



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

**COMPARACIÓN DEL MATERIAL DE DESECHO PROCEDENTE DE ARCILLA COCIDA Y
MATERIAL SELECTO PARA LA UTILIZACIÓN DE SUBBASES EN CARRETERAS**

Oscar Andrés García Valdés

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DEL MATERIAL DE DESECHO PROCEDENTE DE ARCILLA COCIDA Y
MATERIAL SELECTO PARA LA UTILIZACIÓN DE SUBBASES EN CARRETERAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

OSCAR ANDRÉS GARCÍA VALDÉS

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto 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. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

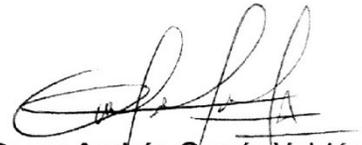
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

COMPARACIÓN DEL MATERIAL DE DESECHO PROCEDENTE DE ARCILLA COCIDA Y MATERIAL SELECTO PARA LA UTILIZACIÓN DE SUB-BASES EN CARRETERAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha mayo de 2012.



Oscar Andrés García Valdés



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



Guatemala, abril de 2013

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 infórmale que el trabajo de graduación "**COMPARACIÓN DEL MATERIAL DE DESECHO PROCEDENTE DE ARCILLA COCIDA Y MATERIAL SELECTO PARA LA UTILIZACIÓN DE SUB-BASES EN CARRETERAS**", elaborado por el estudiante universitario Oscar Andrés García Valdés, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular,

Atentamente


Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez

Colegiado 6842

Jefe de Sección de Mecánica de Suelos



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

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



Guatemala,
20 de mayo de 2013

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 **COMPARACIÓN DEL MATERIAL DE DESECHO PROCEDENTE DE ARCILLA COCIDA Y MATERIAL SELECTO PARA LA UTILIZACIÓN DE SUB-BASES EN CARRETERAS**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Oscar Andrés García Valdés, 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,

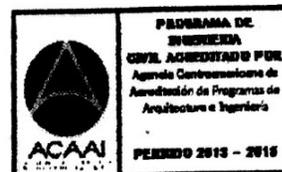
ID Y ENSEÑAD A TODOS

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



FACULTAD DE INGENIERIA
ÁREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

bbdeb.
Mas de 154 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





<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 Jefe del Departamento de Materiales de Construcción, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Oscar Andrés García Valdés, titulado **COMPARACIÓN DEL MATERIAL DE DESECHO PROCEDENTE DE ARCILLA COCIDA Y MATERIAL SELECTO PARA LA UTILIZACIÓN DE SUB-BASES EN CARRETERAS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, agosto de 2013.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

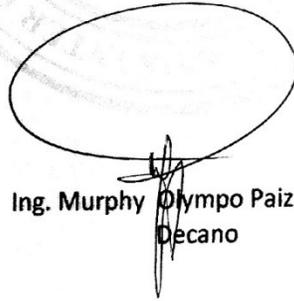


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 607.2013

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: **COMPARACIÓN DEL MATERIAL DE DESECHO PROCEDENTE DE ARCILLA COCIDA Y MATERIAL SELECTO PARA LA UTILIZACIÓN DE SUB-BASES EN CARRETERAS**, presentado por el estudiante universitario **Oscar Andrés García Valdés**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 30 de agosto de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** César Alfonso García Guerra y Alba Marina Valdés de García, por apoyarme siempre en mi vida y mis estudios. Ustedes son un ejemplo a seguir.
- Mis hermanos** César y Lucía García por apoyarme y aconsejarme en las buenas y las malas.
- Mis tíos y tías** Por estar siempre presente y apoyarme desde pequeño con amor incondicional. Especialmente a Oscar Valdés que siempre me ha brindado apoyo y conocimiento a lo largo de mis estudios.
- Mi sobrino** José Mathias Dougherty García, que esto te demuestre que puedes alcanzar tus metas si te lo propones, que no hay obstáculo tan grande que no puedas superar.
- Mis amigos** A cada uno de mis amigos que siempre estuvieron pendientes de mi realización profesional, son parte fundamental de mi vida.
- Mi novia** Stephanie Rodríguez, por apoyarme siempre emocionalmente a lo largo de mis estudios y por impulsarme a ser mejor todos los días.

AGRADECIMIENTOS A:

- Facultad de ingeniería** Por permitirme formarme profesionalmente y hacer posible culminar mis estudios.
- CII/USAC** Por permitirme elaborar cada ensayo de este trabajo de graduación. En especial al Laboratorio de Mecánica de Suelos y a José Istupe por su gran apoyo durante la realización de mis ensayos.
- Mis amigos** Mike, Diego, José Luis, Ángel, Juan Andrés, Luis Alfonso, María Fernanda Dubon, Andrea Álvarez, Diana, Claudia, César Paiz, Rita, Claudia, Héctor, Jeremy, Pablo, Hnos. Divas, Daniel Boesche, Cardona, Boris, Fajardo, Randy, Alex, Eduardo, Juan Antonio Ticas, Ricardo González, Naomy, José Daniel, Lia y a todos los amigos y compañeros universitarios que no nombré y que me han brindado su apoyo.
- INCCO** Por todos los grandes amigos y mentores que me impulsaron a terminar mis estudios.
- INMACO** Por proveerme el material de arcilla cocida para realizar esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Estudios previos sobre la utilización de arcilla cocida en carreteras	2
1.1.2. Reutilización de desecho de arcilla cocida	3
1.2. Tipos de arcillas.....	7
1.2.1. Según su naturaleza.....	8
1.2.1.1. Arcillas primarias o residuales	8
1.2.1.2. Arcillas secundarias o sedimentarias.....	8
1.2.2. Por su origen	8
1.2.2.1. Arcillas caolines	9
1.2.2.2. Arcillas grasas	9
1.2.2.3. Arcillas refractarias	9
1.2.2.4. Arcillas para ladrillos y tejas.....	9
1.2.3. Arcillas comerciales	10
1.2.3.1. Arcilla china	10
1.2.3.2. Arcillas esferoidales.....	10
1.2.3.3. Arcillas refractarias	10

	1.2.3.4.	Arcillas de atapulgita	11
	1.2.4.	Arcillas mixtas	11
1.3.		Carreteras	11
	1.3.1.	Subbase	12
	1.3.1.1.	Materiales en subbases.....	13
	1.3.1.2.	Especificaciones para materiales utilizados para subbases granulares en Guatemala.....	14
	1.3.1.2.1.	Requisitos	14
1.4.		Composición química de la arcilla cocida.....	16
2.		ENSAYOS DE LABORATORIO	19
	2.1.	Análisis de suelos	19
	2.1.1.	Ensayos químicos de laboratorio	19
	2.1.1.1.	Composición química de óxidos metálicos en minerales por fluorescencia de rayos X.....	20
	2.1.2.	Ensayos de mecánica de suelos	21
	2.1.2.1.	Ensayo de granulometría arcilla cocida (ASTM D 422-02, AASHTO T 088-00).....	21
	2.1.2.2.	Proctor (AASHTO T-180-01, ASTM D- 1557-07).....	23
	2.1.2.2.1.	Influencia de la energía de compactación	26
	2.1.2.2.2.	Influencia del tipo de suelo	27
	2.1.2.3.	CBR (AASHTO T-193-99, ASTM D- 1883-07).....	28

2.1.2.4.	Permeabilidad (ASTM D-2464 -38, AASHTO T-215)	29
2.1.2.5.	Triaxial (AASHTO T-297-94, ASTM D-4767-02)	30
2.1.2.6.	Límites de Atterberg	31
2.1.3.	Ensayos complementarios.....	34
2.1.3.1.	Ensayo de abrasión (ASTM C-131)	34
3.	RESULTADOS	35
3.1.	Ensayos químicos de laboratorio.....	35
3.1.1.	Composición química de óxidos metálicos en minerales por fluorescencia de rayos X.....	35
3.2.	Ensayos de mecánica de suelos	36
3.2.1.	Ensayos de prueba con base en cada tipo de granulometría de arcilla cocida.....	36
3.2.2.	Granulometría.....	39
3.2.2.1.	Granulometría alta	39
3.2.2.2.	Granulometría media	40
3.2.2.3.	Granulometría baja	41
3.2.2.4.	Rangos granulométricos.....	42
3.2.3.	Proctor	43
3.2.3.1.	Proctor granulometría alta	44
3.2.3.2.	Proctor granulometría media	45
3.2.3.3.	Proctor granulometría baja	46
3.2.4.	CBR	47
3.2.4.1.	CBR granulometría alta	47
3.2.4.2.	CBR granulometría media	48
3.2.4.3.	CBR granulometría baja	49
3.2.5.	Permeabilidad.....	50

3.2.5.1.	Permeabilidad granulometría alta.....	50
3.2.5.2.	Permeabilidad granulometría media....	50
3.2.5.3.	Permeabilidad granulometría baja.....	51
3.3.	Ensayos de complemento de arcilla cocida según norma.....	51
3.3.1.	Ensayo de abrasión.....	51
3.3.2.	Triaxial.....	52
3.3.3.	Límites de Atterberg	53
3.4.	Ensayos de prueba para material selecto según norma	53
3.4.1.	Ensayo de granulometría	53
3.4.2.	Proctor (AASHTO T180-01, ASTM D1557-07).....	55
3.4.3.	CBR (AASHTO T193-99, ASTM D1883-07).....	56
3.4.4.	Límites de Atterberg (AASHTO T089-02, ASTM D423-66, AASHTO T090-00, ASTM D424-54).....	57
3.4.5.	Permeabilidad (ASTM D2464 -38, AASHTO T215).....	57
4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	59
4.1.	Granulometría	59
4.2.	Proctor.....	60
4.3.	CBR.....	63
4.4.	Permeabilidad	64
4.5.	Límites de Atterberg.....	64
4.6.	Ensayo de abrasión.....	64
	CONCLUSIONES.....	65
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Planta de reciclado de materiales de construcción en Victoria, Australia.....	4
2.	Diagrama de flujo de la compañía EPIC para el reciclado de materiales de construcción, Kuwait	6
3.	Distintos tipos de agregado reciclado	6
4.	Corte transversal de una carretera	12
5.	Representación según diagrama terciario de la composición de las arcillas cocidas con base en el diagrama $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	17
6.	Espectrómetro de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva....	20
7.	Curva granulométrica	22
8.	Curva de densidad seca y humedad	25
9.	Influencia de la energía de compactación	26
10.	Influencia del tipo de suelo	27
11.	Curva presión – penetración.....	28
12.	Rectas de resistencia intrínseca de los suelos	30
13.	Estados de consistencia de los suelos	33
14.	Valores típicos de consistencia en los suelos.....	33
15.	Diagrama ternario de la composición de la arcilla cocida según $\text{CaO-SiO}_2\text{-AL}_2\text{O}_3$	36
16.	Granulometría alta de arcilla cocida	40
17.	Granulometría media de arcilla cocida	41
18.	Granulometría baja de arcilla cocida	42

19.	Rangos granulométricos tipo B-1 para material de subbases o base granular de arcilla cocida.....	43
20.	Gráfica de densidad seca – humedad, granulometría alta	44
21.	Gráfica de densidad seca – humedad, granulometría media	45
22.	Gráfica de densidad seca – humedad, granulometría baja	46
23.	Gráfica de porcentaje CBR - porcentaje de compactación, granulometría alta	47
24.	Gráfica de porcentaje CBR - porcentaje de compactación, granulometría media	48
25.	Gráfica de porcentaje CBR - porcentaje de compactación, granulometría baja	49
26.	Círculos de Mohr para triaxial de arcilla cocida	52
27.	Granulometría material selecto	54
28.	Gráfica de densidad seca – humedad, material selecto	55
29.	Gráfica de porcentaje CBR - porcentaje de compactación, material selecto	56
30.	Distribución de granulométrica de la arcilla cocida y su comparación con la distribución óptima de material selecto	60
31.	Gráfica de densidad seca – humedad, arcilla cocida versus material selecto	61
32.	Gráfica de densidad seca – humedad, arcilla cocida versus distintos suelos.....	62
33.	Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje C, arcilla cocida versus material selecto	63
34.	Coefficientes de permeabilidad, arcilla cocida versus material selecto	64

TABLAS

I	Tipos de graduación para material de subbase o base granular.....	16
II	Clasificación granulométrica	23
III	Rangos de permeabilidad	29
IV	Graduación para tipo de abrasión, de agregado grueso	34
V	Composición química de óxidos metálicas en arcilla cocida por fluorescencia de rayos X	35
VI	Graduación tipo B- 1 para material de subbases.....	37
VII	Granulometría alta de arcilla cocida	38
VIII	Granulometría media de arcilla cocida	38
IX	Granulometría baja de arcilla cocida	39
X	Proctor granulometría alta (arcilla cocida)	44
XI	Proctor granulometría media (arcilla cocida)	45
XII	Proctor granulometría baja (arcilla cocida)	46
XIII	Proctor material selecto	55
XIV	Proctor arcilla cocida versus material selecto	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Φ	Ángulo de fricción interna
CBR	California Bearing Ratio
C	Cohesión
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
mm	Milímetros
Al₂O₃	Óxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
Fe₂O₃	Óxido de hierro
MgO	Óxido de magnesio
SiO₂	Óxido de silicio
Na₂O	Óxido de sodio
K	Permeabilidad hidráulica
PUS	Peso Unitario Seco
porcentaje	Porcentaje
%CBR	Porcentaje de CBR
%C	Porcentaje de compactación
%H	Porcentaje de humedad
SO₃	Trióxido de azufre

GLOSARIO

Abrasión	Acción mecánica de rozamiento y desgaste de un material.
Ángulo de fricción interna	Ángulo de resistencia al deslizamiento causado por la fricción entre superficies de contacto de las partículas del suelo.
Cohesión	Fuerza de atracción entre partículas, producida por el agua de constitución del suelo.
Compacidad relativa	Indica la cantidad de vacíos presentes en una muestra de suelo.
Óxido de calcio	Compuesto químico conocido comúnmente como cal hidratada.
Permeabilidad	La capacidad de un material que permite el flujo de agua sin alterar su estructura interna.

RESUMEN

El presente trabajo, contiene los conocimientos necesarios sobre las propiedades químicas y físico mecánicas de la arcilla cocida, en su potencial uso como subbases en carreteras. Siendo comparado con un material selecto de uso común en subbases en Guatemala.

