peso volumétrico seco máximo (PVSmax)	1550 Kg/m ³
		Humedad óptima	25.0%

Otra propiedad importante a estudiar en una estabilización con cal, es la capacidad de carga que podrá soportar esta mezcla, para lo cual se hace indispensable la determinación del CBR en la misma, tal como se indica a continuación.

4.13.2 Valor de Soporte de California (CBR) de la mezcla suelo-cal.

El Valor de Soporte más apropiado para el diseño debe ser aquel donde el proceso de estabilización del suelo sea considerado estable, los CBR para suelo natural y mezclas suelo-cal deben ser tomados con precaución, un CBR a 28 días puede representar mejor esta condición; considerando que el proceso de reacción química de la cal con el suelo para su ganancia de resistencia es tardío, y por lo cual se toma la decisión de determinar los CBR de la mezcla suelo-cal a 4 y 28 días, esto basado en la nota 7 de la norma AASHTO T 193-03, obteniéndose los resultados que a continuación se muestran.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA "



ENSAYO VALOR DE SOPORTE DE
CALIFORNIA (CBR)
AASHTO T 193

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del Lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

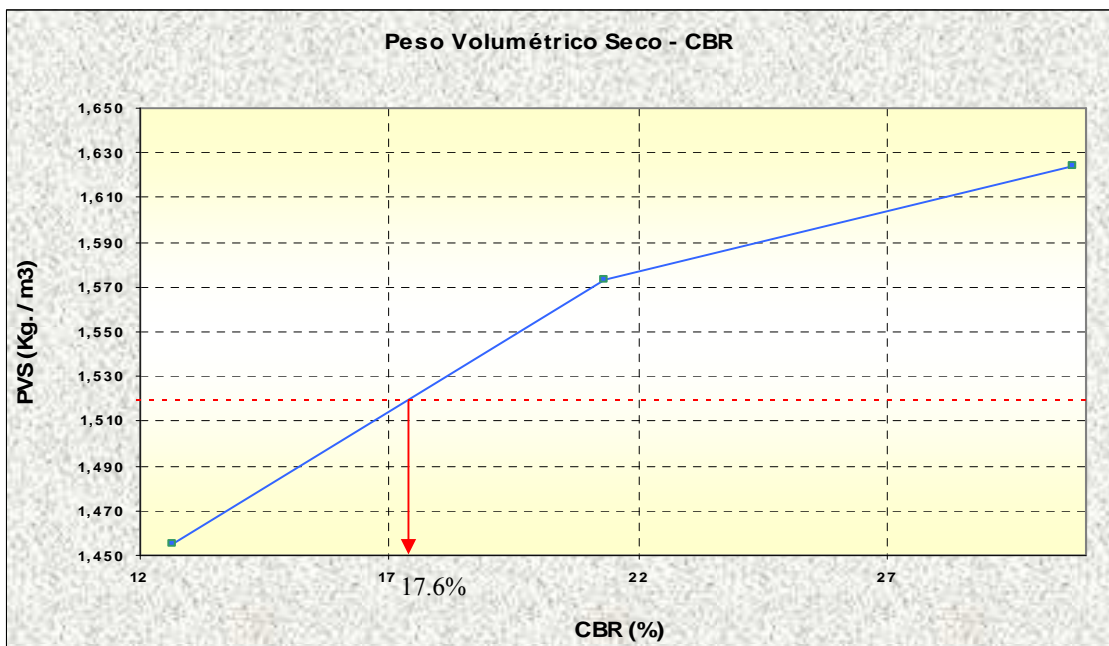
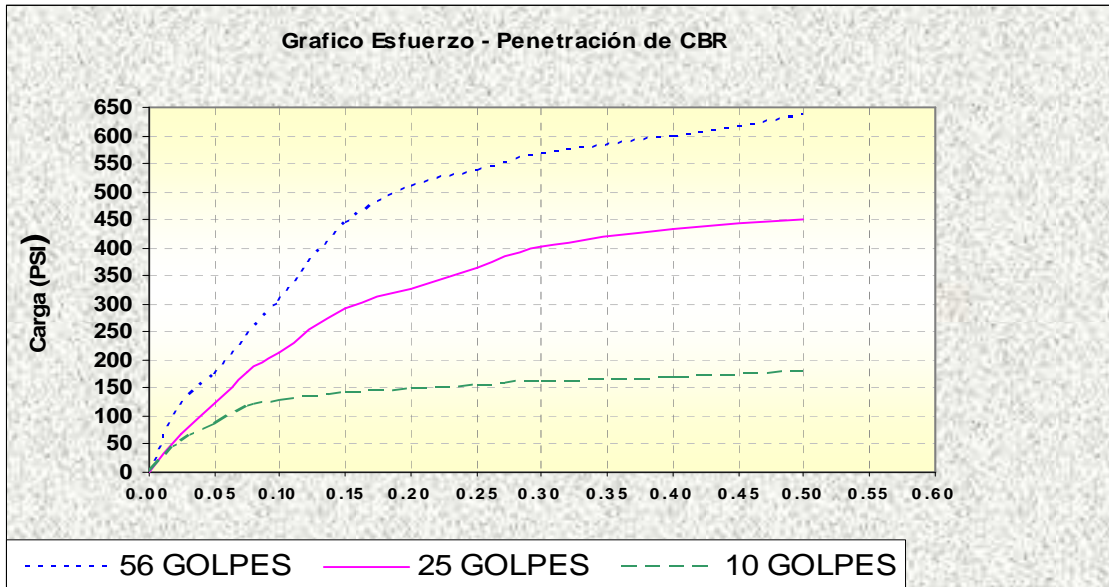
DENSIDAD

Molde No.	6	5	4
Numero de Golpes / capa	56	25	10
Peso molde + suelo compactado Inicial (g)	11,256	11,104	10,823
Peso molde + suelo compactado Final (g)	11,384	11,259	11,120
Agua Absorbida (Wab)	128	155	297
Peso molde (g)	7,146	7,124	7,141
Suelo compactado Inicial (Whi) (g)	4,110	3,980	3,682
Dens. Hum. Inicial $D_{hi} = W_{hi}/V_i$ (g/cm ³)	2,005	1,941	1,796
Densidad Seca Inicial	1,626	1,576	1,458
Peso Suelo seco $W_s = V_i * D_i$ (g)	3,333	3,230	2,990
Dens. Seca final : $D_f = D_i / (1 + E)$ (g/cm ³)	1,624	1,573	1,455

PENETRACIONES-CARGAS-CBR

Penetración (pulg.)	Carga Est. (PSI)	Molde (56 golpes)			Molde (25 golpes)			Molde (10 golpes)					
		Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR
			lb	psi			lbs	psi			lbs	psi	
0.000													
0.025			358	119.3			202	67.3			166	55.3	
0.050			525	175.0			367	122.3			261	87.0	
0.075			728	242.7			533	177.7			355	118.3	
0.100	1000		922	307.3	30.7		640	213.3	21.3		380	126.7	12.7
0.150			1332	444.0			875	291.7			418	139.3	
0.200	1500		1524	508.0	33.9		982	327.3	21.8		440	146.7	9.8
0.250			1613	537.7			1095	365.0			463	154.3	
0.300			1702	567.3			1207	402.3			486	162.0	
0.400			1800	600.0			1295	431.7			510	170.0	
0.500			1912.0	637.3			1355.0	451.7			532	177.3	

Observaciones: CBR con 4% de cal y 96 horas de saturación Método AASHTO T 180



Densidad Max. Próctor (Kg./m3):	1,600 Kg./m ³
Humedad óptima	24.0%
Densidad al 95%	1,520 Kg./m ³
CBR 95%	17.6~18%

Gráfico 4.12 CBR con método de compactación AASHTO T 180, mezcla suelo-cal



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**ENSAYO VALOR DE SOPORTE DE
CALIFORNIA (CBR)
AASHTO T 193**

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del Lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

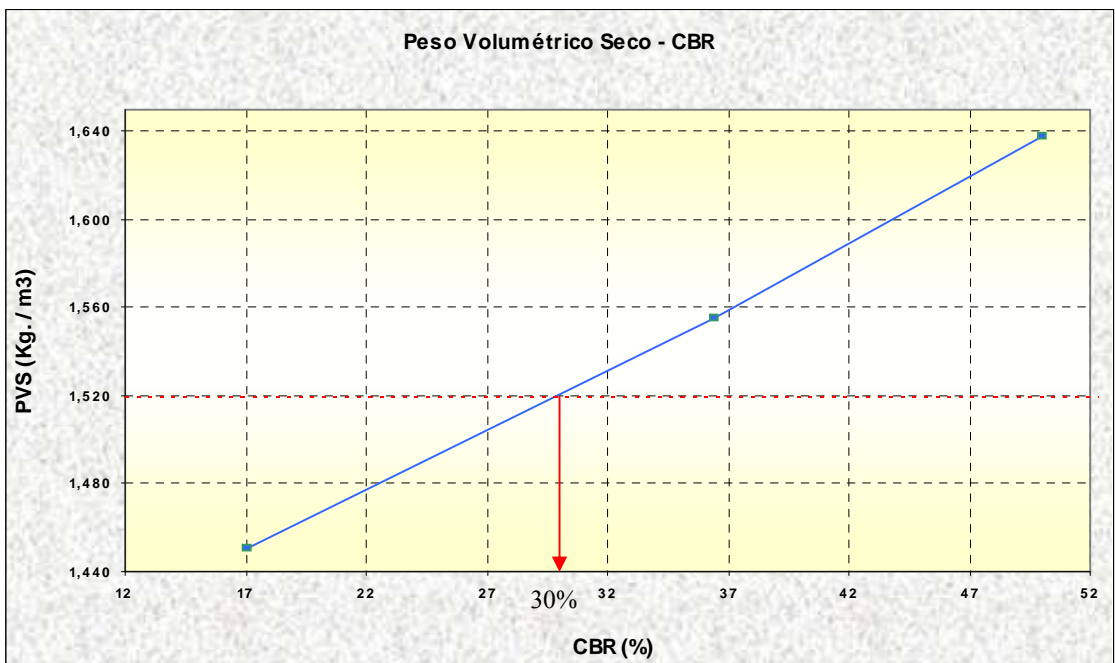
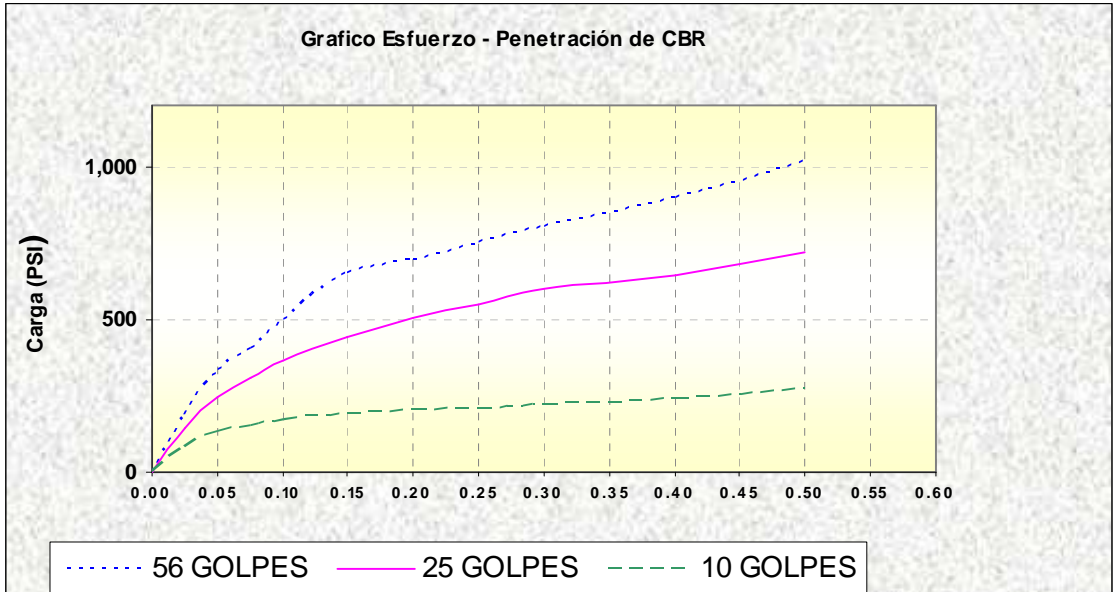
DENSIDAD

Molde No.	9	8	7
Numero de Golpes / capa	56	25	10
Peso molde + suelo compactado Inicial (g)	10,497	10,175	9,930
Peso molde + suelo compactado Final (g)	10,584	10,359	10,205
Agua Absorbida (Wab)	87	184	275
Peso molde (g)	6,400	6,287	6,302
Suelo compactado Inicial (Whi) (g)	4,097	3,888	3,628
Dens. Hum. Inicial $D_{hi}=W_{hi}/V_i$ (g/cm ³)	2,023	1,920	1,792
Densidad Seca Inicial	1,641	1,559	1,454
Peso Suelo seco $W_s=V_i \cdot D_i$ (g)	3,324	3,157	2,945
Dens. Seca final : $D_f=D_i/(1+E)$ (g/cm ³)	1,638	1,555	1,451

PENETRACIONES-CARGAS-CBR

Penetración (pulg.)	Carga Est. (PSI)	Molde (56 golpes)			Molde (25 golpes)			Molde (10 golpes)					
		Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR
			lb	psi			lbs	psi			lbs	psi	
0.000													
0.025			573	191.0			441	147.0			243	81.0	
0.050			1012	337.3			733	244.3			398	132.7	
0.075			1214	404.7			935	311.7			463	154.3	
0.100	1000		1500	500.0	50.0		1093	364.3	36.4		510	170.0	17.0
0.150			1945	648.3			1329	443.0			562	187.3	
0.200	1500		2082	694.0	46.3		1508	502.7	33.5		605	201.7	13.4
0.250			2248	749.3			1651	550.3			625	208.3	
0.300			2414	804.7			1794	598.0			659	219.7	
0.400			2689	896.3			1942	647.3			726	242.0	
0.500			3042.0	1014.0			2154.0	718.0			820	273.3	

Observaciones: CBR con 4% de cal y 28 días de saturación Método AASHTO T 180



Densidad Max. Próctor (Kg./m ³):	1,600 Kg./m ³
Humedad óptima	24.0%
Densidad al 95%	1,520 Kg./m ³
CBR 95%	30%

Gráfico 4.13

CBR con método de compactación AASHTO T-180, mezcla suelo-cal



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO VALOR DE SOPORTE DE
CALIFORNIA (CBR)
AASHTO T 193

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del Lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

