



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**INCIDENCIA DEL CEMENTO PORTLAND ANHIDRO Y PREHIDRATADO PARA EL
MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO PARA LA
UTILIZACIÓN EN BASE Y SUBBASE DE CARRETERAS**

Kenneth Francis Figueroa Estrada

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, octubre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INCIDENCIA DEL CEMENTO PORTLAND ANHIDRO Y PREHIDRATADO PARA EL
MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO PARA LA
UTILIZACIÓN EN BASE Y SUBBASE DE CARRETERAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KENNETH FRANCIS FIGUEROA ESTRADA
ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

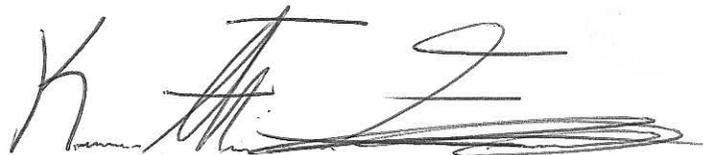
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Carmen Marina Mérida Alva
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Wuilliam Ricardo Yon Chavarria
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

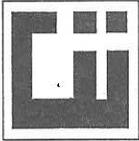
En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**INCIDENCIA DEL CEMENTO PORTLAND ANHIDRO Y PREHIDRATADO PARA EL
MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO PARA LA
UTILIZACIÓN EN BASE Y SUBBASE DE CARRETERAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha 8 de julio de 2013.



Kenneth Francis Figueroa Estrada



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala, julio de 2014

Ingeniero

Guillermo Francisco Melini Salguero

Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Ingeniero Melini

Luego de un breve saludo, sírvame la presente para informarle que el trabajo de graduación **"INCIDENCIA DEL CEMENTO PORTLAND ANHIDRO Y PRE-HIDRATADO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO PARA LA UTILIZACIÓN EN BASE Y SUB-BASE DE CARRETERAS"**, elaborado por el alumno Kenneth Francis Figueroa Estrada, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular me despido.

Atentamente,

OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO No 6842


Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez
Colegiado 6842
Jefe de la Sección de Mecánica de Suelos



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
22 de agosto de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **INCIDENCIA DEL CEMENTO PORTLAND ANHIDRO Y PRE-HIDRATADO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO PARA LA UTILIZACIÓN EN BASE Y SUB-BASE DE CARRETERAS**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil **Kenneth Francis Figueroa Estrada**, quien contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

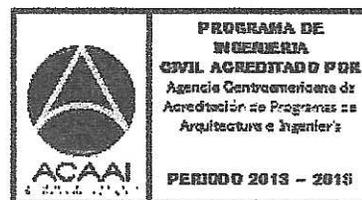
Guillermo Melini

Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.
Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Kenneth Francis Figueroa Estrada, titulado INCIDENCIA DEL CEMENTO PORTLAND ANHIDRO Y PRE-HIDRATADO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO PARA LA UTILIZACIÓN EN BASE Y SUB-BASE DE CARRETERAS, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Hugo Leonel Montenegro Franco
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco **DIRECTOR**
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, octubre 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **INCIDENCIA DEL CEMENTO PORTLAND ANHIDRO Y PREHIDRATADO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO PARA LA UTILIZACIÓN EN BASE Y SUBBASE DE CARRETERAS**, presentado por el estudiante universitario: **Kenneth Francis Figueroa Estrada**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, octubre de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Mario Figueroa y Verónica Estrada. Por brindarme la vida e incondicional apoyo durante la carrera.
Mis hermanos	Adler, Wendy y Javier Figueroa Estrada. Por el apoyo fraternal e influencia en mi carrera.
Mi prometida	Ana Guzmán. Por enseñarme que la vida se vive mejor cuando se ama.
Mis abuelas	Rosa Amparo y Celinda López (q.e.p.d.). Por enseñarme ser las profesoras del amor e inspiración dar todo por la vida.
Mis abuelos	Antonio Figueroa y Salvador Estrada. Por enseñarme la perseverancia y superación, con humildad y orgullo guatemalteco.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser importante influencia de principios universitarios.
Facultad de Ingeniería	Por ser la que me brindó academia para la vida
Mis amigos	Por brindarme su amistad incondicional y quienes juntos, a pesar de las dificultades, logramos culminar el <i>pensum</i> curricular.
Mario Maldonado	Por invitarme a involucrarme en el Laboratorio de Mecánica de Suelos
Ing. Omar Enrique Medrano, José Istupe y Byron García	Por aceptarme como aprendiz en la Sección de Mecánica de Suelos, y permitirme desarrollar la capacidad, no solo como laboratorista, sino como analista de laboratorio y así poder elaborar un trabajo de graduación de la mejor manera.
Mario Pacay y Leonel Moran	Apoyarme en la ejecución de los ensayos de laboratorio necesarios para el trabajo de graduación.

	1.1.3.2.	Finura	8
	1.1.3.3.	Pérdida por calcinación	9
	1.1.3.4.	Resistencia a la compresión.....	9
1.2.		Suelos granulares	10
	1.2.1.	Comportamiento de los suelos granulares	10
		1.2.1.1. Concepto de tensión efectiva	11
		1.2.1.2. Condición de drenaje	11
	1.2.2.	Influencia del tamaño	12
	1.2.3.	Influencia de la forma y de las características mineralógicas	14
1.3.		Subbases y bases	15
	1.3.1.	Definiciones.....	15
	1.3.2.	Especificaciones en la construcción	17
		1.3.2.1. Calidad de los materiales	17
		1.3.2.2. Requisitos para ejecución	18
	1.3.3.	Problemáticas y soluciones	18
		1.3.3.1. Estabilización física	18
		1.3.3.2. Estabilización química.....	19
1.4.		Estabilización tipo suelo cemento	20
	1.4.1.	Definición.....	20
	1.4.2.	Proceso constructivo	21
		1.4.2.1. Almacenamiento del conglomerante	21
		1.4.2.2. Preparación del suelo.....	22
		1.4.2.3. Cribas y máquinas despedregadoras...22	
		1.4.2.4. Maquinaria para la disgregación, escarificación o aireación del suelo.....	23
		1.4.2.5. Humectación y distribución del conglomerante.....	23

	1.4.2.5.1.	Humectación del suelo.....	24
	1.4.2.5.2.	Control de la dosificación.....	24
	1.4.2.6.	Mezcla <i>in situ</i>	25
	1.4.2.7.	Compactación.....	25
	1.4.2.8.	Refino de la superficie	26
	1.4.2.9.	Curado y protección.....	26
	1.4.3.	Ventas y desventajas.....	27
2.		estudio de las características y propiedades de los suelos granulares y del cemento portland	31
2.1.		Descripción de las muestras de suelo	31
	2.1.1.	Granulometría (ASTM D 6913-04).....	32
	2.1.2.	Límites de Atterberg (AASHTO T 89-10 y AASHTO T 90-00)	33
	2.1.3.	Proctor Modificado (AASHTO T 180-01)	33
	2.1.4.	Permeabilidad (ASTM D 2434-00).....	34
	2.1.5.	CBR (Valor Soporte California AASHTO T 193- 99)	35
2.2.		Características del cemento Portland utilizado.....	38
	2.2.1.	Resistencia a la compresión (ASTM C 109-13)	39
	2.2.2.	Determinación de finura (ASTM C 430-08).....	41
	2.2.3.	Porcentaje de humedad (ASTM D 2974-07).....	42
	2.2.4.	Análisis químico del cemento hidráulico, calcinación (ASTM C 114-00)	43
	2.2.5.	Peso específico (ASTM C 188-09)	43
2.3.		Estudios de la estabilización de suelo cemento	44
	2.3.1.	Relación humedad masa unitaria de probetas de suelo cemento (ASTM D 558-96)	46

2.3.2.	Ensayo de durabilidad al desgaste por humedecimiento y secado de muestras de suelo cemento (ASTM D 559-96).....	47
2.3.3.	Resistencia a la compresión no confinada de probetas de suelo cemento (ASTM D 1663-00)	50
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
3.1.	Resultados de laboratorio	55
3.1.1.	Estabilización con cemento prehidratado	61
3.2.	Comparación de resultados	63
3.2.1.	Relación humedad masa unitaria	64
3.2.2.	Humedecimiento y secado	67
3.2.3.	Resistencia a la compresión.....	69
3.2.4.	Permeabilidad	78
	CONCLUSIONES.....	81
	RECOMENDACIONES	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87
	APÉNDICES.....	89
	ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Peso específico.....	8
2.	Ensayo fineza de tamiz N° 325	9
3.	Ensayo a compresión.....	10
4.	Fases de un suelo en estado natural y porciones de las 3 fases.	11
5.	Estado de distribución de esfuerzos según PCA	28
6.	Fotografía de la muestra de arena limosa color beige rosa	31
7.	Fotografía de la muestra arena pómez color gris	32
8.	Ensayo Proctor Modificado	34
9.	Fase de penetración de ensayo CBR.....	35
10.	Gráfico porcentaje de CBR <i>versus</i> porcentaje de compactación	36
11.	Gráfico porcentaje de CBR <i>versus</i> porcentaje de compactación	37
12.	Cemento prehidratado.....	38
13.	Flujo del cemento anhidro.....	39
14.	Suelo estabilizado con cemento anhidro.....	45
15.	Probetas de suelo cemento al finalizar el ensayo de humedecimiento y secado.....	48
16.	Etapa de 5 horas de inmersión previa a colocarlo en horno 48 horas.....	49
17.	Ensayo a compresión no confinada de probetas suelo cemento	50
18.	Falla de una probeta de arena limosa color beige rosa estabilizada con cemento prehidratado.....	51
19.	Gráfica de resultados relación humedad masa unitaria de la arena limosa color beige rosa	64

20.	Gráfica de resultados relación humedad-masa unitaria de la arena pómez color gris.....	66
21.	Gráfica de comparación humedad y secado de la arena limosa color beige rosa	67
22.	Gráfica de comparación humedad y secado de la arena pómez color gris	68
23.	Efecto visual de utilizar cemento pre-hidratado en la arena limosa color beige rosa	70
24.	Ábaco para estimar el número estructural de la base granular “a2”	71
25.	Ábaco para estimar el número estructural de la subbase granular “a3”	72
26.	Ábaco para estimar el número estructural de la base/subbase estabilizada con cemento.	73
27.	Porcentaje de pérdida de aporte estructural según el porcentaje de cemento en la arena limosa beigerosa.	75
28.	Porcentaje de pérdida de aporte estructural según el porcentaje de cemento en la arena pómez color gris	77

TABLAS

I.	Clasificación de los suelos según distintas organizaciones	14
II.	Resultados de ensayo de CBR de arena limosa color beigerosa	36
III.	Resultados de ensayo de CBR de arena pómez limosa color gris	37
IV.	Promedio de resultados de resistencia a compresión de cemento anhidro.....	40
V.	Promedio de resultados de resistencia a compresión de cemento prehidratado.....	41
VI.	Resultados del ensayo de finura usando tamiz núm. 325 (45 µm)	42
VII.	Resultados de porcentaje de humedad del cemento	42

VIII.	Resultados de porcentaje de carbonatos por pérdida de calcinación	43
IX.	Resultados de peso específico	43
X.	Requerimientos típicos para varios grupos de suelos de acuerdo a la ACI 230.1R-90.....	45
XI.	Resultados de relación humedad-masa unitaria 1	46
XII.	Resultados de relación humedad-masa unitaria 2	47
XIII.	Resultados de desgaste por humedecimiento y secado	48
XIV.	Resultados de desgaste por humedecimiento y secado	49
XV.	Resultados de resistencia a compresión no confinada del cemento anhidro, de la arena limosa color beige rosa.....	51
XVI.	Resultados de resistencia a compresión no confinada del cemento prehidratado, de la arena limosa color beige rosa.....	52
XVII.	Resultados de resistencia a compresión no confinada del cemento anhidro, de la arena pómez color gris	53
XVIII.	Resultados de resistencia a compresión no confinada del cemento prehidratado, de la arena pómez color gris	54
XIX.	Requisitos exigidos para uso de material en suelo cemento. Norma ACI-230.1R-90	56
XX.	Requisitos para los materiales a estabilizar con suelo cemento, según la Dirección General de Caminos de Guatemala	56
XXI.	Criterio de la PCA para ensayos de humedecimiento y secado o congelamiento-descongelamiento, ensayo de durabilidad.....	57
XXII.	Rango de esfuerzo para compresión no confinada de suelo cemento	58
XXIII.	Requisitos para los materiales estabilizados cemento, según la Dirección General de Caminos de Guatemala	58
XXIV.	Verificación de resistencia a compresión de la arena limosa color beige rosa estabilizada con cemento anhidro	59

XXV.	Verificación resistencia de la arena pómez color gris estabilizada con cemento anhidro	59
XXVI.	Verificación de porcentaje de desgaste por humedecimiento y secado de la arena limosa color beige rosa estabilizado con cemento anhidro	60
XXVII.	Verificación de porcentaje de desgaste por humedecimiento y secado de la arena pómez color gris estabilizado con cemento prehidratado.....	60
XXVIII.	Chequeo de resistencia a compresión no confinada de la arena limosa color beige-rosa estabilizada con cemento prehidratado	61
XXIX.	Chequeo de cumplimiento de resistencia a compresión no confinada del cemento prehidratado, de la arena pómez color gris.....	62
XXX.	Chequeo porcentaje de desgaste por humedecimiento y secado de la arena limosa color beige rosa estabilizado con cemento prehidratado	62
XXXI.	Verificación de cumplimiento de porcentaje de desgaste por humedecimiento y secado de la arena pómez color gris estabilizado con cemento prehidratado.....	63
XXXII.	Comparación de resultados relación humedad masa unitaria de la arena limosa color beige rosa.....	64
XXXIII.	Comparación de resultados relación humedad masa unitaria de la arena pómez color gris	65
XXXIV.	Aporte estructural para base y subbase de los distintos estados de la arena limosa color beige rosa	74
XXXV.	Aporte estructural para base y subbase de los distintos estados de la arena pómez color gris oscuro.....	74

XXXVI.	Comparación de aporte estructural entre el tipo de cemento utilizado de la arena limosa color beige rosa	75
XXXVII.	Comparación de aporte estructural entre el tipo de cemento utilizado de la arena pómez color gris	76
XXXVIII.	Comparación de resultados de permeabilidad de los suelos estabilizados con suelo cemento	78
XXXIX.	Comparación de resultados de permeabilidad de los suelos estabilizados con suelo cemento	79

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a_n	Aporte estructural
cm	Centímetro
m_n	Coefficiente de drenaje
C	Compactación
ρ	Densidad
Dr	Densidad relativa
Δ	Diferencia
CO₂	Dióxido de carbono
SiO₂	Dióxido de silicio
D_n	Espesor de capa
°C	Grados Celsius
IP	Índice de plasticidad
kg	Kilogramo
Kpa	Kilopascal
KW	Kilovatios
lb	Libra
psi	Libra por pulgada cuadrada
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
Mpa	Megapascal
m	Metro
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico

μ	Micrómetro
mm	Milímetro
min	Minuto
SN	Número estructural
CaO	Óxido de calcio
CO	Óxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrógeno
O₂	Oxígeno
PUS	Peso Unitario Seco
ft	Pie
%	Porcentaje
H%	Porcentaje de humedad
in	Pulgada
e	Relación de vacíos
rev	Revoluciones
Al₂O₃	Trióxido de dialuminio
Fe₂O₃	Trióxido de dihierro
BTU	Unidades térmica británica
CBR	Valor Soporte California

GLOSARIO

Anhidro	Se dice de los cuerpos cuya composición no entra el agua, o que han perdido la que tenían.
Aporte estructural	De acuerdo al Método AASHTO-93 es función de su módulo elástico, el cual a su vez es función directa del estado total de esfuerzos al que está sometido el material.
Base	Es una capa intermedia entre la subbase y la carpeta del pavimento, generalmente constituida por agregados pétreos convenientemente graduados y compactados, pudiendo contener además un agente estabilizador.
Calcinación	Proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química.
Cemento	Es una mezcla de calizas y arcillas pulverizadas a grandes temperaturas, con adición de yeso que al entrar en contacto con el agua, desarrolla la capacidad de unir fragmentos de grava y arena, para formar un sólido único o piedra artificial, conocida como concreto hidráulico.

Cemento prehidratado	Cemento almacenado que contrae moléculas de agua que forman reacciones en el cemento no deseadas.
Compactación	Conjunto de procesos mecánicos que provoca la disminución del espesor del primitivo sedimento y la reducción de la porosidad.
Conglomerante	Material capaz de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión al conjunto mediante reacciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos.
<i>Clinker</i>	Sustancia que se obtiene como resultado de la calcinación en horno, de mezclas calizas arcillosa preparadas artificialmente con adición eventual de otras materias.
Cribas	Equipo que realiza el proceso de separación y elección del tamaño idóneo de los agregados pétreos.
Curado	Acción de mantener las condiciones ideales de reacción del cemento para que complete su endurecimiento durante 7 días mínimo.

Deformabilidad	Movimientos producidos por esfuerzos mecánicos sometidos a un sistema adhesivo/adherente, provocando deformación de éste, sin pérdida de cohesión.
Desaglomeradores	Sistemas integrados para controlar el tamaño de partículas y rompimiento de grumos indeseables.
Despedregar	Movimiento de rocas de tamaño no adecuado para un pavimento.
Estabilización	Proceso por el cual se agrega material para mejorar las características físicas y mecánicas.
Explanadas	Espacio de terreno llano o allanado.
Grumo de cemento	Consolidación de polvo de cemento.
Hidratación	Adición de una o más moléculas de agua a un determinado compuesto.
Higroscopia	Capacidad de algunas sustancias de absorber humedad del medio circundante.
Mineralogía	Rama de la geología que estudia las propiedades físicas y químicas de los minerales que se encuentran en el planeta.

Número estructural	Capacidad de un pavimento de resistir cargas, que está en función del aporte estructural, los espesores de las capas de material y coeficientes de drenaje.
Permeabilidad	Capacidad de un material de permitirle que un flujo lo atraviese sin alterar su estructura interna.
Preconizar	Proponer, recomendar o apoyar un procedimiento, una medida por considerarlo bueno o adecuado para un determinado fin.
Subbase	Es una capa, generalmente constituida por agregados pétreos convenientemente graduados y compactados, constituida sobre la sub-rasante y sobre la cual puede construirse la base cuando sea necesaria.
Suelo cemento	Mezcla de suelo y una proporción de cemento portland y agua, compactados para proporcionar mayor densidad.

RESUMEN

El tratamiento adecuado de los suelos para intensificar sus propiedades físicas y mecánicas resulta necesario en obras de carreteras. Ya que en algunas regiones del país se presentan suelos que no son aptos para dicho uso. Sin embargo, para emplear una estabilización tipo suelo cemento es necesario conocer en que afecta su estado de hidratación a un suelo estabilizado.

El cemento Portland, junto con agregados pétreos, se utiliza principalmente para formar el concreto. El cemento Portland se forma gracias a ciertos minerales en un proceso controlado de calcinación. Almacenando el cemento de forma adecuada puede mantener sus propiedades diseñadas, de lo contrario pasaría a un estado de estado de prehidratación, lo que provocaría una reducción de sus características físicas y mecánica.

Para elaborar una estabilización tipo suelo cemento, previamente se realizaron ensayos de mecánica de suelos a 2 tipos de suelos distintos para conocer sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas. Posteriormente, utilizando como referencia la Norma ACI 230.1R-90, se eligieron distintas proporciones considerando la clasificación de los suelos. Se elaboraron ensayos de compresión no confinada, y ensayos de desgaste de humedad y secado.

Para efectuar análisis de resultados se utilizaron tablas, gráficos y también se consideró el aporte estructural para determinar el comportamiento de los suelos estabilizados con suelo cemento anhidro y prehidratado.

OBJETIVOS

General

Determinar la influencia del cemento Portland anhidro y prehidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos para la utilización de base y subbases de carreteras.

Específicos

1. Extraer los materiales a utilizar de bancos adecuados y analizar las propiedades y características físicas de cada una de ellas, por medio de ensayos y estudios de laboratorio.
2. Definir proporciones en porcentajes de los materiales estabilizantes a usar y con los resultados de laboratorio obtener una estabilización mejorada en suelos.
3. Analizar el comportamiento físico, mecánico e hidráulico de suelos empleados en base y subbase estabilizados con cemento Portland anhidro y prehidratado, y proporcionar la diferencia en resultados entre ambas.
4. Contribuir a complementar por medio del trabajo de graduación el estudio de estabilización de suelos, a profesionales y sector empresarial de qué manera influye un cemento Portland anhidro y prehidratado en una estabilización de suelo cemento.

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo de graduación pretende, por medio de análisis experimentales, encontrar de qué manera influye un cemento Portland prehidratado para elaborar una estabilización química de suelo cemento.

Se buscará material de suelo granular y se elaborarán ensayos de Laboratorio de Mecánica de Suelos para determinar su clasificación. Luego se realizarán ensayos de compactación y de California Bearing Ratio (CBR) para determinar sus características físicas sin alterarse con cemento Portland. Después se procederá a agregarle cemento Portland según porcentaje en peso; para tener un parámetro en la influencia, el porcentaje de cemento Portland será el mismo, tanto en cemento Portland anhidro y en cemento prehidratado. Se elaborarán ensayos mecánicos para determinar las características nuevas, se elaborarán gráficas para determinar las diferencias en resultados y se proporcionarán recomendaciones según resultados. Conjunto con el trabajo de graduación si alguna empresa esta interesada en los resultados obtenidos, se patentará, ya que se pretende inducir nuevas ideas para el uso de cemento rechazado.