La arcilla cocida es un material de construcción que se puede encontrar en fabricación tanto artesanal como industrial, la calidad del material depende del tipo de arcillas, con las cuales se hace la mezcla y la temperatura de cocción a la cual está sometida. Se sometió la arcilla cocida a un análisis de Fluorescencia de Rayos X para conocer su composición química, la cual afecta directamente a su capacidad de resistencia y abrasión.

Para determinar si la arcilla cocida se puede utilizar como material para subbase, se extrajo de las especificaciones de materiales utilizados para subbases granulares en Guatemala. Se utilizó 3 diferentes granulometrías para ser analizadas por los ensayos de mecánica de suelos, y se comparó a un suelo de material selecto para conocer si se comporta de igual forma.

Desafortunadamente el material de arcilla cocida, aunque contiene una buena permeabilidad y presenta casi todos los aspectos necesarios para ser utilizado como un material de subbase en carreteras, según las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes, no cumple con un porcentaje de CBR mínimo, y posee una alta abrasión, la cual se descarta según los requisitos generales.

OBJETIVOS

General

Analizar y comparar el comportamiento fisicoquímico y físico mecánico del reuso de material de arcilla cocida y material selecto para su utilización de subbases en carreteras.

Específicos

1. Evaluar las propiedades químicas que caracterizan las arcillas cocidas en sus propiedades como óxidos metálicos.
2. Determinar el rango efectivo de tamaño de partícula de arcilla cocida, para obtener el óptimo comportamiento en su utilización en subbases de pavimentación.
3. Evaluar mediante ensayos de laboratorio especificados por normas ASTM y AASHTO, el comportamiento físico-mecánico de la arcilla cocida y su posible utilización en pavimentación como subbases.
4. Evaluar mediante ensayos de laboratorio especificados por normas ASTM y AASHTO, el comportamiento físico y mecánico del material selecto.

INTRODUCCIÓN

Los suelos constituyen una de las partes más importante en cualquier estructura civil, ya que estos soportan y distribuyen los esfuerzos y absorben las cargas de las estructuras. Los suelos deben contar con determinadas propiedades, tanto físicas como mecánicas que puedan satisfacer las diferentes condiciones de cada obra civil.

Guatemala posee una geografía y topografía bastante irregular debido a su origen tectónico, afectando así la susceptibilidad de los suelos a los aludes y fallas en carreteras, aunado a una deforestación excesiva que han erosionado los suelos. Asimismo, las carreteras a lo largo del país presentan una deficiencia en sus bases y subbases que ocasionan fallas de la carpeta asfáltica. Las bases y subbases requieren de un suelo adecuado que permita el buen funcionamiento para la protección de obras de infraestructura, como vías de comunicación.

Las bases y subbases deben poseer una consistencia y solidez para evitar por períodos muy largos el colapso de las mismas. Encontrar un tipo de suelo con las propiedades adecuadas para cumplir los parámetros de diseño de una carretera, ha sido labor de muchos años. El impacto ambiental en el país se ha hecho notar durante los años debido a la excavación y explotación de laderas y montañas, ocasionando la inestabilidad de las mismas.

En Inglaterra y Holanda, donde la fabricación de arcilla cocida se remonta a varios siglos atrás, han investigado el utilizar material de demolición tal como la arcilla cocida proveniente de ladrillos y el concreto para ser reutilizados en

pavimentación y agregado para concreto. En Australia han encontrado la forma de utilizar material de arcilla cocida como un suelo para su utilización en subbases, tomando en cuenta los parámetros y especificaciones generales de caminos.

Guatemala es una región donde los suelos arcillosos son abundantes, lo cual ha fomentado la fabricación de ladrillos y otros materiales de arcilla cocida. Por muchos años la arcilla cocida artesanal fue la principal manufactura para ladrillos y tejas en el país, a lo largo de los años la fabricación en línea y control de calidad ha mejorado la calidad de este tipo de material de construcción. Sin embargo el uso de arcilla cocida artesanal es muy común en regiones rurales del país.

La reutilización de materiales de construcción, tales como la arcilla cocida permite por medio de una trituración adecuada y un tamaño de partícula nominal, ser utilizado en la ingeniería vial para su aplicación de carreteras. Evitando así la explotación excesiva de los recursos naturales del país.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Antecedentes

Las fábricas de ladrillos producen una cantidad diaria de desperdicio de material de arcilla cocida, que por distintos factores tales como: fractura o fisuras del ladrillo o teja, o su rechazo por control de calidad. Es así que no se ha encontrado una forma útil de reusar este material. Asimismo, el desperdicio generado por la demolición de construcciones ya existente genera una fuente abundante de material de construcción para ser reutilizado.

En Inglaterra y Holanda la mayoría de las construcciones son de ladrillo. En dichos países se han percatado de la cantidad de desperdicio de materiales de construcción, que se generan después de la demolición de edificios, entre los cuales están los ladrillos de arcilla cocida, cuya vida útil excede los 100 años. De acuerdo a estudios realizados en 1990, según la Tiles and Brick from Europe (TBE), por sus siglas en inglés, se ha encontrado un uso para este material de desperdicio, por ejemplo;

- Recuperación de ladrillos y tejas para ser utilizado en nuevas construcciones.
- El llenado y la estabilización de material para obras de infraestructura, tal como pavimentación.
- Agregado grueso para prefabricados de hormigón y morteros.
- Agregado grueso para ladrillos de silicato de calcio.
- Canchas de tenis de arcilla.
- Sustratos para plantas.

1.1.1. Estudios previos sobre la utilización de arcilla cocida en carreteras

En el estudio realizado en Australia denominado *Geotechnical Properties of Recycled Crushed Brick in Pavement Applications*, publicado en 2011, con el apoyo de la American Society of Civil Engineers (ASCE), por sus siglas en inglés. Se investigó la utilización de ladrillos de arcilla cocida en aplicaciones de pavimentación. Mediante ensayos normalizados se evaluaron las propiedades mecánicas, químicas y físicas que posee el material de reciclaje de arcilla cocida, así como la aplicación en subbases para pavimentos. Se realizó una comparación de las propiedades de la arcilla cocida con especificaciones de la autoridad de Caminos de Australia, para asegurar su utilización como material de subbase.

Dicho estudio realizó pruebas tales como; granulometría y distribución de partículas, ensayo de Proctor modificado, densidad de partícula, absorción de agua, CBR, ensayo de abrasión por máquina de Los Ángeles, contenido de materia orgánica, ensayo triaxial, y ensayo triaxial de carga y descarga. Las conclusiones de la evaluación realizada, indican que el material reciclado de arcilla cocida con un porcentaje de humedad del 65 por ciento es adecuado para ser utilizado como un material para subbase. El porcentaje de abrasión determinado está en los límites permisibles, por lo que recomendaron utilizar una mezcla con otro tipo de material de construcción reciclado como el concreto.

En el estudio realizado en 2006 por la Universidad Politécnica de Hong Kong, denominado *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road subbase*, se investigó la posibilidad de utilizar un

agregado de concreto y ladrillo de arcilla cocida triturado como subbase en una carretera.

El estudio realizó la comparación de un suelo natural para subbase; el agregado de concreto reciclado y el uso ladrillo de arcilla cocida triturado por medio de ensayos de laboratorio como CBR y Proctor, establecieron que los valores de CBR disminuyeron cuando se utilizó el ladrillo de arcilla cocida triturado, sin embargo, ningún resultado de CBR fue inferior al 30 por ciento, el cual es el valor mínimo requerido según las autoridades de Hong Kong. El estudio concluyó que la arcilla cocida aumentó la humedad óptima para ser utilizado como material para subbase y disminuyó la densidad máxima de la partícula.

1.1.2. Reutilización de desecho de arcilla cocida

En Guatemala no existe un código o reglamento sobre cómo tratar los desperdicios de construcción o demolición de obras, se puede observar en los barrancos de la ciudad la acumulación de materiales de construcción; como concreto seco, blocks de concreto, tejas de arcillas cocida, ladrillo de arcilla cocida, entre otros materiales que generan polución y no son biodegradables.

El manejo de desechos de la construcción en países desarrollados como Gran Bretaña, ha generado un manual de cómo tratar los distintos tipos de materiales de construcción como hierro, concreto y ladrillo. En Gran Bretaña existe la institución Institute of Civil Engineers (ICE) por sus siglas en inglés, que emitió un protocolo de demolición, el cual provee parámetros de cómo tratar y utilizar los desechos de construcción. Existen diversas compañías que apoyadas por el Gobierno británico se dedican al reciclaje de materiales de construcción.

El reciclaje de materiales de construcción es una industria que en Guatemala no ha sido explotada y en países como Australia es una industria competitiva y proveen de servicios como la limpieza de obras de construcción, son proveedores de agregados de concreto triturado y ladrillo de arcilla cocida triturada. Existen estudios de la reutilización de dichos materiales como agregados para concreto o como materiales para carreteras. Asimismo en Australia en las especificaciones para carreteras y puentes de la ciudad de Victoria, incluyen la sección 820 para el reciclado de concreto triturado para la utilización para subbases para pavimentos y bases de bajo tráfico.

Se incluyen especificaciones de tamaño nominal de partícula, tanto para el concreto triturado como la arcilla cocida triturada. Bajo esta sección, la compañía Delta Group de Australia provee una mezcla de concreto triturado y arcilla cocida, triturado comercial de clase 3 de 40 milímetros, la cual es excelente para subbases en suelos duros. La Delta Group provee escombros de ladrillo triturado de 40 milímetros y 80 milímetros, material que es útil para acceso a construcciones, consolidación de suelos y proveen de ladrillo triturado de 7 milímetros ideal para jardinería decorativa.

Figura 1. **Planta de reciclado de materiales de construcción en Victoria, Australia**



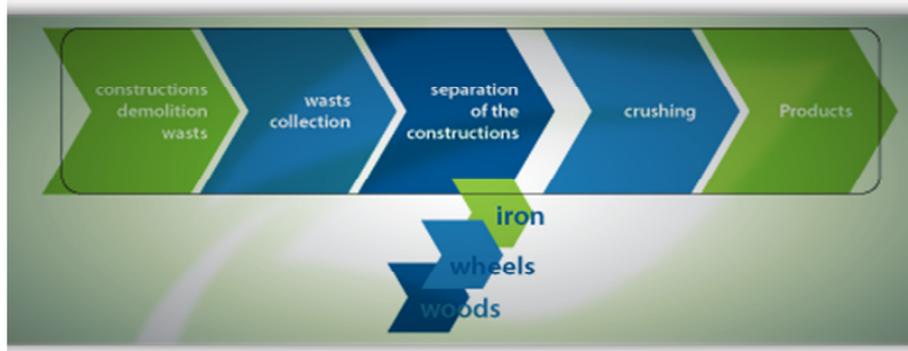
Fuente: http://www.deltagroup.com.au/media/subSections/52/_hero.jpg. consultado: febrero 2012 .

Holanda es uno de los países que tiene una política sobre el uso de vertederos para el reusó y reciclaje de materiales de construcción. La creación del Plan de Gestión de Manejo de Desechos Holandés fue introducida en 2003, siendo su principal propósito asegurar la reutilización de materiales para usos útiles. Los datos reportados son de un 81 por ciento en 2000 aumentando a un 86 por ciento en 2012. Existen leyes y regulaciones sobre el manejo de desecho para la construcción y para otros tipos de materiales. Una de esas leyes establece la prohibición de vertederos, si dichos materiales son posibles de reusar o reciclar. Esta regulación vigente desde 1998 ha obligado a los constructores y contratistas a encontrar procedimientos de reusó del material de construcción.

En Kuwait, el Ministerio de Hacienda ha concedido a Build Operate and Transfer (BOT), un contrato para la Environmental Preservation Industries Company (EPIC) por sus siglas en inglés, para construir la primera planta de reciclaje de residuos de construcción en el Medio Oriente, con una producción diaria de 2 500 toneladas. El gobierno de Kuwait paga honorarios a dicha compañía para la eliminación de residuos, como incentivo para mejorar el medio ambiente. Los residuos de construcción se reciclan a varios tamaños de gravas que junto a la arena filtrada puede ser utilizado en la construcción, en usos auxiliares.

- Recepción de material de desecho (concreto, ladrillo, acero)
- Preparación de material de desecho
- Clasificación de material de desecho
- Limpieza del material de desecho
- Trituración de material de desecho
- Cribado del material de desecho
- Producto final

Figura 2. **Diagrama de flujo de la compañía EPIC para el reciclado de materiales de construcción, Kuwait**



Fuente: <http://www.epickw.com/s/uploads/pages/81cb182c08326d4774a26c81c08a7963.png>. consultado: febrero 2012.

Como se puede observar en la figura 3, a partir de material de construcción reciclado la empresa EPIC, elabora como producto final agregados desde de 2 pulgadas o 50 milímetros hasta un agregado de arena de menos de 2 milímetros.

Figura 3. **Distintos tipos de agregado reciclado**



Fuente: <http://www.epickw.com/s/index/index/id/6>. Consultado: febrero 2012.

1.2. Tipos de arcillas

Según las normas AASHTO, las arcillas son partículas sólidas con diámetro menor a 0,002 milímetros. Este material no es un mineral, sino un agregado de minerales y de sustancias coloidales que se han formado mediante la desintegración química de las rocas alúmina. Químicamente está compuesto por sílice, alúmina y agua, conteniendo entre otras sustancias como fragmentos de rocas, de óxidos hidratados de hierro y materiales coloidales.

La composición y su naturaleza determinan el uso y el valor de la arcilla. El cuarzo disminuye la plasticidad y la retracción, además contribuye a hacerla refractaria. La sílice en forma coloidal aumenta su plasticidad. El óxido de hierro disminuye la temperatura de fusión, actúa como fundente y también como colorante.

Las propiedades físicas más importantes de las arcillas son:

- Plasticidad, que permite que sea moldeada.
- Resistencia a compresión y tensión.
- Retracción, tanto en el secado como mientras está en el horno.
- Temperatura de cocción y vitrificación.
- Color de calcinación, que se debe principalmente a los óxidos de hierro presentes.