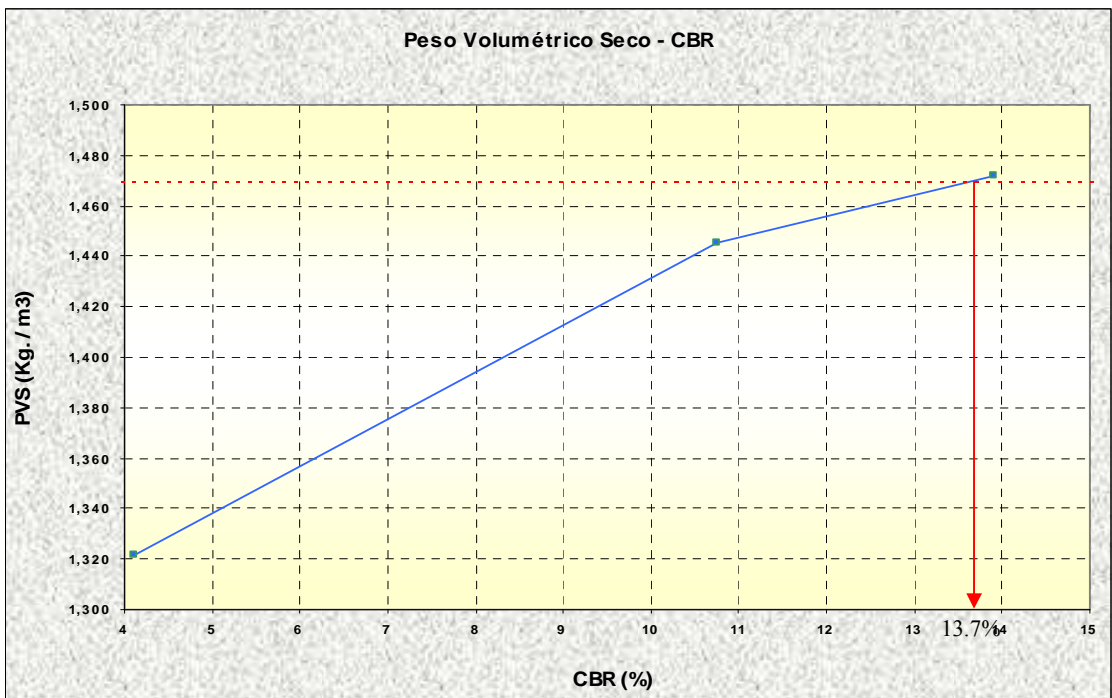
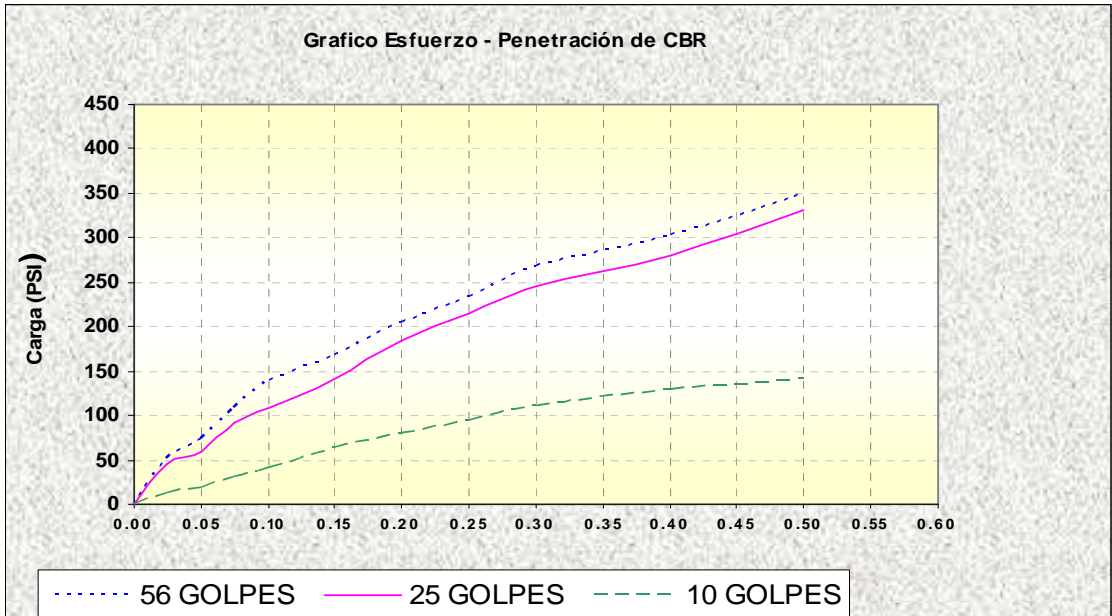
DENSIDAD

Molde No.	6	5	4
Numero de Golpes / capa	56	25	10
Peso molde + suelo compactado Inicial (g)	10,516	10,914	10,130
Peso molde + suelo compactado Final (g)	10,648	11,110	10,362
Agua Absorbida (Wab)	132	196	232
Peso molde (g)	6,672	7,130	6,670
Suelo compactado Inicial (Whi) (g)	3,844	3,784	3,460
Dens. Hum. Inicial $D_{hi}=W_{hi}/V_i$ (g/cm ³)	1,844	1,815	1,659
Densidad Seca Inicial	1,475	1,450	1,327
Peso Suelo seco $W_s=V_i \cdot D_i$ (g)	3,076	3,023	2,767
Dens. Seca final : $D_f=D_i/(1+E)$ (g/cm ³)	1,472	1,445	1,322

PENETRACIONES-CARGAS-CBR

Penetración (pulg.)	Carga Est. (PSI)	Molde (56 golpes)				Molde (25 golpes)				Molde (10 golpes)			
		Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR
			lb	psi			lbs	psi			lbs	psi	
0.000													
0.025		16	151.6	50.5		14	132.7	44.2		8	75.8	25.3	
0.050		23	217.9	72.6		19	180.0	60.0		12	113.7	37.9	
0.075		34	322.2	107.4		29	274.8	91.6		20	189.5	63.2	
0.100	1000	44	416.9	139.0	13.9	34	322.2	107.4	10.7	26	246.4	82.1	8.2
0.150		53	502.2	167.4		45	426.4	142.1		39	369.6	123.2	
0.200	1500	65	615.9	205.3	13.7	58	549.6	183.2	12.2	49	464.3	154.8	10.3
0.250		74	701.2	233.7		68	644.4	214.8		59	559.1	186.4	
0.300		85	805.5	268.5		78	739.1	246.4		70	663.3	221.1	
0.400		96	909.7	303.2		89	843.4	281.1		82	777.0	259.0	
0.500		111	1051.8	350.6		105	995.0	331.7		89	843.4	281.1	

Observaciones: CBR con 4% y 96 horas de saturación(4días) Método AASHTO T 99



Densidad Max. Próctor (Kg./m ³):	1,550 Kg./m ³
Humedad óptima	25.0%
Densidad al 95%	1,470 Kg./m ³
CBR 95%	13.7%~14%

Gráfico 4.14

CBR con método de compactación AASHTO T-99, mezcla suelo -cal



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



ENSAYO VALOR DE SOPORTE DE
CALIFORNIA (CBR)
AASHTO T 193

Solicitante:	Universidad de El Salvador	Material:	Del Lugar
Proyecto:	Trabajo de Graduación	Estacionamiento:	5+140 a 5+290
Procedencia:	LIB 12	Fecha de recibido:	Junio/2008
Ubicación:	HUIZUCAR	Fecha de ensayo:	Junio/2008

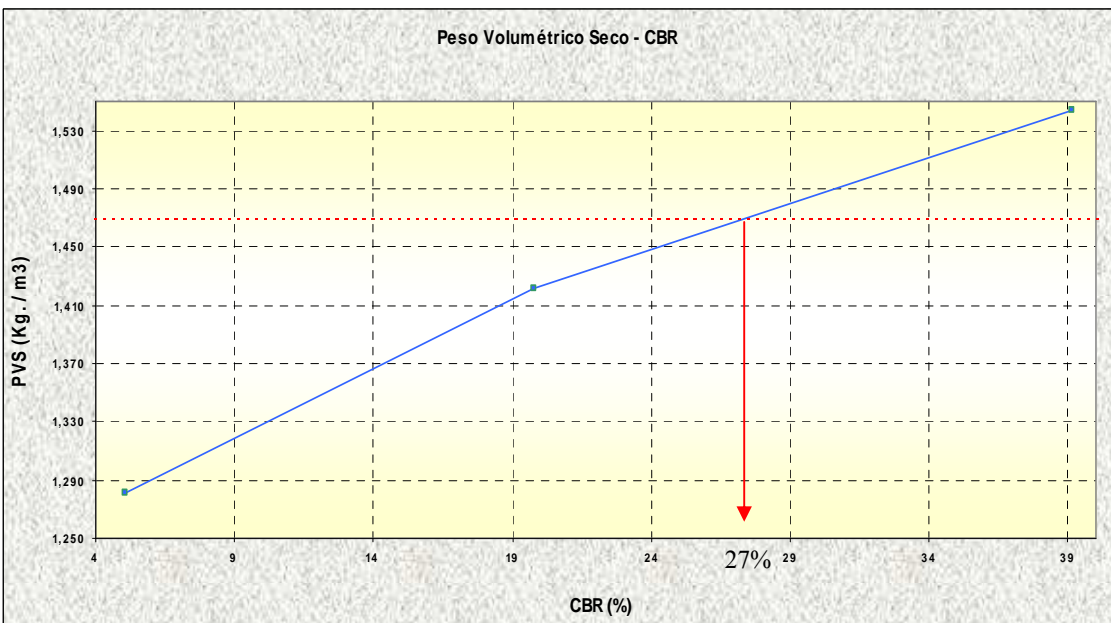
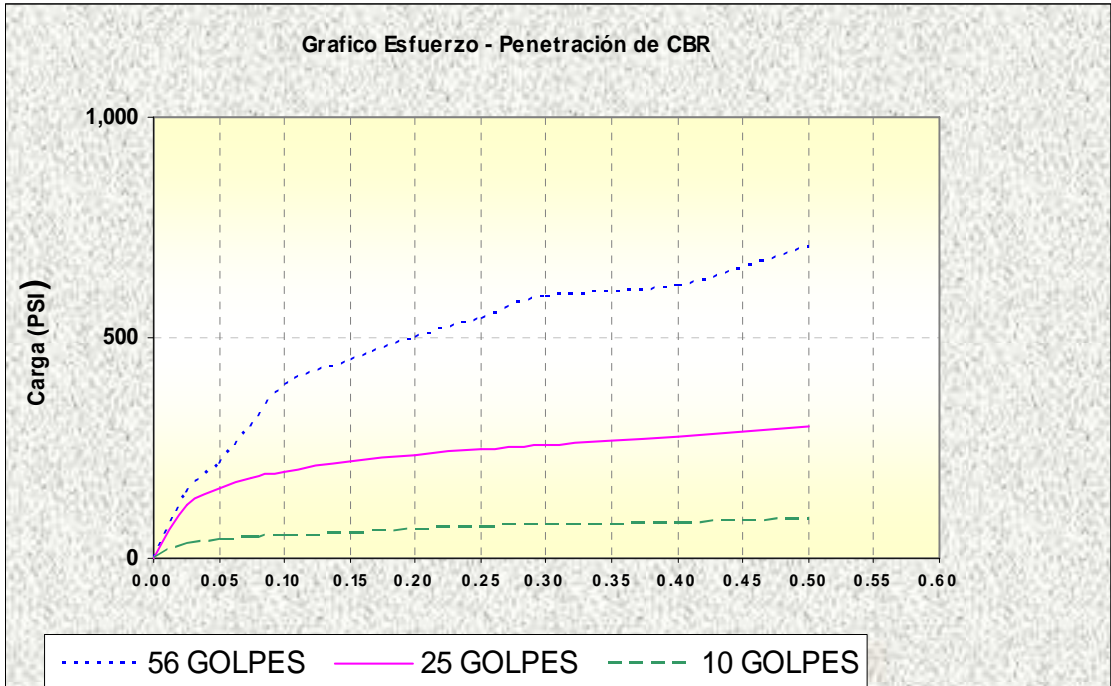
DENSIDAD

Molde No.	6	5	4
Numero de Golpes / capa	56	25	10
Peso molde + suelo compactado Inicial (g)	11,172	10,827	10,481
Peso molde + suelo compactado Final (g)	11,309	11,158	10,988
Agua Absorbida (Wab)	137	331	507
Peso molde (g)	7,143	7,118	7,135
Suelo compactado Inicial (Whi) (g)	4,029	3,709	3,346
Dens. Hum. Inicial $D_{hi} = W_{hi}/V_i$ (g/cm ³)	1,936	1,782	1,608
Densidad Seca Inicial	1,547	1,426	1,287
Peso Suelo seco $W_s = V_i * D_i$ (g)	3,220	2,968	2,677
Dens. Seca final : $D_f = D_i / (1 + E)$ (g/cm ³)	1,544	1,422	1,282

PENETRACIONES-CARGAS-CBR

Penetración (pulg.)	Carga Est. (PSI)	Molde (56 golpes)				Molde (25 golpes)				Molde (10 golpes)			
		Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR	Lectura	Carga (PSI)		CBR
			lb	psi			lbs	psi			lbs	psi	
0.000													
0.025			445	148.3			364	121.3			103	34.3	
0.050			640	213.3			477	159.0			124	41.3	
0.075			900	300.0			544	181.3			142	47.3	
0.100	1000		1175	391.7	39.2		593	197.7	19.8		152	50.7	5.1
0.150			1342	447.3			659	219.7			175	58.3	
0.200	1500		1495	498.3	33.2		703	234.3	15.6		193	64.3	4.3
0.250			1627	542.3			737	245.7			211	70.3	
0.300			1776	592.0			771	257.0			220	73.3	
0.400			1850	616.7			834	278.0			238	79.3	
0.500			2115.0	705.0			901.0	300.3			260	86.7	

Observaciones: CBR con 4% y 28 días de saturación Método AASHTO T 99



Densidad Max. Próctor (Kg./m ³):	1,550 Kg./m ³
Humedad óptima	25.0%
Densidad al 95%	1,470 Kg./m ³
CBR 95%	27%

Gráfico 4.15

CBR con método de compactación AASHTO T-99, mezcla suelo-cal

Los resultados para cada método de compactación y tiempo de saturación se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.25	Comparación del Valor de Soporte de California	
AASHTO T-180	Suelo natural con 4 días de saturación	CBR= 8%
	Suelo con 4% de cal y 4 días de saturación	CBR=18%
	Suelo con 4% de cal y 28 días de saturación	CBR=30%
AASHTO T-99	Suelo natural con 4 días de saturación	CBR=3%
	Suelo con 4% de cal y 4 días de saturación	CBR=14%
	Suelo con 4% de cal y 28 días de saturación	CBR=27%

Como se observa en los resultados antes mostrados, la cal incremento considerablemente el valor de soporte del suelo natural, comprobándose así, la efectividad de este agente estabilizador en suelos plásticos.

En las estructuras de carreteras con alto tráfico usualmente se pide un CBR de 30% como capacidad de carga apropiado en sub-rasantes, para estructuras de menor intensidad vehicular éste valor es demasiado alto, pudiendo adoptarse ésta capacidad de carga para otra estructura del pavimento de mayores exigencias.

Para nuestro caso, en caminos rurales de baja intensidad vehicular puede un CBR de 30% emplearse directamente para la rodadura, aclarando que la capa suelo-cal no presentan resistencia a la abrasión.