Lo que se pretende es proporcionar una alternativa de uso de un material inicialmente rechazado para modificar las características físicas y mecánicas del suelo, que puede tener aplicaciones para cimientos o la capa antes de fundir la losa, pero en este caso la investigación se enfocara para base y subbase de una carretera.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

En las obras de infraestructura vial, por razones ambientales y económicas, es recomendable utilizar en mayor medida los suelos presentes en la obra. Sin embargo, los suelos no poseen las características adecuadas para resistir un tránsito vehicular determinado. Por ello se dispone actualmente de estabilizaciones físicas, como suelo-suelo, y químicas, como suelo cal y suelo cemento.

El presente trabajo se enfocará en la estabilización química, tipo suelo cemento para suelos granulares.

1.1. Cemento Portland

Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Estos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta a los agregados (arena y grava, roca triturada, roca machacada y otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto. El nombre Portland se deriva de la semejanza en apariencia, en el estado endurecido del cemento con la piedra Portland de Inglaterra.

1.1.1. Fabricación del cemento

Para la fabricación del cemento Portland es necesario la obtención de materias primas, procesamiento de los materiales y control de calidad del producto final. Las materias primas que requiere el cemento Portland son:

- Materiales ricos en cal
- Materiales con sílice y alúmina
- Mineral de hierro

Se dosifica una mezcla típica de materias primas, de modo que el *clinker* luego de calcinado, consista aproximadamente en 65 por ciento de CaO, 21 por ciento de SiO₂, 5 por ciento de Al₂O₃ y 3 por ciento Fe₂O₃.

Entre las etapas de la fabricación del cemento se encuentran las siguientes:

1.1.1.1. Explotación de materias primas

Consiste en extracción de la materia prima, utilizando la combinación de maquinaria y explosivos controlados. Posteriormente se transportan las rocas hasta un tamaño adecuado según especificaciones de la trituradora, de manera que se obtengan partículas entre los 5 a 10 milímetros.

1.1.1.2. Procesamiento

Consiste en elaborar la mezcla de las arcillas y las calizas que han sido previamente trituradas. Se transportan por medio de bandas transportadoras o molinos, con el objetivo de reducir su tamaño hasta el orden de diámetro de ½

milímetro. Dentro de esta etapa se puede utilizar uno de los 2 procesos; húmedo o seco. La productora guatemalteca, Cementos Progreso, utiliza el proceso seco.

1.1.1.3. Calcinado

Existen 2 tipos de proceso de calcinado, de los cuales tienen diferencias no solo en el proceso, sino en la calidad de energía que utilizan y la tecnología necesaria para elaborar el cemento.

1.1.1.3.1. Precalentador/precalcinador

Consiste en transportar el material a un horno precalentador que consta de 6 etapas en serie, en las que el grano molido de alimentación de materia prima baja describiendo un espiral, a través de una corriente arremolinada de gas caliente ascendente que viene del horno o de otra etapa. Se tiene una transferencia de calor que permite producir *clinker* a razón de 2,7 millones de BTU por tonelada corta. El precalentador con precalcinador tiene un depósito adicional donde se extrae la mayor parte de CO₂ de la roca caliza para formar la cal viva.

1.1.1.3.2. Largo seco y húmedo

La alimentación seca para el horno o la pasta aguada se saca del almacenamiento y se alimenta en el horno rotatorio. La temperatura se eleva en el material al moverse hacia la fuente de calor y se forman grumos de *clinker* conforme va reaccionando con el hierro, la alúmina, el sílice y la cal, para convertirse en los nuevos compuestos del cemento. Se conserva el material en el horno por 2,5 horas en donde caen en cascada.

1.1.1.4. Molido de acabado

Se almacena el *clinker* en sitios cerrados, en naves o silos. Luego se muele junto con un 5 a 7 por ciento de yeso para controlar el tiempo de fraguado y mejorar las características de resistencia y cambio de volumen. También se muelen sustancias adicionales como algún inhibidor de fraguado por compactación y de ayuda a la pulverización con el fin de mejorar la capacidad para fluir.

1.1.2. Métodos de almacenamiento

El cemento es un material sensible a la humedad, debido a sus componentes químicos. Si se mantiene seco, va a mantener su calidad por tiempo prolongado más no indefinido. El cemento almacenado en contacto con el aire húmedo o en ambientes húmedos, fragua lentamente y tiende a tener menor resistencia que un cemento mantenido seco, lo que tiende a prehidratarse. Al cemento prehidratado, vulgarmente se le conoce como cemento viejo o cemento envejecido.

1.1.2.1. Sacos

El saco contiene 42,5 kilogramos de cemento. Sus dimensiones habituales son 50 x 66 centímetros. Generalmente se encuentra constituido por 3 pliegues de papel. Los sacos destinados a regiones húmedas están reforzados por 6 pliegues. Frecuentemente las hojas de papel que forman el saco están adheridas con un pegamento, aunque pueden estar cosidas.

Las hojas de papel destinadas a la confección de sacos deben estar en almacenamiento previo durante 24 horas a 20 ± 1 grados Celsius y 65 ± 25 de humedad relativa.

1.1.2.1.1. Propiedades del papel

El alargamiento y longitud de rotura, fecha e índice de rotura y resistencia a la rotura disminuyen con el aumento de temperatura.

La fuerza, porosidad, alargamiento de rotura y fecha de rotura aumentan con la humedad. El índice de rotura y la longitud de rotura disminuyen cuando la humedad relativa aumenta.

1.1.2.1.2. Locales de almacenamiento

Los sacos de cemento despachados a las ferreterías o a las obras de construcción deberán tener los siguientes cuidados para que el cemento mantenga la calidad:

- La humedad relativa de los almacenes o cobertizos usados para guardar los sacos de cemento deberán ser la más baja posible.
- Todas las fisuras y aberturas de los muros y techos deberían ser cerrados.
- No deberían almacenar los sacos de cemento en pisos húmedos y deben descansar sobre tarimas. Los sacos deben apilarse juntos para reducir la circulación del aire, pero no deben nunca apilar cerca de los muros externos.

- Los sacos que se almacenen por un largo período se deben cubrir con lonas (mantas) u otra cobertura impermeable.
- En pequeñas obras donde el cobertizo no esté disponible, los sacos se deben colocar sobre plataformas de madera elevadas sobre el suelo. Suelos saturados de humedad, ya que la evaporación del suelo puede afectar los sacos inferiores.
- Las coberturas impermeables deben cubrir toda la pila y extenderse para allá de los bordes de la plataforma para prevenir que la lluvia llegue hasta el cemento y la plataforma. Las plataformas mojadas pueden dañar los sacos inferiores.

El cemento almacenado por períodos prolongados puede sufrir un fenómeno de compactación por almacenamiento o fraguado de empaque. Esto se corrige normalmente rodando los sacos sobre el suelo.

1.1.2.2. Granel

El cemento a granel se debe almacenar en silos o depósitos de concreto impermeable o acero. Se debe usar aeración seca a baja presión o vibración en los silos para mantener la fluidez del cemento y evitarse la formación de grumos. No se debe almacenar un volumen de cemento mayor que el 80 por ciento de la capacidad del silo. La entrega de cemento a granel puede hacerse:

- En contenedores de 1 a 3 metros cúbicos en general, transportados por camión. La carga se efectúa por gravedad. Ciertos modelos de camiones-grúa descargan por sí mismos su contenido.

- Por camiones cisterna con una capacidad de aproximadamente 25 metros cúbicos de material. La descarga puede hacerse por aire a presión.
- Por vagones tolva con una capacidad por vagón, de 30 metro cúbico.

1.1.3. Causas de rechazo de cemento

La mayor parte de especificaciones para el cemento Portland limitan su composición química y sus propiedades físicas. La comprensión del significado de algunas de estas propiedades físicas es útil para el ingeniero para interpretar los resultados e identificar la calidad y estado del cemento. Por ello se indicarán qué ensayos se pueden tomar en consideración y en qué manera influye en la calidad del cemento y se investigará en qué manera influye en las mejoras físicas y mecánicas en el suelo.

1.1.3.1. Peso específico

El peso específico relativo del cemento Portland es de aproximadamente 3.15. Aunque no es un indicador definitivo de la calidad del cemento, aunque puede ser un parámetro de calidad. Su uso principal se tiene en los cálculos de proporción de mezclas en volumen. Se utiliza la Norma ASTM C188.

Figura 1. **Peso específico**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII/USAC.

1.1.3.2. Finura

“La finura del cemento influye en el calor de hidratación liberado y la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia. Los efectos que una mayor finura provocan sobre la resistencia se manifiestan principalmente durante los primeros siete días. La finura se puede medir por medio del ensayo de turbidímetro de Wagner (ASTM C115), el ensayo Blaine de permeabilidad al aire (ASTM C204) o con el tamiz núm. 325 (45 μ), (ASTM C430). Aproximadamente del 85 al 95 por ciento de las partículas del cemento pasan el tamiz núm. 325”.¹

¹ <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2411/Tesis.pdf?sequence=1>. p. 10. Consulta: 18 de abril de 2014.

Figura 2. **Ensayo fineza de tamiz N° 325**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII/USAC.

1.1.3.3. Pérdida por calcinación

“La pérdida por calcinación del cemento Portland se determina calentando una muestra de cemento de peso conocido a 900 a 1 000 grados Celsius hasta que se obtenga un peso constante. Se determina entonces la pérdida en peso de la muestra. Normalmente una pérdida por calcinación elevada indica prehidratación y carbonatación, que pueden ser causadas por un almacenamiento prolongado e inadecuado o por adulteraciones durante el transporte y la descarga. El ensayo para la pérdida por calcinación se lleva a cabo de acuerdo con la Norma ASTM C114. La Norma ASTM C150 indica que como máximo permisible de pérdida es de 3 por ciento.”²

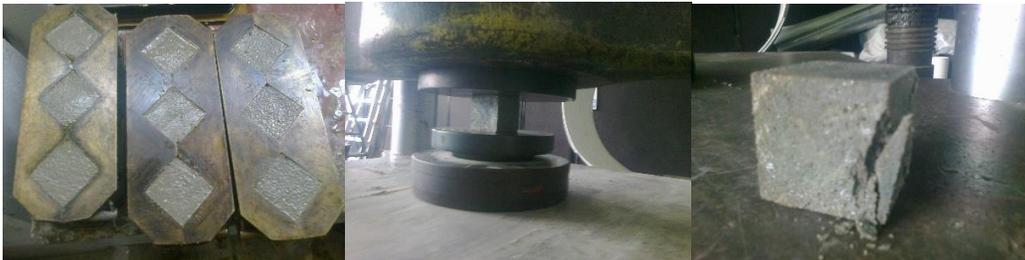
1.1.3.4. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión, en base la Norma ASTM C150, es obtenida a partir de pruebas en cubos de mortero estándar de 5 centímetros, ensayados de acuerdo a la Norma ASTM C109. Para motivo de rechazo el

² <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2411/Tesis.pdf?sequence=1>.
pág 12

cemento debe tener el tipo I como mínimo 28,0 megapascales (4 060 psi) en promedio de resistencia nominal a 28 días de edad.

Figura 3. **Ensayo a compresión**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII/USAC.

1.2. Suelos granulares

“Los suelos granulares se definen como aquellos granos pétreos en los cuales las fuerzas intergranulares o atractivas tienen un efecto despreciable en el comportamiento mecánico”³. Esta categoría engloba a rocas, gravas y arenas. Así también se pueden clasificar como materiales densos o sueltos.

1.2.1. Comportamiento de los suelos granulares

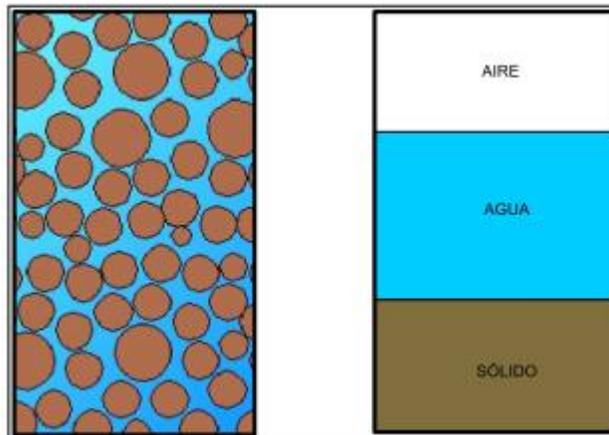
El comportamiento viene dado por las tensiones efectivas y la condición de drenaje de los suelos.

³ <http://es.scribd.com/doc/210757891/Exposicion-de-Suelos-Final1> p. 2. Consulta: 18 de abril de 2014.

1.2.1.1. Concepto de tensión efectiva

Los suelos granulares son materiales trifásicos, constituidos por el conjunto de partículas sólidas, rodeado de vacíos interconectados, que pueden ser ocupados por aire y agua. Un suelo con los huecos completamente ocupados por agua se denomina suelo saturado, sin embargo, es posible que los huecos estén llenos de aire sin nada de agua, entonces se define como suelo seco.

Figura 4. **Fases de un suelo en estado natural y porciones de las 3 fases**



Fuente: elaboración propia.

1.2.1.2. Condición de drenaje

Debido a la característica del agua, que es un elemento considerado incompresible, el suelo al encontrarse saturado se considera de la misma manera. Por lo tanto, si se escapase agua de los huecos se permitiría un cambio de volumen. Entonces, si las tensiones se aplican tan lentamente que

permite que se disipe fácilmente el exceso de presión intersticial, el suelo tiene la condición de drenaje.

El suelo con esta condición, cualquier cambio en la tensión total aplicada implica un cambio en la tensión efectiva y este sufre una deformación volumétrica. Por otro lado, bajo una condición sin drenaje, las cargas se aplican tan rápidamente que la presión intersticial no tiene tiempo a disiparse. Por lo tanto, si no se permite el drenaje, no puede haber ningún cambio de volumen y el suelo únicamente experimenta deformación tangencial, denominándose condición de volumen constante.

1.2.2. Influencia del tamaño

Dentro de la parte sólida de los suelos, hay partículas de distinto tamaño. Por lo que conduce de un análisis de la composición granulométrica.

El análisis granulométrico se realiza separando las partículas del suelo en rangos de tamaño a través de tamices de distintas dimensiones. En esta operación de dividir las partículas de suelo en tamaños, se encuentra con una dificultad práctica, ya que tamizar suelos por tamices inferiores al núm. 200 significa una complicación, ya que éste es muy débil y difícil de manejar, y resulta de interés ingenieril conocer los suelos que pasan dicha malla.

Para las partículas superiores a los 74 micrones se realiza el estudio de su granulometría por tamices representando los porcentajes que pasan por cada tamiz, en función del logaritmo del tamaño, obteniendo una curva granulométrica del material.

Para el estudio de las características granulométricas menores de 74 micrones, no factible ni práctico la utilización de los tamices, por lo que es necesario recurrir a la ley de Stokes, conocido como el Método del Hidrómetro.

Se puede establecer una relación indirecta entre la distribución del tamaño y la permeabilidad, dado que si las partículas son pequeñas, la relación de vacíos entre ellas también lo son, por lo que el movimiento del agua a través de este suelo es más complicado que en un suelo de grano grueso y grandes vacíos entre los mismos. Sin embargo, a pesar de conocer el tamaño de las partículas no permite ninguna estimación precisa de coeficiente de permeabilidad.

En ciertas regiones del mundo, la granulometría es utilizada como elemento de juicio para apreciar las propiedades significativas de los suelos, pero su extensión fuera de los límites indicados no es aconsejable, pues se corre el riesgo de cometer errores.

En esencia, la primera gran clasificación de los suelos, se hace en función del tamaño de las partículas. En la tabla I se destaca la división adoptada para los distintos sistemas de clasificación, aunque en Guatemala se utiliza principalmente la AASHTO y SUCS para carreteras.

Tabla I. **Clasificación de los suelos según distintas organizaciones**

Nombre de la Organización	Tamaño de los granos (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Massachusetts Institute of Tec.	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
U.S. Dep. of Agriculture	>2	2 a 0.05	0.005 a 0.002	<0.002
AASHTO	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema Unificado de Clasif. US Army Corp. Of Engineering US Bureau of Reclamation ASTM	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	<0.075	

Fuente: LEONI, Augusto José; NADEO, Julio Roberto. *Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos*. p. 19.

1.2.3. **Influencia de la forma y de las características mineralógicas**

La forma de los granos tiene una importancia secundaria en la determinación de las propiedades de los suelos, ya que en la mayoría de los casos, los granos tienden a ser redondeados.

Solamente la presencia de mica dentro de los suelos, tiene una importancia significativa para sus propiedades. Si se determina la deformación de una arena formada por granos de cuarzo más bien redondeados, o de forma cercana a la cúbica, y se le agrega un 10 por ciento de mica del mismo tamaño, el conjunto sigue siendo una arena y aunque no se altere su granulometría, la deformación del suelo aumenta de manera notable. La deformación de la mica tiene por lo tanto mucha influencia en la deformación.

En la mayoría de los casos, la dureza individual de los granos del suelo es de poca importancia. Casi todas las arenas se componen mineralógicamente de durísimos granos de cuarzo, con aristas redondeadas.

La influencia decisiva es la densidad relativa, donde indica cuanto mayor sea la densidad relativa, menor es la deformabilidad y mayor será la resistencia.

1.3. Subbases y bases

Dentro de las consideraciones que deben tomarse en cuenta para el diseño de estructuras de pavimento, es necesario analizar fundamentalmente la problemática que representa la calidad de los suelos a utilizar. Por ello es necesario la selección apropiada de los materiales, elaborar los ensayos correspondientes que exige el normativo de Guatemala: *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes* edición septiembre 2001. Por ello se considera de vital importancia conocer lo que solicita dicho normativo.

1.3.1. Definiciones

Previo a concluir si un material es adecuado o no para un pavimento, se debe conocer para qué elemento estructural va a ser utilizado. Por dicha razón se indicaran las siguientes definiciones:

- Subbase común: es la capa de la estructura del pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito proveniente de las capas superiores del pavimento, de tal manera que el suelo de subrasante las pueda soportar.

- Subbase granulares o subbase triturada: es la capa formada por la combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural, clasificado o con trituración parcial para construir una subbase integrante de un pavimento, la cual está destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito proveniente de las capas superiores del pavimento, de tal manera que el suelo de subrasante las pueda soportar.
- Base granular o base triturada: es la capa formada por la combinación de piedra o grava, con arena y suelo en su estado natural, clasificados o con trituración parcial para constituir una base integrante de un pavimento.
- Subbase estabilizada: es la capa constituida de materiales pétreos y/o suelos mezclados con materiales o productos estabilizadores, preparada y construida aplicando técnicas de estabilización de suelos, para mejorar sus condiciones de estabilidad y resistencia, para constituir una subbase integrante de un pavimento, la cual está destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito proveniente de las capas superiores del pavimento, de tal manera que el suelo de subrasante las pueda soportar.
- Base estabilizada: es la capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas cuando sea requerido en las disposiciones especiales, 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 de un pavimento destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a la capa de subbase.

1.3.2. Especificaciones en la construcción

Dentro de las especificaciones de la construcción se deben guiar bajo el normativo guatemalteco de *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes edición septiembre 2001*. Donde indica lo siguiente:

1.3.2.1. Calidad de los materiales

La capa de la subbase y base debe estar constituida por materiales de tipo granular en su estado natural o mezclados, que forme y produzcan un material que llene los siguientes requisitos:

- Valor soporte: el material debe tener un CBR (AASHTO T 193), mínimo de 30 efectuado sobre muestra saturada a 95 por ciento de compactación, (AASHTO T 180).
- Piedras grandes y exceso de finos. El tamaño máximo de gravas que contenga el material subbase, no debe exceder de 70 milímetros ni exceder de $\frac{1}{2}$ espesor de la capa. El material de subbase no debe tener más del 50 por ciento en peso, de partículas que pasen el tamiz 0,425 milímetros, ni más del 35 por ciento en peso, en partículas que pasen el tamiz 0,075 milímetros.
- Plasticidad: la porción que pasa el tamiz 0,425 milímetros, no debe tener un IP AASHTO T90 mayor de 6 ni un Límite Líquido AASHTO T89, mayor a 25, determinados ambos, sobre muestra preparada en húmedo, AASHTO T146.

- Impurezas: el material de subbase debe estar exento de materiales vegetales, basura, terrones de arcilla, o sustancias incorporadas dentro de la capa de subbase puedan causar fallas en el pavimento.

1.3.2.2. Requisitos para ejecución

Ya establecido la calidad de materiales con sus límites mínimos y máximos, en la división 300 de las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes de Guatemala* indican los requisitos para la construcción, de la base y subbase de las carreteras, así como controles de calidad.

1.3.3. Problemáticas y soluciones

Idealmente cuando se diseña una pavimentación se desea utilizar el material que se encuentra alrededor de la construcción, para que el impacto ambiental no sea severo y evitar costos elevados de sobre acarreo de material. Sin embargo, cuando se elaboran ensayos preliminares de laboratorio como granulometría, Proctor modificado, CBR y límites de Atterberg a los bancos de material se encuentran características que no cumplen con las especificaciones por ello se estabilizan de manera física y/o química.

1.3.3.1. Estabilización física

La más común es estabilizar mezclas de diferentes bancos de material. El parámetro que se utiliza es la granulometría, se mezcla el material en porcentaje de manera que el material este apegado al rango permisible. Luego se elaboran los ensayos pertinentes para verificar si cumple con los requisitos mínimos. En ciertas ocasiones cuando el material es sin cohesión, y se desea

cierto grado de plasticidad, se mezclan con materiales con esas características, y cuando se desea quitar se utilizan materiales granulares.

También se estabiliza con ripio, el cual es un plan de reciclaje de material.