1.2.1. Según su naturaleza

Las arcillas son producto de la descomposición de rocas por abrasión del agua, aire o hielo. Las arcillas se clasifican en 2 grupos; arcillas primarias y secundarias, el cual define la composición química y física de las mismas.

1.2.1.1. Arcillas primarias o residuales

Son formadas en el lugar de sus rocas madres y no han sido transportadas por el agua o el viento. Estas arcillas tienden a ser de grano grueso y relativamente no plásticas. Son relativamente puras, blancas y libres de contaminación con materiales arcillosos. La mayoría de los caolines son arcillas primarias.

1.2.1.2. Arcillas secundarias o sedimentarias

Las arcillas secundarias o sedimentarias, son las que han sido desplazadas del lugar de las rocas madres originales. Aunque el agua es el agente más común de transporte, el viento puede también transportar arcilla. Éstas son mucho más comunes que las arcillas primarias y tienen una constitución más compleja debido a que están compuestas por material procedente de distintas fuentes: hierro, cuarzo, mica, materias carbonosas y otras impurezas.

1.2.2. Por su origen

Según lo anterior, las arcillas dependen del origen o ubicación a partir de la roca madre. Ya que su pureza o impureza afecta sus

propiedades químicas y físicas. Esto afecta directamente al uso que se le da a un tipo arcilla.

1.2.2.1. Arcillas caolines

Son arcillas primarias, contienen alto porcentaje de caolinita. Son de grano fino. Se utilizan en una gran gama de productos de uso diario. Por ejemplo; papel, vidrio, pintura, medicina, porcelana entre otros.

1.2.2.2. Arcillas grasas

Son arcillas muy plásticas y untuosas, contienen cierto grado de impurezas se utilizan especialmente para cosmetología, las cuales las cataloga como una arcilla secundaria.

1.2.2.3. Arcillas refractarias

Son arcillas que contienen poco óxido metálico y álcalis, y pueden resistir temperaturas elevadas sin desagregarse, por cuya razón se usan en la construcción de hornos, estufas y obras similares.

1.2.2.4. Arcillas para ladrillos y tejas

La arcilla con la que se elaboran los ladrillos, es un material sedimentario de partículas muy pequeñas de silicatos hidratados de alúmina, además de otros minerales como el caolín, la montmorilonitas y la illita. Gran contenido de óxido ferroso, el cual le da el color rojizo, calcio, y magnesio. La combinación de diferentes tipos de arcillas, hace que el ladrillo presente gran resistencia a la compresión.

1.2.3. Arcillas comerciales

Las arcillas comerciales o arcillas empleadas como material crudo en las construcciones, están entre los más importantes recursos minerales no metálicos. Las arcillas comerciales están catalogadas como arcillas primarias, ya que presentan mayor cantidad del mineral caolinita. El valor de estas arcillas está estrechamente relacionado con sus composiciones mineralógicas y químicas, especialmente las arcillas que contienen los minerales caolinita, montmorilonitas, illita y atapulgita, la presencia de otros minerales o impurezas de sales solubles, restringe sus usos. Las impurezas más comunes son cuarzo, carbonatos, óxido de hierro, sulfatos y feldespato.

1.2.3.1. Arcilla china

Son caolines blancos de gran calidad. Se emplean en la manufactura de cerámica, papeles, pintura, plásticos, insecticidas y tinta. Se utiliza para crear la porcelana, son muy frágiles cuando se funden.

1.2.3.2. Arcillas esferoidales

Compuestas principalmente de caolinita, pero de color más oscuro que el caolín. Se emplean en la manufactura de cerámica, donde no prevalece el color blanco.

1.2.3.3. Arcillas refractarias

Compuestas de caolinita, con pequeñas cantidades de impurezas como illita y cuarzo. Soportan temperaturas de 1 500 grados Celsius o más. Se

emplean en revestimientos de hornos, vasijas para productos químicos, crisoles, retortas, equipos para fundición y ladrillos refractarios.

1.2.3.4. Arcillas de atapulgita

Son silicato de aluminio y magnesio hidratados. Estas arcillas poseen una utilidad industrial que se emplean para descolorar y en el refinado de aceites minerales, vegetales y cera.

1.2.4. Arcillas mixtas

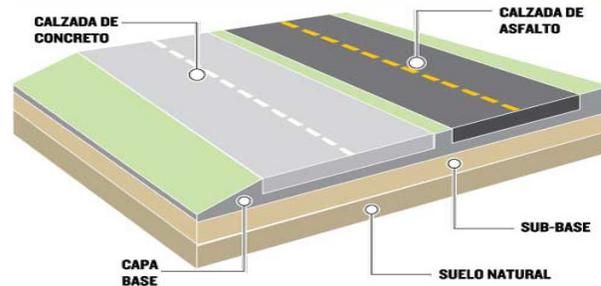
La mayoría de las arcillas contienen mezclas en diferentes proporciones de caolinita, montmorilonitas, illita y atapulgita. La industria para materiales de construcción, es el mayor consumidor de este tipo de arcilla. Con ellas se fabrican ladrillos, tejas, conductos de agua, baldosas, desagües, bloques, entre otros.

1.3. Carreteras

Se le denomina carretera a la adaptación de una faja sobre la superficie terrestre que llene las condiciones de ancho, alineamiento y pendiente para permitir el rodamiento adecuado de los vehículos para los cuales fue acondicionada.

La carretera o carpeta de rodadura está sobre puesta en 2 capas llamadas subbase y base. Estas capas están constituidas con suelo de características adecuadas o con suelos de baja calidad, pero tratados con un método de estabilización adecuado para que funcione correctamente.

Figura 4. **Corte transversal de una carretera**



Fuente: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=997425>. Consultado: febrero 2012.

1.3.1. Subbase

Se define como la capa granular situada entre la explanada y la base de la capa de rodadura. Es una capa típica de los pavimentos bituminosos, aunque en ocasiones se emplea en pavimentos rígidos asentados de baja capacidad portante. Las principales funciones de esta capa son:

- Resistencia mecánica

Ha de soportar y repartir adecuadamente las cargas de tráfico sobre la explanada, de forma que ésta pueda tolerar las presiones recibidas sin deformarse excesivamente. Además, dada la profundidad a la que se halla situada en el firme, está sometida a una alta presión de confinamiento lateral.

- Economía

Al estar más alejada del plano de rodadura, sus características portantes no tienen por qué ser muy elevadas, por lo que pueden

emplearse materiales de inferior calidad, para economizar de esta manera el coste de la obra.

- Drenaje

Debe impedir la ascensión capilar del agua procedente del cimiento a las capas superiores del pavimento, ya que afectaría de manera negativa a su comportamiento mecánico y durabilidad. Aparte de exigir características drenantes al material (bajo contenido en finos arcillosos) deben disponerse drenes o cunetas conectados con esta capa que faciliten una rápida evacuación del agua filtrada, ya que una acumulación resultaría muy perjudicial para la funcionalidad de esta capa.

1.3.1.1. Materiales en subbases

Debido a las funciones y características de la subbase, se suelen utilizar materiales con una granulometría muy bien estudiada, estricto contenido en finos y con gravas resistentes para evitar su degradación con el paso del tiempo.

Las gravas naturales, son sin duda los materiales más apropiados para subbases, dado que es un material altamente friccionante, aunque no presentan una elevada capacidad de soporte. Son más económicas que las gravas artificiales obtenidas de rocas trituradas mediante el proceso de machaqueo, estas pueden emplearse en casos de mayor exigencia mecánica.

En muchos casos se han utilizado capas subbase confeccionadas con materiales que por diversos motivos (tráfico, clima, calidad del material) han

sido estabilizadas con ligantes o conglomerantes. Algunas de estas capas han conservado una permeabilidad elevada después del tratamiento.

1.3.1.2. Especificaciones para materiales utilizados para subbases granulares en Guatemala

Las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes en la sección 304: capa de subbase y base granular, establece las siguientes especificaciones y requisitos para materiales de subbases en Guatemala.

1.3.1.2.1. Requisitos

El material de subbase granular, debe consistir en piedra o grava clasificada sin triturar o trituración parcial combinada con arena y material de relleno para formar un material que cumpla con los siguientes requisitos:

- Valor soporte

Debe tener un CBR determinado por el método AASHTO T- 193, mínimo de 40, efectuado sobre muestra saturada, a 95 por ciento de compactación y un hinchamiento máximo de 0,5 por ciento.

- Abrasión

Debe tener un porcentaje de abrasión menor de 50, esta propiedad es determinada por el método AASHTO T- 96.

- Partículas planas o alargadas

No más del 25 por ciento en peso del material retenido en el tamiz #4, pueden ser partículas planas o alargadas, con una longitud mayor de 5 veces el espeso promedio de las partículas.

- Impurezas

El material de subbases, debe estar exento de materias vegetales, basura, terrones de arcilla o sustancias que incorporadas dentro de la capa de subbases pueden causar fallas en el pavimento.

- Plasticidad y cohesión

El material no debe poseer un índice de plasticidad mayor de 6, ni un límite líquido mayor de 25, determinados por los métodos AASHTO T- 90 y AASHTO T -89 respectivamente.

- Graduación

El material para capa de subbases, debe llenar los requisitos de graduación, determinada por los métodos AASHTO T - 27 y AASHTO T - 11, para el tipo que se indique en las disposiciones especiales, según la tabla I.

Tabla I. **Tipos de graduación para material de subbase o base granular**

Standard mm	Tamiz N°	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)					
		TIPO "A" (Subbases) 50 mm (2") máximo	TIPO "A" (Base) 50 mm (2") máximo		TIPO "B" (Subbases y base) 38,1 mm (1" ½") máximo		TIPO "C" (Subbases y base) 25 mm (1") máximo
		A-1	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1
50,0	2"	100	100	100			
38,1	1 ½"	-	-	-	100	100	
25,0	1"	60-90	65-90	60-85	-	-	100
19,0	¾"	-	-	-	60-90	-	-
9,5	?"	-	-	-	-	-	50-85
4,75	N° 4	20-60	25-60	20-50	30-60	20-50	35-65
2,00	N° 10	-	-	-	-	-	25-50
0,425	N° 40	-	-	-	-	-	12-30
0,075	N° 200	3-12	3-12	3-10	5-15	3-10	5-15

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes p. 305-2

El porcentaje que pasa el tamiz 0,075 milímetros (N° 200), debe ser menor que la mitad del porcentaje que pasa el tamiz 0,425 milímetros (N° 40).

1.4. Composición química de la arcilla cocida

La arcilla es un compuesto de los elementos de silicio (Si) y aluminio (AL). Puesto que el silicio y el aluminio se encuentran generalmente en combinación

con el oxígeno, como óxidos, se les llama sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3). La arcilla es conocida en química como un silicato hidratado de alúmina.

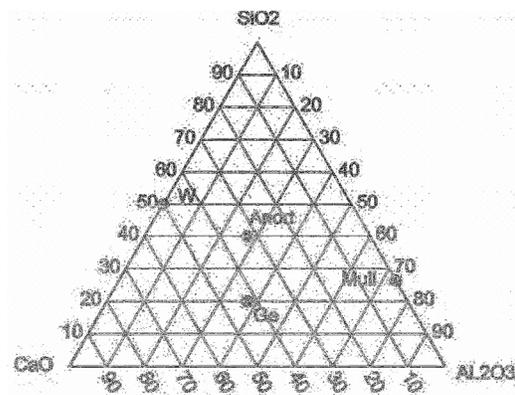
La arcilla pura es una combinación de 1 molécula de alúmina, 2 moléculas de sílice y 2 de agua: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Esta agua no es la que se añade para hacer plástico el material. La arcilla totalmente seca ha perdido el agua que le da plasticidad, pero tiene aún su agua química de composición.

Los distintos tipos de arcillas se pueden clasificar según el porcentaje de CaO , Al_2O_3 y SiO_2 como se puede observar en la figura 5, dependiendo del porcentaje de estos óxidos, se puede clasificar su composición química y a qué familia pertenece la arcilla o cuál es su mineral más semejante.

Figura 5. **Representación según diagrama terciario de la composición de las arcillas cocidas con base en el diagrama $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$**

Tipos de minerales conocidos

- W (Wollastonita)
- Anort (Anortita)
- Mull (Mullita)
- Ge (Gehlenita)



Fuente: Fuente: elaboración propia.

2. ENSAYOS DE LABORATORIO

2.1. Análisis de suelos

El suelo es el soporte último de todas las obras de infraestructura, por lo que es necesario conocer sus propiedades físicas y mecánicas, para estudiar su comportamiento ante esfuerzos que pueda ocasionar asentamiento.

El suelo se comporta como una estructura, con características físicas propias, densidad, porosidad, cohesión. Estas características confieren ciertas propiedades resistentes ante diferentes tipos de esfuerzos.

Es importante conocer las propiedades químicas de las arcillas, ya que dependiendo del porcentaje de óxidos de alúmina, óxidos de sílice y óxidos de calcio, se puede determinar el origen de la muestra y cuál es su comportamiento más parecido a arcillas ya conocidas.

2.1.1. Ensayos químicos de laboratorio

De los distintos procedimientos de análisis químico de materiales silicoaluminosos, se considera más adecuado el análisis por fluorescencia de rayos X , debido a las ventajas que presenta, tales como.

- Rápidez de análisis
- Fácil preparación
- Técnica no destructiva
- Técnica sensitiva, con buena precisión y exactitud

2.1.1.1. Composición química de óxidos metálicos en minerales por fluorescencia de rayos X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X, es un método de análisis cualitativo y cuantitativo para elementos químicos basados sobre la medición de las longitudes de onda y las intensidades de las líneas espectrales emitidas por excitación secundaria. El rayo primario procedente de un tubo de rayos X que irradia la muestra, excitando cada elemento para emitir líneas espectrales secundarias, teniendo longitudes de onda características a cada elemento e intensidades relacionadas a su concentración.

Figura 6. **Espectrómetro de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva**



Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/oxford-instruments/espectrometros-de-fluorescenciade-rayos-x-por-energia-dispersiva-edxrf-16640-215527.html>. Consultado: marzo 2012.

2.1.2. Ensayos de mecánica de suelos

Los ensayos de mecánica de suelos, están encaminados a conseguir la mayor estabilidad mecánica posible, de forma que las tensiones se transmitan uniformemente y no produzcan asentamientos excesivos.