4.13.3 Resistencia a la compresión inconfiada de mezclas de suelo compactado con cal.

Una vez conocido como se comporta la capacidad de carga del suelo, veamos como evoluciona su resistencia a la compresión simple para suelo-cal en base a la norma **ASTM D-5102**, realizando la compactación de los especímenes a ensayar por los

métodos AASHTO T-180 y AASHTO T-99; este método de ensayo abarca los procedimientos para la elaboración y curado, en laboratorios de especímenes compactados de suelo-cal y otros materiales tratados para determinar resistencia a la compresión inconfiada.

Este método puede ser utilizado y preparado para especímenes a la máxima densidad de peso seco y el óptimo contenido de agua, o para especímenes preparados para otros objetivos con diferentes densidades de peso seco y contenido de agua.

A continuación se detalla el procedimiento seguido:

Procedimiento empleado.

Tamaño de espécimen. Lo primero es seleccionar el tamaño de espécimen que se pretende ensayar, puede utilizarse un diámetro mínimo de 50mm (2.0pulgadas), para los especímenes con diámetros de 72mm (2.8pulgadas) o mayor, el tamaño de las partículas más grandes será más pequeño que 1/6 del diámetro de la muestra compactada, también puede utilizarse la relación existente en el molde de 4pulg, (Método “b” de la norma ASTM D-5102).



Fotografía 4.31

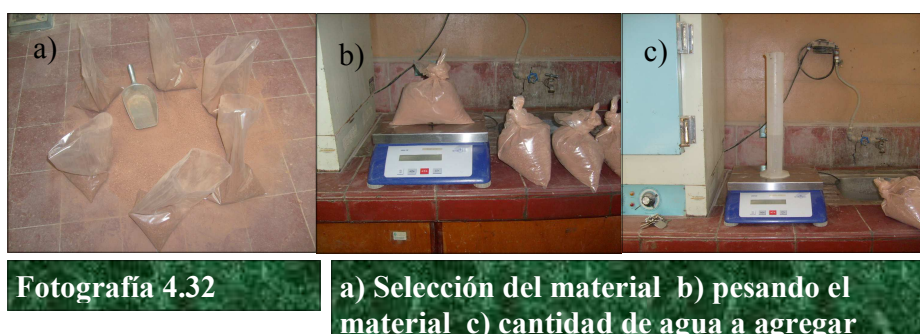
a) Material seleccionado para Compactarse b) Molde de 4”

Fotografía tomada en Laboratorio “Ing. Mario Ángel G. Urbina” de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Luego calcular la cantidad de suelo, cal, y agua necesaria para un espécimen y las cantidades totales para los especímenes que sean, pueden utilizarse los valores obtenidos con los próctor AASHTO T-180 y AASHTO T-99 para el contenido óptimo de agua y

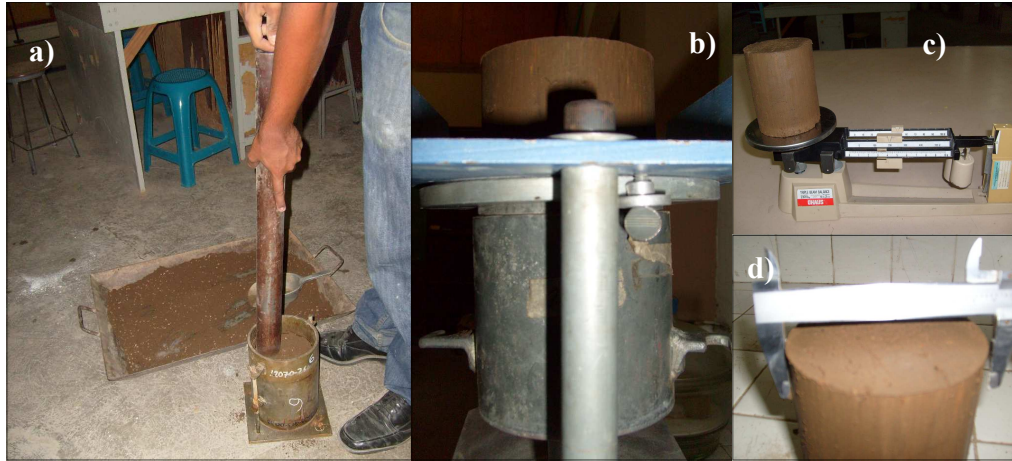
densidad máxima registrada, la cual se pretende alcanzar en especímenes compactados para la compresión simple.

Mezclar el suelo-cal justamente como se hizo en la relación humedad-densidad del suelo y seleccione el molde de compactación adecuado, en conformidad con el procedimiento que deba utilizarse y que garantice la relación de altura/diámetro de 2.0-2.5 ó cualquier otra relación que pueda aplicar corrección por esbeltez.



Fotografía tomada en FC S. A. DE C. V. Laboratorio de Suelos y Materiales.

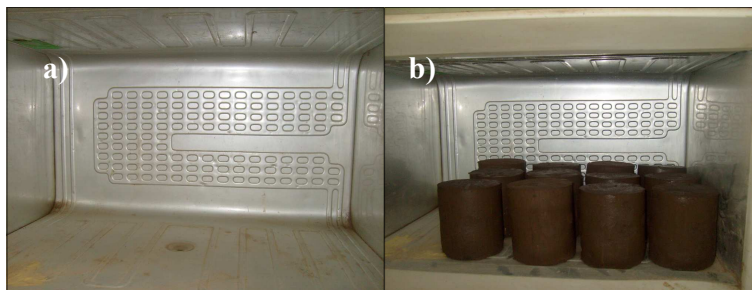
A continuación dependiendo del procedimiento A ó B (Para mayor información consultar norma) que se pretenda utilizar compacte los especímenes; para al ejemplo con el suelo muestreado de la calzada de la carretera LIB 12 que se viene analizando se utilizó el procedimiento “B” compactando los especímenes con la mismas condiciones de un próctor AASHTO T-180 y AASHTO T-99, después de compactar una muestra se deben calcular los contenidos de agua (según el método de ensayo ASTM D-2216), extraer el espécimen del molde y determinar y registrar la masa de la muestra, la longitud del espécimen, y el diámetro de muestra.



Fotografía 4.33 a) Compactado de espécimen b) Extrayendo el espécimen
c) pesando el espécimen, d) Registro de dimensiones

Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Después de que se han determinado las masas y dimensiones de las muestras, coloque la muestra en un recipiente hermético, en un contenedor que permita el curado del espécimen.



Fotografía 4.34 a) Contenedor de curado b) Muestras

Fotografía tomada en FC S. A. DE C. V. Laboratorio de Suelos y Materiales.

Curado de especímenes.

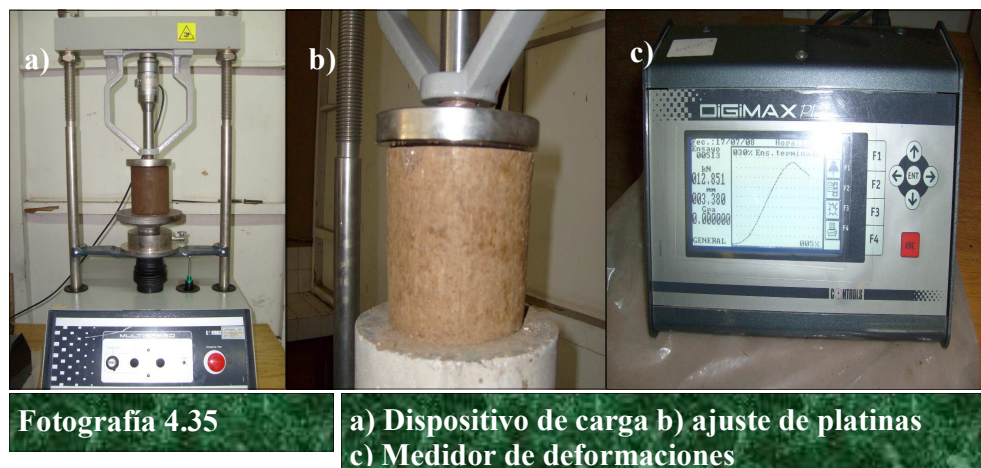
Selecciona aleatoriamente las muestras para la realización de pruebas para garantizar resultados en muestras representativas.

Cure los especímenes en una superficie rígida, hermética; y en contenedores a prueba de humedad a una temperatura de $23 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($73 \pm 4 \text{ } ^\circ\text{F}$) durante el período de curado.

El espécimen debe ser envuelto y sellado en plástico o en fundas de goma para reducir la carbonatación. El curado bajo condiciones distintas de las especificadas deben ser señalados en el reporte.

Un paño húmedo colocado dentro del contenedor de curado, pero que no esté en contacto con el espécimen de suelo-cal se mantendrá en condiciones húmedas para curar y prevenir el secado.

Al final de estos cuidados determinar y registrar la masa de las muestras, coloque la muestra en el dispositivo de carga centrado en la platina de la parte inferior.



Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil, U.E.S.

Con cuidado, ajustar la carga hasta que la platina superior de carga únicamente haga un mínimo contacto con el espécimen. Poner a cero el indicador de la deformación. Aplicar la carga continua y sin fin de choque para producir una carga axial de deformación a una velocidad de aproximadamente 0.5 a 2.0% por minuto. La tasa más baja debe ser seleccionada para especímenes quebradizo, mientras que la tasa más alta para especímenes no quebradizo.

Anote los valores de carga (fuerza axial), deformación y tiempo a intervalos suficientes para definir la forma de la curva de deformaciones (generalmente de 10 a 15 puntos son

suficientes). Registrar la máxima fuerza axial aplicada a la muestra, junto con su deformación.

Seguir aplicando carga hasta valores en disminución con el aumento de tensión o hasta que el 5% de carga se supere.

Haga un bosquejo o tomar una fotografía de la falla registrada después de la prueba.

Medir y registrar el diámetro de la muestra con tres dígitos significativos en tres direcciones distintas, a menos que una falla frágil se produzca.

Para medir los contenidos de humedad, se deberá utilizar como mínimo 100gr del material que conforma el espécimen ensayado.



Fotografía tomada en Laboratorio "Ing. Mario Ángel G. Urbina" de la Esc. Ing. Civil .U.E.S

4.14 Resultados obtenidos de la resistencia a la compresión simple.

Luego de aplicado el procedimiento antes descrito y de los cuidados pertinentes para el suelo objeto de estudio en mezclas compactadas con cal, utilizando el procedimiento "B" de la norma ASTM D 5102 (Para mayor información consultar norma), se obtienen los siguientes resultados:

Los valores registrados deben reportarse al entero próximo según la norma ASTM D 5102.

Tabla 4.26

Compresión simple Inconfinada de Suelo-Cal

Método compactación	# Probeta	Edad	Humedad de compactac. %	Peso, g	Alto, cm	Diámetro, Cm	Peso volumétrico, g/cm ³	Área, cm ²	Resistencia a la compresión, Kn	Esfuerzo Kg./cm ²	Esfuerzo Promedio Kg./cm ²
AASHTO T-180	3A1	3días	23	1853	11.50	9.90	2.1	77.0	5	7	7
	3A2		23	1813	11.51	9.90	2.0	77.0	5	6	
	3B1	7días	23	1548	11.53	9.92	1.7	77.3	7	10	10
	3B2		23	1558	11.52	9.92	1.7	77.3	7	10	
	3C1	28días	23	1498	11.53	9.91	1.7	77.1	12	16	17
	3C2		23	1495	11.50	9.92	1.7	77.3	13	17	
	3D1	90días	23	1488	11.50	9.90	1.7	77.0	19	25	25
	3D2		23	1470	11.51	9.89	1.7	76.8	19	25	
AASHTO T-99	4A1	3días	25	1789	11.51	9.90	2.0	77.0	4	5	6
	4A2		25	1795	11.50	9.91	2.0	77.1	4	6	
	4B1	7días	25	1512	11.50	9.94	1.7	77.6	7	9	9
	4B2		25	1502	11.52	9.92	1.7	77.3	7	9	
	4C1	28días	25	1498	11.42	9.94	1.7	77.6	9	12	12
	4C2		25	1456	11.45	9.92	1.6	77.3	9	12	
	4D1	90días	25	1426	11.50	9.90	1.6	77.0	13	17	17
	4D2		25	1432	11.49	9.90	1.6	77.0	13	17	

Los valores de Resistencia a la Compresión Simple en Kn fueron obtenidos en esas unidades Directamente de la maquina de ensayo Utilizada; para obtener el Esfuerzo en Kg/cm² basta con multiplicar (Resistencia a la compresión en Kn por 1000 para obtener Newton “N” luego Dividir entre 9.81 debido a que 1Kg= 9.81N, para obtener Kg y por ultimo Dividir la Fuerza entre una área para obtener un Esfuerzo.

Ejemplo: (5 Kn x1000)=5000N esto 5000N/ 9.81=509.68Kg y luego Fuerza/Area=509.68Kg / 77.0cm²=6.62 Kg/cm² lo que se puede reportar como 7.0 Kg/cm² reportando al entero próximo el valor de esfuerzo.

Para ver mejor la evolución de la resistencia conforme al tiempo de maduración de la mezcla suelo-cal y comparar el incremento obtenido sobre el suelo natural se presenta la siguiente tabla resumen de esfuerzos promedios.

Tabla 4.27		Compresión Simple de Especímenes con y sin Cal	
Energía de compactación	Edad	Promedio Esfuerzo en Kg./cm ²	
		Suelo Natural	Suelo Cal
AASHTO T-180	3días	11	7
	7días	11	10
	28días	13	17
	90días	13	25
AASHTO T-99	3días	9	6
	7días	9	9
	28días	9	12
	90días	9	17

Gráfico de resistencias obtenidas según el método de compactación AASHTO T 180:

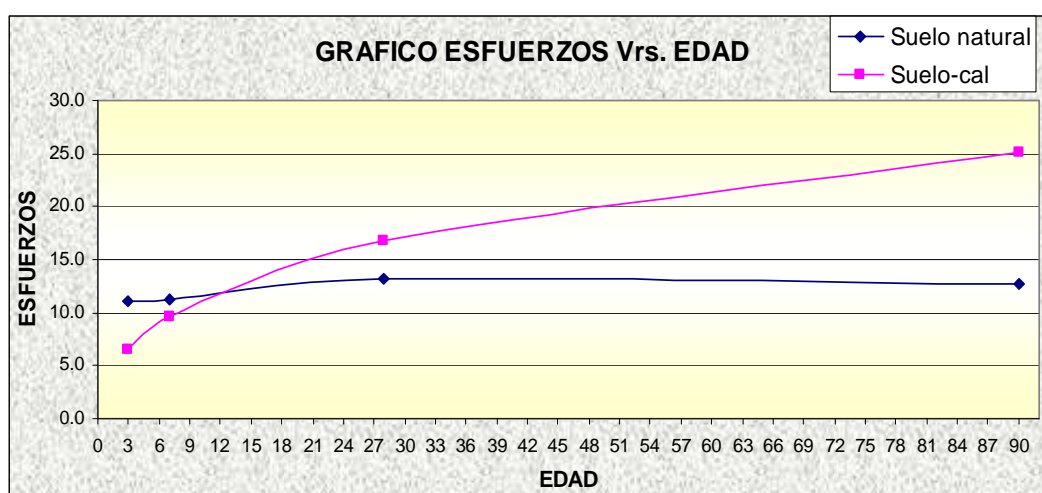


Gráfico 4.16

Variación de resistencia con método de compactación AASTHO T 180

Gráfico de resistencias obtenidas según el método de compactación AASHTO T 99:

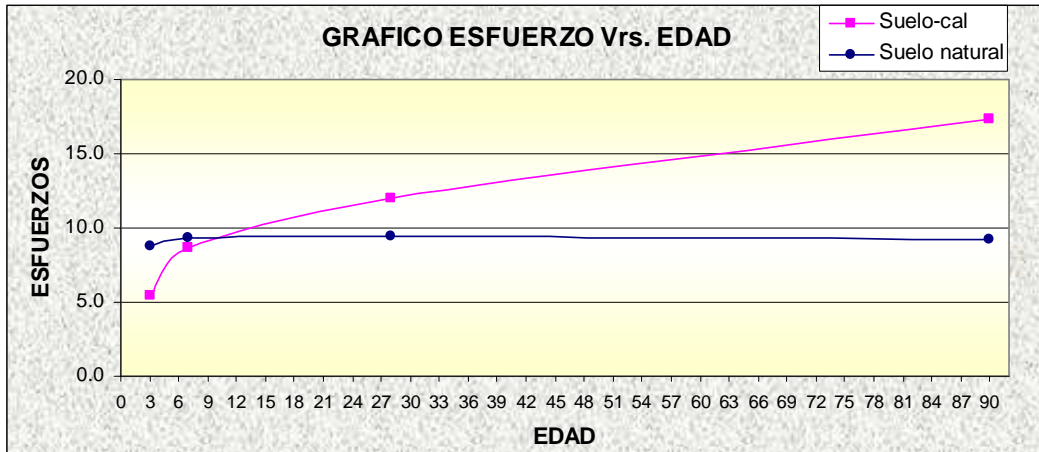


Gráfico 4.17

Variación de resistencia con método de compactación AASHTO -99

Los resultados muestran que los especímenes de suelo natural para los primeros días presentan mayor resistencia que especímenes suelo-cal, este fenómeno se debe a que con la adición de cal el suelo baja totalmente su plasticidad, perdiéndose de esta manera la cohesión entre las partículas; cohesión que muchas veces genera un porcentaje mínimo de resistencia al material.