1.3.3.2. Estabilización química

Dentro de las estabilizaciones químicas indican agregarle materiales que no se puedan separar físicamente, es decir por medio de tamizaje u otro procedimiento separativo. Entre estas se encuentran:

- Cal: método económico para disminuir la plasticidad de los suelos y aumentar la resistencia. Los porcentajes van del 2 al 6 por ciento con respecto al suelo seco del material por estabilizar.
- Cemento Portland: ideal para estabilizar arenas o gravas finas, con el fin primordial de aumentar la resistencia y disminuir la plasticidad.
- Productos asfálticos: para material triturado sin cohesión, el cual la emulsión es el que comúnmente se utiliza.

También se encuentran las estabilizaciones con polímeros, hule de neumáticos, con cloruro de sodio, cloruro de calcio y escorias de fundición, de las cuales aún se encuentran en experimentación y al momento de recomendar su uso, se deben elaborar los ensayos pertinentes para demostrar las distintas mejoras que puedan tener y el costo que representaría.

Las reacciones del cemento con el suelo son de naturaleza físicoquímica. La reacción entre el cemento y los suelos granulares no plásticos es menos compleja que con suelos finos plásticos. Los suelos arcillosos no se pueden considerar como la reacción de un cementante con un material inerte; por lo contrario, los minerales arcillosos reaccionan y cambian durante el proceso alterando su estructura interna.

1.4. Estabilización tipo suelo cemento

La estabilización tipo suelo cemento, un procedimiento útil para mejorar un material que no cumple con las especificaciones técnicas para ser utilizado como base o subbase de una carretera.

1.4.1. Definición

Se utilizará como base de la definición los conceptos de la PCA, que indica lo siguiente:

El suelo cemento: es una mezcla íntima de suelo, convenientemente pulverizado con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad. Principalmente se utiliza como base en los pavimentos de carreteras, calles y aeropuertos

Grava-cemento: mezcla de agregados y las resistencias mecánicas son similares a las de un concreto para pavimentos. Por lo que puede soportar el paso continuado del tráfico sin necesidad de una carpeta de rodadura.

Dentro de las aplicaciones se encuentra mejorar la base para pavimentos con tráfico industrial muy pesado, terminales portuarias de minerales y contenedores, de ferrocarriles, de vehículos muy pesados, patios de almacenamiento industrial pesado. También es efectivo en el uso de reparación de pavimentos fallados por su fácil aplicación, ya que permite reutilizar el material para elaborar una nueva base.

1.4.2. Proceso constructivo

Para poder estabilizar con cemento en un proyecto, se deben tomar en consideración, tanto el conglomerante como la maquinaria a utilizar y el procedimiento.

1.4.2.1. Almacenamiento del conglomerante

El almacenamiento del cemento en la obra es en función de tipo de obra, condiciones de suministro y producciones previstas. En general, el suministro del conglomerante en obras de cierta importancia es a granel, en cisternas de aproximadamente 25 metros cúbicos. Sin embargo, en aplicaciones menores puede ser conveniente emplear el conglomerante en sacos y distribuirlos manualmente sobre el suelo.

Para garantizar un trabajo sin interrupciones, ya que el cemento es susceptible a la humedad, es recomendable disponer de capacidad de almacenamiento de conglomerantes para al menos un día de trabajo. A la hora de dimensionar la capacidad de almacenamiento se debe tener en cuenta la densidad del conglomerante. Hay que considerar, asimismo, los plazos máximos de almacenamiento del conglomerante.

1.4.2.2. Preparación del suelo

Antes de proceder a la distribución del cemento Portland y su mezclado con el suelo pueden ser necesarias algunas operaciones previas a preparar este convenientemente para dicho tratamiento. Estas operaciones son:

- Remoción de partículas gruesas en suelos con tamaño máximo superior admisible, por lo general es mayor de 3 pulgadas.
- Disgregación de suelos cohesivos, para permitir el correcto mezclado posterior con el conglomerante.
- Escarificación del suelo para facilitar la aireación, esponjamiento o secado, o bien para facilitar la humectación del material o labor del equipo de mezclado.

1.4.2.3. Cribas y máquinas despedregadoras

El tamaño máximo de los suelos se puede ajustar a los requerimientos mediante el corte granulométrico, en caso de que el material de origen supere el tamaño permitido de las especificaciones o el aceptable para el correcto funcionamiento la de la máquina mezcladora. Por ello, se recurre en algunos casos al escarificado del material y extracción manual de las piedras de mayor tamaño. Sin embargo, dada la baja eficiencia de la extracción manual en ocasiones, es necesario realizar un corte granulométrico eficaz. Atendiendo a criterios económicos, y dependiendo de la proporción de sobretamaños que tenga el material de origen se puede emplear dos métodos.

- Despedregadoras, si el porcentaje de sobretamaños es inferior aproximadamente al 5-10 por ciento.
- Cribas, si dicho porcentaje es superior al 5-10 por ciento.

1.4.2.4. Maquinaria para la disgregación, escarificación o aireación del suelo

Los equipos para realizar dicha operación son los que comúnmente se emplean para movimiento de tierras. Es frecuente la utilización de *ripper* de dientes múltiples montados sobre una motoniveladora, de un tractor de cadenas de mediana potencia. Se permite utilizar máquinas de origen agrícola, como gradas de reja o discos, o rastrillos arrastrados por un tractor.

En aquellos casos en los que el elevado grado de cohesión del suelo dificulte su disgregación por el equipo anteriormente mencionado, esta operación se puede realizar mediante máquinas de tipo rotavator agrícola, que pueden ser las mismas empeladas para la posterior mezcla del suelo con el conglomerante.

1.4.2.5. Humectación y distribución del conglomerante

El conglomerante es distribuido sobre el suelo mediante equipos distribuidores en una operación previa a la de mezclado. En ocasiones puede ser necesario el manejo del conglomerante en sacos y su distribución manual sobre el suelo, cuidando la proporción estimada, utilizando en relación el espesor y el área abarcada.

1.4.2.5.1. Humectación del suelo

La humectación del suelo es necesaria para elevar el porcentaje de humedad hasta el valor óptimo determinado por el ensayo de Proctor Modificado AASHTO T - 180. La humectación del material se puede realizar de 2 formas:

- Riego de agua sobre la superficie a tratar mediante cisterna de agua tradicional antes de la distribución del cemento, por lo que se recomienda escarificar previamente el suelo.
- Un sistema de dosificación e inyección de aditivos líquidos en la cámara de mezcla.

1.4.2.5.2. Control de la dosificación

La dosificación del conglomerante debe ser determinada, utilizando como parámetro el porcentaje de cemento que cumplió con los requisitos del diseñador. La dosificación del conglomerante sobre el suelo puede ser:

- Volumétrica, independientemente de la velocidad. La precisión en el reparto queda acondicionada por la regularidad de la velocidad de avance del equipo.
- Volumétrica, proporcionada a la velocidad de avance del distribuidor.
- Volumétrica, proporcional a la velocidad de avance y con corrección ponderal discontinua.

1.4.2.6. Mezcla *in situ*

Un mezclador *in situ* es una máquina automotriz, remolcada o transportada destinada a pulverizar, triturar, airear, homogenizar y esponjar un suelo y a mezclarlo con uno o más materiales de aportación, en este caso cemento y agua.

Los equipos de mezcla empleados en la mejora de tratamiento de suelos se pueden clasificar en 3 grupos:

- Útiles fijados a la máquina: *ripper*, hoja de motoniveladora, vertederas o rejillas y otros.
- Útiles cuyo accionamiento se produce por tracción y fricción con el suelo: gradas de discos.
- Útiles cuyo accionamiento es producido por un motor: rotovator agrícola o las estabilizadoras modernas con rotor y cámara de mezcla.

1.4.2.7. Compactación

La selección del equipo a emplear dependen de muchos factores, pero el más importante es el tipo de material a compactar y su estado en el momento de la compactación. También depende de operarlo correctamente con el objetivo de obtener una compactación óptima. Los factores más importantes son la velocidad del compactador, el espesor de la capa y el número de pasadas.

Para un suelo estabilizado con cemento, la compactación debe finalizar durante el plazo de trabajabilidad disponible, que puede ser relativamente corto, debido a la rápida evaporación del agua.

Para la compactación de materiales tratados con cemento se emplean en general uno o la combinación de algunos de los siguientes tipos de compactadores:

- Rodillo estático tipo pata de cabra
- Rodillo vibratorio liso
- Rodillo vibratorio tipo pata de cabra
- Compactador de neumáticos

1.4.2.8. Refino de la superficie

Los diferentes tratamientos provocan en mayor o menor medida un esponjamiento del suelo y deformaciones puntuales de la rasante, por lo que es preciso proceder a una rasante o refino final, que se realiza con motoniveladora.

En el caso de la estabilización de suelos para explanadas, es preciso obtener una rasante final con tolerancias muy estrictas por el supervisor. Cuando se usa cemento, se debe refinar en un tiempo muy corto.

1.4.2.9. Curado y protección

Luego de completar una capa estabilizada, se puede extender rápidamente a la capa siguiente, con un adecuado grado de humedad, que evite la pérdida de agua en la capa ya estabilizada.

Al finalizar el proceso de compactación y refinación se debe mantener un período de curado, sin tráfico, que variará de 3 a 7 días en función del tratamiento.

Se recomienda un riego ligero de agua para mantener la superficie húmeda, acompañado de una pasada de rodillo liso sin vibrar para sellar la superficie. Para el suelo cemento, también es recomendable utilizar un riego con emulsión asfáltica, acompañado de una extensión con arena o gravilla, con el objetivo de permitir el tráfico de obra sobre la superficie.

1.4.3. Ventas y desventajas

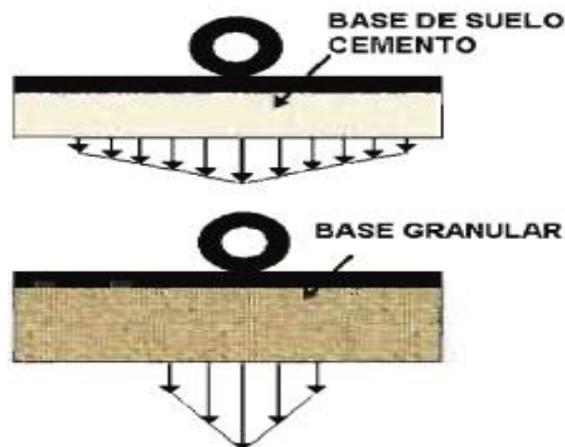
La estabilización de los suelos aumenta considerablemente la potencialidad de su uso en los bancos de materiales. Esto se debe a que una buena parte de los materiales de los bancos en un proyecto convencional, se desecharían por no cumplir los requisitos de diseño, por lo que requieren un tratamiento adecuado con cemento. Puede ser ambiguo el beneficio costo, en relación en la distancia de la obtención un material adecuado como el uso del cemento dentro del proyecto.

Las ventajas de una estabilización de tipo suelo cemento son las siguientes:

- Aumenta la durabilidad
- Permite utilizar en mayor cantidad los materiales locales de excavación, por lo que aumenta rendimientos de construcción.
- Reduce impacto ambiental, por la menor necesidad de explotación de bancos de material.

- Mayor rigidez y mejor distribución de cargas aplicadas al pavimento, por lo que permite contar con estructuras de pavimentos de menor número de capas.
- Si el suelo tiene una gran parte de fracción granular, puede conseguirse un material insensible al agua, estable y capaz de resistir a largo plazo las deformaciones producidas por el tráfico.

Figura 5. Estado de distribución de esfuerzos según PCA



Fuente: QUINTANILLA RODRÍGUEZ, Carlos Antonio. *El estado del arte del suelo cemento en estructuras de pavimentos*. p. 14.

- Resistencia a los agentes atmosféricos, extremos cálidos y fríos.
- Aumento de resistencia y menores intervenciones de mantenimiento, aumenta la vida útil.
- En el pavimento rígido, disminuye el fenómeno de bombeo, mejora la distribución de carga, mejora la plataforma de trabajo.

- En el pavimento flexible, aumenta la vida útil y reducción del agrietamiento por fatiga y disminución de la presión en la subrasante.

Las desventajas de una estabilización de tipo suelo cemento son las siguientes:

- Si no es diseñado, dosificado y controlado adecuadamente, puede producir demasiada contracción y agrietamiento, donde pueden ser notorias en las carpetas de rodadura.
- Se debe seleccionar el tipo de cemento adecuado y realizar el número de ensayos necesarios, antes de ejecutar compactaciones en campo.
- El tiempo para ejecutar el mezclado, conformación y compactación está limitado por el del fraguado del cemento, y la acelerada absorción del agua que limita la compactación cercana al 100 por ciento.
- El suelo cemento tiene una reducida resistencia al desgaste. Por ello, las bases de suelo cemento precisan capas de rodadura de concreto asfáltico, tratamientos superficiales o capas de rodadura de concreto hidráulico.
- La liga entre diferentes capas es dificultosa.
- Es necesario contar con personal especializado.

2. ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS GRANULARES Y DEL CEMENTO PORTLAND

2.1. Descripción de las muestras de suelo

El material seleccionado para la experimentación fueron 2 muestras: arena limosa color beige rosa y arena pómez color gris. Ambas muestras fueron tomadas de la zona 8 de Mixco, Ciudad San Cristóbal. A continuación se presentaran los resultados de su clasificación científica y sus características mecánicas e hidráulicas. (Anexo)

Figura 6. **Fotografía de la muestra de arena limosa color beige rosa**



Fuente: zona 8 de Mixco, Ciudad San Cristóbal.

Figura 7. **Fotografía de la muestra arena pómez color gris**



Fuente: zona 8 de Mixco, Ciudad San Cristóbal.

2.1.1. **Granulometría (ASTM D 6913-04)**

El material, previo a someterse a la tamizadora; se lavó por la malla número 200 y posteriormente fue tamizado en estado seco saturado. Se utilizaron los tamices recomendados por la Norma ASTM D 6913-04 y los resultados de los suelos fueron los siguientes.

- Arena limosa color beige rosa
 - Porcentaje de grava: 10,67
 - Porcentaje de arenas: 60,28
 - Porcentaje de finos: 29,04
- Arena pómez color gris
 - Porcentaje de grava: 20,56
 - Porcentaje de arenas: 77,98
 - Porcentaje de finos: 1,49

2.1.2. Límites de Atterberg (AASHTO T 89-10 y AASHTO T 90-00)

Los materiales fueron sometidos al ensayo de índice de plasticidad y ambos presentaron resultados nulos, ya que no poseen límite plástico, por consiguiente no poseen límite líquido.

Con los resultados de granulometría y límites de Atterberg, se pudo determinar que el suelo de arena limosa color beige rosa tiene una clasificación AASHTO como A-2-4 y clasificación SCU como SP (arena mal graduada), y el suelo arena pómez color gris tiene una clasificación AASHTO como A-3 y clasificación SCU como SP (arena mal graduada).

2.1.3. Proctor Modificado (AASHTO T 180-01)

Los materiales fueron sometidos al ensayo de compactación mecánica según Norma AASHTO T 180-01 tipo A y C. Los resultados fueron los siguientes:

- Arena limosa color beige rosa
 - Proctor método A (tamiz #4)
 - PUS: 1 318 kg/m³, (82,25 lb/ft³)
 - Humedad óptima: 19,4 %
- Arena pómez color gris
 - Proctor método C (tamiz ¾")
 - PUS: 1 005 kg/m³, (62,75 lb/ft³)
 - Humedad óptima: 7,1 %

Figura 8. **Ensayo Proctor Modificado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

2.1.4. Permeabilidad (ASTM D 2434-00)

Los materiales fueron sometidos al ensayo hidráulico de permeabilidad de cabeza constante, por tener características de suelo granular, según Norma ASTM D 2434-00. Los resultados fueron los siguientes:

- Arena limosa color beige rosa

Coeficiente de permeabilidad= $8,98 \times 10^{-3}$ centímetros

- Arena pómez color gris

Coeficiente de permeabilidad= $5,12 \times 10^{-1}$ centímetros

2.1.5. CBR (Valor Soporte California AASHTO T 193-99)

Los materiales fueron sometidos al ensayo de valor soporte: Razón Soporte California (CBR), según Norma AASHTO T 193 y los resultados fueron los siguientes:

Figura 9. Fase de penetración de ensayo CBR



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

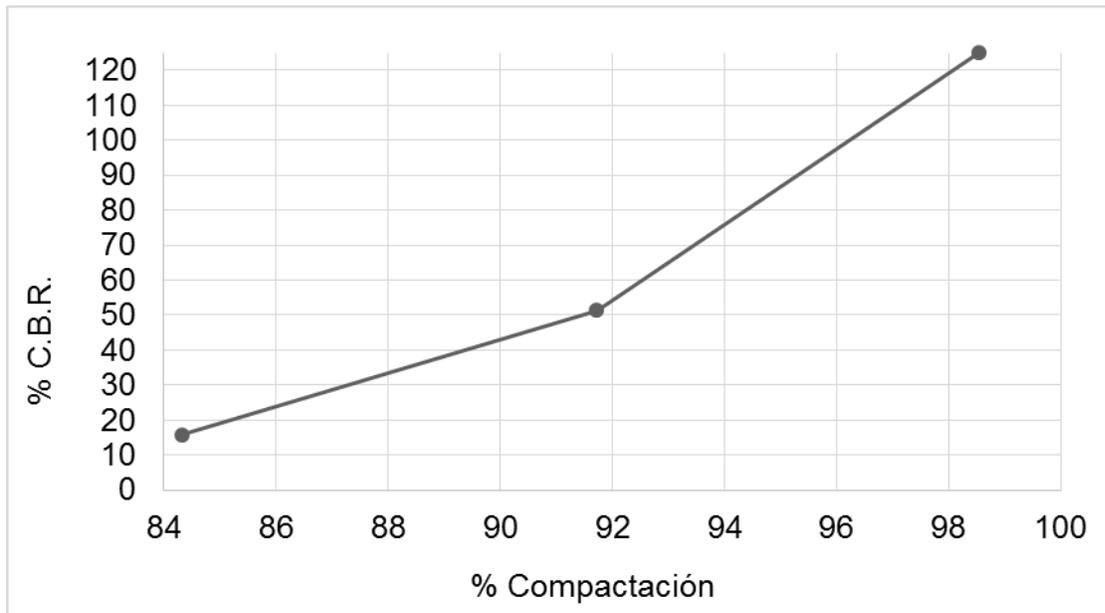
- Arena limosa color beige rosa

Tabla II. **Resultados de ensayo de CBR de arena limosa color beige rosa**

Probeta No.	Golpes No.	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	Yd (Lb/pie ³)			
1	10	20,78	69,36	84,33	0,02	15,72
2	30	20,78	75,44	91,72	0,02	51,35
3	65	20,78	81,04	98,53	0,00	124,95

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

Figura 10. **Gráfico porcentaje de CBR versus porcentaje de compactación**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

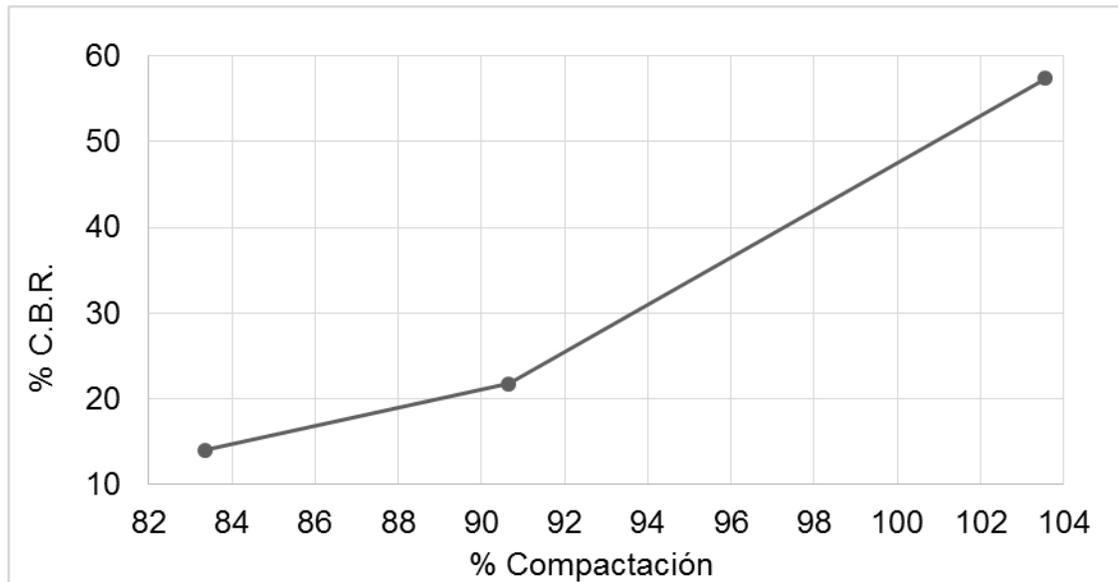
- Arena pómez color gris

Tabla III. **Resultados de ensayo de CBR de arena pómez limosa color gris**

Probeta No.	Golpes No.	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	Yd (Lb/pie ³)			
1	10	9,01	52,31	83,36	0,07	14,06
2	30	9,01	56,89	90,66	-0,04	21,72
3	65	9,01	64,98	103,55	-0,02	57,35

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

Figura 11. **Gráfico porcentaje de CBR versus porcentaje de compactación**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

Se puede determinar que ambos materiales son inadecuados para utilizarlos como subbase o base para una carretera, debido a la baja densidad que poseen, a pesar de que poseen una gran capacidad soporte CBR.

2.2. Características del cemento Portland utilizado

De la muestras de cemento Portland tipo I, se determinó su calidad mecánica, física y fisicoquímica, una muestra será identificada como cemento anhidro y la segunda muestra será identificada como cemento prehidratado, previamente.