2.1.2.1. Ensayo de granulometría arcilla cocida (ASTM D 422-02, AASHTO T 088-00)

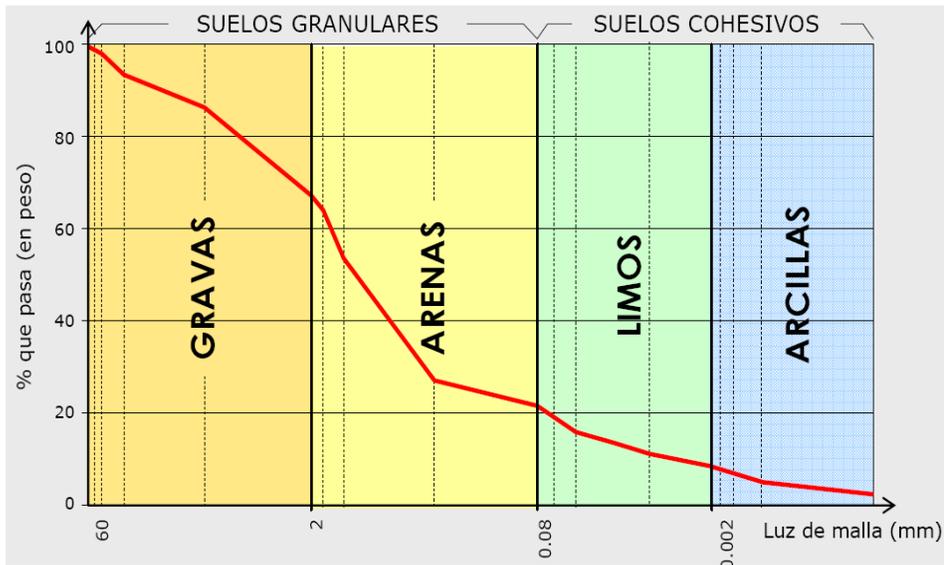
La función del ensayo granulométrico, es determinar las proporciones de los distintos tamaños de granos que están presentes en el suelo.

Para determinar los distintos tamaños de granos se utiliza el tamiz, éste es un instrumento compuesto de una malla con un espaciamiento uniforme, el cual se le conoce como abertura, en la cual se hace pasar la muestra de suelo.

Para realizar el ensayo, se debe emplear una serie de tamices normalizados con una abertura decreciente, en la cual se deja pasar una determinada cantidad de suelo seco, el suelo se queda retenido en los distintos tamices que tengan un tamaño igual o superior a la abertura del tamiz.

Una vez realizado el tamizado, se procede a tomar el peso de la cantidad de suelo retenida en cada uno de los tamices, el cual ayuda a construir una gráfica de carácter semi logarítmica, donde se representa el porcentaje en peso de una muestra retenida o que pasa por cada abertura de los tamices.

Figura 7. **Curva granulométrica**



Fuente: Manual de carreteras. Sección 15, p. 6.

El ensayo de granulometría permite establecer una clasificación genérica de suelos, como se puede observar en la tabla II, según el tamaño de partícula se puede clasificar el suelo.

Tabla II. **Clasificación granulométrica**

Clasificación granulométrica de los suelos			
TIPO	DENOMINACIÓN		TAMAÑO (mm)
SUELOS GRANULARES	Bolos y bloques		> 60
	Grava	Gruesa	60 - 20
		Media	20 - 6
Fina		2 - 6	
Arena	Gruesa	0.6 - 2	
	Media	0.2 - 0.6	
	Fina	0.08 - 0.2	
SUELOS COHESIVOS	Limo	Grueso	0.02 - 0.08
		Medio	0.006 - 0.02
		Fino	0.002 - 0.006
Arcilla		< 0.002	

Fuente: Manual de carreteras. Sección 15, p. 8.

2.1.2.2. Proctor (AASHTO T-180-01, ASTM D-1557-07)

Para determinar el grado de compactación de un suelo, es necesario determinar la cantidad de agua con la cual se obtenga una excelente lubricación de las partículas o la mejor densidad posible, a esto se le conoce como peso unitario seco máximo, cuando se realiza el ensayo de compactación, se debe

agregar una cantidad de agua necesaria para alcanzar dicha densidad, la cual se conoce como humedad óptima.

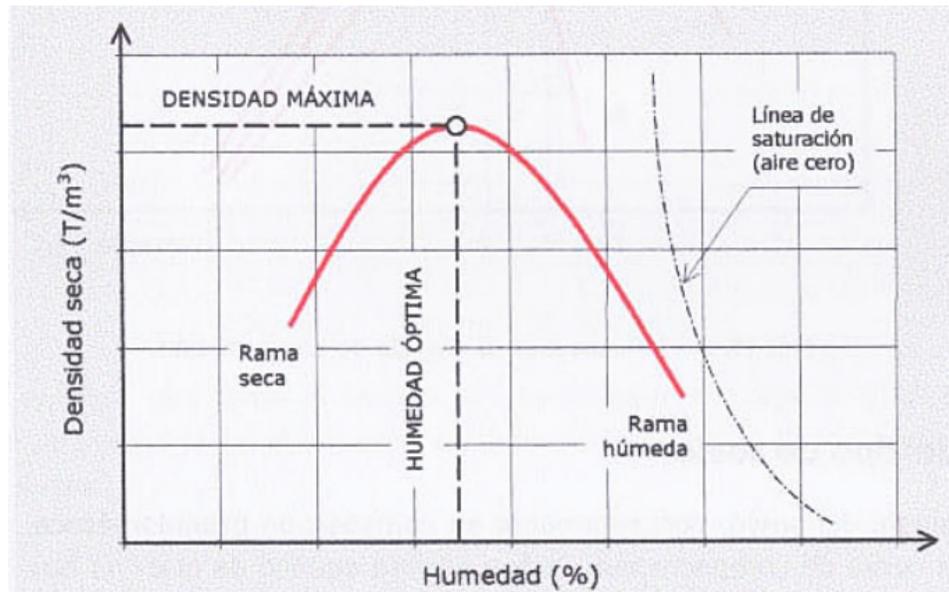
Existen 2 diferentes variantes del ensayo de Proctor; el Proctor normal y el Proctor modificado. La diferencia entre estos 2 métodos, es únicamente la energía de compactación utilizada, siendo el Proctor modificado 4,5 veces superior al Proctor normal.

La compactación no es más que el acomodo de las partículas de un suelo, que depende de la humedad que tenía el suelo al momento de compactar. Si las partículas están secas, la fricción intergranular opone una resistencia mayor al desplazamiento. Si las partículas están saturadas de agua, es decir con una humedad elevada, el agua llena los vacíos y separa las partículas del suelo.

Para medir el grado de compactación de un material o un relleno, se debe establecer la densidad seca del material. En la obtención de ésta, se debe tener en cuenta los parámetros de la energía utilizada durante la compactación y también depende del contenido de humedad durante el mismo. Para obtener una buena compactación, será necesario controlar debidamente la cantidad de agua, porque si ésta es muy poca, no existirá lubricación y no se podrá disminuir la fricción existente entre las partículas; en caso de que la humedad sea en exceso, las partículas podrán ser separadas por el agua.

Como se puede observar en la figura 8, se representa una curva de densidad seca versus humedad donde se puede ver claramente como varía la densidad seca según el porcentaje de humedad agregada al suelo, encontrando así la humedad óptima del suelo.

Figura 8. **Curva de densidad seca y humedad**



Fuente: Manual de carreteras. Sección 15, p. 13.

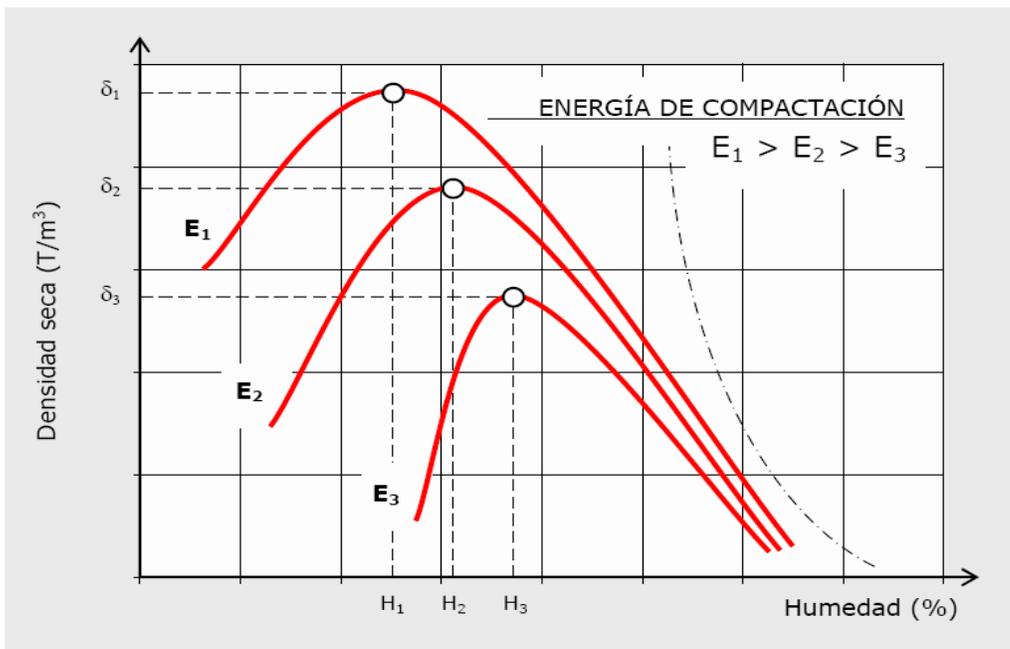
En general, es conveniente compactar un suelo para:

- Aumentar la resistencia al corte y por consiguiente, mejorar la estabilidad y la capacidad de carga de pavimentos.
- Disminuir la compresibilidad y así reducir los asentamientos.
- Disminuir la relación de vacíos y por consiguiente, reducir la permeabilidad.
- Reducir el potencial de expansión, contracción por congelamiento.

2.1.2.2.1. Influencia de la energía de compactación

Un suelo es afectado por la energía de compactación aplicada sobre la muestra, como se puede observar en la figura 9, en la gráfica de humedad – densidad, la humedad óptima varía en función de la energía aplicada al suelo.

Figura 9. Influencia de la energía de compactación

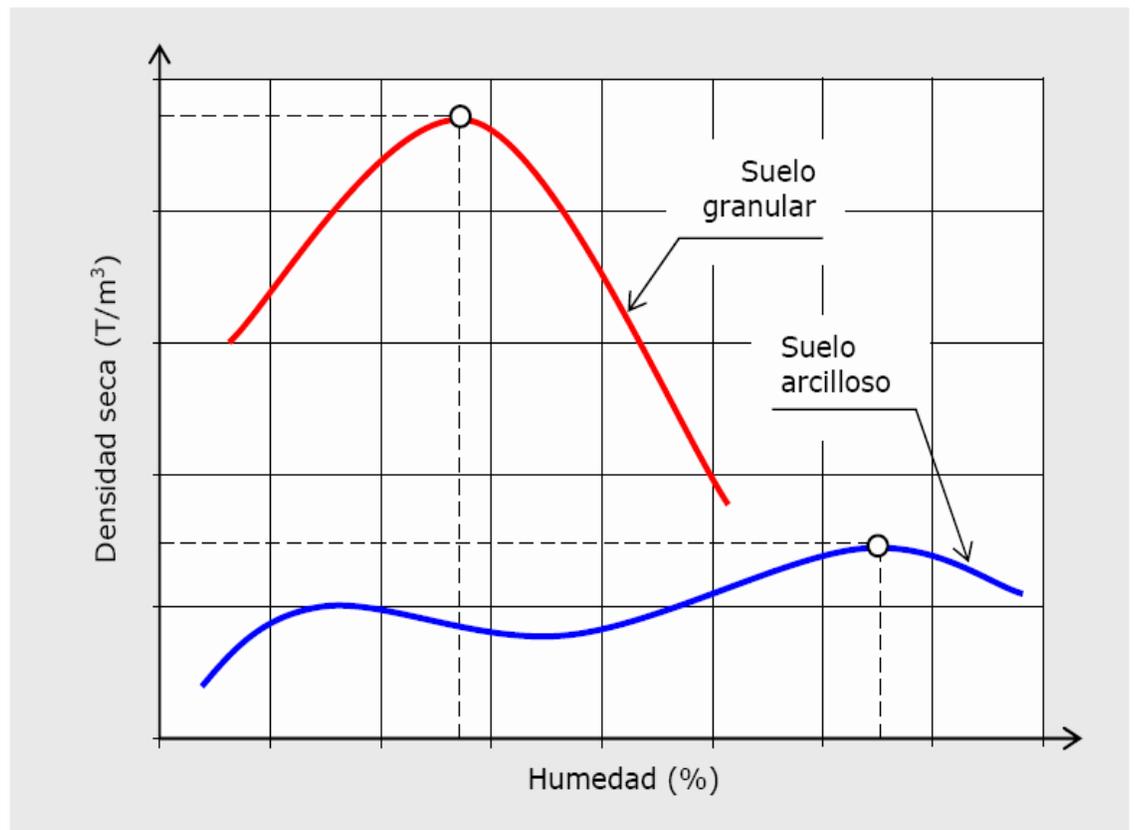


Fuente: Manual de carreteras. Sección 15, p.14.

2.1.2.2. Influencia del tipo de suelo

En la figura 10, se puede observar que la influencia del tipo de suelo o granulometría del material, su punto de humedad óptima es diferente, aunque ningún suelo es el mismo, se puede obtener una aproximación de la humedad óptima según el tipo de suelo.