4.15 Índice de expansión de suelos.

Analicemos ahora como el índice de expansión se modifica por la adición de cal según los resultados obtenidos del ensayo realizado a la mezcla suelo-cal:



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"**



**"METODO DE ENSAYO ESTANDAR PARA
ENCONTRAR EL INDICE DE EXPANSION DE SUELOS"**

ASTM D-4829

Solicitante:	<u>Universidad de El Salvador</u>	Material:	<u>Del Lugar</u>
Proyecto:	<u>Trabajo de Graduación</u>	Estacionamiento:	<u>5+140 a 5+290</u>
Procedencia:	<u>LIB 12</u>	Fecha de recibido:	<u>Junio/2008</u>
Ubicación:	<u>HUIZUCAR</u>	Fecha de ensayo:	<u>Junio/2008</u>

INDICE DE EXPANSION SUELO NATURAL USANDO UN CONSOLIDOMETRO

**DATOS INICIALES DE LA
PASTILLA**

Diámetro Inicial, Do	6.10cm
Altura Inicial, H1	2.0cm
Área Inicial, Ao	0.0029m ²
Peso Inicial, Wo	174.3g
Peso de Anillo, W	64.6g
Peso de Carga	40.33lbs

HUMEDAD DE COMACTACION Y SATURACION

	Compactación	Saturación
Tara	1	2
Peso Tara	10.50	10.50
Muestra humedad + tara	58.0	117.9
Muestra seca + tara	49.30	83.30
% de humedad	22.4%	47.5%

CALENDARIO DE REGISTRO DE LECTURAS

		LECTURA,mm	OBSERVACION	FECHA
Hora de carga	9.20a.m.	0.0000	Sin Carga	02-Jul-08
Reposo 10mm, d1	9.30a.m.	3.2950	Compresión	02-Jul-08
Inicio de Lecturas a 3h, d2	12.20m.d.	3.4225	Compresión	02-Jul-08
Lectura a las 6h, d2	3.20p.m.	3.4275	Compresión	03-Jul-08
Lectura a las 24h, d2	9.20a.m.	3.44000	Expansión	03-Jul-08

CALCULOS DE INDICE DE EXPANSION

Grado de Saturación:	
Altura Inicial, H1	20.00
Lectura D1	16.71
Lectura D2	16.56
Cambio de Altura, ΔH	-0.15
Índice de Expansión:	0.0
Expansión Potencial, 0-20	Muy Baja

Observaciones: Las Lecturas D1 y D2 resultan de la resta de H1 menos d1 y d2

Tabla 4.28	Comparación del Índice de Expansión del Suelo	
Método del consolidómetro	Suelo sin cal	
	Índice de Expansión:	0.25
	Expansión Potencial, 0-20	Muy baja
	Suelo-cal	
	Índice de Expansión:	0.0
	Expansión Potencial, 0-20	Muy baja

Los resultados muestran como el índice de expansión se reduce a cero (0) con el porcentaje óptimo de cal.

A continuación se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados.

Tabla 4.29

Propiedades de la mezcla suelo-cal.

Clasificación	SUCS	ML	Limo ligeramente plástico
	AASHTO	A-4 (0)	Suelo Limoso
Próctor	AASHTO T-180	PVS=1600 Kg/m ³	%Wopt=23.3%
	AASHTO T-99	PVS=1550 Kg/m ³	%Wopt=25.0%
CBR	AASHTO T-180	18% (4 días) y 30% (28 días)	
	AASHTO T-99	14% (4 días) y 27% (28 días)	
Compresión Simple	AASHTO T-180	3días	Esfuerzo= 7 Kg./cm ²
		7días	Esfuerzo= 10 Kg./cm ²
		28días	Esfuerzo= 17 Kg./cm ²
		90días	Esfuerzo=25 Kg./cm ²
	AASHTO T-99	3días	Esfuerzo= 6 Kg./cm ²
		7días	Esfuerzo= 9 Kg./cm ²
		28día	Esfuerzo= 12 Kg./cm ²
		90días	Esfuerzo=17 Kg./cm ²
LP	NP (No Practicable)		
IP	NP (No Practicable)		
IE	0.0%		

**CAPITULO V:
PROCESO
CONSTRUCTIVO
Y CONTROL DE
CALIDAD
DE LA CAPA
SUELO-CAL**

5.1 REQUERIMIENTO DE CONSTRUCCION.

El supervisor debe autorizar, por escrito, el inicio de los trabajos de construcción del suelo-cal, luego de constatar que han sido satisfechos los requisitos previos establecidos en las especificaciones, y lo establecido en el contrato de la obra.

Cuando se vaya a construir la capa de suelo – cal sobre la superficie de una vía que haya estado en servicio y que presente irregularidades en toda o en parte de su longitud, se debe proceder, previamente, al acondicionamiento de las zonas irregulares de dicha superficie.

El tramo analizado para fines de esta investigación contaba con ciertas irregularidades en su superficie, por lo cual previo a su estabilización con cal, se realizo el acondicionamiento del lugar, con la ayuda de una motoniveladora tal como se muestra en la siguiente fotografía.



Fotografía 5.1 Preparación del lugar previo a su estabilización.

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar.

5.2 EQUIPO.

El equipo será el requerido para ejecutar las siguientes actividades:

- Escarificación
- Disgregación
- Adición de Cal
- Adición del agua

- Mezclado
- Extendido, compactado y acabado de la superficie de la capa
- Curado
- Control de calidad.

5.3 CALCULO DE LA CANTIDAD DE CAL A UTILIZAR EN EL TRAMO DE PRUEBA.

Para determinar el número de bolsas de cal con las que contaría el tramo a estabilizar se realizaron los siguientes pasos:

a) Primero se determina el volumen del tramo a estabilizarse con cal. El tramo que se analizo para fines de esta investigación contaba con las siguientes características:

Ancho: 5 mts.

Largo: 150 mts. (De Est. 5+140 a 5+290)

Espesor: 0.30 mts.

Volumen total = $5 * 150 * 0.30 = 225 \text{ m}^3$

b) Luego este volumen es multiplicado por el Peso Volumétrico Seco Máximo obtenido en el próctor (AASHTO T 180) realizado al material (suelo natural), determinando así el peso del mismo.

Nota: el próctor a utilizar dependerá de las especificaciones y exigencia del proyecto en particular donde se realice la estabilización.

Peso = Volumen * Peso Volumetrico Seco Maximo

Peso = $225 \text{ m}^3 * 1590 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 357750 \text{ Kg}$.

c) Luego se multiplica por el porcentaje de cal óptimo, determinado previamente en este trabajo.

Porcentaje de cal optimo = 4%

Peso = $357750 * 0.04 = 14310 \text{ Kg}$.

d) El número total de bolsas de cal que deberá contener el tramo, vendrá dado de dividir el peso determinado en el literal anterior y el peso por bolsa de cal.

Peso por bolsa de cal = 25Kg.

Número de bolsas de cal = $14310 \text{ Kg} / 25 \text{ Kg} \approx 572$ **bolsas de cal**.

El número de bolsas de cal a utilizar en el tramo es de 572 bolsas, las cuales deberán ser distribuidas de la mejor manera posible por el ingeniero encargado de la estabilización, a fin de garantizar que la mezcla será homogénea a lo largo y ancho del tramo ejecutado.

5.4 EJECUCION DE LA ESTABILIZACION.

La estabilización de suelos con cal puede hacerse principalmente de dos formas diferentes:

- Mezcla in situ (vía seca / húmeda).
- Mezcla en plantas centrales o planta móvil.

El mezclado en planta puede resultar idóneo si el suelo utilizado proviene de un préstamo en el cual se puede mezclar la cal con el suelo y almacenarlo para su posterior puesta en obra mediante las técnicas normales de terraplenado. El problema que se plantea es que el amasado que realizan estas plantas es ejecutado en una mezcladora de palas, que no es muy eficaz con los tipos de suelos susceptibles de tratar con cal, es decir, con suelos arcillosos.

Esta metodología está especialmente indicada para tratar suelos procedentes de préstamos y en zonas de la traza de difícil ejecución.

Es importante tomar en cuenta que este producto (la cal) cuenta con una ventaja muy importante para la organización de la obra donde se vaya a utilizar, que es el hecho de que la cal no presente un proceso de endurecimiento rápido que marque una rigidez en los intervalos de mezcla y puesta en obra. La mezcla suelo-cal puede apilarse en montones

durante días, para su posterior colocación en capas, siempre que se controle su humedad y se proteja del aire. Para este fin puede ser necesaria la protección con lonas o plásticos.

No obstante, el sistema de mezclado in situ es el más utilizado hasta el día de hoy. La maquinaria disponible actualmente para la estabilización de suelos permite obtener resultados excelentes con esta técnica. Su calidad en cuanto a la finura, dosificaciones y homogeneidad del mezclado es muy buena.

La estabilización in situ se realiza siguiendo las siguientes fases:

1ª fase) Preparación del suelo y almacenamiento de la cal:

Escarificación o esponjamiento del suelo o del préstamo y su colocación en capas compatibles con el mezclador a utilizar. De esta forma se mejora significativamente el rendimiento del proceso posterior de mezclado.

El suministro y almacenamiento de la cal debe hacerse teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad, distancias, espacio necesario, seguridad e higiene, y ritmo de producción de la obra.

El almacenamiento de la cal en obra debe hacerse en contenedores que eviten que la cal entre en contacto con la humedad y con el aire para garantizar su conservación. Es muy importante también controlar y regular la humedad natural del suelo, de tal forma que, si esta es superior a la humedad óptima del ensayo proctor, convendrá aplicar un porcentaje mayor de cal a fin de reducirla. Por el contrario, si esta fuese inferior a la óptima, habrá que regar las capas en cualquiera de las fases aquí descritas.

2ª fase) Extendido de la cal:

Adición y extensión de la cantidad, calculada previamente mediante los estudios de laboratorio pertinentes, de la cal en forma de polvo (vía seca) o de lechada (vía húmeda). Para ello, se utilizarán los equipos que garanticen la precisión requerida.

3ª fase) Mezclado:

Mezclado de la cal y el suelo en todo el espesor de la capa mediante las pasadas necesarias para lograr su homogeneidad. Para ello se pueden utilizar equipos recicladores/estabilizadores de suelos, pulvimezcladores, motoniveladoras etc., que aseguren la eficacia necesaria.

4ª fase) Compactación y terminación:

Compactación mecánica y humectación hasta conseguir las densidades necesarias, nivelación y curado de la capa mezclada mediante las técnicas convencionales de movimiento de tierras.

A continuación se describe cada una de estas fases en la ejecución del tramo de prueba ejecutado para esta investigación.

5.5 PROCESO CONSTRUCTIVO.

5.5.1 Preparación de los suelos y almacenamiento de la cal.

La preparación de los suelos consiste en una serie de operaciones previas cuya ejecución es necesaria, y muy importante, para mejorar los rendimientos del tratamiento propiamente dicho:

- Escarificación y esponjamiento de los suelos para mejorar los rendimientos del mezclado. Se realiza con riper montado en motoniveladora o tractor de orugas, o bien mediante escarificadores de gradas o de discos. Este aspecto es determinante para lograr la profundidad y homogeneidad de mezclado requerida.

- Aireación de los suelos, en el caso de que sea necesario; es decir una vez escarificado el material dejarlo en reposo a fin de perder humedad mediante la exposición al sol del mismo.



Fotografía 5.2 Aireación del suelo previo a su estabilización.

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar.

- Humectación (colocación de agua) de los suelos en el caso de suelos demasiado secos mediante los sistemas de riego tradicionales. Este aspecto es muy importante ya que sobre un suelo esponjado y humedecido, la cal, según cae, se quedará adherida, evitando el riesgo de dispersión a causa del viento, y comenzará a actuar inmediatamente sobre el suelo, incluso, antes de empezar la mezcla. En el caso de utilizar equipos pulvimezcladores, puede inyectarse el agua directamente en el proceso de mezclado, dentro de la cámara.
- Eliminación de grandes terrones, frecuentes en algunos suelos arcillosos, mediante riper, rastrillos o desterronadores. De esta forma se favorece la homogeneidad del mezclado y se evitan numerosas averías y desgaste de piezas en los mezcladores.

5.5.2 Extendido de la cal.

Cuando la superficie a tratar es reducida, es posible recibir suministros de cal en sacos, tal es el caso de nuestro tramo de prueba analizado. El extendido se realiza manualmente en dos etapas:

1ª Etapa: Colocación de las bolsas de cal en el terreno según una distribución adecuada en filas y columnas de las bolsas efectuada con anterioridad con el objeto de cumplir la dosificación establecida, tal como se muestra en la siguiente fotografía.



Fotografía 5.3 Distribución de la cal en tramo a estabilizar

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar.

Es de suma importancia tomar en cuenta en esta etapa del proceso, que la distribución de las bolsas de cal se realizara a criterio del ingeniero encargado del proceso constructivo de la capa suelo-cal, y para lo cual deberá considerar parámetros importantes como: ancho y longitud del tramo de vía que será estabilizado.