Figura 12. **Cemento prehidratado**



Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

2.2.1. Resistencia a la compresión (ASTM C 109-13)

Ambas muestras fueron sometidas al ensayo de determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, usando especímenes cúbicos de 50 milímetros de lado, según Norma ASTM C 109, COGUANOR NTG 41003 h4. Previo a dicho ensayo, se determinó el flujo con el cemento anhidro para determinar la proporción de cemento, arena estándar y agua. Se dictaminó que la proporción idónea para una fluencia de 110 ± 5 es 1:2.75:0.466 y para mantener la misma constante en la variable, la misma proporción será utilizada en un cemento prehidratado.

Figura 13. Flujo del cemento anhidro



Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

Ya hecha la proporción se elaboraron los cubos y los resultados a compresión promedio son los siguientes:

Tabla IV. **Promedio de resultados de resistencia a compresión de cemento anhidro**

N° cubo	Edad	Resistencia Mpa	Resistencia Psi	Promedio	
				Resistencia Mpa	Resistencia psi
1	3	20,7	3000	21,1	3070
2	3	20,1	2920		
3	3	22,6	3280		
4	7	25,0	3630	25,0	3630
5	7	24,6	3570		
6	7	25,4	3690		
7	28	25,3	3670	27,5	4000
8	28	31,4	4560		
9	28	25,9	3760		

Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

Tabla V. **Promedio de resultados de resistencia a compresión de cemento prehidratado**

N° cubo	Edad	Resistencia Mpa	Resistencia Psi	Promedio	
				Resistencia Mpa	Resistencia Psi
1	3	6,9	1000	7.0	1010
2	3	6,9	1000		
3	3	7,1	1030		
4	7	8,8	1280	9,3	1360
5	7	10,1	1470		
6	7	9,1	1320		
7	28	19,1	2770	20,0	2900
8	28	20,7	3000		
9	28	20,1	2920		

Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

2.2.2. **Determinación de finura (ASTM C 430-08)**

Ambas muestras fueron sometidas al ensayo de determinación de la finura, usando el método de la malla núm. 325 (45 µm), según Norma ASTM C 430, COGUANOR NTG 41003 h22. Para que un cemento sea aprobado con fines estructurales, aproximadamente del 85 al 95 por ciento de las partículas son menores a 45 micrones.

Tabla VI. **Resultados del ensayo de finura usando tamiz núm. 325 (45 μm)**

Estado del cemento	Resultados (porcentaje que pasa el tamiz No. 325)	Aprobado/Rechazado
Anhidro	96,22	Aprobado
Prehidratado	81,00	Rechazado

Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

2.2.3. Porcentaje de humedad (ASTM D 2974-07)

Ambas muestras fueron sometidas al ensayo de determinación del contenido gravimétrico de agua (porcentaje de humedad), utilizando como método alternativo la Norma ASTM D 2974. No se puede olvidar que el cemento totalmente hidratado es el que ya se encuentra en forma pastosa, un cemento prehidratado se encuentra con grumos en sus áreas de almacenaje y ha absorbido humedad del ambiente.

Tabla VII. **Resultados de porcentaje de humedad del cemento**

Estado del cemento	porcentaje de humedad
Anhidro	1,40 \pm 0,12
Prehidratado	2,81 \pm 0,04

Fuente: Sección de Química Industrial. CII/USAC.

2.2.4. Análisis químico del cemento hidráulico, calcinación (ASTM C 114-00)

Ambas muestras fueron sometidas al ensayo de pérdida por calcinación del cemento, según Norma ASTM C 114. Con este procedimiento no solo se evapora la humedad, sino también calcina cualquier impureza de carácter orgánico.

Tabla VIII. Resultados de porcentaje de carbonatos por pérdida de calcinación

Estado del cemento	porcentaje de carbonatos
Anhidro	3,88 ± 0,02
Prehidratado	8,01 ± 0,30

Fuente: Sección de Química Industrial CII/USAC.

2.2.5. Peso específico (ASTM C 188-09)

Ambas muestras fueron sometidas al ensayo de peso específico del cemento, según Norma ASTM C 188. Dicho procedimiento no es indicador de rechazo de un lote de cemento, sin embargo puede ser tomado en consideración para diseño de mezcla.

Tabla IX. Resultados de peso específico

Estado del cemento	Peso específico
Anhidro	2,89
Prehidratado	2,73

Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

Como se pudo observar con los ensayos de control de calidad del cemento, ambos se encuentran en estado prehidratado, el nombrado anhidro se encuentra en estado de menor hidratación que el nombrado prehidratado. El cemento tiene una directa relación con sus características físico químicas y fineza que pasa el tamiz núm. 325, con sus demás características deseadas en obra como peso específico y resistencia a compresión a 28 días de edad.

2.3. Estudios de la estabilización de suelo cemento

Para el diseño de mezcla para estabilizar un suelo se deben considerar primero sus características mecánicas y físicas, para determinar qué es lo que se quiere mejorar. Para determinar el porcentaje de cemento a utilizar se utilizó el Método del ACI 230.1R donde según su granulometría recomienda distintas proporciones de cemento. Esta tabla no indica una proporción definitiva para utilizarla en campo, pero si para tener un punto de partida para diseñar la estabilización.

Tabla X. **Requerimientos típicos para varios grupos de suelos de acuerdo a la ACI 230.1R-90**

AASHTO	USCS	Rango típico de cemento (porcentaje en peso)	Contenido típico de cemento para prueba de humedad-densidad (porcentaje en peso)	Contenido típico de cemento para pruebas de durabilidad (porcentaje en peso)
A-1-a	GW, GP, SW, SP, SM	3-5	5	3-5-7
A-1-b	GM, GP, SM, SP	5-8	6	4-6-8
A-2	GM, GC, SM, SC	5-9	7	5-7-9
A-3	SP	7-11	9	7-9-11
A-4	CL, ML	7-12	10	8-10-12
A-5	ML, MH, CH	8-13	10	8-10-12
A-6	CL, CH	9-15	12	10-12-14
A-7	MH, CH	10-16	13	11-13-15

Fuente: QUINTANILLA RODRÍGUEZ, Carlos Antonio. *El estado del arte del suelo cemento en estructuras de pavimentos*. p. 30.

Figura 14. **Suelo estabilizado con cemento anhidro**



Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

2.3.1. Relación humedad masa unitaria de probetas de suelo cemento (ASTM D 558-96)

Se eligieron las proporciones de cemento para elaborar el ensayo de humedad masa unitaria basándose en la figura 7, según la clasificación de los suelos según AASHTO. Se utilizó el método de la AASHTO T-180 para manipular la variable de la misma manera. Se omitió el Método ASTM D 558, ya que varía en el procedimiento de 25 golpes en 3 capas, en cuanto para ver una mejora en las mismas condiciones es con el procedimiento anteriormente dicho.

Arena limosa color beige rosa

Por ser un suelo clasificado dentro de la A-2, se utilizó como parámetro para dicho ensayo un 7 por ciento de cemento en peso.

Tabla XI. Resultados de relación humedad masa unitaria

Estado del cemento	PUS kg/m ³ (lb/pie ³)	porcentaje de humedad óptima
Anhidro	1 363 (85,1)	20,5
Prehidratado	1 298 (81,0)	20,1

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

- Arena pómez color gris

Por ser un suelo clasificado dentro de la A-3, se utilizó como parámetro para dicho ensayo un 9 por ciento de cemento en peso.

Tabla XII. **Resultados de relación humedad masa unitaria**

Estado del cemento	PUS kg/m³ (lb/pie³)	porcentaje de humedad óptima
Anhidro	1 081 (67,5)	19,5
Prehidratado	1 022 (63,8)	17,4

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

2.3.2. Ensayo de durabilidad al desgaste por humedecimiento y secado de muestras de suelo cemento (ASTM D 559-96)

Se elaboró el ensayo de humedecimiento y secado para las 2 muestras, utilizando como parámetro de humedad las óptimas según el estado del cemento. Las muestras de probetas para someterlo a dicho ensayo se elaboraron bajo la compactación AASHTO T 180, se extrajeron de las probetas y se curaron bajo la Norma ASTM D 1632-96 por 7 días y se sometieron a desgaste bajo la Norma ASTM D 559.

Figura 15. **Probetas de suelo cemento al finalizar el ensayo de humedecimiento y secado**



Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

- Arena limosa color beige rosa

Tabla XIII. **Resultados de desgaste por humedecimiento y secado**

Estado del cemento	Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Porcentaje de desgaste
Anhidro	5	21
	7	16
	9	9
Prehidratado	5	43
	7	30
	9	29

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

Figura 16. **Etapa de 5 horas de inmersión previa a colocarlo en horno 48 horas**



Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

- Arena pómez color gris

Tabla XIV. **Resultados de desgaste por humedecimiento y secado**

Estado del cemento	Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Porcentaje de desgaste
Anhidro	7	23
	9	22
	11	20
Prehidratado	7	25
	9	21
	11	18

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

2.3.3. Resistencia a la compresión no confinada de probetas de suelo cemento (ASTM D 1663-00)

Se elaboró el ensayo de humedecimiento y secado para las 2 muestras, utilizando como parámetro de humedad las óptimas, según el estado del cemento. Las muestras de probetas para someterlo a dicho ensayo se elaboraron bajo la compactación AASHTO T 180, se extrajeron de las probetas y se curaron bajo la Norma ASTM D 1632-76 por 7 días y se sometieron a compresión no confinada bajo Norma ASTM D 1663.

Figura 17. **Ensayo a compresión no confinada de probetas suelo cemento**



Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

- Arena limosa color beige rosa

Tabla XV. **Resultados de resistencia a compresión no confinada del cemento anhidro, de la arena limosa color beige rosa**

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Edad	Resistencia Kpa	Resistencia Psi	Promedio	
				Resistencia Kpa	Resistencia Psi
5	7	3 535	510	3 325	485
	7	3 135	455		
7	7	4 895	710	4 760	690
	7	4 635	670		
9	7	6 470	940	6 370	930
	7	6 295	915		

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

Figura 18. **Falla de una probeta de arena limosa color beige rosa estabilizada con cemento prehidratado**



Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

Tabla XVI. **Resultados de resistencia a compresión no confinada del cemento prehidratado, de la arena limosa color beige rosa**

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Edad	Resistencia Kpa	Resistencia Psi	Promedio	
				Resistencia Kpa	Resistencia Psi
5	7	2 295	330	2 275	330
	7	2 270	325		
7	7	2 295	435	3 115	455
	7	3 235	470		
9	7	3 695	535	3 640	550
	7	3 570	520		

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

- Arena pómez color gris

Tabla XVII. **Resultados de resistencia a compresión no confinada del cemento anhidro, de la arena pómez color gris**

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Edad	Resistencia Kpa	Resistencia Psi	Promedio	
				Resistencia Kpa	Resistencia Psi
7	7	1 735	275	1 680	255
	7	1 635	235		
9	7	2 170	315	2 520	365
	7	2 835	410		
11	7	2 970	430	3 115	455
	7	3 270	475		

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

Tabla XVIII. **Resultados de resistencia a compresión no confinada del cemento prehidratado, de la arena pómez color gris**

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Edad	Resistencia Kpa	Resistencia Psi	Promedio	
				Resistencia Kpa	Resistencia Psi
7	7	700	100	700	100
	7	700	100		
9	7	1 035	150	1 120	165
	7	1 190	175		
11	7	1 645	240	1 470	215
	7	1 315	190		

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Resultados de laboratorio

Los cementos seleccionados poseen características distintas determinadas por análisis de laboratorio. Utilizando como referencia la tabla VIII se puede inferir, por las características higroscópicas del cemento, el conglomerante adquiere humedad en el momento que tiene contacto con el ambiente, a pesar de estar almacenado de manera adecuada; por lo tanto, se tomó como cemento anhidro al que presentó menor porcentaje de carbonatos.

Fueron tomadas en consideración 2 características elementales en dicho estudio, que dictaminaron la aceptación o rechazo del material estabilizado con cemento:

- La resistencia a compresión no confinada
- El desgaste por humedad y secado

Se utilizó como parámetro de referencia la Norma ACI 230.1R-90 (ACI, 1997) y la sección 307 de las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes (Dirección General de Caminos, 2001), como parámetros de aceptación o rechazo.

Tabla XIX. **Requisitos exigidos para uso de material en suelo cemento. Norma ACI-230.1R-90**

Requisito	Arena limosa color beige rosa	Arena pómez color gris
Porcentaje que pasa tamiz N°4 < 55%	No cumple	No cumple
Porcentaje que pasa tamiz N°200 < 5-35%	Si cumple	Si cumple
Tamaño máximo de agregado: 50mm (2")	Si cumple	Si cumple
Índice de Plasticidad < 8%	Si cumple	Si cumple

Fuente: ACI 230.1R-7, datos experimentales

Tabla XX. **Requisitos para los materiales a estabilizar con suelo cemento, según la Dirección General de Caminos de Guatemala**

Inciso	Material para estabilizar para subbase	Material para estabilizar base
Plasticidad previo a estabilización	IP < 15	IP < 10 LL < 30
Granulometría	% Pasa tamiz 200 < 70%	Idealmente, la graduación de tabla 304-1, sección 304 o tabla 305-1, sección 305.
Abrasión del tamiz N°4	No aplica	Abrasión del tamiz retenido N°4 < 50% o a consideración del diseñador

Fuente: *Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes, Ingenieros Consultores de Centro América S.A. 307-2.*

Como se puede observar en la tabla XIX, los materiales seleccionados según la normativa ACI, no cumplen como material para estabilizar con cemento. Debido a que los materiales no cumplieron el requisito para el tamiz núm. 4 (ver anexo).

Los requisitos que el ACI solicita respecto al tamiz núm. 4, no los solicita la Dirección General de Caminos y los índices de plasticidad y fineza del tamiz núm. 200 son mayores para dicha institución. Por lo que los materiales cumplen con la normativa guatemalteca.

A continuación se presentan 3 tablas, en donde se indican criterios o requisitos para poder aceptar o rechazar una estabilización de suelo cemento.

Tabla XXI. **Criterio de la PCA para ensayos de humedecimiento y secado o congelamiento descongelamiento, ensayo de durabilidad**

AASHTO	SUCS	Máxima pérdida de peso permisible (porcentaje)
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	14
A-1-b	GM, GP, SM, SP	14
A-2	GM, GC, SM, SC	14*
A-3	SP	14
A-4	CL, ML	10
A-5	ML, MH, CH	10
A-6	CL, CH	7
A-7	MH, CH	7
<p>*10% de pérdida máxima permisible para suelos A-2-6 y A-2-7 Criterios adicionales: 1. Cambio máximo de volumen durante la prueba de durabilidad, debe ser menor de 2% 2. El máximo contenido de agua durante la prueba debe ser menor que la cantidad requerida para la saturación de la mezcla en el tiempo del moldeo. 3. La resistencia a la compresión debe incrementar con la edad del espécimen.</p>		

Fuente: ACI 230.1R, tabla 5.1

Tabla XXII. **Rango de esfuerzo para compresión no confinada de suelo cemento**

Tipo de suelo	Rango de esfuerzo de compresión en estado saturado* (Psi)	
	7 días de edad	28 días de edad
Grupo AASHTO: A-1, A-2 y A-3 Grupo SUCS: GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP y SM	300-600	400-1000
Grupo AASHTO: A-4, A-5 Grupo SUCS: ML y CL	250-500	300-900
Grupo AASHTO: A-6 y A-7 Grupo SUCS: MH y CH	200-400	250-600
*Los especímenes deben ser curados a 7 días o 28 días, saturados con agua previamente al ensayo.		

Fuente: ACI 230.1R-90, tabla 4.1.

Tabla XXIII. **Requisitos para los materiales estabilizados cemento, según la Dirección General de Caminos de Guatemala**

Inciso	Material para estabilizar para subbase	Material para estabilizar base
Resistencia a la compresión no confinada a 7 días de edad	2.40 MPa	3.50 MPa
Resistencia a mojado y secado	% de desgaste < 14%	% de desgaste < 10%
Plasticidad posterior a estabilización	IP < 4	IP < 4

Fuente: elaboración propia.

Tomando en consideración las tablas anteriormente mencionadas, se interpretaron los resultados para las muestras estabilizadas con cemento anhidro.

Tabla XXIV. Verificación de resistencia a compresión de la arena limosa color beige rosa estabilizada con cemento anhidro

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Resistencia promedio		Normativo guatemalteco		Código norteamericano
	Mpa	Psi	Base >2.40 Mpa	Subbase >3.50 Mpa	ACI 230.1R 300-600 Psi
5	3,325	485	Cumple	Cumple	Cumple
7	4,760	690	Cumple	Cumple	No Cumple
9	6,370	930	Cumple	Cumple	No Cumple

Fuente: elaboración propia.

Utilizando 5 por ciento de cemento anhidro en la arena limosa, cumplió para ambos normativos.

Tabla XXV. Verificación resistencia de la arena pómez color gris estabilizada con cemento anhidro

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Resistencia promedio		Normativo guatemalteco		Código norteamericano
	Mpa	Psi	Base >2,40 Mpa	Subbase >3,50 Mpa	ACI 230.1R 300-600 Psi
7	1.680	255	No cumple	No cumple	No cumple
9	2.520	365	Cumple	Cumple	Cumple
11	3.115	455	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: elaboración propia.

Utilizando 9 y 11 por ciento de cemento anhidro en la arena pómez, cumplió para ambos normativos. Para el 7 por ciento de cemento no cumplió con las especificaciones de resistencia.

Tabla XXVI. Verificación de porcentaje de desgaste por humedecimiento y secado de la arena limosa color beige rosa estabilizado con cemento anhidro

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Porcentaje de desgaste	Normativo guatemalteco		Código norteamericano
		Base <14%	Subbase <10%	PCA <14%
5	21	No cumple	No cumple	No cumple
7	16	No cumple	No cumple	No cumple
9	9	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: elaboración propia.

La arena limosa cumple con los requerimientos de ambos normativos con el 9 por ciento de cemento.

Tabla XXVII. Verificación de porcentaje de desgaste por humedecimiento y secado de la arena pómez color gris estabilizado con cemento prehidratado

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Porcentaje de desgaste	Normativo guatemalteco		Código norteamericano
		Base <14%	Subbase <10%	PCA <14%
7	23	No cumple	No cumple	No cumple
9	22	No cumple	No cumple	No cumple
11	20	No cumple	No cumple	No cumple

Fuente: elaboración propia.

La arena pómez no cumple con los requisitos de desgaste para ambos normativos, por lo que se recomienda utilizar riego con emulsión asfáltica para evitar desgaste.

3.1.1. Estabilización con cemento prehidratado

Luego de determinar los resultados con el cemento anhidro, se presentaran los resultados de cemento prehidratado, juntamente con su análisis de la manera que se comportó.

Tabla XXVIII. **Chequeo de resistencia a compresión no confinada de la arena limosa color beige rosa estabilizada con cemento prehidratado**

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Resistencia promedio		Normativo guatemalteco		Código norteamericano
	Mpa	Psi	Base >2,40 Mpa	Subbase >3,50 Mpa	ACI 230.1R 300-600 Psi
5	2,275	330	No cumple	No cumple	Cumple
7	3,115	455	Cumple	No Cumple	Cumple
9	3,640	550	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: elaboración propia.

Para el normativo guatemalteco la arena limosa no cumple como base y subbase utilizando una proporción de 5 por ciento. Se permite utilizar 7 por ciento como base y un 9 por ciento como base y/o subbase.

Tabla XXIX. **Chequeo de cumplimiento de resistencia a compresión no confinada del cemento prehidratado, de la arena pómez color gris**

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Resistencia promedio		Normativo guatemalteco		Código norteamericano
	Mpa	Psi	Base >2,40 Mpa	Subbase >3,50 Mpa	ACI 230,1R 300-600 Psi
7	0,700	100	No cumple	No cumple	No cumple
9	1,120	165	No cumple	No cumple	No cumple
11	1,470	215	No cumple	No cumple	No cumple

Fuente: elaboración propia.

Utilizando un material poroso, como la arena pómez el efecto fue negativo, ya que no cumplió con las especificaciones mínimas tanto normativo guatemalteco como el ACI.

Tabla XXX. **Chequeo porcentaje de desgaste por humedecimiento y secado de la arena limosa color beige rosa estabilizado con cemento prehidratado**

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Porcentaje de desgaste	Normativo guatemalteco		Código norteamericano
		Base <14%	Subbase <10%	PCA <14%
5	43	No cumple	No cumple	No cumple
7	30	No cumple	No cumple	No cumple
9	29	No Cumple	No Cumple	No Cumple

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Verificación de cumplimiento de porcentaje de desgaste por humedecimiento y secado de la arena pómez color gris estabilizado con cemento prehidratado**

Contenido de cemento (porcentaje en peso)	Porcentaje de desgaste	Normativo guatemalteco		Código norteamericano
		Base <14%	Subbase <10%	PCA <14%
7	25	No cumple	No cumple	No cumple
9	21	No cumple	No cumple	No cumple
11	18	No cumple	No cumple	No cumple

Fuente: elaboración propia.

Ambos materiales estabilizados con cemento prehidratado no cumplieron con los requisitos mínimos establecidos por los normativos, por lo que no es recomendable utilizar dicho material en la construcción de carreteras con alta afluencia vehicular.

3.2. Comparación de resultados

Luego de obtener los resultados se elaboró una comparación. Se utilizó como punto de partida los materiales sin estabilizar con cemento. Posteriormente se indicaran los incrementos y decrementos de las características físicas y mecánicas de los suelos.