Figura 10. Influencia del tipo de suelo



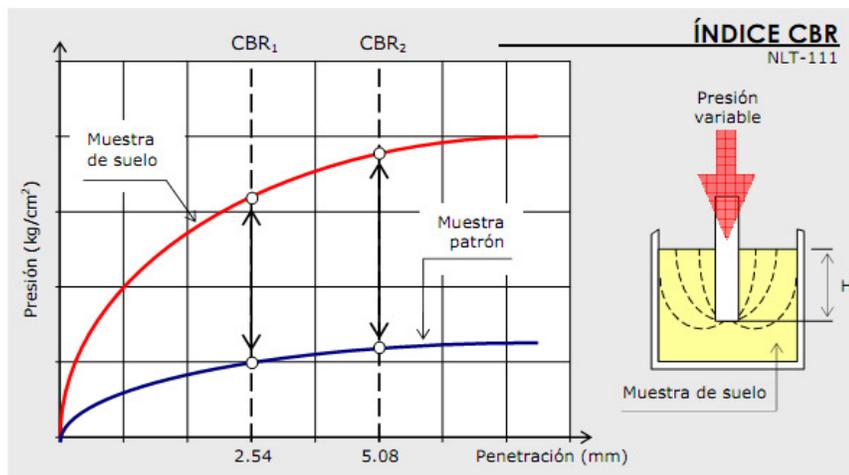
Fuente: Manual de Carreteras. Sección 15, p. 15.

2.1.2.3. CBR (AASHTO T-193-99, ASTM D-1883-07)

El ensayo de California Bearing Ratio (CBR) determina la capacidad soporte de suelos y agregados compactados en laboratorio, utilizando una humedad óptima y niveles de compactación variables. El ensayo fue desarrollado por la División de Carreteras de California, con el propósito de clasificar y evaluar la capacidad de un suelo para ser utilizado como subbases o material de base en la construcción de carreteras.

El ensayo mide la resistencia a corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la cual permite obtener un porcentaje de relación de soporte. El porcentaje de compactación de CBR, se define como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre a una determinada profundidad.

Figura 11. Curva presión – penetración



Fuente: Manual de carreteras. Sección 15, p. 6.

2.1.2.4. Permeabilidad (ASTM D-2464 -38, AASHTO T-215)

El suelo es un material no homogéneo, que varía en su arreglo de partículas dejando un espacio entre ellas. Conocida en mecánica de suelos, como vacíos o poros. Los poros o vacíos dentro de un suelo, crean canales de diferentes tamaños, donde el agua drena o circula hasta encontrar otro material no permeable o el nivel freático.

El ensayo de permeabilidad permite conocer el coeficiente de permeabilidad, la cual es una constante que relaciona la facilidad de movimiento de un flujo, a través de un medio poroso. En la tabla III se muestra los rangos de permeabilidad hidráulica.

Tabla III. Rangos de permeabilidad

Tipo de suelo	Permeabilidad hidráulica, k en cm/s
Gravas limpias	De 10^{-2} a 1.0
Arenas limpias, mezcla de arena y gravas limpias	De 1.0 a 1×10^{-3}
Arenas muy finas, limos, mezcla de arena, limo y arcilla, depósitos de arcilla estratificada	De 1×10^{-3} a 1×10^{-7}
Suelos impermeables como las arcillas homogéneas bajo la zona de meteorización	De 1×10^{-7} a 1×10^{-9}
Suelos impermeables que han sufrido alteración por la vegetación y la meteorización	De 1×10^{-2} a 1×10^{-7}

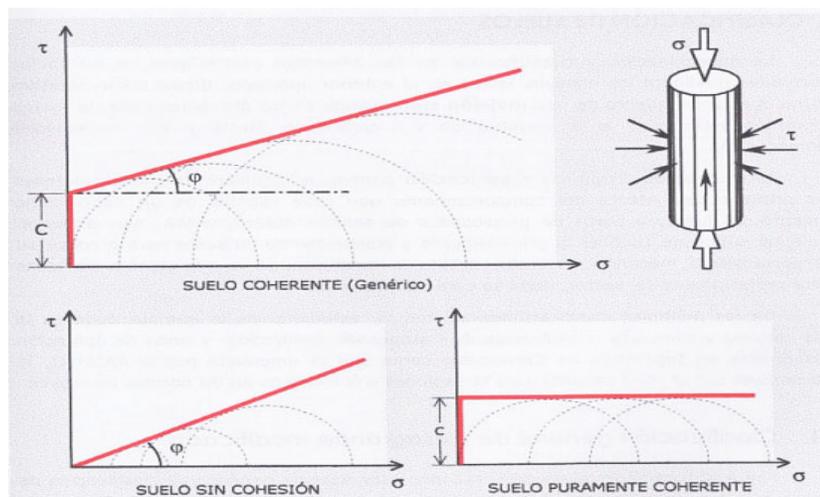
Fuente: Canales Hernández J.C. Características Físicas y Propiedades Mecánicas de los Suelos y sus Métodos de Medición. p. 346.

2.1.2.5. Triaxial (AASHTO T-297-94, ASTM D-4767-02)

El ensayo triaxial constituye un método versátil para estudiar las propiedades esfuerzo-deformación. El ensayo se realiza sobre una muestra inalterada del suelo con relación 1:2 y se somete a una presión de confinamiento en todas sus caras. El ensayo permite determinar las tensiones y deformaciones de probetas de suelo al variar los esfuerzos que actúan, obteniendo la cohesión C y ángulo de fricción interna Φ .

En el ámbito de la tecnología de carreteras, este procedimiento ayuda a encontrar la recta de resistencia intrínseca del suelo, definida como la envolvente de los círculos de Mohr obtenidos para distintas tensiones axiales y relaciona las características mecánicas del suelo con 2 de sus propiedades físicas: cohesión y ángulo de fricción interna.

Figura 12. Rectas de resistencia intrínseca de los suelos



Fuente: Manual de carreteras. Sección 15, p. 19.

2.1.2.6. Límites de Atterberg

El comportamiento de un suelo está muy influenciado por la presencia de agua. Este hecho se acentúa cuanto menor es el tamaño de las partículas que componen dicho suelo. Especialmente, es relevante en aquellos donde predomina el componente arcilloso, ya que en ellos los fenómenos de interacción superficial se imponen a los de tipo gravitatorio.

- Límite líquido (AASHTO T089-02, ASTM D-423-66)

El límite líquido de un suelo está definido como la humedad o cantidad de agua que posee, en la cual una masa de suelo se encuentra entre el estado plástico y el estado líquido.

- Límite plástico (AASHTO T090-00, ASTM D-424-54)

El límite plástico de un suelo está definido como el contenido de humedad, en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado semisólido y el estado plástico.

- Estados de consistencia

Los estados de consistencia de un suelo que pueden darse en los suelos coherentes en función de su grado de humedad: líquido, plástico, semisólido, sólido.

- Líquido

La presencia de una cantidad excesiva de agua, anula las fuerzas de atracción interparticular que mantienen unido al suelo (la cohesión) y lo convierte en un líquido viscoso sin capacidad resistente.

- Plástico

El suelo es fácilmente moldeable y presenta grandes deformaciones con la aplicación de esfuerzos pequeños. Su comportamiento es plástico, por lo que no recupera su estado inicial una vez cesado el esfuerzo. Mecánicamente no es apto para resistir cargas adicionales.

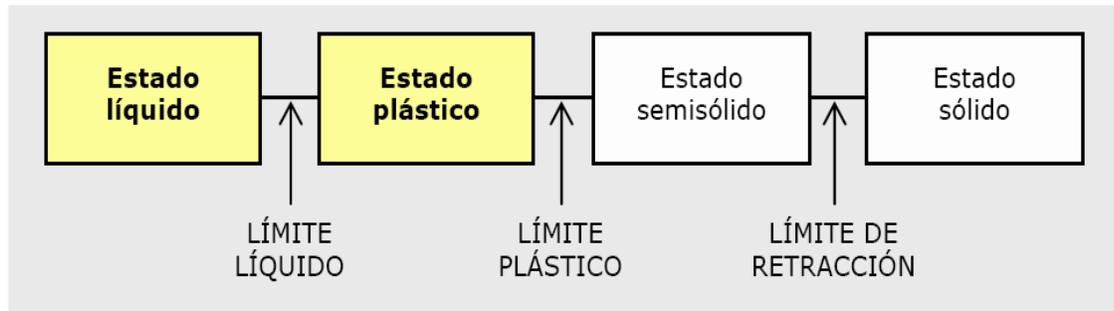
- Semi-sólido

El suelo deja de ser moldeable, pues se quiebra y resquebraja antes de cambiar de forma. No obstante, no es un sólido puro, ya que disminuye de volumen si continúa perdiendo humedad. Su comportamiento mecánico es aceptable.

- Sólido

En este estado, el esfuerzo alcanza la estabilidad, ya que su volumen no varía con los cambios de humedad. El comportamiento mecánico es óptimo. Las humedades correspondientes a los puntos de transición entre cada uno de los estados, definen los límites líquido (LL), plástico (LP) y de tracción (LR) respectivamente.

Figura 13. **Estados de consistencia de los suelos**



Fuente: Manual de carreteras. Sección 15, p. 9.

En la tabla IV se muestran los rangos de valores más frecuentes de todos estos parámetros en diferentes tipos de suelos.

Figura 14. **Valores típicos de consistencia en los suelos**

Valores típicos de consistencia del suelo				
PARÁMETRO		TIPO DE SUELO		
		Arena	Limo	Arcilla
LL	Límite líquido	15 - 20	30 - 40	40 - 150
LP	Límite plástico	15 - 20	20 - 25	25 - 50
LR	Límite de retracción	12 - 18	14 - 25	8 - 35
IP	Índice de plasticidad	0 - 3	10 - 15	10 - 100

Fuente: Manual de carreteras. Sección 15, p. 11.

2.1.3. Ensayos complementarios

Según las especificaciones generales, para la construcción de carreteras y puentes de Guatemala indica realizar ensayos no solamente de mecánica de suelos, y realizar ensayos complementarios que nos indiquen propiedades físicas y mecánicas específicas de un suelo.

2.1.3.1. Ensayo de abrasión (ASTM C-131)

El ensayo de abrasión, mide la resistencia al desgaste con efectos de impacto y fricción, utilizando la máquina de Los Ángeles, debido a la rotación del tambor de la máquina, provoca que el material y las esferas impacten, ocasionando fracturas que hacen disminuir el tamaño de las partículas. El resultado del ensayo indica el porcentaje en el cual se desgasta el material.

Tabla IV. Graduación para tipo de abrasión, de agregado grueso

Tipo	Tamaño de material retenido	Masa en (g) de cada tamaño	No. de esferas	Rev.	Tiempo (min)
A	1" ¾" ½" 3/8"	1 250±10	12	500	17
B	½" 3/8"	2 500±10	11	500	17
C	1/4." 4"	2 500±10	8	500	17
D	# 8	5 000±10	6	500	17

Fuente: Norma ASTM C-131.

3. RESULTADOS

3.1. Ensayos químicos de laboratorio

El ensayo fue realizado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la Sección de Química Industrial. Bajo los parámetros y requisitos de la norma.

3.1.1. Composición química de óxidos metálicos en minerales por fluorescencia de rayos X

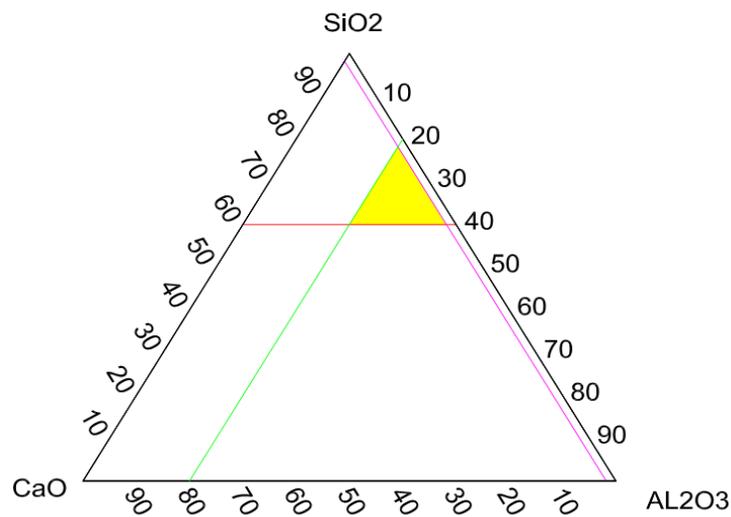
En la tabla VI, se muestran los datos obtenidos por el ensayo de Fluorescencia de Rayos X, y en la figura 14. El diagrama de terciarios según los datos obtenidos del ensayo.

Tabla V. **Composición química de óxidos metálicas en arcilla cocida por fluorescencia de rayos X**

Determinación	Porcentaje (porcentaje)
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	8,34 ± 0,42
Oxido de Aluminio (Al_2O_3)	23,54 ± 0,99
Oxido de Calcio (CaO)	1,89 ± 0,11
Oxido de Magnesio (MgO)	0,48 ± 0,035
Oxido de Silicio (SiO_2)	58,38 ± 2,52
Oxido de Potasio (K_2O)	1,045 ± 0,049
Oxido de Sodio (Na_2O)	1,45 ± 0,099
Trióxido de azufre (SO_3)	0,01 ± 0,001
Perdida por Ignición	1,80 ± 0,03

Fuente: Laboratorio de Química Industrial, CII-USAC.

Figura 15. **Diagrama ternario de la composición de la arcilla cocida según CaO-SiO₂-AL₂O₃**



Fuente: elaboración propia.

3.2. **Ensayos de mecánica de suelos**

Se realizaron los ensayos en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, bajo todos los parámetros y requerimientos de las normas ASTM y AASHTO.

3.2.1. **Ensayos de prueba con base en cada tipo de granulometría de arcilla cocida**

Los ensayos de mecánica de suelos con el material de arcilla cocida, se consideró según la tabla I tipos de graduación para material

de subbases o base granular, que refiere el rango superior, inferior y medio de la granulometría de tipo B-1.

Tabla VI. **Graduación tipo B- 1 para material de subbases**

Standard mm	Tamiz	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura TIPO "B" (Subbases y Base)
		B-1
50.0	2"	
38.1	1 1/2"	100
25,0	1"	-
19,0	3/4"	60-90
9,5	? "	-
4,75	N° 4	30-60
2,00	N° 10	-
0,425	N° 40	-
0,075	N°	5-15

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes p.305-2

Se realizaron todos los ensayos de mecánica de suelos, excepto los ensayos triaxial y límites de Atterberg, utilizando los 3 rangos granulométricos; identificándolos como baja, media y alta.

Cuando se refiere a una granulometría alta, se tomó en cuenta los rangos más bajos de la tabla VII, los resultados se presenta en la tabla VIII.