2ª Etapa: Apertura de las bolsas y extendido de la cal con palas o auxiliándose de equipo como motoniveladora.

Luego de la distribución más adecuada de las bolsas de cal sobre el suelo que será estabilizado, se procede al rompimiento de las mismas, tomado en cuenta las medidas de

seguridad respectiva para evitar la inhalación del producto por el personal ocupadas en esta parte del proceso.



Fotografía 5.4 Rompimiento de la cal sobre el suelo a estabilizar

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar.

Con la cal expuesta completamente sobre el suelo, se procede al extendido de esta, sobre la totalidad del tramo que será estabilizado, Este proceso se realizo ocupando como equipo una motoniveladora, la cual extendería la cal en un capa de espesor constante a lo largo y ancho del tramo a estabilizar, es importante siempre en esta etapa del proceso constructivo de la capa suelo-cal, verificar que el extendido de la cal cubra hasta los laterales de la vía, a fin de generar la mezcla lo mas homogénea posible de suelo-cal en el tramo; tal como se muestra en las siguientes fotografías.



Fotografía 5.5 Colocación de la cal previamente distribuida.

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar.



Fotografía 5.6 Extendido de la cal previo a su mezclado.

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar.

5.5.3 Mezclado.

Esta fase consiste en mezclar la cal con el material a estabilizar, para lo cual en caminos de baja intensidad vehicular una motoniveladora es suficiente, para lo cual con la cal expuesta al suelo (fotografía 5.6), el procedimiento consiste en voltear el material escarificado con la hoja de la motoniveladora, al cual se ha cubierto con la cal de un lado a otro hasta notar una mezcla homogénea; se puede considerar una mezcla homogénea cuando el suelo ya no presenta grumos visibles de cal ó hasta que el suelo tenga el mismo color, evidenciando un color gris en todo el tramo de estabilización.

Para la estabilización con cal de capas para soporte de infraestructuras civiles, cuyas especificaciones son muy exigentes por razones obvias de calidad, la maquinaria específica para realizar el mezclado son los “estabilizadores de suelos”, o equipos pulvimezcladores de eje horizontal (fotografía 5.7).

Son equipos autónomos especialmente concebidos para la estabilización de suelos. Tienen un mezclador intermedio horizontal formado por un rotor con eje provisto de cavadoras y con una cubierta dentro de la cual se realiza la mezcla al girar el rotor a gran velocidad. Además, tienen un sistema de inyección de agua o lechada en la cámara de mezclado, tal como se muestra en la siguiente fotografía.



Fotografía 5.7 Recicladora con eje rotor horizontal.

Fotografía tomada en Blvd. Diego de Holguín, Tramo II (Santa Tecla).

En nuestro caso el equipo ocupado para la realización del mezclado del suelo con la cal fue una motoniveladora; tomando en cuenta para este proceso los siguientes aspectos:

- a) La hoja de la motoniveladora, se introduciría hasta una profundidad de 0.3mts (espesor de capa suelo-cal), a fin de cumplir con los parámetros de diseño previamente establecidos de la misma.
- b) El número de pasadas de mezclado con la motoniveladora, dependerá del criterio del ingeniero a cargo de la obra, garantizando que estas finalizaran cuando se tenga una mezcla homogénea de suelo-cal en todo el tramo estabilizado.

Nota: Se recomienda realizar como mínimo tres pasadas de mezclado cuando el equipo utilizado sea una "motoniveladora".

En la siguiente fotografía se muestra el proceso de mezclado ocupado en el tramo de prueba realizado para fines de esta investigación.



Fotografía 5.8 Proceso de mezclado del suelo-cal.

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar.

Es importante tomar en cuenta el espesor de la capa suelo-cal en esta etapa del proceso constructivo, principalmente por los siguientes aspectos:

1. El espesor máximo de la capa suelo-cal vendrá dado, principalmente por la capacidad y rendimiento del equipo utilizado en los procesos de mezclado y compactación.
2. La calidad de la capa suelo-cal, no solo dependerá de trabajar con un espesor de capa en base al rendimiento del equipo implementado en los procesos antes mencionados; pues en el caso de trabajar con suelos plásticos, excesivamente húmedos, el hecho de tener que mezclar una cantidad excesiva de material dificulta enormemente el mezclado y avance de la máquina; para tales casos se recomienda reconsiderar el espesor de la mezcla suelo-cal o realizar la estabilización mediante la construcción de dos capas sucesivas a fin de cumplir con el espesor de la capa suelo-cal contemplada en el diseño.

Nota: En el caso de que el extendido de cal se realice por vía seca, en zonas con vientos moderados, deberán coordinarse adecuadamente los procesos de extendido y mezclado de la cal, de tal forma que ambos actúen uno inmediatamente a continuación del otro, para evitar el levantamiento de la cal en polvo extendida sobre el suelo a causa del viento.

5.5.4 Requisitos de campo de la mezcla de suelo – cal.

En el momento de iniciar su compactación, la mezcla de suelo-cal debe satisfacer los requisitos siguientes:

- (a) La humedad de la mezcla debe ser la humedad óptima de compactación previamente determinada mediante el próctor especificado.
- (b) El contenido de cal de la mezcla no debe variar en más de 5% por exceso o por defecto, de la cantidad de cal por metro cúbico de mezcla, establecida en la fórmula de trabajo.
- (c) En el caso de que la mezcla sin compactar sea afectada por la lluvia, ésta se deberá desechar, si al verificar su humedad se encuentra demasiado alta en comparación con la humedad óptima determinada en el próctor para la mezcla.
- (d) Se deberán ejecutar a modo de verificar la calidad de la mezcla, ensayos de resistencia a la compresión de especímenes de la mezcla suelo-cal realizada en cada tramo.

5.5.5 Compactación y terminación.

La compactación de las capas tratadas se realiza tras su nivelación con motoniveladora hasta la altura requerida de la capa suelo-cal, mediante las técnicas convencionales en el movimiento de tierras.

Es importante que el espesor de las capas sea compatible con el rendimiento de los compactadores a utilizar; es decir no exceder los espesores de las capas de compactación si no se cuenta con un equipo adecuado para realizar dicho proceso.

El proceso de compactación del tramo de prueba en el Municipio de Huizucar, se realizó con un compactador de rodó liso, como se muestra en la siguiente fotografía.



Fotografía 5.9 Proceso de compactación de la mezcla suelo-cal.

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar

El proceso de compactación se dará como terminado cuando se alcance el grado de densidad igual o mayor al 95% en la capa suelo-cal construida.

Una vez terminada la compactación, la superficie deberá mantenerse húmeda hasta que se aplique el riego de curado.

La capa suelo-cal compactada deberá recibir una protección superficial dependiendo de su naturaleza y de la climatología para permitir su endurecimiento antes de colocar la siguiente capa.

La capa suelo-cal compactada, deberá ser curada durante un período de 3 a 7 días para permitir su endurecimiento antes de colocar la correspondiente capa de sub-base o base.

El curado puede ser efectuado mediante una de las dos formas siguientes:

- manteniendo la superficie en condiciones húmedas mediante un regado ligero y compactando cuando sea necesario.
- mediante una membrana de curado formada por un sellado de la superficie de la capa suelo-cal con un riego asfáltico.

En la siguiente fotografía se muestra el texturizado final obtenido en nuestro tramo de prueba construido, el cual es un acabado liso generado mediante un rodo liso.



Fotografía 5.10

Texturizado final de tramo de prueba.

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huizucar.

5.6 CONDICIONES A TENER EN CUENTA.

Cuando la conclusión final del estudio realizado a un suelo para ser estabilizado es realizar el tratamiento con cal, debe hacerse una reflexión previa al comienzo de los trabajos. A parte de las consideraciones habituales que intervienen en la preparación de una obra, es necesario tener en cuenta un cierto número de aspectos específicos de la técnica tales como:

- El periodo de ejecución de las obras, donde se tendrá en cuenta la velocidad de reacción de los materiales a usar en el tratamiento y los riesgos derivados del clima.
- La protección del personal de la obra y de las personas en las cercanías de los trabajos contra posibles perjuicios.
- La elección del modo de tratamiento.
- La secuencia de las operaciones del tratamiento con cal.

- Verificar los espesores de la capa a estabilizar a fin de chequear que esta no sea superior a la profundidad de la acción del mezclador, y modalidades de compactación.
- Verificación de la naturaleza de las protecciones superficiales a aplicar sobre la superficie a tratar.

5.7 CONTROL DE CALIDAD EN LA ESTABILIZACION CON CAL.

A continuación se presenta una propuesta de Control de Calidad, es de suma importancia aclarar que este dependerá de cada proyecto en particular y de las condiciones contractuales del mismo.

El objetivo de las medidas a adoptar en el Control de Calidad es el de asegurar la correcta ejecución de los distintos elementos y fases que involucren la aceptación de calidad para un tramo en ejecución. Para ello, este control se basará en:

5.7.1 Alcance del sistema de control de calidad.

La ejecución del Sistema de Control de Calidad es responsabilidad del contratista. Asimismo, el supervisor tendrá toda la autoridad y obligación contractual de verificar y asegurarse de que el contratista ejecute el Sistema de Control de Calidad según se requiere en los documentos contractuales. Para ello el supervisor evaluará las características de calidad mediante pruebas de contraste. Cuando no sea posible usar los mismos métodos de prueba, se determinarán factores de correlación entre las pruebas de contratista y de la supervisión.

5.7.2 Sistema de control.

La calidad del trabajo realizado por el contratista será verificada durante todos sus procesos por el supervisor, para su aceptación, y todos los resultados de los ensayos de un determinado tramo de trabajo se analizarán colectiva y estadísticamente.

5.7.3 Plan de control de calidad del contratista.

El Contratista proporcionará y mantendrá un efectivo Sistema de Control de Calidad (SCC) que permita alcanzar los requisitos de construcción y calidad de los materiales detallados en planos y especificaciones concernientes al tramo en ejecución.

El Contratista establecerá un Sistema de Control de Calidad (SCC), para realizar suficientes trabajos de inspección y ensayos, con el fin de controlar la conformidad de los procesos y del producto final según se especifique en el diseño, en lo que respecta a materiales, mano de obra, equipo, procedimiento constructivo, acabado, rendimiento funcional, e identificación.

Una parte integral del Sistema de Control de Calidad (SCC) lo constituye el Sistema de Seguimiento Estadístico de los Procesos Constructivos (SEPC) a través de gráficas de control de desempeño de características de calidad y su consistencia que permitirán monitorear los resultados de las pruebas de campo y laboratorio correspondientes a la producción, colocación y mediciones de la calidad del producto terminado a medida que éste progresa. Se entiende que este requisito establece no un fin, es decir no basta con cumplir con la representación gráfica de los resultados de la producción, colocación y producto terminado, sino un medio que facilite al Ingeniero de Control de Calidad tomar las acciones necesarias para investigar causas asignables de variación no aleatoria que le permitan asegurar la estabilidad de los procesos constructivos.

Se recomienda que sea el contratista el que elabore el Plan de Control de Calidad (PCC) a utilizar en la obra, el cual registrará sus actividades de autocontrol de calidad.

5.7.4 Contenido del plan de control de calidad.

El Plan de Control de Calidad deberá contener una descripción del personal responsable del control de calidad, los procedimientos, instrucciones, formatos y registros a ser utilizados así como también el listado con nombres de los involucrados en el control de calidad.

Los controles tendrán tres fases de inspección para las actividades definidas del trabajo, según se describe a continuación:

Las actividades definidas del trabajo, son las unidades en que se divide la obra, para efecto del control de calidad, es decir son los segmentos en que el Supervisor recibirá la obra. Estos segmentos pueden ser, a manera de ejemplo, lotes de material a incorporar a la obra, tramos estabilizados, entre otros.

Las tres fases de inspección son las siguientes:

5.7.5 Inspección Preparatoria.

Será responsabilidad del contratista definir la fecha más adecuada para la realización de esta inspección, la cual deberá incluir como mínimo, lo siguiente:

- Una revisión conjunta de todos los requisitos contractuales y especificaciones técnicas aplicables.
- Una comprobación para asegurarse que todos los materiales han sido ensayados, sometidos a aprobación, y aprobados.
- Una comprobación para asegurarse que los Documentos Contractuales correspondientes han sido sometidos a aprobación y han sido aprobados.
- Una revisión para asegurarse que se han hecho los arreglos necesarios para realizar oportunamente todos los ensayos de control de calidad requeridos.
- Una inspección del área donde se realizarán los trabajos, para asegurarse que todo el trabajo previo y/o preliminar ha sido completado.
- Una revisión del equipo de laboratorio, formatos y procesos para la realización de las pruebas de laboratorio.
- Una inspección minuciosa de los equipos claves.
- Una descripción, detallada y minuciosa, por parte del contratista, del proceso constructivo propuesto indicando como mínimo: puntos de control, toma y

cantidad de muestras, tolerancias, rendimientos de equipo y mano de obra, necesidad de equipo y mano de obra, secuencias de procesos, encargados, mecanismos de comunicación interna del contratista necesarias para la actividad en cuestión, etc.

- Revisión de las medidas de seguridad, análisis de riesgos y amenazas y control de tráfico a tomar.

5.7.6 Inspección inicial.

Esta inspección será llevada a cabo, tan pronto como una porción representativa de cada actividad particular del trabajo ha sido completada, e incluirá:

- Una evaluación de la calidad de la mano de obra empleada.
- Una revisión de los ensayos, pruebas, mediciones de control realizados por el laboratorio.
- Evaluación del desempeño y rendimiento de equipos clave, a fin de asegurar la conformidad con los requisitos contractuales y adecuado avance de obras.
- Control de calidad de los materiales haciendo énfasis en los defectuosos o dañados.
- Una revisión de la obra efectuada que asegure que no se han realizado omisiones y que el trabajo se ajusta a los requisitos de niveles, ubicaciones y dimensiones.
- Inspección de Sistema de Higiene y Seguridad Ocupacional.

Inspecciones preparatorias e iniciales adicionales.

Se deberán realizar Inspecciones Preparatorias e Iniciales adicionales para una misma actividad de trabajo si: la calidad de trabajo es inaceptable; si hay cambios en los miembros de la Unidad de Control de Calidad responsable o mano de obra; si se va a recomenzar el trabajo después de un periodo de interrupción o inactividad considerable; o si se han desarrollado otros problemas.

5.7.7 Inspecciones de seguimiento.

Serán realizadas diariamente para controlar que exista conformidad con los requisitos contractuales, haciendo énfasis en la calidad de los procesos constructivos, por ejemplo, procesos de producción de plantas, funcionamiento de maquinaria clave, etc., incluyendo resultados de ensayos, hasta que sea completada la actividad particular del trabajo. Dicha inspección y sus resultados deberán ser documentados.

5.8 CONTROL DE LA EJECUCION.

Consiste en controlar el seguimiento del proceso constructivo diseñado previamente y de que los resultados obtenidos sean satisfactorios.