3.2.1. Relación humedad masa unitaria

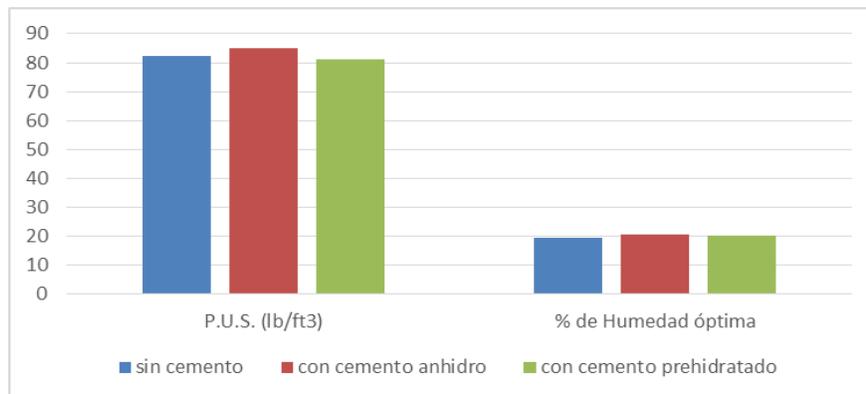
Esta relación se analiza en las siguientes tablas, se comparan los diferentes materiales tales como el cemento anhidro y el prehidratado, y de cómo estos afectan a los materiales del lugar.

Tabla XXXII. **Comparación de resultados relación humedad masa unitaria de la arena limosa color beige rosa**

Estado del material	PUS (lb/pie ³)	Porcentaje de humedad óptima
Sin cemento	82,25	19,4
Con 7 % cemento anhidro	85,1	20,5
Con 7 % cemento prehidratado	81	20,1

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfica de resultados relación humedad masa unitaria de la arena limosa color beige rosa**



Fuente: elaboración propia.

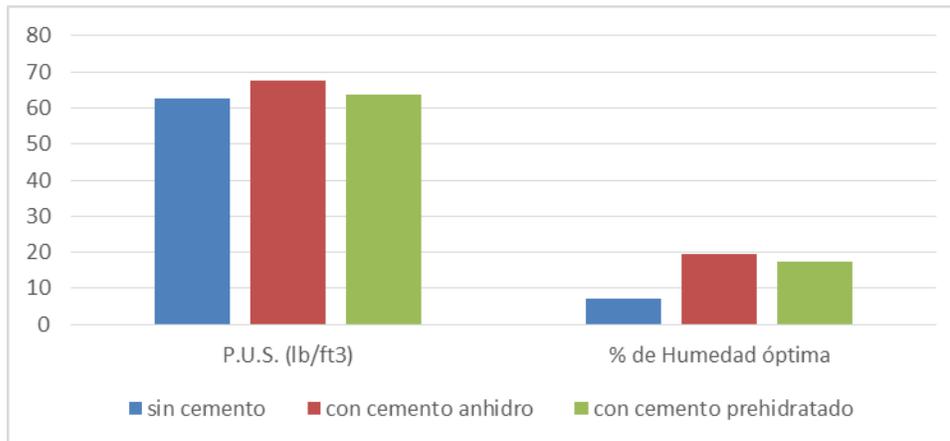
La mejora de la arena limosa con cemento anhidro respecto a la densidad seca fue de 2,85 libras por pie cúbico. Aunque al agregarle cemento prehidratado no mejoró su densidad debido a que disminuyó 1,25 libras por pie cúbico. La humedad de dicho material se mantuvo cercana al material sin estabilizar. El porcentaje de humedad requerido para lo óptimo no tuvo variaciones significativas, ya que las partículas finas por su naturaleza requieren de mayor cantidad de agua.

Tabla XXXIII. **Comparación de resultados relación humedad masa unitaria de la arena pómez color gris**

Estado del material	PUS (lb/pie³)	Porcentaje de humedad optima
Sin cemento	62,75	7,1
Con 9% cemento anhidro	67,5	19,5
Con 9% cemento prehidratado	63,8	17,4

Fuente: resultados experimentales.

Figura 20. **Gráfica de resultados relación humedad-masa unitaria de la arena pómez color gris**



Fuente: elaboración propia.

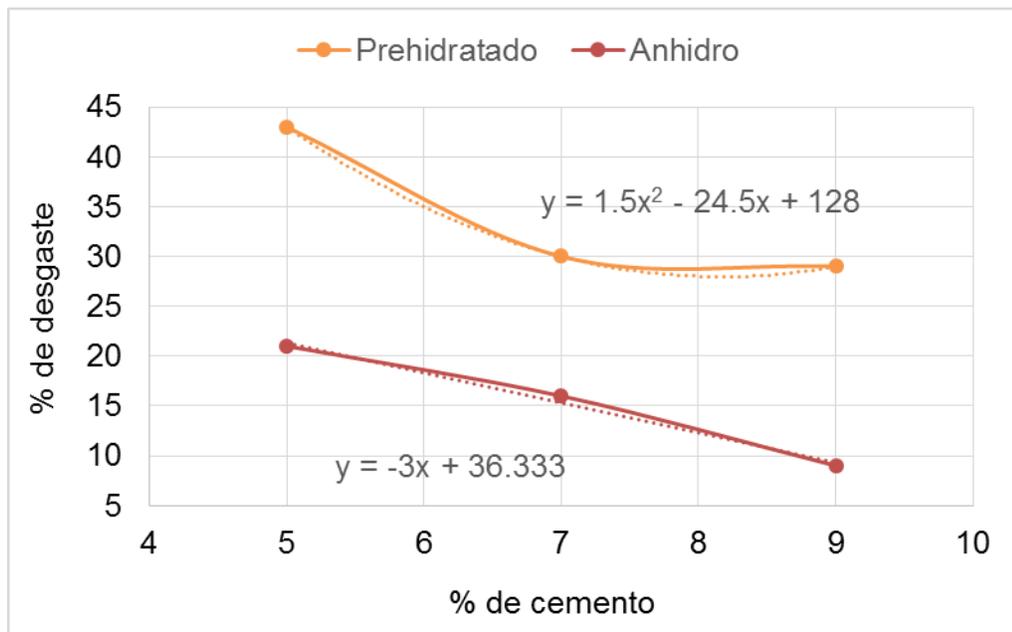
La mejora de la arena pómez con cemento anhidro fue de 4,75 libras por pie cúbico y la cantidad de agua se incrementó considerablemente hasta un 12,4 por ciento, por lo que el material debido a la poca cantidad de materiales finos que posee y el cemento absorbió la mayor cantidad de agua. Con el cemento prehidratado aumentó 1,05 libras por pie cúbico y la cantidad de agua se incrementó en un 10,3 por ciento. Esto es debido a que en el cemento prehidratado, las partículas fraguadas complementaron granulometría y el cemento ocupó los vacíos de las partículas de pómez.

Como se pudo observar en ambas gráficas, el porcentaje de humedad en obra no es significativo, ya que practican variaciones entre 1-5 por ciento de humedad, tomando en cuenta las condiciones climáticas y del material.

3.2.2. Humedecimiento y secado

En el presente inciso se compararán los resultados del ensayo de desgaste por humedecimiento y secado. Verificando si hay relaciones matemáticas en función de la cantidad de cemento y la calidad de él.

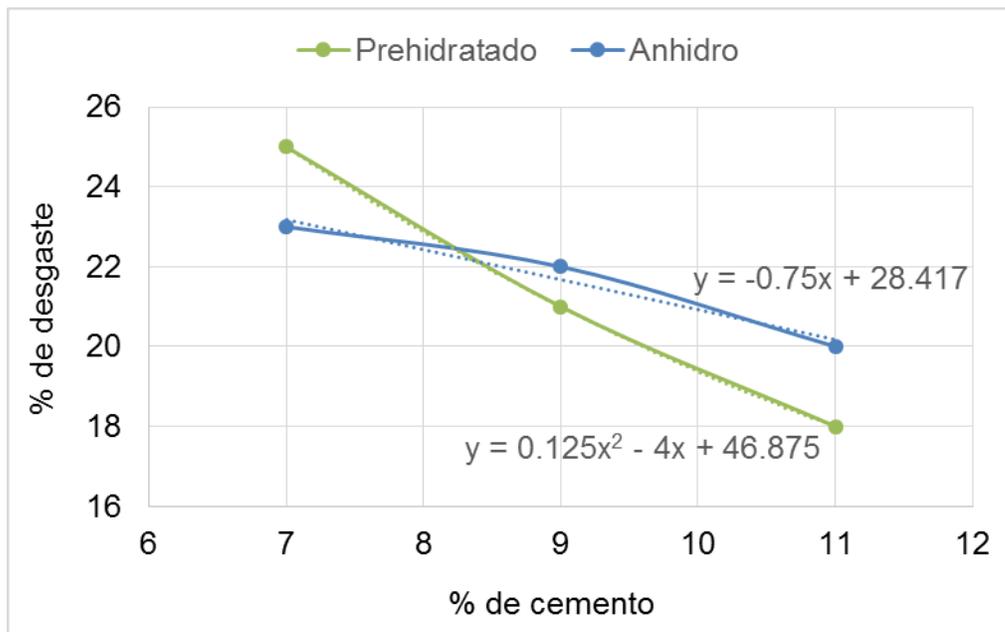
Figura 21. **Gráfica de comparación humedad y secado de la arena limosa color beige rosa**



Fuente: elaboración propia.

En el presente gráfico se aprecia que la arena limosa estabilizada con cemento anhidro tiene un comportamiento lineal, en cuanto al cemento prehidratado tiene un comportamiento polinomial. El comportamiento polinomial indica que a pesar de que se le agregue una mayor cantidad de cemento prehidratado no desarrollará mayor durabilidad.

Figura 22. **Gráfica de comparación humedad y secado de la arena pómez color gris**



Fuente: elaboración propia.

En el presente gráfico se aprecia el comportamiento parecido semejante a la arena limosa estabilizada con cemento anhidro. También presenta con tendencia lineal la arena pómez estabilizada con cemento anhidro y el prehidratado con tendencia polinomial. El traslape que se presenta en el gráfico no indica un comportamiento característico, aunque los resultados cercanos son debido a que el desgaste no varió en gran medida entre ambos.

3.2.3. Resistencia a la compresión

Para una comparación respecto a su capacidad a compresión, se utilizó como parámetro el aporte estructural “a”, donde se utiliza en el diseño del número estructural “SN” para la sección estructural del pavimento.

En el Método AASHTO para diseño de pavimentos recomienda utilizar ábacos para interpolar el valor de aporte estructural en pavimentos, para posteriormente incorporarla en la ecuación descrita a continuación.

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Donde:

- a₁, a₂, a₃: coeficientes estructurales de capa de carpeta, base y subbase
- D₁, D₂, D₃: espesor de la carpeta, base y subbase, en pulgadas
- m₂, m₃: coeficiente de drenaje para base y subbase.

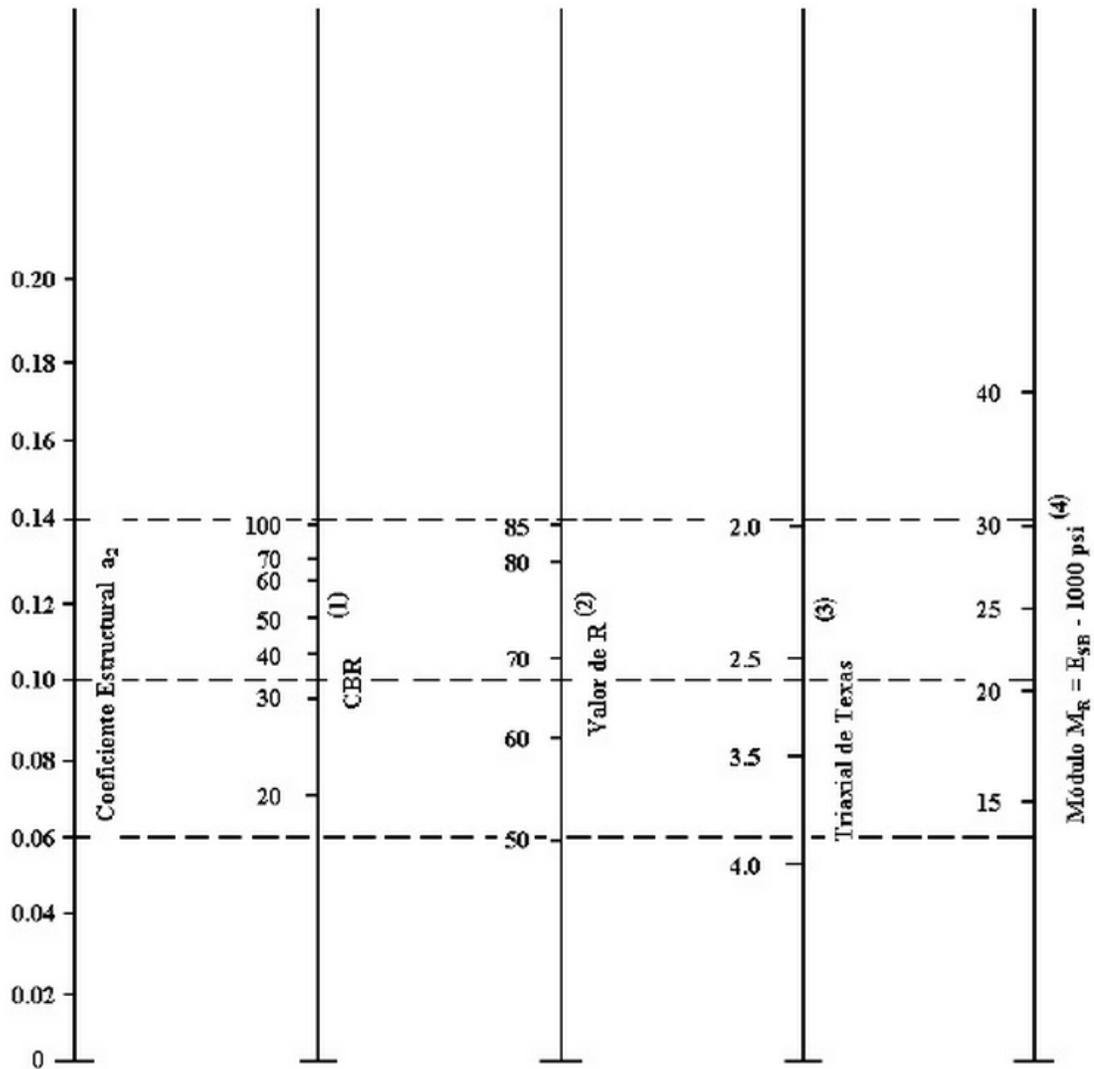
Los valores con el subíndice 1 son respecto a la carpeta asfáltica, por ende no se coloca coeficiente de drenaje. Los valores con el subíndice 2 y 3 son para la base y subbase.

Figura 23. **Efecto visual de utilizar cemento prehidratado en la arena limosa color beige rosa**



Fuente: Sección de Agregados, Concreto y Morteros. CII/USAC.

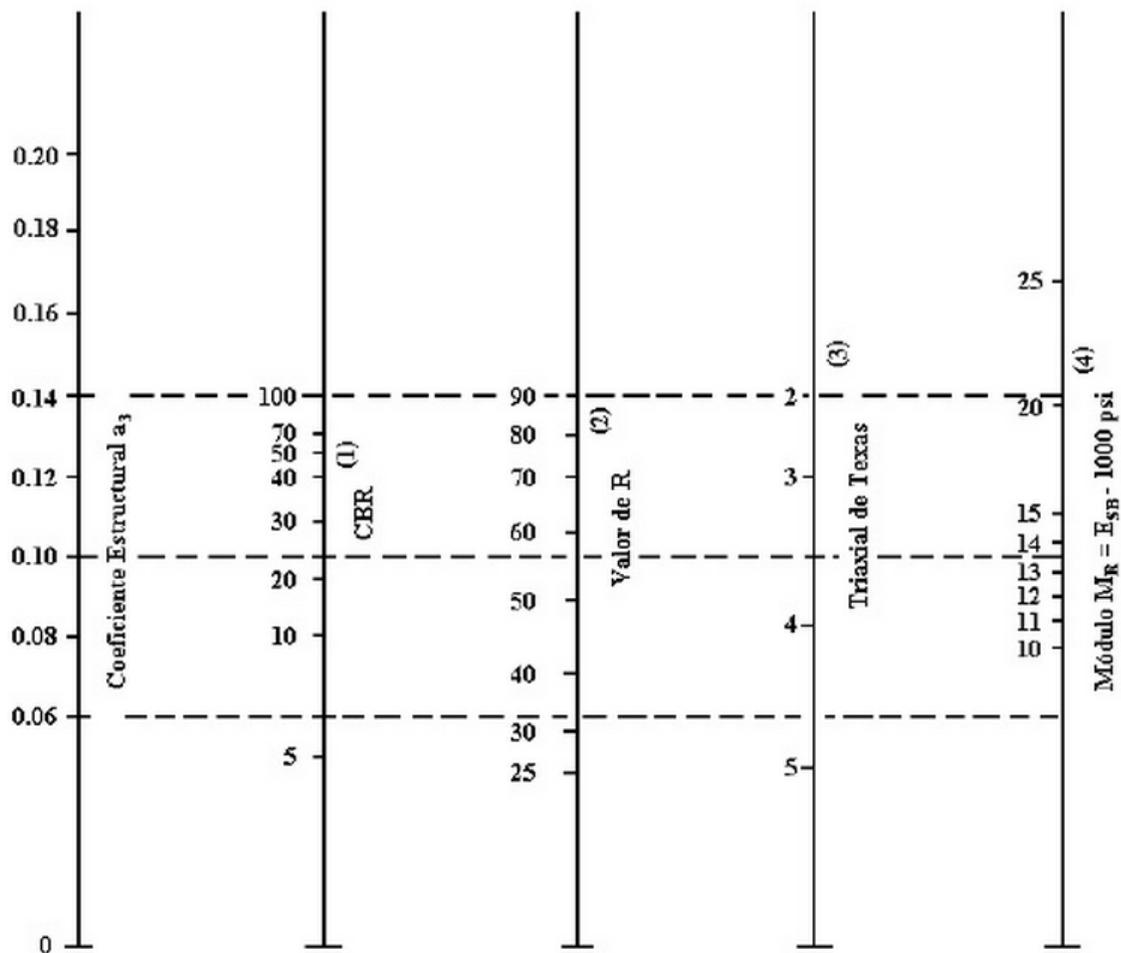
Figura 24. **Ábaco para estimar el número estructural de la base granular "a2"**



- (1) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de California, Nuevo Mexico y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: AASHTO. *Guía para diseño estructural de pavimentos 1993.*

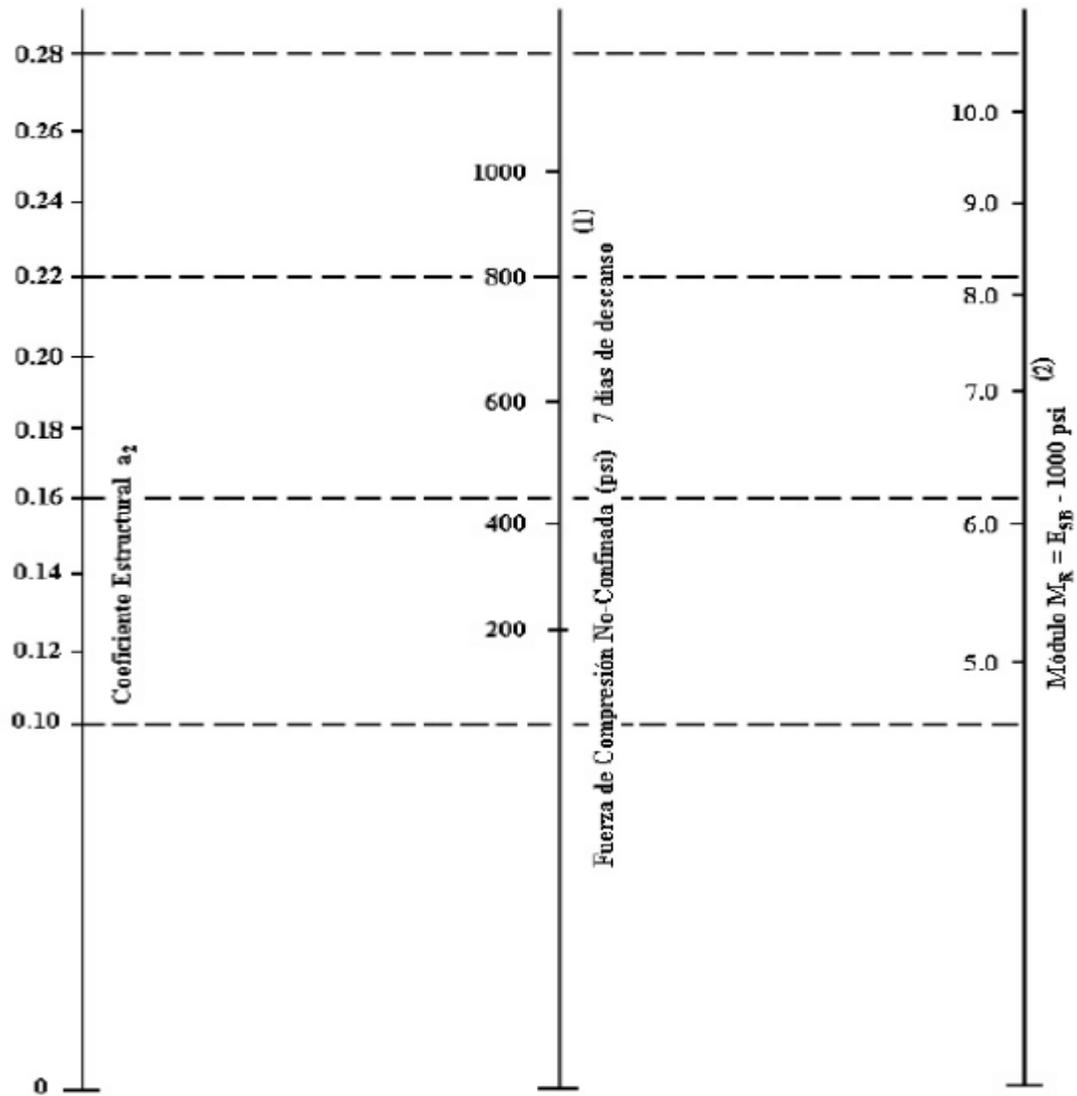
Figura 25. **Ábaco para estimar el número estructural de la subbase granular “a3”**



- (1) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de California, Nuevo Mexivo y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: AASHTO. *Guía para diseño estructural de pavimentos 1993.*

Figura 26. **Ábaco para estimar el número estructural de la base/subbase estabilizada con cemento**



- (1) Escala derivada por correlaciones promedios de Illinois, Louisiana y Texas.
- (2) Escala derivada en el proyecto NCHRP (3).