Tabla VII. **Granulometría alta de arcilla cocida**

Standard mm	Tamiz N°	porcentaje que pasa	porcentaje retenido
19,0	¾"	60	40
4,75	N° 4	30	70
0,075	N° 200	5	95

Fuente: elaboración propia.

Cuando se refiere a una granulometría media, se tomó en cuenta los rangos medios de la tabla I, los resultados se presenta en la tabla IX.

Tabla VIII. **Granulometría media de arcilla cocida**

Standard mm	Tamiz N°	porcentaje que pasa	porcentaje retenido
19,0	¾"	75	25
4,75	N° 4	45	55
0,075	N° 200	10	90

Fuente: elaboración propia.

Cuando se refiere a una granulometría baja, se tomó en cuenta los rangos de más altos de la tabla I y los resultados del material ensayado se presentan en la tabla X.

Tabla IX. **Granulometría baja de arcilla cocida**

Standard mm	Tamiz N°	porcentaje pasa	que porcentaje retenido
19,0	$\frac{3}{4}$ "	90	10
4,75	N° 4	60	40
0,075	N° 200	15	85

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Granulometría

Los siguientes ensayos fueron realizados acorde a las Normas ASTM D-422-02 y AASHTO T-088-00 y evaluadas bajo los requisitos de ensayos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.2.2.1. Granulometría alta

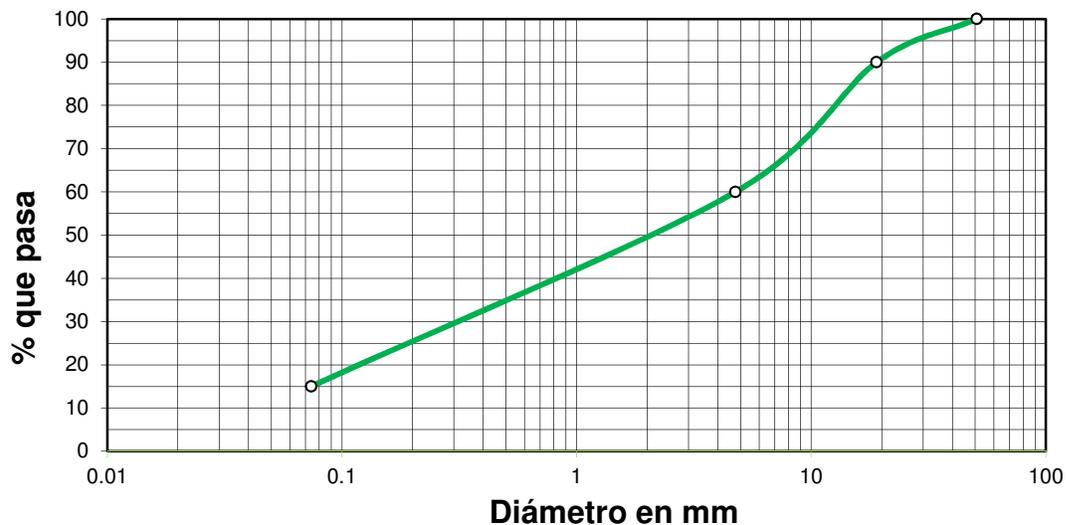
Los resultados obtenidos en el ensayo de granulometría para la proporción alta de arcilla cocida son los siguientes, los cuales se pueden apreciar gráficamente en la figura 15.

Porcentaje de Grava: 40,00

Porcentaje de Arena: 45,00

Porcentaje de Finos: 15,00

Figura 16. **Granulometría alta de arcilla cocida**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.2.2.2. **Granulometría media**

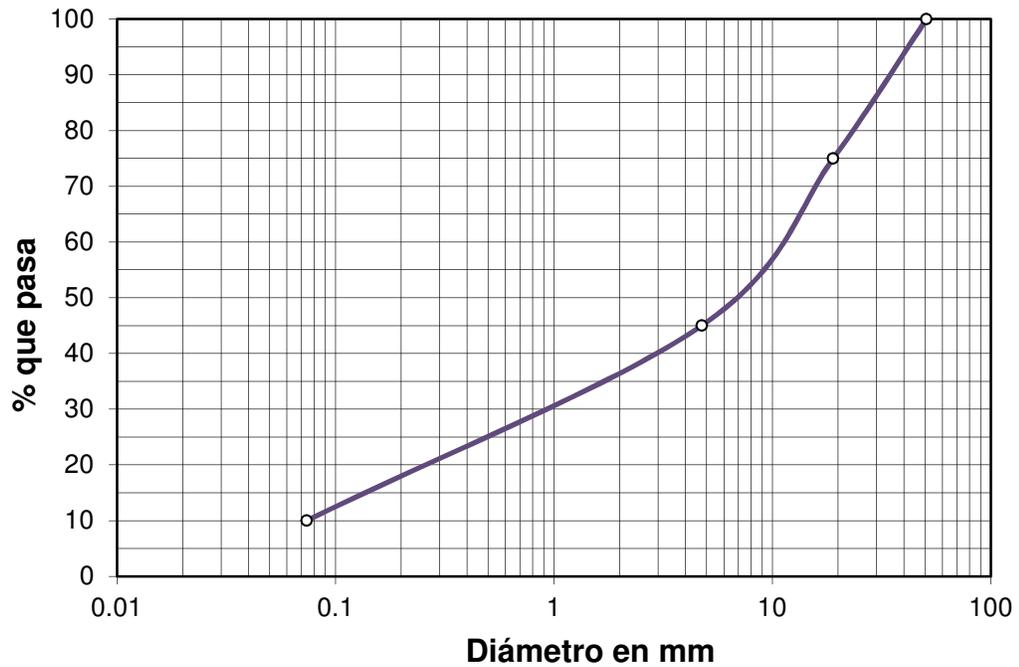
Los resultados obtenidos en el ensayo de granulometría para la proporción media de arcilla cocida son los siguientes, los cuales se pueden apreciar gráficamente en la figura 16.

Porcentaje de Grava: 55,00

Porcentaje de Arena: 35,00

Porcentaje de Finos: 10,00

Figura 17. **Granulometría media de arcilla cocida**



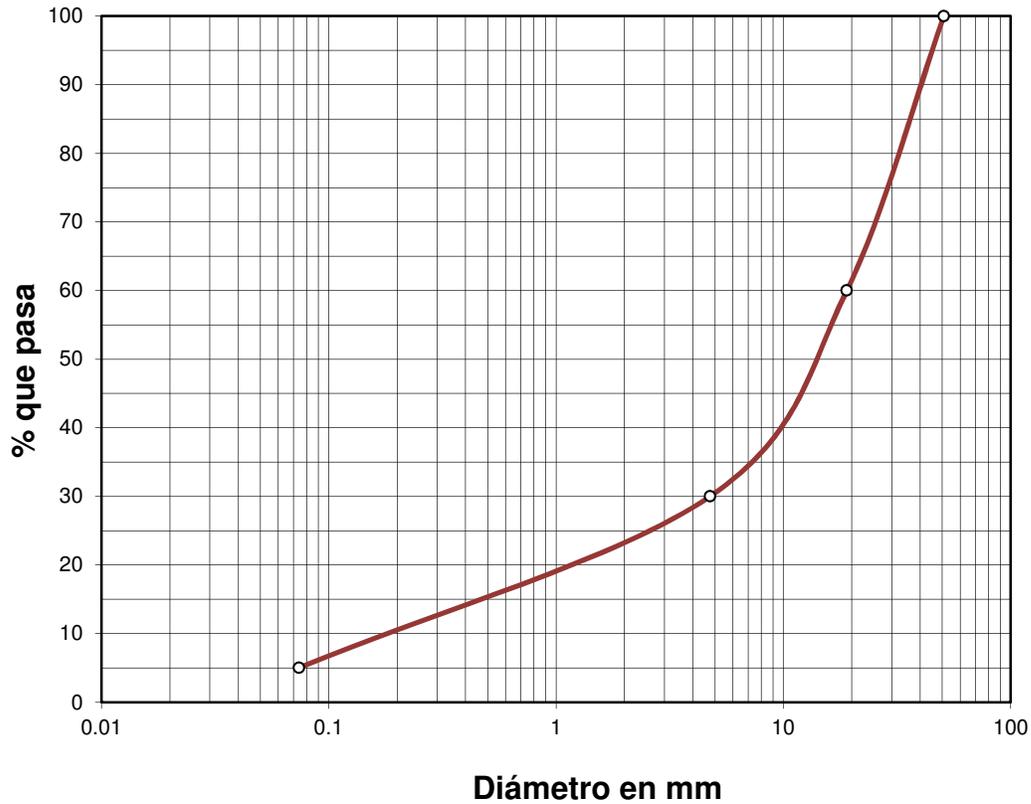
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.2.2.3. **Granulometría baja**

Los resultados obtenidos en el ensayo de granulometría para la proporción baja de arcilla cocida son los siguientes, los cuales se pueden apreciar gráficamente en la figura 17.

Porcentaje de Grava:	70,00
Porcentaje de Arena:	25,00
Porcentaje de Finos:	5,00

Figura 18. **Granulometría baja de arcilla cocida**

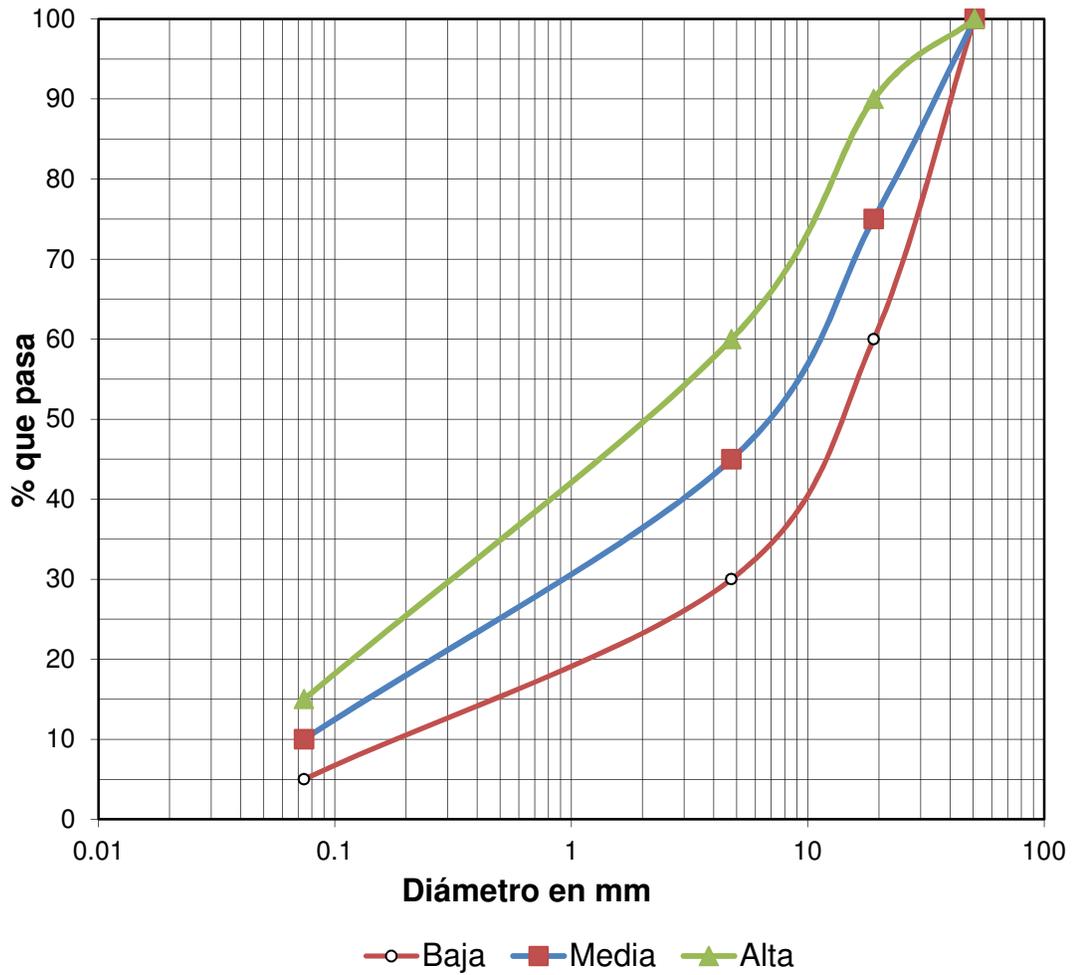


Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.2.2.4. Rangos granulométricos

Según lo establecido anteriormente, se elaboró la gráfica que representa las 3 granulometrías para los distintos rangos de graduación tipo B- 1 para material de subbases o base Granular.

Figura 19. Rangos granulométricos tipo B-1 para material de subbases o base granular de arcilla cocida



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.2.3. Proctor

Los siguientes ensayos fueron realizados acorde a las Normas ASTM D-1557-07 y AASHTO T-180-01 y evaluadas bajo los requisitos de ensayos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.2.3.1. Proctor granulometría alta

El ensayo Proctor determinó el comportamiento de la arcilla cocida con el rango granulométrico alto, los resultados se presentan en la tabla XI y figura 19.

Tabla X. Proctor granulometría alta (arcilla cocida)

Proctor granulometría Alta (arcilla cocida)				
%H. promedio	11,0	17,4	21,3	26,7
PUS (lb/pie ³)	91,75	92,6	92,9	92,7

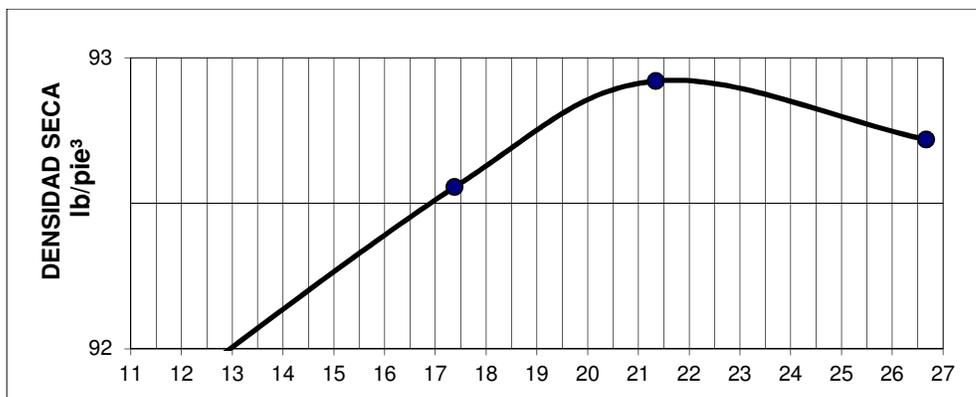
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Datos obtenidos:

Humedad óptima: 21,5 %

Densidad seca máxima: 92,9 lb. /pie³ ó 1, 488 kg/m³.