Para ello, antes del comienzo de las actividades, es imprescindible la realización de tramos de prueba en los que podemos ajustar y coordinar, a escala real, todos y cada uno de los parámetros de ejecución como:

- Inspección de perfiles longitudinales y transversales.
- Equipo adecuado para realizar del proceso constructivo de la mezcla suelo-cal.
- Verificación del funcionamiento del equipo ocupado en el proceso constructivo es el adecuado.
- Manejo del equipo ocupado en el proceso constructivo de la mezcla suelo-cal es adecuado.
- Condiciones ambientales adecuadas para realizar el proceso constructivo de la capa suelo-cal, etc.
- Porcentaje de cal a emplearse.
- Espesor de capa a estabilizar.
- Humedad de compactación óptima adecuada.
- Pulverización correcta del suelo.
- Distribución uniforme de las bolsas de cal.
- Adecuada homogenización de la mezcla.
- Comprobación del grado de compactación (Alcanzar el grado de compactación especificado).

- Curado adecuado.
- Cumplimiento de los tiempos de ejecución de cada proceso programado.
- Orden adecuado para la realización de toda la actividad concerniente al proceso constructivo.

Estos tramos de prueba consistirán en realizar distintos segmentos de tratamiento, modificando los distintos parámetros sensibles para poder encontrar las soluciones óptimas de ejecución.

5.8.1 Preparación de los suelos:

Antes del extendido de la cal, se debe comprobar visualmente que el suelo está esponjado y que no existen grandes terrones.

5.8.2 Extendido de la cal:

Se puede controlar de dos formas distintas:

- a) Mediante pasadas periódicas de la cal recogida en recipientes o lonas de superficie conocida ($< 1 \text{ m}^2$) dispuestas en el suelo antes del paso de la máquina.
- b) Controlando el peso total de cal extendida dividido por la superficie cubierta.

5.8.3 Mezclado:

- **Durante el mezclado**

Es posible evaluar visualmente la penetración de la herramienta en el suelo (discos, rejas, etc.), medirla con la ayuda de una varilla graduada que se desplaza sobre una regla (pulverizador-mezclador) o por cualquier otro sistema que haya previsto el constructor de la maquinaria.

- **Después del mezclado**

Es necesario hacer sondeos del suelo tratado; en general, un cambio de consistencia o de color, permite distinguir la profundidad de la acción. Deberá comprobarse la finura y la homogeneidad obtenidas en todo el espesor de la mezcla. Puede hacerse visualmente, o por métodos físico-químicos.

Los métodos más usados son:

a) Inspección visual del color y aspecto de la mezcla suelo-cal.

En este sentido, y tomando como referencia el color y aspecto de la mezcla realizada en laboratorio, con las proporciones a aplicar en obra, se podrá observar, bien a lo largo de un agujero, o de un testigo, la variación del color y su homogeneidad a lo largo de su profundidad.

Procurar que las superficies a observar no se alteren por la excavación del agujero, ni por la extracción del testigo.

En el caso de testigos cilíndricos, se les realizaran las pruebas de resistencia respectiva, y se observará la coloración en las dos superficies interiores, y a distintas alturas o porciones, para ver la homogeneidad del mezclado.

b) Utilización de la Fenolftaleína.

Realizando un agujero o por el extraído de un testigo, se rocía con fenolftaleína dichas superficies en todo su espesor.

Se observará entonces la coloración producida a lo largo de dichas caras, teniendo en cuenta lo siguiente:

- La fenolftaleína, incolora, cambia a rosa cuando el pH es 8.4 o superior. Aprovechando esta propiedad, y como la cal aumenta el pH del suelo hasta un máximo de 12.4, en función de la dosificación, se podrá ver si hay cal en todo el espesor mezclado en tanto que se produzca dicha coloración; tal como se muestra en la siguiente fotografía.



Fotografía 5.11 Colocación de fenolftaleína en mezcla suelo-cal

Fotografía tomada en tramo de prueba ubicado en el Municipio de Huixucar.

- Sin embargo, este método no permite distinguir el porcentaje o grado de homogeneidad del mezclado a lo largo de todo el espesor de la capa tratada, puesto que siempre que el valor del pH alcance el valor mínimo de 8,4, la coloración rosa será la misma.
- Este método, combinado con el anterior, podría darnos una estimación de la homogeneidad del mezclado en el espesor de la capa.

c) Medición del pH.

Lo más eficaz, para controlar el proceso de mezclado, es utilizar métodos basados en la medición de la variación del pH producida por la mezcla del suelo con la cal, ya analizada en fase de proyecto, para la dosificación.

Para obtener una evaluación cuantitativa y más exacta, se debe medir, mediante un peachímetro portátil o papel tornasol (medidor de pH mediante carta de color).

La concordancia del pH obtenido a distintas profundidades permitirá garantizar la homogeneidad del mezclado, pues estará garantizando una homogeneidad en la acción de la cal sobre el suelo.

Es importante tener en cuenta que en los ensayos de pH para determinar la dosificación de cal utilizados en el proyecto realizada bajo la norma ASTM D 6276, se utiliza sólo la fracción arcillosa del suelo, lo cual puede implicar una variación del pH, al momento de realizar este proceso en campo.

5.8.4 Control final:

La compactación de los suelos tratados, que se van a utilizar en bases, sub- bases y sub rasante de carreteras debe ser particularmente cuidada; esto implica la aplicación de una energía de compactación elevada debido a las dosificaciones de cal habitualmente utilizadas.

Para obtener el máximo desarrollo de la resistencia y durabilidad de la capa estabilizada, las mezclas suelo-cal deben compactarse adecuadamente.

Los principios que gobiernan la compactación de las mezclas suelo-cal son los mismos que para el material no tratado. De forma similar, la maquinaria adecuada para la compactación del suelo no tratado es adecuada para compactar el suelo tratado. En general, la compactación inicial se realiza utilizando un rodillo de pata de cabra, seguido de una apisonadora lisa, para compactar la zona superior y dejar un acabado liso y cerrado.

Ambas apisonadoras pueden ser vibrantes para mejorar la eficacia, pero hay que tener cuidado para asegurar que no suba agua desde las capas inferiores como resultado de la vibración.

A diferencia de los materiales tratados con cemento, los suelos tratados con cal pueden compactarse hasta 2 ó 3 días después del mezclado. Sin embargo, no debe dejarse secar el suelo o la cal se carbonatará. Si la compactación final se va a retrasar entonces la superficie debe protegerse con un riego de imprimación.

Es importante tomar en cuenta que durante la compactación, las irregularidades de la superficie aparecerán y deberán corregirse con una última nivelación.

El comportamiento de un suelo fino tratado con cal es tal que la densidad seca obtenida es muy sensible a la energía de compactación y, tanto más, cuanto la dosificación en cal es mayor.

La capa estabilizada deberá ser compactada en todo su espesor. Por esta razón, es importante que el espesor de la capa a compactar este en base al rendimiento del equipo a utilizar para este proceso.

Una vez realizada la compactación, el objetivo principal es lograr el CBR especificado. Se medirá la densidad/humedad obtenida, a fin de lograr una densidad media mayor al 95 % de la densidad máxima obtenida en el ensayo proctor (normal o modificado), y se medirá también el espesor estabilizado.

CAPITULO VI:
CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES.

- El muestreo de campo y la reducción de muestra para cada ensayo en particular, fueron realizados conforme a su norma respectiva.
- Esta investigación sobre la estabilización con cal, fue realizada en base a una amplia información bibliográfica sobre el comportamiento de los suelos y este agente estabilizador (cal), técnica con muy poca divulgación y poco implementada en El Salvador.
- La realización de esta investigación de estabilización de suelos con cal, se baso en la ejecución de una serie de ensayos de laboratorios basados en normas ASTM Y AASHTO.
- La adición de cal disminuye la plasticidad del suelo, reduciendo de igual manera su cohesión, y la resistencia en los primeros días de curado; razón por la cual la resistencia a compresión a temprana edad en probetas elaboradas con suelo natural son superiores que las de mezcla suelo-cal.
- La adición de cal disminuye considerablemente la plasticidad de los suelos, para este suelo en particular con el porcentaje optimo de cal (determinado bajo la norma ASTM D 6276) se reduce esta propiedad a cero (0), provocando además un considerable cambio en su granulometría y de igual manera en su clasificación, pasando de un suelo arcilloso (CL) a ser un suelo limoso (ML).
- La dosificación del porcentaje de cal a utilizar, dependerá de las características y propiedades que presente cada suelo en particular.

- El método de ensayo utilizado para encontrar el porcentaje óptimo de este agente estabilizador (cal), viene dado por la medición estándar de pH para las mezclas suelo-cal bajo la norma ASTM D 6276, obteniéndose así un 4% de cal como el porcentaje óptimo para este suelo en particular.
- El suelo estabilizado con cal y analizados para fines de esta investigación, presenta resultados de resistencia a la compresión con un incremento del más del 100% a los valores obtenidos para el mismo suelo sin cal a los 90 días de curado, tiempo que se define en la norma ASTM D 5102-04, como el tiempo necesario en los que los especímenes de mezcla suelo-cal alcanzan una resistencia a la compresión aceptable.
- La ganancia de resistencia a la compresión en suelos estabilizados con cal, depende de diversos factores como el buen diseño de la mezcla suelo-cal, tipo de cal implementada, mineralogía del suelo y proceso constructivo de la capa suelo-cal, de ahí la importancia de establecer un plan de control de calidad que asegure la correcta ejecución de todas las etapas antes mencionadas.
- La ganancia de resistencia a compresión simple inconfiada de probetas elaboradas con la energía de compactación AASHTO T 180 y AASHTO T 99 para 3 días con curado estándar, fue entre 20 y 30%, a los 7 días entre 40 y 50%, y a los 28 días entre 60 y 70%, de la resistencia obtenida a los 90 días.
- La resistencia a la compresión y los valores de CBR obtenidos en la mezcla suelo-cal generada para fines de esta investigación, sirven como parámetros de comparación sobre las mejoras que se pueden obtener al adicionar cal a un suelo plástico; la aceptabilidad o rechazo de estos resultados de resistencia a la

compresión y valores de CBR dependerán de las especificaciones técnicas y contractuales para cada obra en particular donde sea implementada esta técnica de estabilización.

RECOMENDACIONES.

- No se puede rechazar un material por el hecho de que el resultado de un ensayo no cumpla con los parámetros dados por las especificaciones, se deberán repetir los ensayos a fin de asegurarse que los resultados están en lo correcto. Por lo cual se recomienda llevar un control estadístico de los resultados y no tomar decisiones sobre datos puntuales sino más bien sobre tendencias.
- Se recomienda que antes de comenzar cualquier trabajo de terracería, tener el conocimiento de las características de los materiales, de los problemas que estos materiales puedan generar y de las soluciones que pueden adoptarse.
- Precedentes a esta investigación, muestran que cuando el suelo presenta una mayor plasticidad y es estabilizado con cal, los resultados obtenidos en sus propiedades son superiores, puesto que se genera una mejor reacción química entre estos, por lo cual se recomienda más estudios de esta técnica de estabilización en nuestro país, donde se involucren distintos suelos con diferentes propiedades plásticas.
- Se recomienda que el material a ser estabilizado con cal, no cuente con más del 1% de materia orgánica; esto porque suelos que contengan cantidades superiores al 1% de materia orgánica pueden requerir porcentajes de cal adicionales considerables y/o procedimientos de construcción especiales.

- Como norma general se puede señalar que para que la estabilización con cal sea eficaz, los suelos deben ser plásticos, y en este sentido se considera que a partir de un índice de plasticidad (IP) igual o mayor a 10, el suelo es adecuado para reaccionar satisfactoriamente con este agente estabilizante.
- Como medida de control de las capas compactadas se recomienda el uso de la fenolftaleína, debido a que con su utilización se puede evidenciar el cambio de color en el espesor de la capa total compactada, pero se restringe su uso para control de la homogeneidad de la mezcla suelo-cal, debido a que las mezclas suelo-cal con porcentajes de cal menores al óptimo pueden de igual manera generar un cambio de color, puesto que este agente químico empieza a reaccionar con porcentajes de pH= 8 mínimo.
- Los equipos utilizados para la realización de los ensayos involucrados en esta investigación deberán ser calibrados periódicamente a fin de que los resultados obtenidos por los mismos, sean los mas certeros posibles.
- Se recomienda construir un tramo de prueba para cada proyecto donde sea implementada esta técnica de estabilización, para poder ajustar y coordinar a escala real, todos y cada uno de los parámetros de ejecución involucrados en la construcción del tramo con el equipo disponible para ello.
- Se recomienda como mínimo realizar tres pasadas de mezclado cuando el equipo utilizado para esta etapa del proceso constructivo sea una “motoniveladora”.
- El patrón de compactación establecido en el tramo de prueba deberá ser el que se ejecute durante todo el proyecto, siempre que se mantengan las condiciones de espesores de capa, las características del suelo y equipos de compactación.

Cuando estas condiciones cambien, inmediatamente deberá verificarse y establecerse el nuevo patrón.

- Se recomienda hacer y seguir un plan de control de calidad, para el diseño, proceso constructivo y control final de la capa suelo-cal, donde se defina claramente cuales son los ensayos de control de calidad a realizar y la frecuencia de los mismos, con el cual todas las partes involucradas en el proyecto estén conformes.
- Los diseños de mezcla suelo-cal, dependerán de los resultados de la campaña geotécnica realizada y de la identificación de los tramos homogéneos a lo largo de toda una ruta del proyecto.
- Para el control de la frecuencia mínima de ensayos en tramos largos de estabilización se recomienda tomar como mínimo una muestra cada 1000m^3 para granulometrías, límite líquido e índice plástico, una muestra cada 2000m^3 para la medición de pH y próctor, y tres especímenes para compresión simple cada 1000m^3 , una extracción de núcleo cada 250ml (metro lineal) y una densidad cada 100.0ml/carril.
- Se recomienda la revisión periódica de las normas ASTM y AASHTO, para estar al día con los cambios que se realicen a estas.

6.3 BIBLIOGRAFIA.

Libros.

JUAREZ BADILLO E. Y RICO RODRIGUEZ, MECANICA DE SUELOS TOMO I: “FUNDAMENTOS DE LA MECANICA DE SUELOS”, TERCERA EDICION EDITORIAL LIMOSA, MEXICO 1978.

RICO RODRIGUEZ A. Y DEL CASTILLO MEJIA H. (1994). “LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES”. VOL. 2, MEXICO.

Tesis.

PROCEDIMIENTO PARA LA ESTABILIZACION Y MANTENIMIENTO DE CAMINOS DE TIERRA EMPLEANDO CAL, SUELO CEMENTO Y RESIDUO ASFALTICO; (TESIS UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR 1995),

SIBRIAN HENRIQUEZ, CELIO; MANUAL PARA ENSAYOS DE LABORATORIO DE LA ASIGNATURA TECNOLOGIA DE MATERIALES II, UNIVERSIDAD POLITECNICA DE EL SALVADOR; TRABAJO DE GRADUACION, UNIVERSIDAD POLITECNICA DE EL SALVADOR, 2004.

CALDERON, GUSTAVO A. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE CAMINOS DE TIERRA EMPLEANDO CAL, SUELO CEMENTO Y RESIDUO ASFÁLTICO (TESIS UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR 1995

Manuales y Especificaciones.