Fuente: AASHTO. *Guía para diseño estructural de pavimentos 1993.*

Para el suelo sin estabilizar se utilizó el valor soporte CBR al 95 por ciento de compactación y para los suelos estabilizados con cemento se utilizó el ábaco.

Tabla XXXIV. **Aporte estructural para base y subbase de los distintos estados de la arena limosa color beige rosa**

Estado del material	Dato a utilizar	Aporte estructural por el ábaco*
Sin estabilizar, uso de base	85 % CBR	0,134
Sin estabilizar, uso de subbase	85% CBR	0,134
5% de cemento anhidro	485 psi	0,169
5% de cemento prehidratado	330 psi	0,140
7% de cemento anhidro	690 psi	0,210
7% de cemento prehidratado	455 psi	0,170
9% de cemento anhidro	930 psi	0,240
9% de cemento prehidratado	550 psi	0,185

*Son valores aproximados.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Aporte estructural para base y subbase de los distintos estados de la arena pómez color gris oscuro**

Estado del material	Dato a utilizar	Aporte estructural por el ábaco*
Sin estabilizar, uso de base	35% CBR	0,100
Sin estabilizar, uso de subbase	35% CBR	0,115
7% de cemento anhidro	255 psi	0,141
7% de cemento prehidratado	100 psi	0,100
9% de cemento anhidro	365 psi	0,149
9% de cemento prehidratado	165 psi	0,120
11% de cemento anhidro	455 psi	0,172
11% de cemento prehidratado	215 psi	0,139

*Son valores aproximados.

Fuente: elaboración propia.

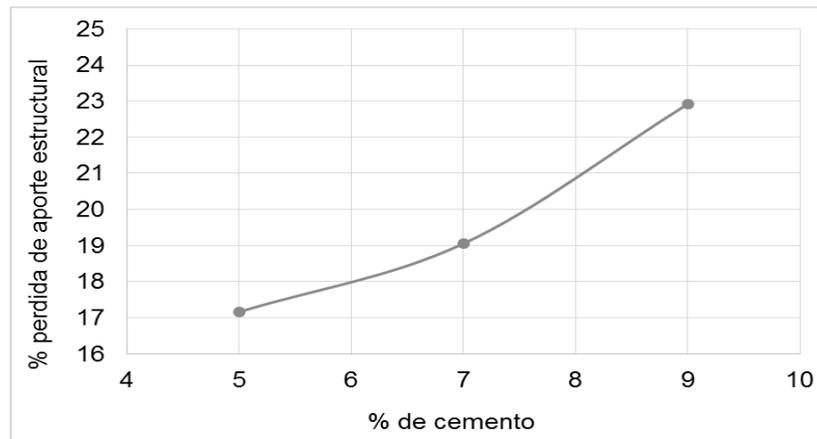
Los resultados obtenidos del aporte estructural con el suelo estabilizado fueron considerablemente mayores en comparación con el suelo en estado natural. Por el suelo, a pesar de ser estabilizado con cemento prehidratado presenta mejoras estructurales.

Tabla XXXVI. **Comparación de aporte estructural entre el tipo de cemento utilizado de la arena limosa color beige rosa**

Porcentaje de Cemento	Aporte Estructural según estado del cemento		Diferencia Δ	Porcentaje de pérdida de aporte estructural
	Anhidro	Prehidratado		
5	0,169	0,140	0,029	17,16%
7	0,210	0,170	0,040	19,05%
9	0,240	0,185	0,055	22,92%
Promedio			0,041	19,71%

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Porcentaje de pérdida de aporte estructural según el porcentaje de cemento en la arena limosa beige rosa**



Fuente: elaboración propia.

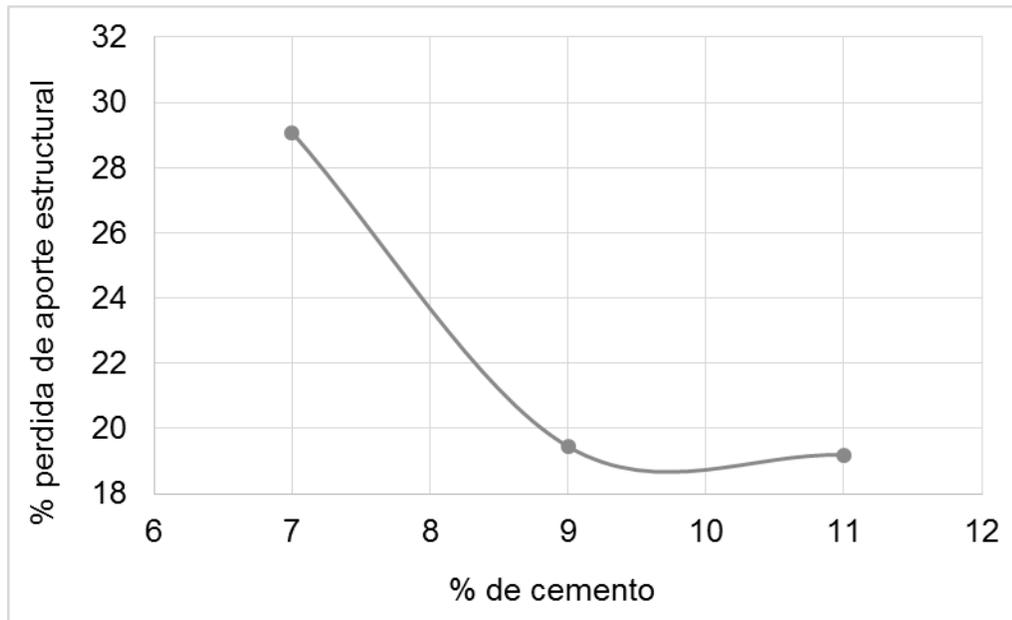
La disminución en promedio de aporte estructural fue de 19,71 por ciento. También se infiere que a mayor cantidad de cemento prehidratado que se utilice, mayor cantidad de aporte estructural se pierde si se utilizaría un cemento anhidro. Por consiguiente los espesores tendrían que aumentar en proporción de dicha pérdida.

Tabla XXXVII. **Comparación de aporte estructural entre el tipo de cemento utilizado de la arena pómez color gris**

Porcentaje de Cemento	Aporte Estructural según estado del cemento		Diferencia Δ	Porcentaje de pérdida de aporte estructural
	Anhidro	Prehidratado		
7	0,141	0,100	0,041	29,08
9	0,149	0,120	0,029	19,45
11	0,172	0,139	0,033	19,19
Promedio			0,034	22,57

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Porcentaje de pérdida de aporte estructural según el porcentaje de cemento en la arena pómez color gris**



Fuente: elaboración propia.

La disminución en promedio de aporte estructural fue de 22,57 por ciento, ya que el material no obtuvo suficiente adherencia. En el figura 27, el comportamiento de dicho material no está de acuerdo lo esperado, por lo que se infiere que la pérdida de aporte estructural depende de las características mineralógicas del suelo.

3.2.4. Permeabilidad

El cemento solo aporta capacidad mecánica al suelo, sino también hidráulica como lo es su permeabilidad. La permeabilidad no afecta en el valor de coeficiente de drenaje, ya que depende del tiempo que tarda el agua en ser evacuada del pavimento y el tiempo durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación en el transcurso del año.

Tabla XXXVIII. **Comparación de resultados de permeabilidad de los suelos estabilizados con suelo cemento**

Estado del material	Coeficiente de permeabilidad (cm/s)	
	Arena limosa color beige rosa (7% de cemento)	Arena pómez color gris (9% de cemento)
Natural	$8,98 \times 10^{-3}$	$5,12 \times 10^{-1}$
Estabilizado con cemento anhidro	$7,85 \times 10^{-5}$	$6,48 \times 10^{-2}$
Estabilizado con cemento prehidratado	$4,32 \times 10^{-4}$	$3,81 \times 10^{-1}$

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

Como se puede observar, en la permeabilidad aumenta al estabilizar el suelo con cemento, más no modifica la naturaleza permeable. El cemento funciona como ligante en el suelo, aunque no es suficiente como para llenar los vacíos del material, que lo convertiría como impermeable.

Tabla XXXIX. **Comparación de resultados de permeabilidad de los suelos estabilizados con suelo cemento**

Estado del material	Coefficiente de permeabilidad (cm/s)	
	Arena limosa color beige rosa (7% de cemento)	Arena pómez color gris (9% de cemento)
Estabilizado con cemento anhidro	$7,85 \times 10^{-5}$	$6,48 \times 10^{-2}$
Estabilizado con Cemento Prehidratado	$4,32 \times 10^{-4}$	$3,81 \times 10^{-1}$
Diferencia Δ	$3,54 \times 10^{-4}$	$3,16 \times 10^{-1}$

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. CII/USAC.

La variabilidad de los resultados es debido a que al utilizar un material con alta porosidad, el agua puede fluir entre los vacíos. El material que obtuvo un mayor efecto con el cemento fue la arena limosa, aunque ambos presentaron levemente una disminución de permeabilidad.

CONCLUSIONES

1. La arena limosa pómez color beige rosa y la arena pómez color gris cumplieron para el normativo guatemalteco, para ser utilizados como subbase, porque los resultados se encuentran en los rangos permisibles, tanto de índices de plasticidad como granulometría. Sin embargo, en el normativo norteamericano ACI 230.1R-90 no cumplieron con los requisitos mínimos para ser utilizados como material de base y subbase en las carreteras. El material evaluado para la resistencia a compresión de suelos estabilizados con cemento, se concluyó lo siguiente:
 - Arena limosa pómez color beige rosa
 - Estabilizado con cemento anhidro: para el normativo guatemalteco, las proporciones comprendidas entre 5 y 9 por ciento de cemento, cumple con los requisitos mínimos para ser utilizado como base y subbase, ya que sobrepasan los resultados de resistencia a compresión a 7 días de edad de 3,5 megapascales. Sin embargo, la proporciones superiores de 7 por ciento sobrepasaron el rango de resistencia del que solicita el ACI 230.1R-90
 - Estabilizado con cemento prehidratado: para el normativo guatemalteco, las proporciones superiores de 7 por ciento cumplen únicamente para ser utilizados como base, ya que sobrepasaron la resistencia de 2,4 megapascales a 7 días de edad. El suelo estabilizado con 9 por ciento de cemento

cumple para ser utilizado como base ya que sobrepasó 3,5 megapascales de resistencia. Para el normativo ACI los resultados cumplió con los requisitos mínimos, ya que se encuentra entre el rango de 300 y 600 libras por pulgada cuadrada.

- Arena pómez color gris
 - Estabilizado con cemento anhidro: para el normativo guatemalteco, las proporciones comprendidas entre 9 y 11 por ciento de cemento, cumple con los requisitos mínimos para ser utilizado como base y subbase, ya que sobrepasan los resultados de resistencia a compresión a 7 días de edad de 3,5 megapascales, así también se encuentra entre el rango que permite el normativo ACI 230.1R-90.
 - Estabilizado con cemento prehidratado: tanto para el normativo guatemalteco como el ACI 230.1R-90, no cumplió con los requisitos mínimos que solicitan ambos normativos.
2. Utilizando la recomendación de desgaste por humedad y secado, ambos materiales estabilizados con cemento anhidro o prehidratado los normativos no permiten utilizarlo. Sin embargo, en la resistencia a compresión las proporciones adecuadas son las siguiente:
- La arena limosa color beige rosa con proporciones mayores de 5 por ciento con cemento anhidro o con proporciones mayores a 9 por ciento con cemento prehidratado

- La arena pómez color gris con proporciones mayores de 7 por ciento con cemento anhidro y evitar utilizar cemento prehidratado.
3. La resistencia de los suelos estabilizados, tanto con cemento anhidro como prehidratado mostraron crecimientos conforme se aumentaban las proporciones. El material estabilizado con cemento anhidro mostraron crecimientos mayores que el cemento prehidratado. El aporte estructural que se obtuvo de manera estabilizada fue mayor que el suelo compactado únicamente con agua. Al utilizar un cemento prehidratado se tiene una pérdida de aporte en un rango promedio de 20-25 por ciento. La permeabilidad de los suelos estabilizados con cemento anhidro y prehidratado disminuyeron la capacidad permeable de ambos materiales, aunque no le modificaron la característica de permeabilidad, sin embargo estabilizarlo con cemento prehidratado no aporta mayor modificación. Ambos materiales, por su naturaleza son muy erosionables, por lo que al efectuar la prueba de desgaste no cumplieron los requisitos, a pesar de tener altas cantidades de cemento.
 4. La manera que influye un cemento anhidro y prehidratado es que ambos incrementan el aporte estructural de los materiales para una base y subbase. Sin embargo, al utilizar un cemento prehidratado no incrementa sus capacidades como se esperaría con un cemento anhidro. El ensayo de desgaste no presentó comportamientos definitivos, por lo que varía según el tipo de material. Los materiales con mayor presencia de finos presentan mayor mejora en la resistencia a compresión. Con base en la información fotográfica, se encontraron grumos de cemento fraguado, por lo que indica que la calidad de adherencia del cemento prehidratado es mucho menor que con el cemento anhidro, aunque hay que tomar en

cuenta que dependiendo de las características físicas de los suelos presentaría distinto comportamiento.

RECOMENDACIONES

1. El cemento prehidratado puede ser utilizado tomando en cuenta su aporte estructural, pero no para estructuras de pavimento importantes como carreteras principales o secundarias. Podría ser utilizado en zonas no muy transitadas por transporte pesado, parqueos, ciclo vías, pasos peatonales y protección de tuberías enterradas en áreas de terracería. Y para evitar el desgaste aplicar riego de emulsión asfáltica.
2. Emplear una programación adecuada para el diseño de suelo cemento, ya que el ensayo de desgaste por humedad y secado requiere de un mes para elaborar el estudio y preparar suficientes probetas para minimizar el rango de error de resultados estadísticos.
3. Según información fotográfica, al elaborar estudios de campo para verificar del estado actual del pavimento, se pueden tomar en consideración las características visuales, por lo que puede indicar un porcentaje de pérdida de aporte estructural y dictaminaría una investigación más detenida.
4. Continuar con la investigación ya que únicamente se emplearon aspectos generales para que futuros investigadores profundicen en cada uno de los aspectos descritos en el trabajo de graduación.

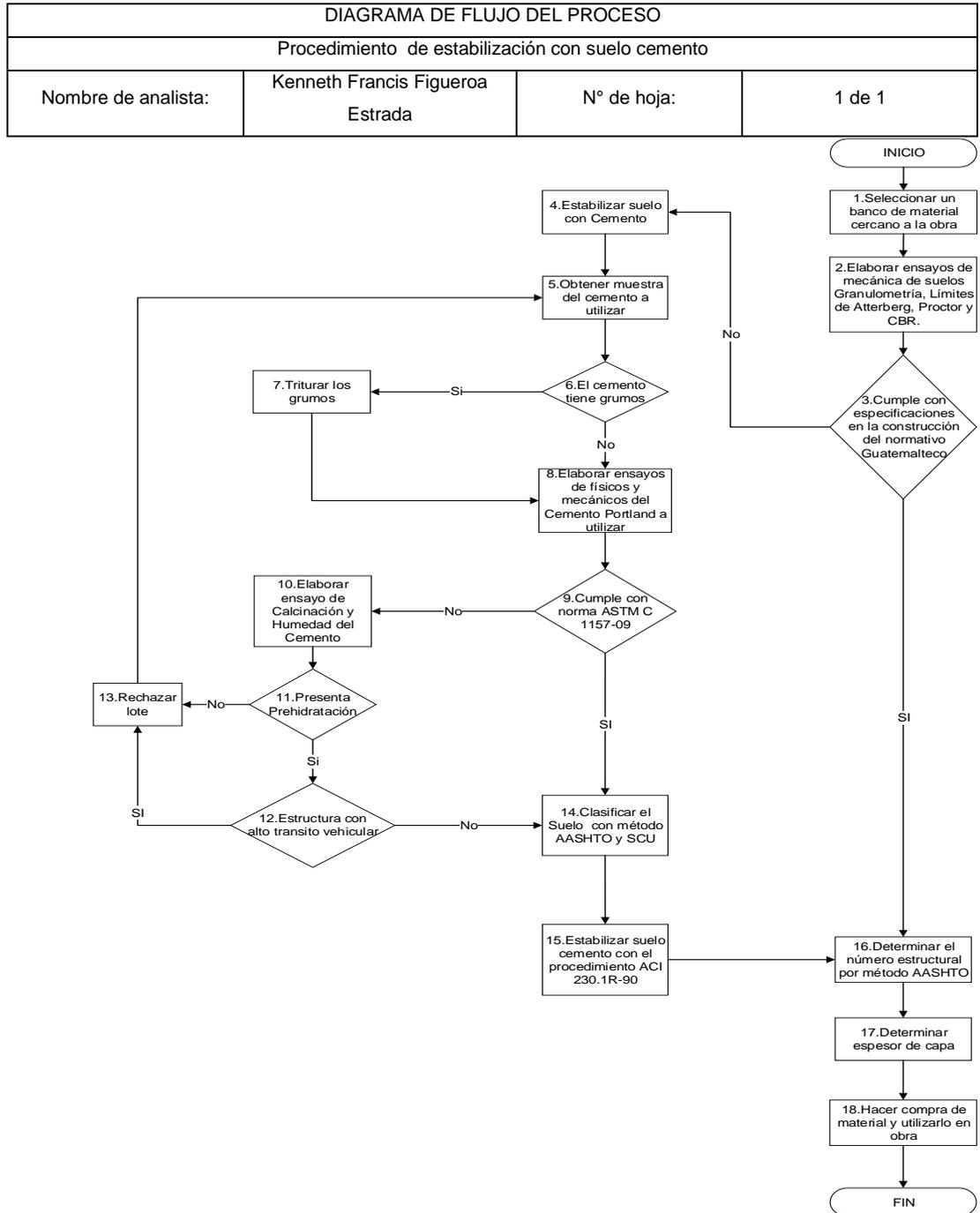
BIBLIOGRAFÍA

1. ACI. *State of the Art Report on Soil Cement*. ACI 230.1R-90. Estados Unidos de América: ACI, 1997. 23 p.
2. ANCADE, ANTER, IECA. *Manual de Estabilización de suelos con cemento o cal*. España: IECA, 2008. 205 p.
3. DAS, Braja M. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 4 ed. México: Internacional Thomson Editores, 2001. 862 p.
4. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras*. República de Guatemala: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, Guatemala: MICIVI 2001. 723 p.
5. GUERRERO URQUILA, Luis Ernesto, MIRANDA MARTÍNEZ, Héctor Armando; RAMÍREZ, José Antonio. *Correlación del módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y coeficiente de capa en bases de suelo cemento*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2008. 250 p.
6. Universidad Nacional Autónoma de México.
<<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2411/Tesis.pdf?sequenc>> [Consulta: 01 de mayo de 2014].

7. Instituto Boliviano del Cemento y el hormigón. *Dosificación de mezclas de suelo-cemento normas de dosificación*. Bolivia: IBCI, 2002. 40 p.
8. KOSMATKA, Steven H. *Diseño y control de mezclas de concreto*. México: PCA, 2004. 448 p.
9. LEONI, Augusto José; NADEO, Julio Roberto. *Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos*. Argentina. Universidad Nacional de La Plata. 62 p.
10. QUINTANILLA RODRÍGUEZ, Carlos Antonio. *El estado del arte del suelo cemento en estructuras de pavimento*. Panamá: FICEM, 2007. 50 p.
11. WADDELL, Joseph J. *Manual de la construcción con concreto Tomo 1*. 3a ed. México: McGraw-Hill, 1997. 320 p.