Figura 20. Gráfica de densidad seca – humedad, granulometría alta



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.2.3.2. Proctor granulometría media

El ensayo Proctor determinó el comportamiento de la arcilla cocida con el rango granulométrico medio, los resultados obtenidos se presentan a continuación en la tabla XII y figura 20.

Tabla XI. **Proctor granulometría media (arcilla cocida)**

Proctor granulometría media (arcilla cocida)					
%Hpromedio	9,4	12,3	18,3	21,6	24,1
PUS (lb/pie ³)	93,42	93,3	94,6	94,7	94,4

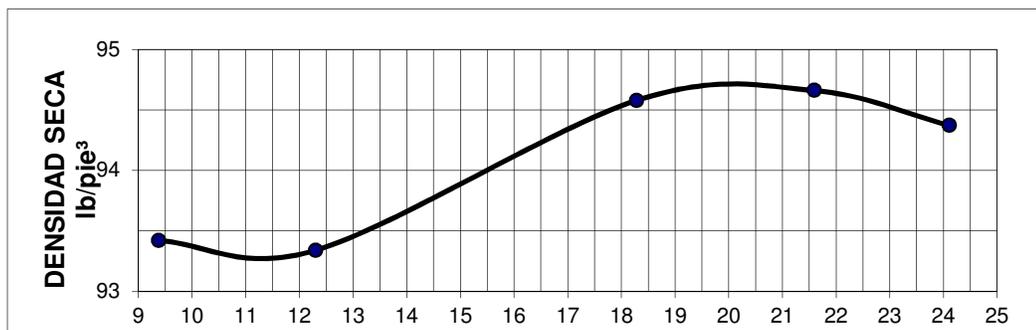
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Datos obtenidos:

Humedad óptima: 20,0 %

Densidad seca máxima: 94,7 lb./pie³ ó 1,517 kg/m³

Figura 21. **Gráfica de densidad seca – humedad, granulometría media**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.2.3.3. Proctor granulometría baja

El ensayo Proctor determinó el comportamiento de la arcilla cocida con el rango granulométrico baja, los resultados obtenidos se presentan a continuación en la tabla XIII y figura 21.

Tabla XII. **Proctor granulometría baja (arcilla cocida)**

Proctor granulometría Baja (arcilla cocida)				
%H. promedio	11,7	16,1	20,7	24,9
PUS (lb/pie ³)	88,9	89,0	91,2	89,3

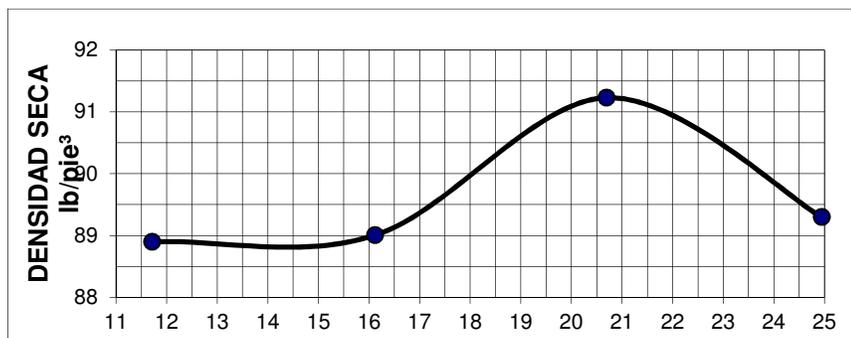
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Datos obtenidos:

Humedad óptima: 20,5 %

Densidad seca máxima: 91,25 lb./pie³ ó 1,462 kg/m³

Figura 22. **Gráfica de densidad seca – humedad, granulometría baja**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.2.4. CBR

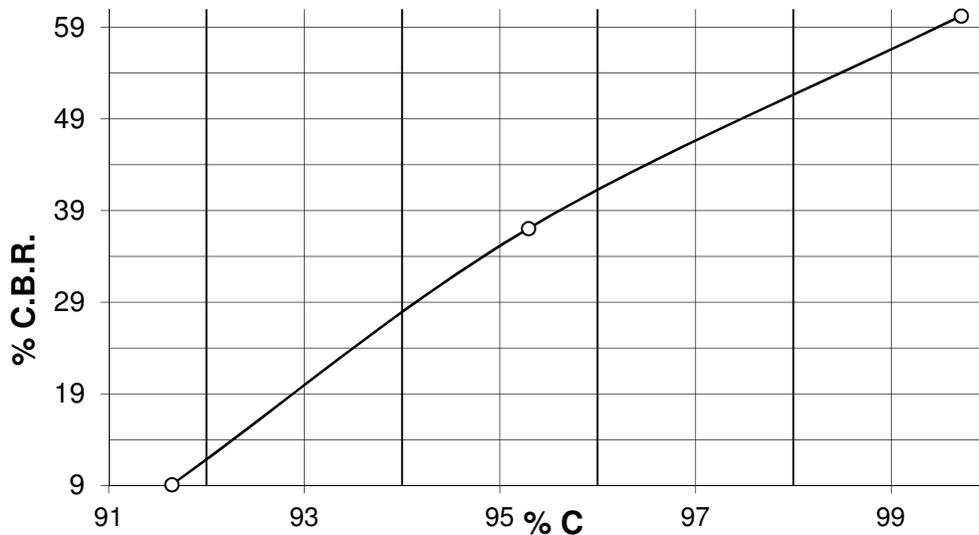
Los siguientes ensayos fueron realizados acorde a las Normas ASTM D-1883-07 y AASHTO T-193-99 y evaluados bajo los requisitos de ensayos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.2.4.1. CBR granulometría alta

El ensayo de valor soporte California determinó el comportamiento de la arcilla cocida con una granulometría alta y los resultados son los siguientes:

Humedad óptima: 21,5%

Figura 23. **Gráfica de porcentaje CBR - porcentaje de compactación, granulometría alta**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Datos obtenidos porcentaje de CBR versus porcentaje de compactación en la arcilla cocida ensayada

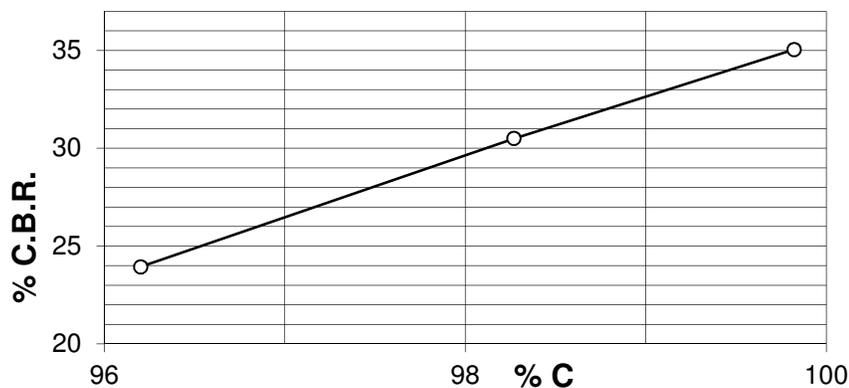
Porcentaje de Compactación		Porcentaje de CBR	
10 golpes:	91,6	10 golpes:	9,1
30 golpes:	95,3	30 golpes:	37,1
65 golpes:	99,7	65 golpes:	60,3

3.2.4.2. CBR granulometría media

Ensayo de valor soporte California, realizado para determinar el comportamiento de arcilla cocida con una granulometría media. Los resultados se presentan a continuación:

Humedad óptima: 20,0 %

Figura 24. **Gráfica de porcentaje CBR - porcentaje de compactación, granulometría media**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Datos obtenidos porcentaje de CBR versus porcentaje de compactación en la arcilla cocida ensayada.

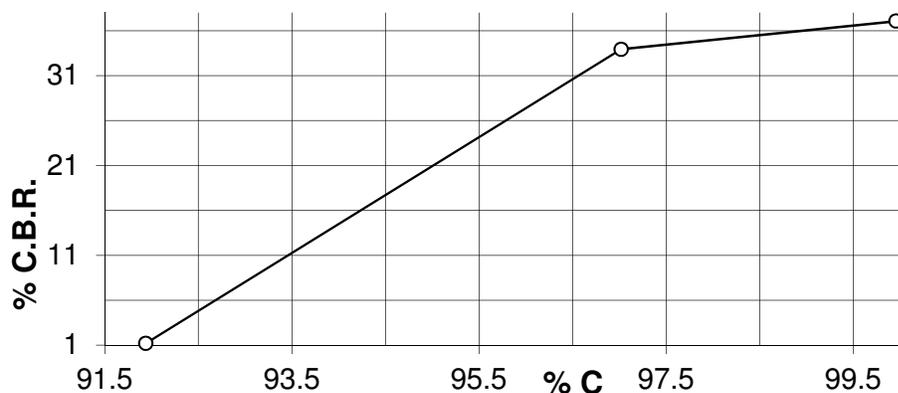
Porcentaje de Compactación		Porcentaje de CBR	
10 golpes:	96,2	10 golpes:	23,9
30 golpes:	98,3	30 golpes:	30,5
65 golpes:	99,8	65 golpes:	35,0

3.2.4.3. CBR granulometría baja

El ensayo de valor soporte California fue realizado para determinar el comportamiento de arcilla cocida con una granulometría baja. Los resultados del ensayo se presentan a continuación:

Humedad óptima: 20,5%

Figura 25. **Gráfica de porcentaje CBR - porcentaje de compactación, granulometría baja**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Datos obtenidos porcentaje de CBR versus porcentaje de compactación en la arcilla cocida ensayada.

Porcentaje de Compactación		Porcentaje de CBR	
10 golpes:	91,94	10 golpes:	1,2
30 golpes:	97,02	30 golpes:	33,9
65 golpes:	99,96	65 golpes:	37,1

3.2.5. Permeabilidad

Los siguientes resultados, fueron obtenidos bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, y la Norma ASTM D-2464 -38 y AASHTO T-215.

3.2.5.1. Permeabilidad granulometría alta

El ensayo de permeabilidad realizado para determinar el comportamiento de arcilla cocida con granulometría alta, el resultado es el siguiente.

Resultado del ensayo:

Coeficiente de Permeabilidad= $6,82 \times 10^{-5}$ cm/s

3.2.5.2. Permeabilidad granulometría media

El ensayo de permeabilidad realizado para evaluar el comportamiento de la arcilla cocida con granulometría media, el resultado es el siguiente:

Resultado del ensayo:

Coefficiente de Permeabilidad= $1,6643 \times 10^{-4}$ cm/s

3.2.5.3. Permeabilidad granulometría baja

El ensayo de permeabilidad realizado para evaluar el comportamiento de la arcilla cocida con granulometría baja, el resultado del ensayo es el siguiente:

Resultado del ensayo:

Coefficiente de Permeabilidad= $2,13 \times 10^{-4}$ cm/s

3.3. Ensayos de complemento de arcilla cocida según norma

Los siguientes resultados fueron obtenidos bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, y la Norma ASTM C-131 para el ensayo de abrasión, la Norma ASTM D-4767-02 y AASHTO T297-94 para el ensayo triaxial y AASHTO T089-02, ASTM D423-66, AASHTO T090-00, ASTM D424-54 para Límites de Atterberg .

3.3.1. Ensayo de abrasión

Ensayo de abrasión realizado para evaluar el comportamiento de la arcilla cocida. Los resultados se presentan a continuación:

Norma de Ensayo ASTM C-131
Graduación B
porcentaje Desgaste 73,00

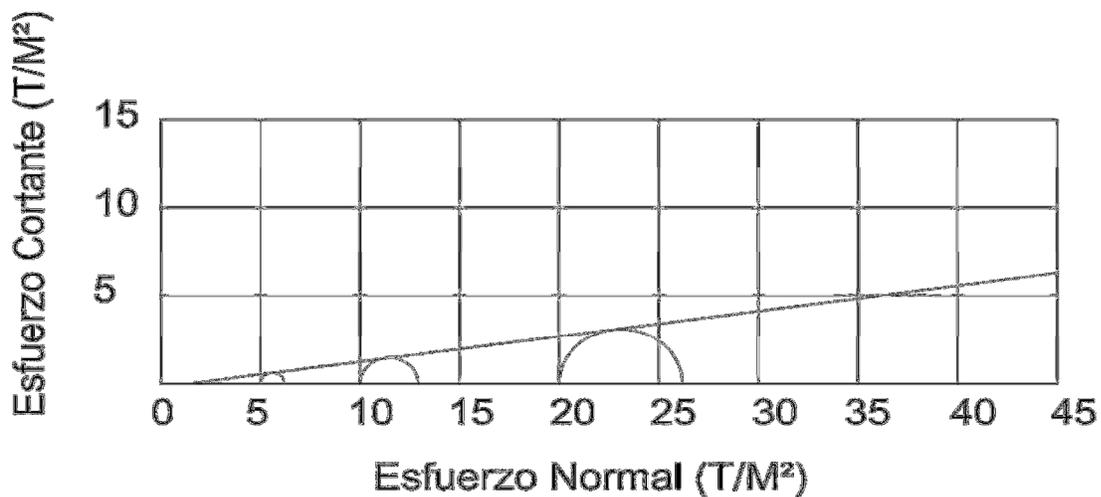
3.3.2. Triaxial

El ensayo triaxial se realizó con probeta remoldeada de arcilla cocida, empleando la densidad seca máxima obtenida en Proctor. La figura 25 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

Ángulo de fricción interna: $8,18^\circ$

Cohesión: 0 t/m^2

Figura 26. **Círculos de Mohr para triaxial de arcilla cocida**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.3.3. Límites de Atterberg

El material de arcilla cocida no presenta límite líquido y límite plástico por lo que se clasificó como una arena limosa con partículas de grava color rojizo.