ESPECIFICACIONES Y NORMAS DE LA SOCIEDAD AMERICANA PARA ENSAYOS Y MATERIALES; ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS); EDICIÓN DEL AÑO 2003.

ESPECIFICACIONES Y NORMAS DE LA ASOCIACION AMERICANA DE CARRETERAS ESTATALES Y OFICIALES PARA EL TRANSPORTE; POR SUS

SIGLAS EN INGLES “AASHTO” (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT OFFICIAL), EDICIÓN DEL AÑO 2003.

TRATAMIENTOS DE SUELO CON CAL, ASOCIACION NACIONAL DE FABRICANTES Y DERIBADOS (ANCADE), ABRIL 2005

www.ancade.es

SOIL STABILIZATION FOR PAVEMENTS, TECHNICAL MANUAL NO. 5-822-14. AIR FORCE MANUAL NO. 32-1019. HEADQUARTERS, DEPARTMENTS OF THE ARMY, AND THE AIR FORCE WASHINGTON, D.C. 25 OCTOBER 1994.

AVITIA, R.”SUELO CEMENTO”.INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO A.C., ASOCIACIÓN MEXICANA DE CAMINOS A.C.

MANUAL DE ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRANSITO; SUELOS ESTABILIZADOS CON CAL. MINISTERIO DE TRANSPORTE Y DE COMUNICACION DE LA REPUBLICA DEL PERU.

MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS, TOMADO DE LA SECRETARIA DE INTEGRACION ECONOMICA CENTROAMERICANA (SIECA) AÑO 2002.

Diccionarios.

ROBB, LOUIS A.; DICCIONARIO PARA INGENIEROS ESPAÑOL – INGLES E INGLES- ESPAÑOL; QUINTA REIMPRESION, MEXICO 2001.

6.4 ANEXOS.

6.4.1 ANEXO 1: Lista de Chequeo para Control de Laboratorio.

“CONTROL DE LABORATORIO PARA IDENTIFICACION DE MATERIALES, DETERMINACION DEL PORCENTAJE OPTIMO DE CAL Y CARACTERISTICAS DE COMPACTACION Y RESISTENCIA DE SUELOS PLASTICOS			
IDENTIFICACION DEL PROYECTO.			
Proyecto: _____	Técnico de Laboratorio: _____		
Ubicación del proyecto: _____	Laboratorio Responsable: _____		
Estacionamiento de muestreo: _____	Solicita: _____		
Profundidad del muestreo: _____	Tipo de muestreo: _____		
PARTE 1: IDENTIFICACION DEL MATERIAL.			
IDENTIFICACION DEL TIPO DE MATERIAL.			
I- Descripción e Identificación de Suelos (Procedimiento Visual-Manual) realizado en campo.			
1-Norma empleada:	ASTM D 2488	SI _____	NO _____
2-Tipo de suelo a muestrear, procedimiento visual manual:	_____		
Ficha de muestreos			
Proyecto		Profundidad de muestreo	
Número de muestreo		Lugar de muestreo	
Banco de material		Estacionamiento	
Tipo de muestreo		Descripción del material	

II-Muestreo del material.

1- Norma empleada: ASTM D 75 _____ AASHTO T 2 _____

2-Tipo de procedimiento empleado: _____

3-Condicion del material: Alterado SI _____ NO _____

Observaciones: _____

4-Cantidad de material muestreado en base al tamaño nominal del suelo:

Norma empleada	Tipo de ensayo	Cantidad de material mínimo
ASTM D 2488	Descripción e Identificación de Suelos (Visual-Manual)	5 lbs. + 3 lbs de testigo
ASTM D 4318 ó AASHTO T 89	Valor de límite líquido	1 lbs. + 1 bs de testigo
ASTM D 4318 ó AASHTO T 90	Valor de límite plástico he índice de plasticidad	1 lbs. + 1 bs de testigo
ASTM C 117 ó AASHTO T 11	Granulometría de material que pasa el tamiz No 200	2 lbs. + 2 lbs de testigo
ASTM C 136 ó AASHTO T 27	Granulometría de material que se retiene en el tamiz No 200	4 lbs. + 2 lbs de testigo
ASTM D 2974	Porcentaje de materia orgánica	1 lbs. + 1 lbs de testigo
AASHTO T 180 ó AASHTO T 99	Relación densidad/humedad del suelo	75 lbs. + 25 lbs de testigo
ASTM D3668 ó AASHTO T 193	Valor de Soporte de California (CBR)	75 lbs. + 25 lbs de testigo
ASTM D 5102 ó ASTM D 2166	Resistencia a La compresión simple	75 lbs. + 25 lbs de testigo
ASTM D 6276	Porcentaje óptimo de cal	1 lbs. + 1 lbs de testigo
ASTM D 75 ó AASHTO T 2	Muestreo de materiales en estado seco	Suma total 325 lbs.
ASTM D 75 ó AASHTO T 2	Muestreo de materiales en estado húmedo	Suelo total 500 lbs.

Nota: Para cada ensayo siguiente las muestras deben ser reducidas a tamaño de ensayo según la norma

ASTM C 702 _____ AASHTO T 248 _____

III-Determinación de la plasticidad del suelo.

1-Cantidad de muestra seleccionado para el ensayo (mínimo 4 lbs.) _____ lbs.

1-Limite Líquido.

1-Norma empleada: ASTM D 4318 _____ AASHTO T 89 _____

2-El equipo para el ensayo esta en condiciones: BUENAS _____ MALAS _____

3-El equipo usado cuenta con carta de calibración reciente: SI _____ NO _____

4-Para tomar la humedad inicial de la muestra se efectúo bajo el procedimiento:

4.1-Secado al horno SI _____ NO _____ %w: _____ Temperatura _____ °C

4.2-Con secado al ambiente SI _____ NO _____ %w _____

5-Puntos de prueba

1 _____ 3 _____ 5 _____ Otros _____ Observaciones: _____

6-Numero de golpes por punto registrados

1 _____ %w _____ 4 _____ %w _____

2 _____ %w _____ 5 _____ %w _____

3 _____ %w _____ 6 _____ %w _____

7-Valor Registrado de LL: _____ %

2-Limite plástico.

1-Norma empleada: ASTM D 4318 _____ AASHTO T 90 _____

3.2 Lavado usando un agente humectante: SI___ NO___ Tipo de agente:_____

4-Tamiz utilizado: No 200 SI___ NO___ Otro No_____

5-Condiciones del tamiz empleado: BUENAS___ MALAS___

6-Material húmedo retenido en la malla No 200.____g

7-Material seco retenido en la malla No 200____g

8-El procedimiento empleado para secar el material retenido en la malla No 200 fue por:

8.1 Secado al horno SI___ NO___

8.2 Otro procedimiento SI___ NO___

9- Porcentaje de material que se retiene en la malla No 200:_____g

10- Porcentaje de material que pasa la malla No 200:_____g

2- Análisis del material que se retiene en la malla No 200.

1-Norma empleada: ASTM C 136_____ AASHTO T 27 _____

1-Cantidad de muestra seleccionado para el ensayo (mínimo 6 lbs.)_____ lbs.

2-Se separan las gravas de las arenas antes del tamizado: SI___ NO___ Tamiz usado_____

3-Peso de la Fracción de grava____g Peso de la Fracción de Arenas____g

4-Se utiliza base y tapa en el juego de tamices: SI___ NO___

5-Procedimiento utilizado en el proceso del tamizado:

5.1-Tamizado mecánico SI___ NO___

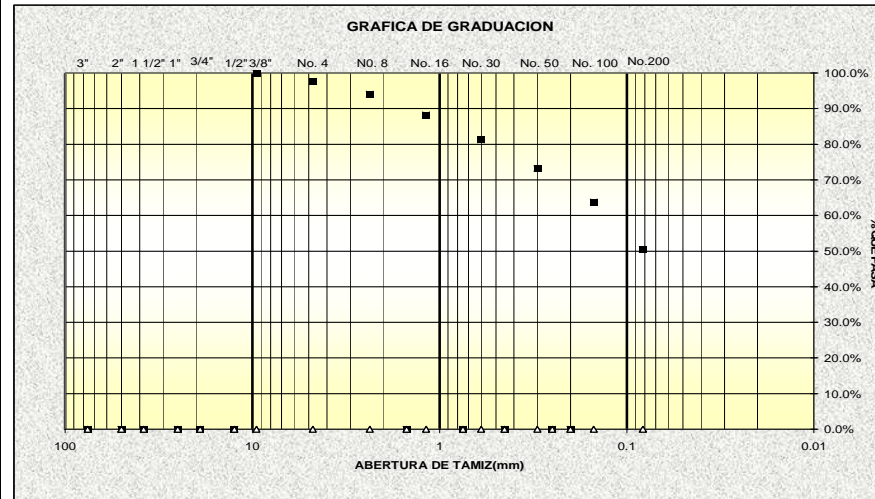
5.2-Tamizado manual SI___ NO___

6-Tiempo de tamizado: _____ min.

7-Tiempo de reposo luego del tamizado: _____ min.

8-Material que pasa en cada tamiz para formar el gráfico:

GRAVAS		ARENAS	
Tamiz	% Que pasa	Tamiz	% Que pasa
3pul.		No 4	
3/4 pul		No 8	
1/2 pul.		No 16	
3/8pul		No 30	
No 4		No50	
		No100	
		No200	
Suma		Suma	



V-Clasificación del material.

1-Norma empleada: ASTM D 2487 _____ AASHTO M 145 _____

2-Material que pasa el tamiz No 200: _____ g (lbs)

3-El Suelo es de grano Grueso SI _____ NO _____ Valor Limite AASHTO M 145: 35% para separar finos de gruesos

4-El Suelo es de grano Fino SI _____ NO _____ Valor Limite ASTM D 2487: 50% para separar finos de gruesos

5-Simbología de Grupo: ASTM D 2487 _____ AASHTO M 145 _____

6-Nombre de Grupo: ASTM D 2487 _____ AASHTO M 145 _____
7-Tipo de material: ASTM D 2487 _____ AASHTO M 145 _____
8- Índice de grupo: _____

PARTE 2: DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE CAL OPTIMO.

I- Porcentaje de materia orgánica (1% máximo recomendado).

1-Norma empleada: ASTM D 2974 SI _____ NO _____
2-Cantidad de muestra seleccionado para el ensayo (mínimo 2 lbs.): _____ lbs.
3-Método empleado para la humedad:
 3.1 Método “A” Usando únicamente horno a T°C 105±5 SI___ NO___
 3.2 Método “B” Usando un secado al aire y luego horno a T°C 105±5 SI___ NO___
4-Método empleado para el contenido de ceniza
 4.1 Método “C” SI___NO___ Temperatura a 440°C
 4.2 Método “D” SI___NO___ Temperatura a 750°C
5-Resultado de Humedad de la muestra: _____ %
6-Porcentaje de ceniza: _____ %
7-Contenido de orgánico: _____ %

II- Porcentaje optimo de cal.

1-Norma empleada: ASTM D 6276 SI _____ NO _____

2-Cantidad de muestra seleccionado para el ensayo (mínimo 2 lbs.): _____ lbs.

3-Se tamizo el material en la malla No 40 antes del ensayo: SI _____ NO _____ Otro _____

4-Se utilizó contador de pH (pHchimetro) SI _____ NO _____

Tipo: _____

5-Se calibró el contador de pH SI _____ NO _____ Observación: _____

6-Tipo de solución Búfer utilizada en la calibración de Contador de pH:

pH 4	SI _____	NO _____	pH 10	SI _____	NO _____
pH 7	SI _____	NO _____	pH 12	SI _____	NO _____

7-Se utilizó según norma una muestra de: 25g SI _____ NO _____

8-Se utilizó según norma 100ml de agua SI _____ NO _____

9-Porcentaje de cal empleado por punto de análisis:

1% _____	4% _____	7% _____	10% _____
2% _____	5% _____	8% _____	11% _____
3% _____	6% _____	9% _____	12% _____

10-Se cumple el tiempo de mezclado del material según norma durante 30s cada 10min. durante un hora.
SI _____ NO _____ Observación: _____

11-Valores registrados de pH por mezcla Suelo-cal-agua:

1 _____	3 _____	5 _____	7 _____	9 _____	11 _____
2 _____	4 _____	6 _____	8 _____	10 _____	12 _____

13-Porcentaje óptimo de Cal, en el que se cumple la relación de pH 12.4 según norma: _____%

III-Proceso alternativo para determinar el porcentaje optimo de cal usando los tradicionales

Limites de Atterberg.

1-Norma empleada: ASTM D 4318 _____ AASHTO T 89 y T-90 _____

2-Cantidad de muestra seleccionado para el ensayo (mínimo 5lbs.): _____ lbs.

Nota: Se busca bajar la plasticidad del suelo hasta un valor menor, en donde el limite de plasticidad sea no practicable(NP) ó hasta obtener un IP menor de 5% en mezclas de suelo-cal, preparadas según la norma ASTM D 6276.

Mezcla 1: % de cal empleado: _____ Valor de IP: _____ %

Mezcla 2: % de cal empleado: _____ Valor de IP: _____ %

Mezcla 3: % de cal empleado: _____ Valor de IP: _____ %

Mezcla 4: % de cal empleado: _____ Valor de IP: _____ %

Mezcla 5: % de cal empleado: _____ Valor de IP: _____ %

Mezcla 5: % de cal empleado: _____ Valor de IP: _____ %

Mezcla 7: % de cal empleado: _____ Valor de IP: _____ %

3-Se cumple la relación de IP según lo apreciado

PARTE 3: ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE ESTABILIDAD DEL SUELO.

Nota: Para cada ensayo siguiente las muestras deben ser reducidas a tamaño de ensayo según la norma

ASTM C 702 _____ AASHTO T 248 _____

I-Relación Densidad/Humedad del suelo(Próctor).

1-Norma empleada: AASHTO T 99 _____ AASHTO T-180 _____

2-Cantidad de muestra seleccionado para el ensayo (mínimo 100 lbs.): _____ lbs.

3-Tamiz utilizado para seleccionar la muestra de ensayo:

3.1 Tamiz No 4 SI _____ NO _____ % Retenido _____

3.2 Tamiz 3/4" SI _____ NO _____ % Retenido _____

4-Método seleccionado A _____ B _____ Si menos del 40% del material se retiene en la malla No 4.

5-Método seleccionado C _____ D _____ Si menos del 30% del material se retiene en la malla 3/4".

6-Diámetro del molde utilizado: _____ Numero de capas: _____ Golpes por capa: _____

7-Puntos de análisis(Según norma se recomiendan 5 puntos mínimo): _____

8-Peso de material por punto(3Kg máximo):

1 _____ lbs.(Kg.) 4 _____ lbs.(Kg.)

2 _____ lbs.(Kg.) 5 _____ lbs.(Kg.)

3 _____ lbs.(Kg.) 6 _____ lbs.(Kg.)

9-El equipo utilizado en la compactación esta en condiciones:

BUENAS _____ MALAS _____ Observaciones: _____

10-Peso del molde: _____ Kg.