APÉNDICES

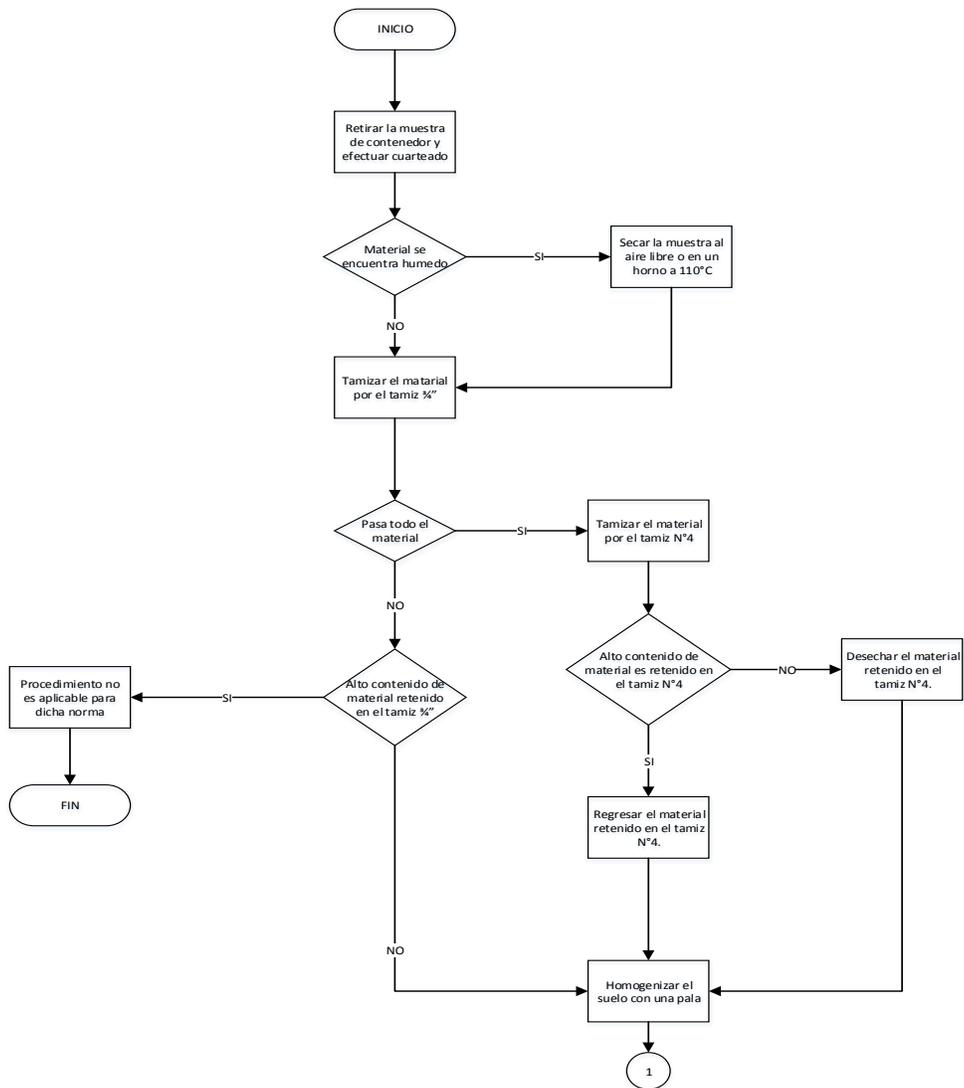
Apéndice 1. Diagrama de flujo del proceso del procedimiento de estabilización de suelo cemento



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Diagrama de flujo del proceso del procedimiento de ensayo relación humedad masa unitaria (ASTM D 558-96), hoja 1 de 3**

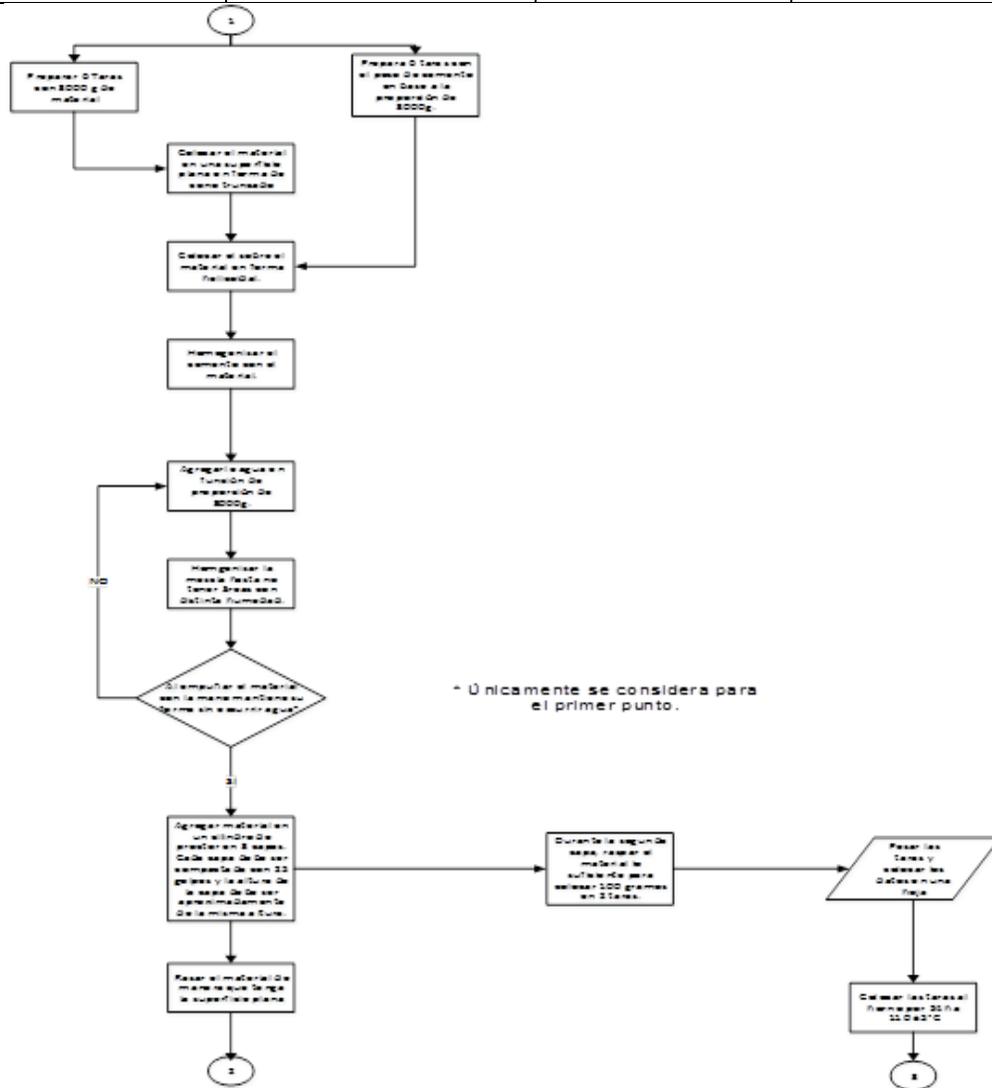
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO			
Procedimiento de ensayo relación humedad-masa unitaria (ASTM D 558-96)			
Nombre de analista:	Kenneth Francis Figueroa Estrada	N° de hoja:	1 de 3



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Diagrama de flujo del proceso del procedimiento de ensayo relación humedad masa unitaria (ASTM D 558-96), hoja 2 de 3

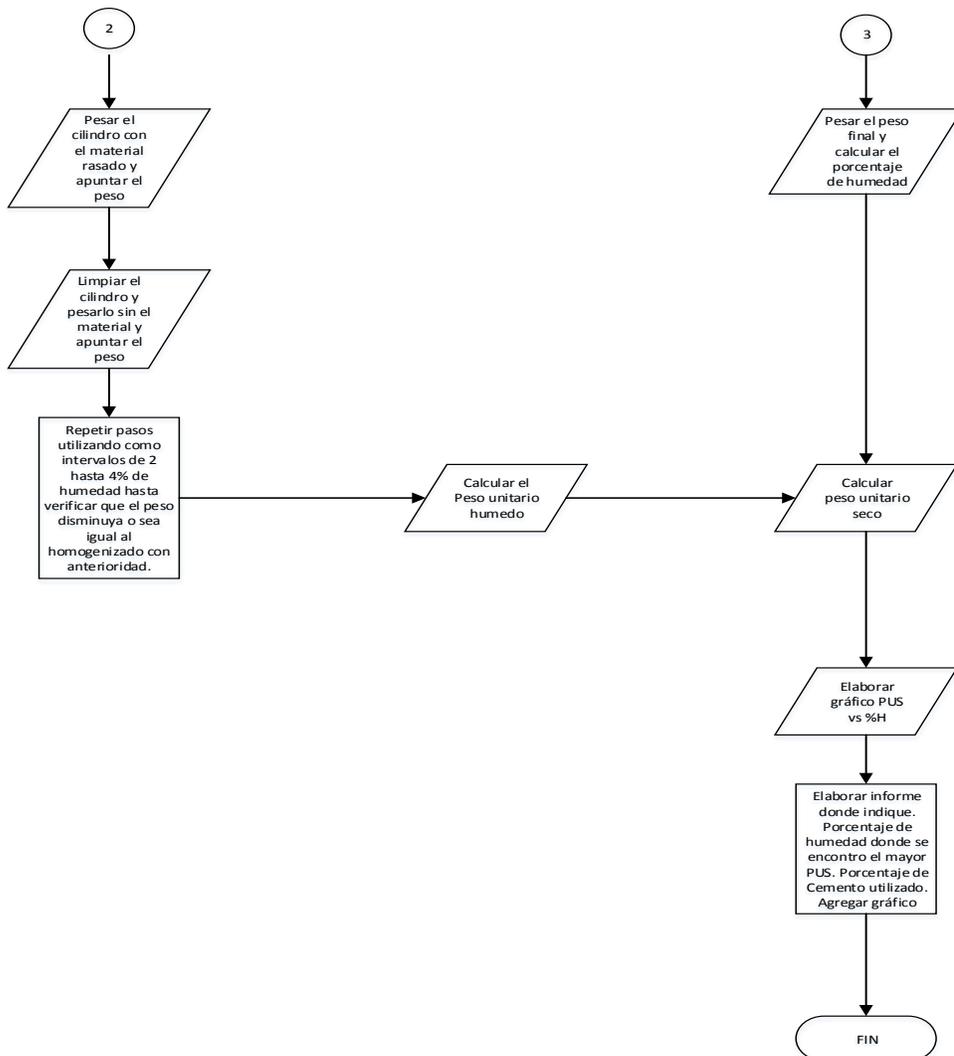
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO			
Procedimiento de ensayo relación humedad-masa unitaria (ASTM D 558-96)			
Nombre de analista:	Kenneth Francis Figueroa Estrada	Nº de hoja:	2 de 3



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Diagrama de flujo del proceso del procedimiento de ensayo relación humedad masa unitaria (ASTM D 558-96), hoja 3 de 3**

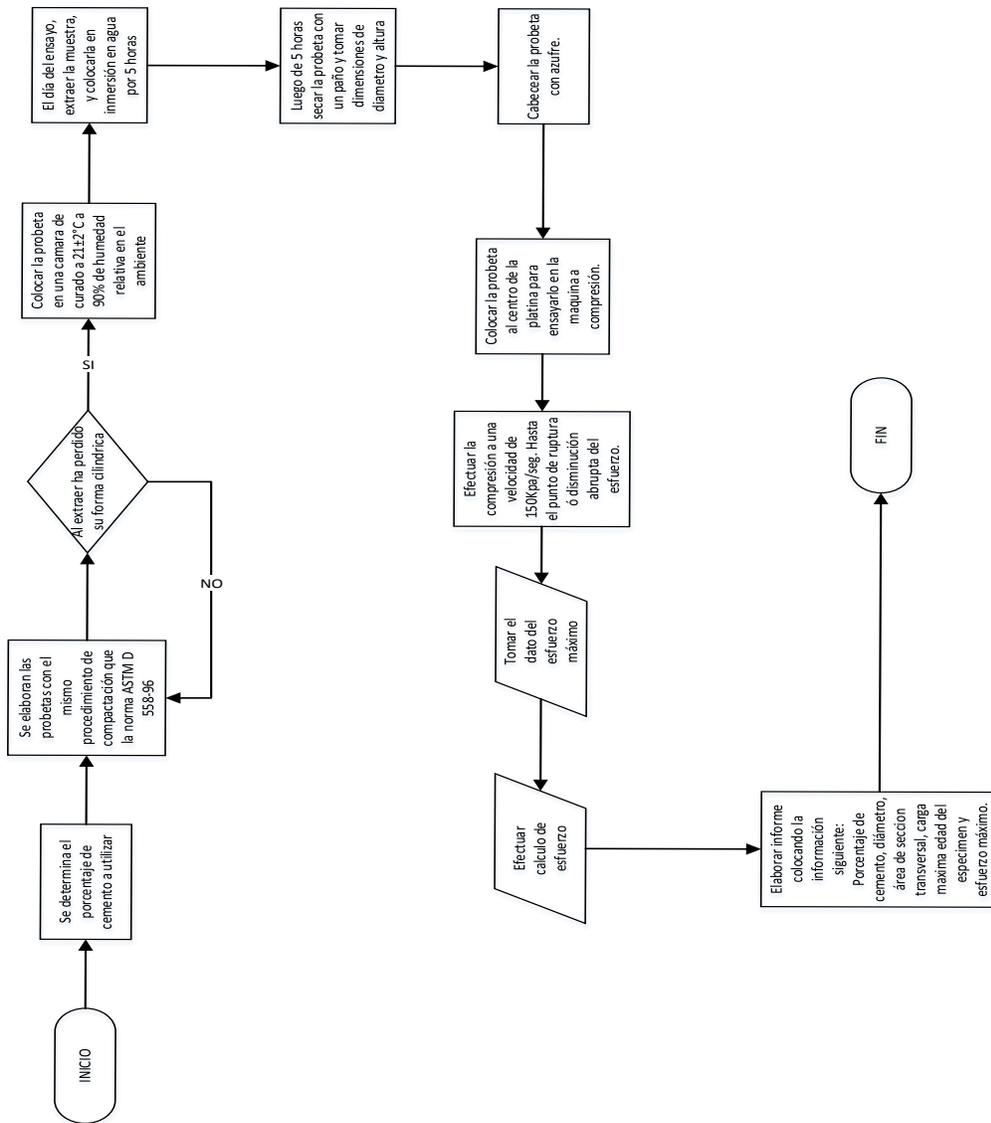
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO			
Procedimiento de ensayo relación humedad-masa unitaria (ASTM D 558-96)			
Nombre de analista:	Kenneth Francis Figueroa Estrada	N° de hoja:	3 de 3



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Diagrama de flujo del proceso del procedimiento de ensayo a compresión de probetas de suelo cemento (ASTM D 1633-00)

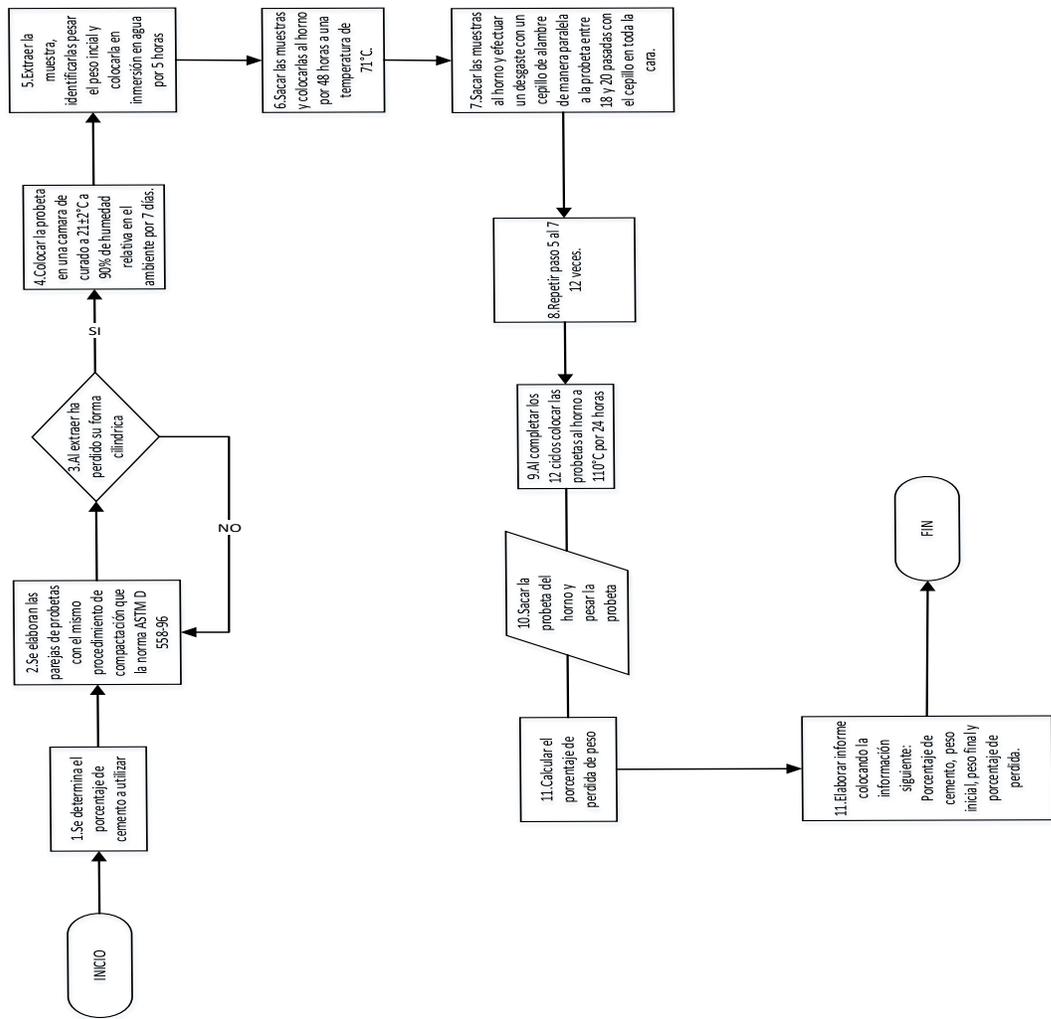
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO			
Procedimiento de ensayo a compresión no confinada de probetas de suelo cemento (ASTM D 1633-00)			
Nombre de analista:	Kenneth Francis Figueroa Estrada	N° de hoja:	1 de 1



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Diagrama de flujo del proceso del procedimiento de ensayo a desgaste por humedad y secado de probetas de suelo cemento (ASTM D 559-96)

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO			
Procedimiento de ensayo a desgaste por humedad y secado de probetas de suelo cemento (ASTM D 559-96)			
Nombre de analista:	Kenneth Francis Figueroa Estrada	N° de hoja:	1 de 1



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Clasificación suelos Método AASHTO**

GRUPO SUB-GRUPO	Suelos Granulares: 35% o menos pasa malla # 200							Suelos Arcillosos y Limosos: Más de 35% pasa malla # 200			
	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*
Porcentaje de material que pasa el tamiz											
No. 10	50max										
No. 40	30max	50max	51min								
No. 200	15max	30max	10max	35max	35max	35max	35max	36min	36min	36min	36min
Plasticidad Pasa la malla # 40											
LL				40max	41min	40max	41min	40max	41min	40max	41min
IP	6max		NP	10max	10max	11min	11min	10max	10max	11min	11min
Índice de Grupo ^a	0		0	0		4max		8max	12max	16max	20max
Materiales Constructivos	Fragmentos de Piedra, grava y Arena		Arena Fina	Grava y/o Arena limosa		Grava y/o Arena arcillosa		Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Calidad (Subrasante)	Excelente a Buena						Regular a Mala				

* A-7-5: IP menor o igual a LL - 30 * A-7-6: IP mayor que LL - 30

^a Índice de Grupo = IG = (F₂₀₀ - 35) [0.2 + 0.005 (LL - 40)] + 0.01 (F₂₀₀ - 15) (IP - 10)

Fuente: BOWELS, Joseph E. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. p. 70.

Anexo 2. Informes de laboratorio



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



O.T. No. 31820
USAC-CII-QUIND-LAFIQ-
RG-358-29-13

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada
Proyecto: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento portland anhidro y prehidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras."
Muestra: 2 muestras de cemento
Fecha: Guatemala, 19 de agosto de 2013

a) Determinación de porcentaje de humedad y de carbonatos por gravimetría.

Identificación LAFIQ	Identificación interesado	% Humedad	% Carbonatos (CO ₃ ²⁻)
RG-360-45-13	Cemento anhidro "Nuevo"	1,40 ± 0,12	3,88 ± 0,02
RG-360-46-13	Cemento prehidratado "Viejo"	2,81 ± 0,04	8,01 ± 0,30

* Muestra proporcionada por el interesado

MS. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
Asesora LAFIQ/QI

Ing. César Alfonso García Guerra
Jefe
Sección Química Industrial -CII-

Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora
Centro de Investigaciones de Ingeniería CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME DE ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS AL CEMENTO

S.C. - 678 O.T. No. 31833

HOJA 1/1

INTERESADO: Kenneth Francis Figueroa Estrada, Carné No. 2008-15254

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland Anhidro y Pre-hidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo"

DIRECCIÓN: 48 calle 10-90, Prados de Monte María, Zona 12 Villa Nueva

FECHA: 24 de septiembre de 2013

RESULTADOS:

ENSAYOS FÍSICOS		
ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Peso Especifico	ASTM C-188	2.89
Fineza Tamiz No. 325	ASTM C-430	96.22

ENSAYOS MECÁNICOS							
No. CUBO	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Peso [g]	Área [cm ²]	Carga [kg]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
1	21/08/2013	3	288.10	25.857	5,470	20.70	3000.00
2	21/08/2013	3	287.18	25.401	5,200	20.10	2920.00
3	21/08/2013	3	289.18	25.601	5,890	22.60	3280.00
4	21/08/2013	7	281.15	25.652	6,550	25.00	3630.00
5	21/08/2013	7	278.80	25.550	6,400	24.60	3570.00
6	21/08/2013	7	281.50	25.251	6,540	25.40	3690.00
7	21/08/2013	28	270.82	25.908	6,680	25.30	3670.00
8	21/08/2013	28	272.50	25.806	8,260	31.40	4560.00
9	21/08/2013	28	271.88	25.301	6,680	25.90	3760.00

OBSERVACIONES:

a) La mezcla corresponde a: **Cemento Portland Abhidro + arena estándar + agua.**

b) Muestras ensayadas en maquina universal BALDWIN LIMA HAMILTON con capacidad de 60,000 kg.

c) Dial utilizado para lectura de cargas: 12,000 kg.

d) Proporción de diseño de mezcla: **1 : 2.75 : 0.466**

ATENTAMENTE,



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concreto y Morteros



Vo.Bo.



Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CIH/USAC



EM6

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115 Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Pagina web: http://cih.usac.edu.gt

Continuación del anexo 2.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME DE ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS AL CEMENTO

S.C. - 679

O.T. No. 31834

HOJA 1/1

INTERESADO: Kenneth Francis Figueroa Estrada, Carné No. 2008-15254.
PROYECTO: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland Anhidro y Pre-hidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo".
DIRECCIÓN: 48 calle 10-90, Prados de Monte María, Zona 12 Villa Nueva.
FECHA: 4 de octubre de 2013

RESULTADOS:

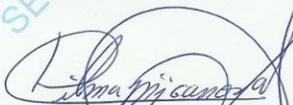
ENSAYOS FÍSICOS		
ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Peso Especifico	ASTM C-188	2.73
Fineza Tamiz No. 325 (%)	ASTM C-430	81

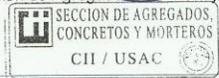
ENSAYOS MECÁNICOS							
No. CUBO	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Peso [g]	Área [cm ²]	Carga [kg]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
1	27/08/2013	3	277.79	26.163	1,850	6.90	1000
2	27/08/2013	3	279.15	26.317	1,850	6.90	1000
3	27/08/2013	3	281.40	26.266	1,912	7.10	1030
4	27/08/2013	7	280.75	26.000	2,340	8.80	1280
5	27/08/2013	7	281.02	26.020	2,680	10.10	1470
6	27/08/2013	7	280.03	25.989	2,400	9.10	1320
7	27/08/2013	28	281.76	26.138	5,100	19.10	2770
8	27/08/2013	28	284.14	26.086	5,500	20.70	3000
9	27/08/2013	28	281.27	25.781	5,280	20.10	2920

OBSERVACIONES:

- La mezcla corresponde a: **Cemento Portland Pre-hidratado + arena estándar + agua.**
- Muestras ensayadas en maquina universal BALDWIN LIMA HAMILTON con capacidad de 60,000 kg.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 12,000 kg.
- Proporción de diseño de mezcla: **1 : 2.75 : 0.466**

ATENTAMENTE,


Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concreto y Morteros



Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



c.v.

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Pagina web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 2.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. 213 S.S.

O.T.: 31.987

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada

Proyecto: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12

FECHA: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

RESULTADOS:

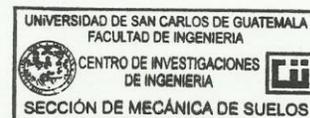
ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACIÓN *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	N.P.	N.P.	M.L.	Arena Limosa Pomez Color Beige Rosa

(*) = CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLATICIDAD

Observaciones:

Muestra tomada por el interesado.
Suelo en estado natural

Atentamente,

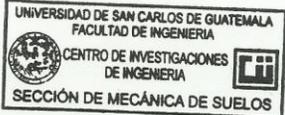


Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Omar Enrique Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Continuación del anexo 2.

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
INFORME No. 214 S.S.		O.T.: 31.987
INTERESADO:	Kenneth Francis Figueroa Estrada	
PROYECTO:	Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"	
ASUNTO:	ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS DEL SUELO	
NORMA:	ASTM D854-05	
UBICACION:	48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12	
DESCRIPCIÓN DEL SUELO:	Arena Limosa Pomez Color Beige Rosa	
FECHA:	Miércoles, 26 de Marzo de 2014	
RESULTADOS:	 G_{20°C} : 2,26	
OBSERVACIONES:	Muestra tomada por el interesado. Suelo en estado natural	
Atentamente,		
		
Vo. Bo. Inga. <i>Teima Marcela Cano Morales</i> DIRECTORA CII/USAC	<i>Omar Enrique Medrano Méndez</i> Ing. Omar Enrique Medrano Méndez Jefe Sección Mecánica de Suelos	
<small>FACULTAD DE INGENIERIA —USAC— Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: http://cii.usac.edu.gt</small>		

Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

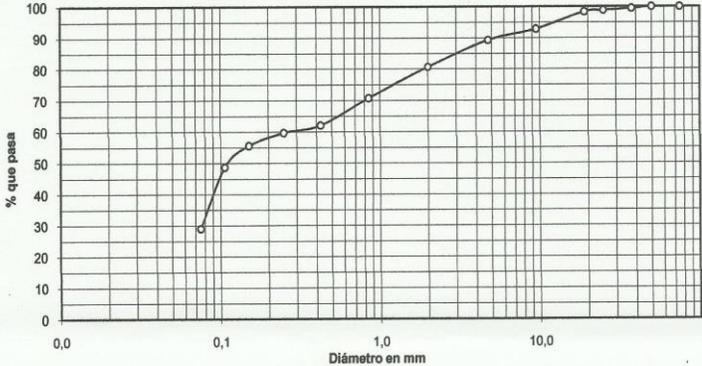


INFORME No.: 215 S.S.

O.T.: 31.987

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada
 Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico con tamices y lavado previo
 Norma: ASTM D6913-04
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"
 Ubicación: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12
 Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014 Muestra: 1

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100,00	10	2.00 mm	80,72
2"	50 mm	100,00	20	850 μ m	70,72
1 1/2"	37.5 mm	99,46	40	425 μ m	62,09
1"	25 mm	98,83	60	250 μ m	59,75
3/4"	19.0 mm	98,38	100	150 μ m	55,59
3/8"	9.5 mm	92,91	140	106 μ m	48,71
4	4.75 mm	89,33	200	75 μ m	29,04



Descripción del suelo: Arena Limosa Pomez Color
 Clasificación: S.C.U.: S.P. P.R.A.: A-3

% de Grava: 10,67
 % de Arena: 60,28
 % de finos: 29,04

D10: 0.00 mm
 D30: 0.00 mm
 D60: 0.35 mm

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CIIUSAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERIA—USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Nota: La clasificación P.R.A. es A-2-4.

Continuación del anexo 2.



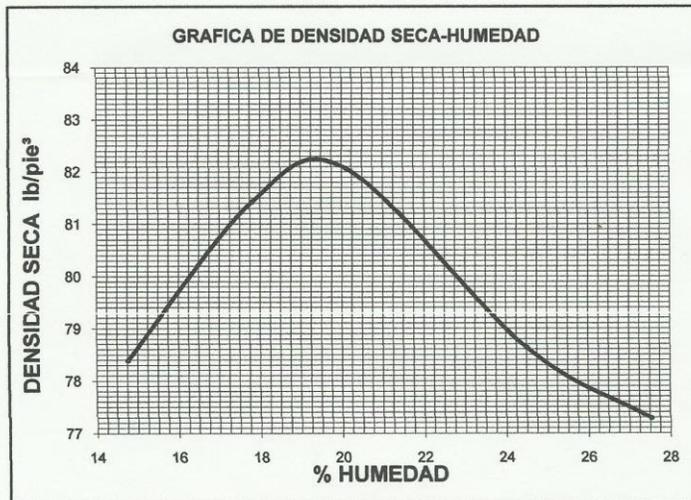
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No.: 216 S.S.

O.T.: 31.987

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.T.H.O. T-99
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180
Proyecto: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"
Ubicación: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12
Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

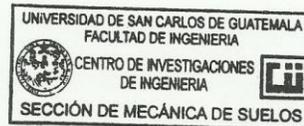


Descripción del suelo: Arena Limosa Pomez Color Beige Rosa
Densidad seca máxima γ_d : 1.318 Kg/m³ 82,25 lb/ft³
Humedad óptima Hop.: 19,4 %
Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,



Inga. Telma Maridela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Médrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

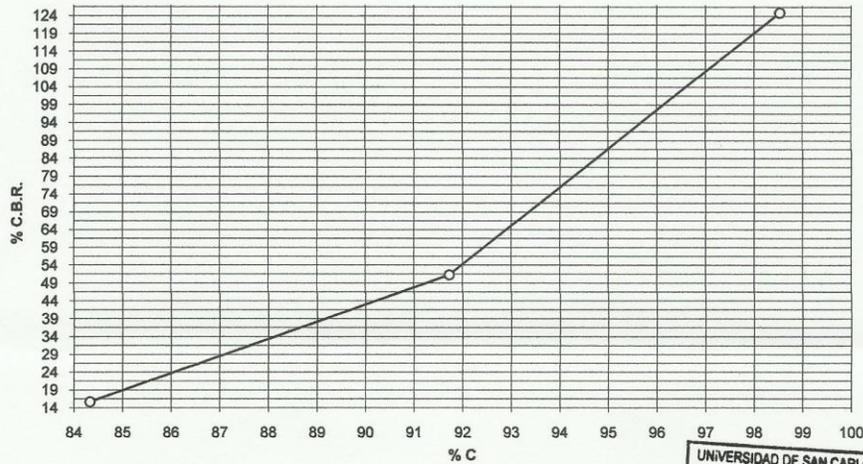


INFORME No.: 217 S.S.

O.T. No.: 31.987

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O. T-193
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"
 Ubicación: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12
 Descripción del suelo: Arena Limosa Pomez Color Beige Rosa
 Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

PROBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
No.	No.	H (%)	Yd (Lb/pie ³)	(%)	(%)	(%)
1	10	20,78	69,36	84,33	0,02	15,72
2	30	20,78	75,44	91,72	0,02	51,35
3	65	20,78	81,04	98,53	0,00	124,95



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 Vo. Bó.:
 DIRECCION

Ing. Telma Marcela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC

Atentamente,

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 SECCION DE MECANICA DE SUELOS

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Continuación del anexo 2.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No.: 223 S.S.

O.T. No.: 31.988

INTERESADO: Kenneth Francis Figueroa Estrada

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Incidencia del Cemento Portland Anhidro y Pre-hidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras".

ASUNTO: Ensayo de Permeabilidad Cabeza Constante

NORMA: ASTM D 5856-00

UBICACIÓN: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12

MUESTRA No.: 1 PROFUNDIDAD: X m

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Arena Limosa Pomez Color Beige Rosa

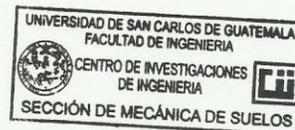
FECHA: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

RESULTADO DEL ENSAYO:

Coefficiente de Permeabilidad = 8.98×10^{-3} cm/s

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,



Omar Enrique Medrano Mendez
Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo.

Telma Maricela Cano Morales
Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Continuación del anexo 2.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. 218 S.S.

O.T.: 31.987

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada

Proyecto: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12

FECHA: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

RESULTADOS:

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACIÓN *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	N.P.	N.P.	M.L.	Arena Pomez Limosa Color Gris

(*) = CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLATICIDAD

Observaciones:

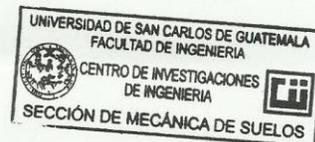
Muestra tomada por el interesado.
Suelo en estado natural

Atentamente,



Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Omar Enrique Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Continuación del anexo 2.

 **CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA** 

INFORME No. 219 S.S. **O.T.:** 31.987

INTERESADO: Kenneth Francis Figueroa Estrada

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"

ASUNTO: ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS DEL SUELO

NORMA: ASTM D854-05

UBICACIÓN: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Arena Pomez Limosa Color Gris

FECHA: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

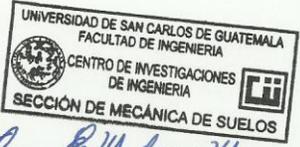
RESULTADOS:

$G_{20^{\circ}\text{C}} : 1,79$

OBSERVACIONES:
Muestra tomada por el interesado.
Suelo en estado natural

Atentamente,


Vo. Bo.
Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC


Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No.: 220 S.S.

O.T.: 31.745

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico con tamices y lavado previo

Norma: ASTM D6913-04

Proyecto: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"

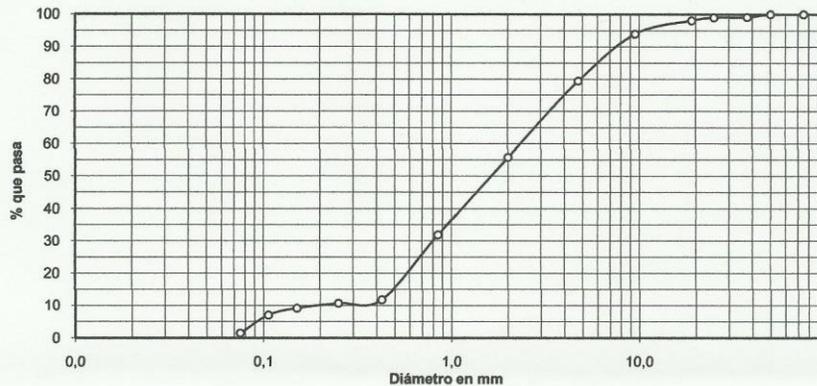
Ubicación: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12

Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

Muestra: 1

Análisis con Tamices:

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100,00	10	2.00 mm	55,75
2"	50 mm	100,00	20	850 μ m	31,86
1 1/2"	37.5 mm	99,14	40	425 μ m	11,69
1"	25 mm	99,03	60	250 μ m	10,65
3/4"	19.0 mm	98,08	100	150 mm	9,11
3/8"	9.5 mm	93,99	140	106 μ m	7,01
4	4.75 mm	79,47	200	75 μ m	1,49



Descripción del suelo: Arena Pomez Limosa Color Gris
 Clasificación: S.C.U.: S.P. P.R.A.: A-3

% de Grava: 20,53 D10: 0.00 mm
 % de Arena: 77,98 D30: 0.00 mm
 % de finos: 1,49 D60: 0.35 mm

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo. Inga. *Tejma Maricela Cano Morales*
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA DIRECTORA CII/USAC
 DIRECCION

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

Ing. *Omar Enrique Medrano Mendez*
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 222 S.S.

O.T. No.: 31.987

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada

Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.)

Norma: A.A.S.H.T.O.T-193

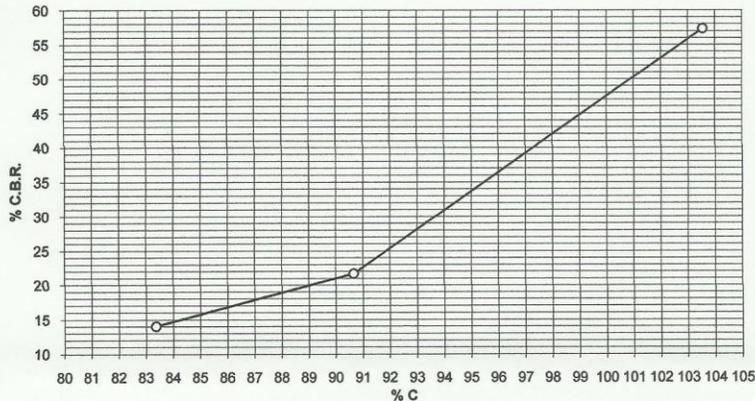
Proyecto: Trabajo de Graduación "Incidencia del cemento Portland anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades Mecánicas del Suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"

Ubicación: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12

Descripción del suelo: Arena Pomez Limosa Color Gris

Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

PROBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
No.	No.	H (%)	Yd (Lb/pie ³)	(%)	(%)	(%)
1	10	9,01	52,31	83,36	0,07	14,06
2	30	9,01	56,89	90,66	-0,04	21,72
3	65	9,01	64,98	103,55	-0,02	57,35



Vo. Bo.:

Inga. Telma Matricula Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Atentamente,



Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—

Calle T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121

Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 2.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No.: 224 S.S.

O.T. No.: 31.988

INTERESADO: Kenneth Francis Figueroa Estrada

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Incidencia del Cemento Portland Anhidro y Prehidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras".

ASUNTO: Ensayo de Permeabilidad Cabeza Constante

NORMA: ASTM D5856-00

UBICACIÓN: 48 Calle 10-90, Prados de Monte María Casa 7, Zona 12

MUESTRA No.: 1 PROFUNDIDAD: X m

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Arena Pomez Limosa Color Gris

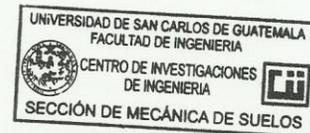
FECHA: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

RESULTADO DEL ENSAYO:

Coefficiente de Permeabilidad= 5.12×10^{-1} cm/s

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,



Omar Enrique Medrano Mendez
Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo.

Telma Maricela Cano Morales
Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No.: 225 S.S. **O.T. No.:** 31.988

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada
Asunto: Ensayo a compresión no confinada de cilindros de suelo cemento (ASTM D 1633-00)
Proyecto: Trabajo de Graduación " Incidencia del cemento anhidro y pre-hidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"
Ubicación: 48 calle 10-90, Prados de Monte María, zona 12
Descripción del suelo: Arena Limosa Pomez Color Beige Rosa
Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

IDENTIFICACIÓN	EDAD EN DIAS	PROPORCIÓN CEMENTO	ALTURA mm	DIAMETRO mm	ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL mm ²	CARGA lb	ESFUERZO Kpa	ESFUERZO psi	ESFUERZO PROMEDIO	
									Kpa	psi
1	7		117,2	102,3	8223	6500	3535	510	3325	490
2	7	5%	117,8	102,3	8227	5800	3135	455		
3	7		117,7	102,2	8197	9000	4895	710	4760	700
4	7	7%	117,2	102,1	8180	8500	4635	670		
5	7		117,5	102,4	8240	12000	6470	940	6370	945
6	7	9%	117,7	102,6	8260	11700	6295	915		

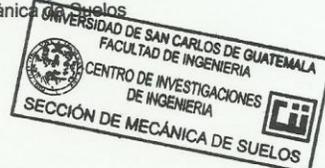
Observaciones:
Muestra proporcionada por el interesado, se utilizo cemento anhidro

Atentamente,

Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No.: 226 S.S. **O.T. No.:** 31.988

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada
Asunto: Ensayo a compresión no confinada de cilindros de suelo cemento (ASTM D 1633-00)
Proyecto: Trabajo de Graduación " Incidencia del cemento anhidro y pre-hidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"
Ubicación: 48 calle 10-90, Prados de Monte María, zona 12
Descripción del suelo: Arena Limosa Pomez Color Beige Rosa
Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

IDENTIFICACIÓN	EDAD EN DIAS	PROPORCIÓN CEMENTO	ALTURA mm	DIAMETRO mm	ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL mm ²	CARGA lb	ESFUERZO Kpa	ESFUERZO psi	ESFUERZO PROMEDIO	
									Kpa	psi
1	7	5%	116,5	103,1	8346	4300	2295	330	2275	315
2	7		117,6	102,7	8276	4200	2270	325		
3	7	7%	117,1	102,2	8203	5500	2995	435	3115	455
4	7		117,1	102,3	8217	6000	3235	470		
5	7	9%	117,1	102,2	8206	6800	3695	535	3640	525
6	7		117,4	102,3	8221	6600	3570	520		

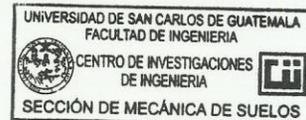
Observaciones:
Muestra proporcionada por el interesado, se utilizo cemento prehidratado

Atentamente,



Omar E. Medrano Mendez
Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No.: 227 S.S.

O.T. No.: 31.988

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada

Asunto: Ensayo a compresión no confinada de cilindros de suelo cemento (ASTM D 1633-00)

Proyecto: Trabajo de Graduación " Incidencia del cemento anhidro y pre-hidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"

Ubicación: 48 calle 10-90, Prados de Monte María, zona 12

Descripción del suelo: Arena pomez color gris

Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

IDENTIFICACIÓN	EDAD EN DIAS	PROPORCIÓN CEMENTO	ALTURA mm	DIAMETRO mm	ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL mm ²	CARGA lb	ESFUERZO Kpa	ESFUERZO psi	ESFUERZO PROMEDIO	
									Kpa	psi
1	7	7%	117,7	102,2	8197	3500	1735	275	1680	245
2	7		117,2	102,1	8180	3000	1635	235		
3	7	9%	116,9	102,3	8221	4000	2170	315	2520	350
4	7		117,0	102,3	8218	5200	2835	410		
5	7	11%	117,8	102,5	8258	5500	2970	430	3115	455
6	7		117,9	102,7	8281	6100	3270	475		

Observaciones:

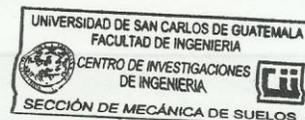
Muestra proporcionada por el interesado, se utilizo cemento anhidro.

Atentamente,



Ing. Omar Enrique Medraño Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No.: 228 S.S.

O.T. No.: 31.988

Interesado: Kenneth Francis Figueroa Estrada
Asunto: Ensayo a compresión no confinada de cilindros de suelo cemento (ASTM D 1633-00)
Proyecto: Trabajo de Graduación " Incidencia del cemento anhidro y pre-hidratado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo para la utilización en base y sub-base de carreteras"
Ubicación: 48 calle 10-90, Prados de Monte María, zona 12
Descripción del suelo: Arena pomez color gris
Fecha: Miércoles, 26 de Marzo de 2014

IDENTIFICACIÓN	EDAD EN DIAS	PROPORCIÓN CEMENTO	ALTURA mm	DIAMETRO mm	ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL mm ²	CARGA lb	ESFUERZO Kpa	ESFUERZO psi	ESFUERZO PROMEDIO	
									Kpa	psi
1	7	7%	116,2	102,2	8203	1300	704,99	100	700	105
2	7		117,26	102,39	8234	1300	702,3	100		
3	7	9%	116,55	101,96	8164	1900	1035,2	150	1120	175
4	7		116,58	101,99	8170	2200	1197,9	175		
5	7	11%	116,68	101,67	8118	3000	1643,7	240	1470	210
6	7		116,88	101,89	8154	2400	1309,3	190		

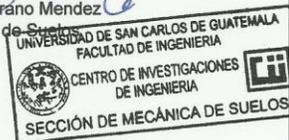
Observaciones:
Muestra proporcionada por el interesado, se utilizo cemento prehidratado

Atentamente,



Omar E. Medrano Mendez
Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorios de CII-USAC.