11- Todo el equipo empleado para el ensayo esta debidamente calibrado: SI _____ NO _____

12-Volumen del molde: _____ m³

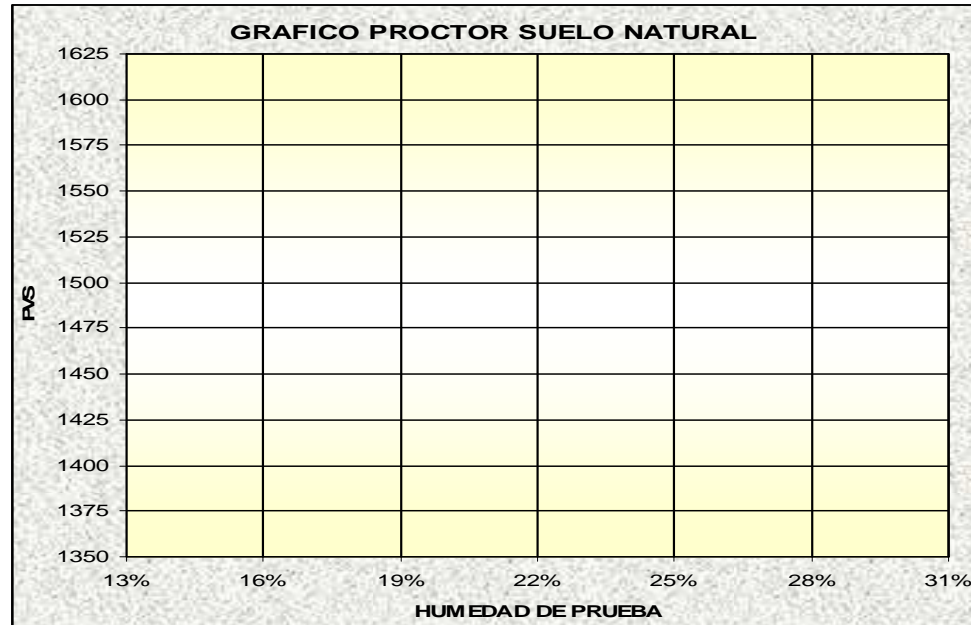
13-Peso del martillo utilizado: _____ lb.

14-Peso volumétricos secos máximos determinados por puntos de análisis:

1 _____ Kg/m³ 4 _____ Kg/m³

2 _____ Kg/m³ 5 _____ Kg/m³

3 _____ Kg/m³ 6 _____ Kg/m³



15- Porcentaje óptimo de agua: _____ % según norma ASTM D 2216 _____ AASHTO T 265 _____

PVSmax. _____ Kg/m³

II-Valor de Soporte de California CBR

1-Norma empleada: ASTM D 3668 _____ AASHTO T-193 _____

2-Cantidad de muestra seleccionado para el ensayo (mínimo 100 lbs.): _____ lbs.

Nota: se debe usar los mismos parámetros del próctor utilizado para la compactación de los puntos.

3-El proceso de humedecimiento del material se efectuó en material

3.1-Con Secado al horno SI _____ NO _____ %w _____

3.2-Con secado al ambiente SI _____ NO _____ %w _____

4-El equipo utilizado en la compactación está en condiciones:

BUENAS _____ MALAS _____ Observaciones: _____

4.1 Todo el equipo empleado para el ensayo esta debidamente calibrado: SI _____ NO _____

5-Numero de especimenes compactados y cantidad de golpes:

Capas utilizadas: _____ Peso de martillo: _____ Próctor: _____

1 10 Golpes _____ Otros 1 _____ Golpes

2 25 Golpes _____ 2 _____ Golpes

3 56 Golpes _____ 3 _____ Golpes

6-Se controlan los pesos de los especimenes después de la compactación: SI _____ NO _____

7-Se controlan los pesos de los especimenes antes y después de la penetración: SI _____ NO _____

8-Tiempo de saturación por espécimen:

8.1- 96 horas (4días) SI _____ NO _____

8.2 - Otro tiempo de saturación: _____ horas (días).

9-Se efectuó el registro de los hinchamientos: SI _____ NO _____

10-Se controló el tiempo de escurrimiento luego del periodo de saturación(15minutos recomendado)

SI _____ NO _____ Otro tiempo _____ min.

11-Velocidad de penetración: _____/min.

Nota: El CBR es generalmente seleccionado a 2.54mm (0.10pulg.) cuando la penetración a 5.08mm (0.20pulg.) es menor, si se da lo contrario el ensayo se vuelve realizar. Si el reensayo da un resultado similar, la relación a 5.08mm se usará.

12- CBR a 0.10pulg. > CBR 0.20pulg: SI___

NO__ Observación: _____

13- CBR a 0.10 pulg. < CBR 0.20pulg: SI___

NO__ Observación: _____

14- Valor de CBR: _____%

III-Resistencia a la compresión simple.

1-Norma empleada: ASTM D 5102 (Suelo-cal) _____ ASTM T-2166(Suelo Sin cal) _____

2-Cantidad de muestra seleccionado para el ensayo (mínimo 100 lbs.): _____ lbs.

Nota: se debe usar los mismos parámetros del próctor utilizado para la compactación de los puntos

3-Método utilizado:

3.1 Procedimiento "A" (Relación altura/diámetro de 2.0-2.5) SI___ NO___

3.2 Procedimiento "B" (Utilizando el molde del próctor utilizado) SI___ NO___

4- Capas utilizadas: _____ Peso de martillo: _____ Próctor: _____ Humedad óptima: _____

5-Edades de prueba utilizadas(Recomendadas según norma 7, 28 y 90días):

3días___ 7días___ 14días___ 28días___ 56días___ 90días

6-El curado se efectuó bajo condición:

6.1-Curado Estándar: SI___ NO___

6.2-En bolsa de plástico: SI____ NO____

4-Otro: SI____ NO____

Observación: _____

5-Numero de especimenes utilizados para fecha de prueba (Recomendado por norma 2):

2 Especimenes SI____ NO____

3-Especimenes SI____ NO____

6-Valores de Esfuerzos por fecha de prueba:

3dias____ 7dias____ 14dias____ 28dias____ 56dias____ 90dias____

IV-Se han realizados otros ensayos para identificación del material.

1-Índice de Expansión. Norma ASTM D 4829 SI____ NO____ Valor:_____

2-Limite de Contracción. Norma ASTM D 427 SI____ NO____ Valor:_____

4-Otro Norma ASTM SI____ NO____ Valor:_____

6.4.2 ANEXO2: Lista de Chequeo para Control de Campo.

CHECKLIST “PROCESO CONSTRUCTIVO Y CONTROL DE CALIDAD DE CAPA SUELO-CAL”.			
	SI	NO	Observaciones
CONSIDERACIONES PREVIA AL PROCESO CONSTRUCTIVO.			
1. El suelo cuenta con los estudios pertinentes; y verificar así que es apto para ser estabilizado con cal.	_____	_____	_____
2. El tipo de cal a utilizar es " Cal Hidratada".	_____	_____	_____
3. Se ha determinado la cantidad correcta de cal a utilizar en la estabilización, en base a la formula de trabajo.	_____	_____	_____
4- Humedad de compactación empleado (+2% arriba del óptimo).	_____	_____	_____
5- Se cumple con el Porcentaje de compactación especificado.	_____	_____	_____
6- Se cumple con el Porcentaje óptimo de cal según el diseño.	_____	_____	_____
7- Se cumple con el número total de bolsas calculado en el diseño.	_____	_____	_____
8- El valor de pH calculado en campo a la mezcla suelo-cal es adecuado.	_____	_____	_____
9- Se utiliza la Fenolftaleina para control de espesor de la capa a estabilizar.	_____	_____	_____
CONSIDERACIONES A TOMAR EN CUENTA EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO.			
1. Se cumple con las dimensiones del tramo en cuanto a longitud y ancho, ocupados para la determinación de la cantidad de cal en la formula de trabajo.	_____	_____	_____
2. Se verifico el funcionamiento del equipo a utilizar, funciona adecuadamente	_____	_____	_____

	SI	NO	Observaciones
7. La cantidad de cal colocada cumple con la determinada en el diseño de la mezcla suelo-cal, para este tipo de suelo en particular.	_____	_____	_____
8. El extendido de la cal se realiza adecuadamente.	_____	_____	_____
9. El volumen de cal empleado corresponde al tramo a estabilizar.	_____	_____	_____
10. El mezclado del suelo con la cal se realiza hasta la profundidad adecuada.	_____	_____	_____
11. El proceso de mezclado es adecuado, a fin de generar una mezcla homogénea completamente.	_____	_____	_____
12. Se determino la humedad a la mezcla suelo-cal generada en campo.	_____	_____	_____
13. La humedad de la mezcla suelo-cal en campo, cumple con la humedad optima determinada en laboratorio previamente para esta mezcla.	_____	_____	_____
14. El espesor de la capa suelo-cal es compatible con el rendimiento del equipo compactador utilizado.	_____	_____	_____
15. Se ha generado una compactación adecuada a la capa suelo-cal.	_____	_____	_____
16. Se contó con un orden adecuado para la realización de toda las actividades concernientes al proceso constructivo.	_____	_____	_____
17. Se contó con el equipo adecuado para realizar del proceso constructivo de la mezcla suelo-cal.	_____	_____	_____
18. El funcionamiento del equipo ocupado en el proceso constructivo de la mezcla suelo-cal fue adecuado.	_____	_____	_____

	SI	NO	Observaciones
19. El manejo del equipo ocupado en el proceso constructivo de la mezcla suelo-cal fue adecuado por parte de los operadores.	_____	_____	_____
20. Las condiciones ambientales fueron las adecuadas para realizar el proceso constructivo de la capa suelo-cal.	_____	_____	_____
CONSIDERACIONES A TOMAR EN CUENTA EN EL CONTROL DE LA CALIDAD.			
1. Se determino la humedad antes de la compactación.	_____	_____	_____
2. Se determino el grado de compactación a la capa suelo-cal	_____	_____	_____
3. Se cuenta con el equipo adecuado para la determinación del grado de compactación de la capa suelo-cal	_____	_____	_____
4. Se determino el valor de pH en campo mediante el uso de "papel tornasol"	_____	_____	_____
5. Los resultados de pH en campo fueron satisfactorios	_____	_____	_____

6.4.3 ANEXO 3: “Tablas completa para control de compresión simple”.

Tabla ANEXA 1						Compresión simple Inconfinada de Suelo Natural.								
Método de compactación	Tipo de curado	Fecha elaboración	Fecha ruptura	# Probeta	Edad	Humedad de compactación, %	Peso, g	Alto, cm	Diámetro, cm	Peso volumétrico, g/cm ³	Área, cm ²	Resistencia a la compresión, Kn	Esfuerzo, Kg/cm ²	Esfuerzo Promedio, Kg/cm ²
AASHTO T-180	Estándar	3/7/8	7/7/8	1A	3días	21.0	1844	11.50	9.91	2.1	77.1	8.5	11.2	11.1
				1A		21.0	1812	11.51	9.90	2.0	77.0	8.4	11.1	
	Estándar	3/7/8	10/7/8	1B	7días	21.0	1650	11.52	9.88	1.9	76.7	8.7	11.6	11.3
				1B		21.0	1648	11.52	9.90	1.9	77.0	8.3	11.0	
	Estándar	3/7/8	31/8/8	1C	28días	21.0	1526	11.52	9.80	1.8	75.4	9.8	13.2	13.2
				1C		21.0	1518	11.49	9.91	1.7	77.1	10.0	13.2	
	Estándar	3/7/8	1/10/8	1D	90días	21.0	1498	11.50	9.91	1.7	77.1	9.7	12.8	12.7
				1D		21.0	1482	11.50	9.90	1.7	77.0	9.5	12.6	
AASHTO T-99	Estándar	28/7/8	31/7/8	2A	3días	24.0	1756	11.50	9.90	2.0	77.0	6.5	8.6	8.4
				2A		24.0	1700	11.51	9.90	1.9	77.0	6.1	8.1	
	Estándar	28/7/8	5/8/8	2B	7días	24.0	1624	11.50	9.91	1.8	77.1	7.2	9.4	9.3
				2B		24.0	1612	11.50	9.93	1.8	77.4	6.9	9.1	
	Estándar	16/7/8	13/8/8	2C	28días	24.0	1586	11.49	9.90	1.8	77.0	7.3	9.6	9.4
				2C		24.0	1591	11.49	9.91	1.8	77.1	7.0	9.3	
	Estándar	12/7/8	10/10/8	2D	90días	24.0	1452	11.49	9.90	1.6	77.0	6.9	9.1	9.2
				2D		24.0	1477	11.49	9.89	1.7	76.8	7.0	9.3	

Nota: Los edades de los especimenes se refieren a días efectivos de curado, comenzando el día desde la hora del proceso de compactación y finalizar transcurridas las 24 horas para tener un día completo de curado.

Tabla ANEXA 2

Compresión simple Inconfinada de Suelo-Cal.

Método de compactación	Tipo de Curado	Fecha elaboración	Fecha ruptura	# Probeta	Edad	Humedad de compactación, %	Peso, g	Alto, cm	Diámetro, cm	Peso volumétrico, g/cm ³	Área, cm ²	Resistencia a la compresión, Kn	Esfuerzo, Kg/cm ²	Esfuerzo Promedio, Kg/cm ²
AASHTO T-180	Estándar	3/7/8	7/7/8	3A	3días	23.0	1853	11.50	9.90	2.1	77.0	5.2	6.9	6.6
				3A		23.0	1813	11.51	9.90	2.0	77.0	4.8	6.4	
	Estándar	3/7/8	10/7/8	3C	7días	23.0	1548	11.53	9.92	1.7	77.3	7.4	9.7	9.7
				3C		23.0	1558	11.52	9.92	1.7	77.3	7.4	9.7	
	Estándar	3/7/8	31/8/8	3E	28días	23.0	1498	11.53	9.91	1.7	77.1	12.4	16.4	16.8
				3E		23.0	1495	11.50	9.92	1.7	77.3	13.1	17.3	
	Estándar	3/7/8	1/10/8	3G	90días	23.0	1488	11.5	9.90	1.7	77.0	18.7	24.8	25.1
				3G		23.0	1470	11.51	9.89	1.7	76.8	19.1	25.3	
AASHTO T-99	Estándar	28/7/8	31/7/8	4A	3días	25.0	1789	11.51	9.90	2.0	77.0	4.1	5.4	5.5
				4A		25.0	1795	11.50	9.91	2.0	77.1	4.2	5.6	
	Estándar	28/7/8	5/8/8	4C	7días	25.0	1512	11.50	9.94	1.7	77.6	6.6	8.7	8.7
				4C		25.0	1502	11.52	9.92	1.7	77.3	6.6	8.7	
	Estándar	16/7/8	13/8/8	4E	28días	25.0	1498	11.42	9.94	1.7	77.6	9.2	12.0	12.0
				4E		25.0	1456	11.45	9.92	1.6	77.3	9.0	11.9	
	Estándar	12/7/8	10/10/8	4G	90días	25.0	1426	11.50	9.90	1.6	77.0	13.0	17.2	17.3
				4G		25.0	1432	11.49	9.90	1.6	77.0	13.1	17.3	

Nota: Los edades de los especimenes se refieren a días efectivos de curado, comenzando el día desde la hora del proceso de compactación y finalizar transcurridas las 24 horas para tener un día completo de curado.