3.4. Ensayos de prueba para material selecto según norma

El material selecto que se utilizó como comparación, es una arena limosa con pómez, el cual es un suelo bastante común para la utilización de subbases de carreteras en Guatemala.

Se realizó el ensayo de granulometría para determinar la cantidad de arena y fino, que presenta la muestra con el fin de ubicarlo dentro de las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.

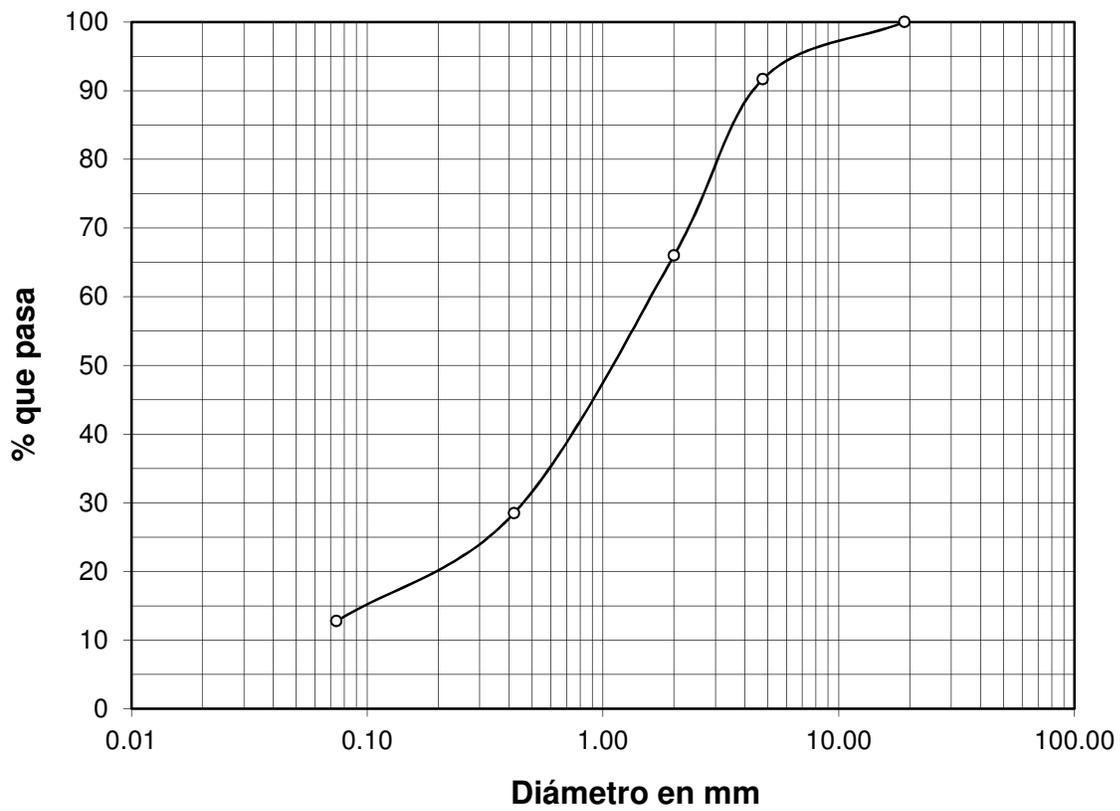
Asimismo se realizó el ensayo de Proctor y CBR para conocer la humedad óptima, porcentaje de compactación, porcentaje de CBR y ensayo de límites de Atterberg y ensayo de permeabilidad para realizar la comparación con las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.

3.4.1. Ensayo de granulometría

Este ensayo fue realizado acorde a las Normas AASHTO T-27 y AASHTO T-11 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El resultado obtenido para el material utilizado para este ensayo, se presenta a continuación.

Porcentaje de Grava: 8,32
Porcentaje de Arena: 78,91
Porcentaje de Finos: 12,78

Figura 27. **Granulometría material selecto**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.4.2. Proctor (AASHTO T180-01, ASTM D1557-07)

Ensayo Proctor realizado en el del material selecto, fue ensayado bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala .Los resultados se presentan en la tabla XIV y figura 27.

Tabla XIII. Proctor material selecto

Proctor material selecto				
%H. promedio	17,0	19,2	23,0	26,9
PUS (lb/pie ³)	85,4	87,6	86,4	84,3

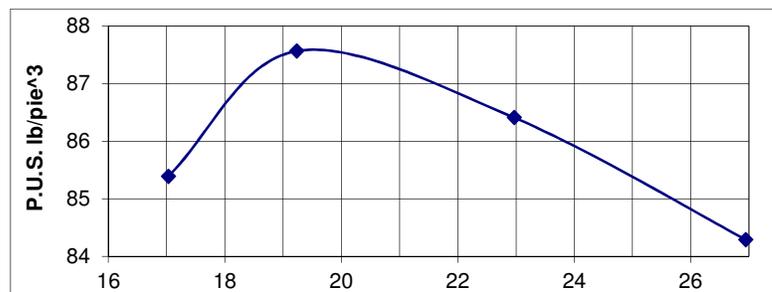
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Datos obtenidos:

Humedad óptima: 19,4%

Densidad seca máxima: 87,6 lb. /pie³ ó 1, 403 kg/m³

Figura 28. Gráfica de densidad seca – humedad, material selecto



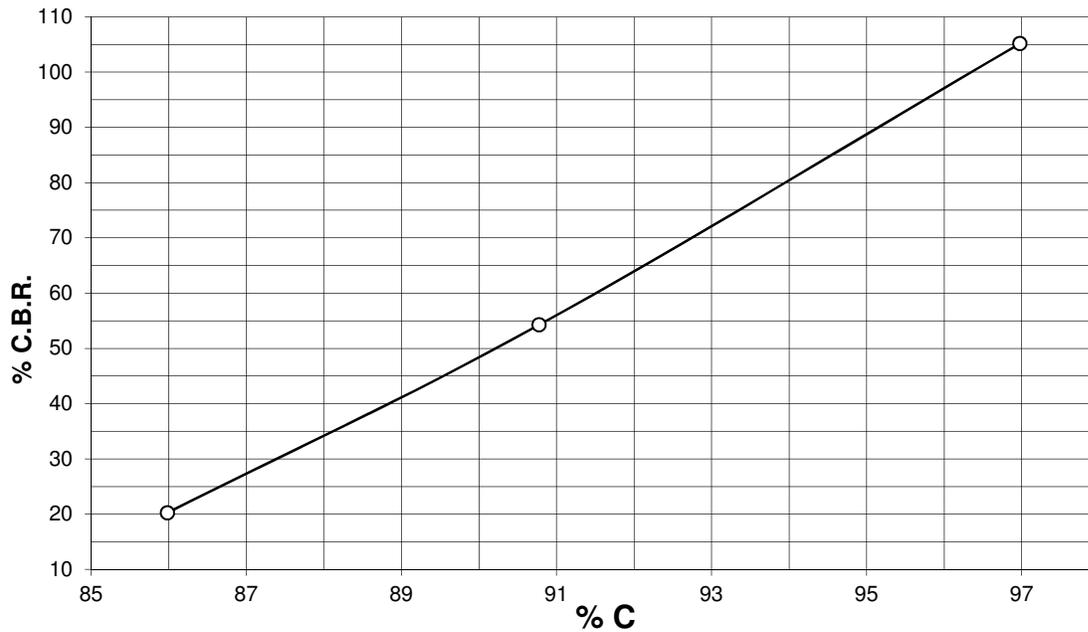
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

3.4.3. CBR (AASHTO T193-99, ASTM D1883-07)

Ensayo de valor soporte California realizado en el del material selecto fue ensayado bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala .Los resultados se presentan en a continuación y en la figura 28.

Humedad óptima: 19,4%

Figura 29. **Gráfica de porcentaje CBR - porcentaje de compactación, material selecto**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Datos obtenidos porcentaje de CBR versus porcentaje de compactación en el material selecto:

Porcentaje de Compactación		Porcentaje de CBR	
10 golpes:	86,0	10 golpes:	20,3
30 golpes:	90,8	30 golpes:	54,2
65 golpes:	97,0	65 golpes:	105,2

3.4.4. Límites de Atterberg (AASHTO T089-02, ASTM D423-66, AASHTO T090-00, ASTM D424-54)

El material selecto no presenta límite líquido y límite plástico por lo que se clasifico como una arena limosa con pómez.

3.4.5. Permeabilidad (ASTM D2464 -38, AASHTO T215)

El ensayo de permeabilidad fue realizado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el material selecto cumpliendo las especificaciones de la Norma ASTM D2464-38 y AASHTO T215, .A continuación se presenta el resultado del coeficiente de permeabilidad

Resultado del ensayo:

Coeficiente de permeabilidad= $1,67 \times 10^{-3}$ cm/s

4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

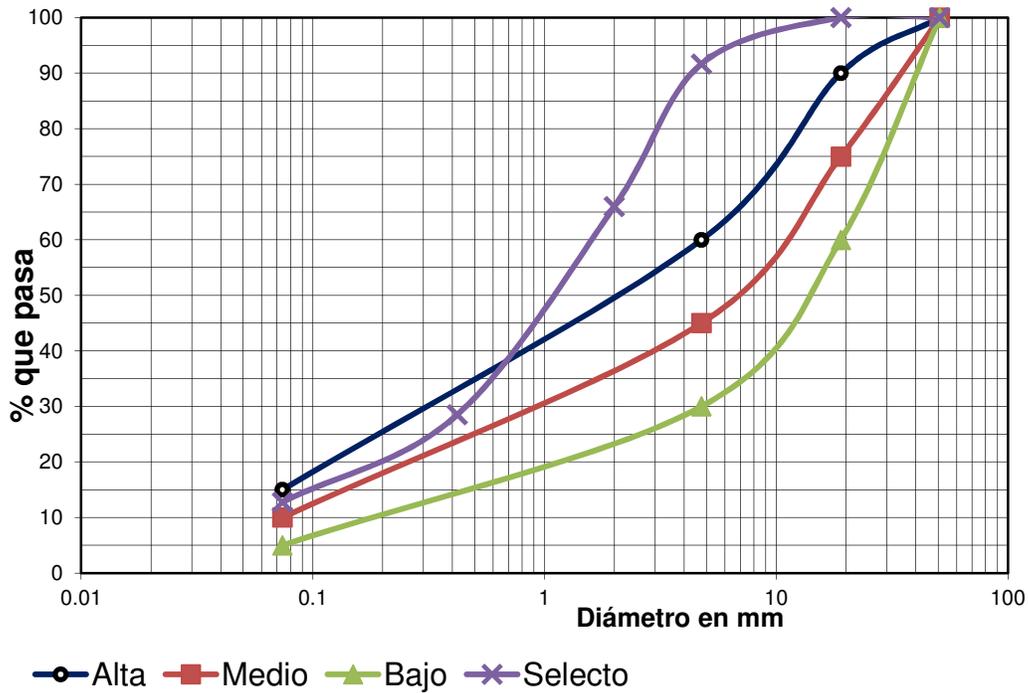
El propósito de esta investigación es comparar el rendimiento de la arcilla cocida triturada en comparación con un material selecto, según las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.

4.1. Granulometría

Se compararon las gráficas granulométricas de todas las arcillas cocidas y la gráfica granulométrica del material selecto, tal como se puede observar en la figura 28, la gráfica granulométrica media de arcilla cocida, presenta la mayor similitud al material selecto dentro del rango de los porcentajes de finos, luego el material selecto aumenta drásticamente su porcentaje de arena.

El material de arcilla cocida presenta una mayor cantidad de gravas, ya que el material es muy abrasivo que aumenta el porcentaje de arena una vez compactado el material. Se podría asumir que las gráficas granulométricas se acercan una vez compactado el material de arcilla cocida a un selecto.

Figura 30. **Distribución de granulométrica de la arcilla cocida y su comparación con la distribución óptima de material selecto**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

4.2. Proctor

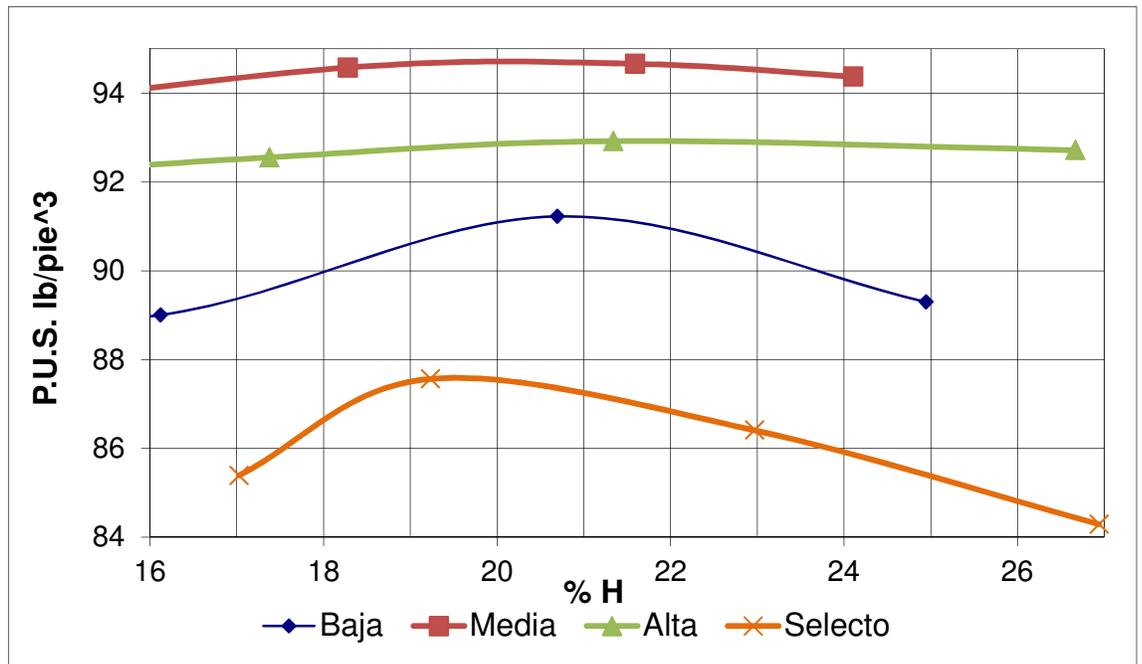
Los resultados de densidad seca en función de porcentaje de humedad para las arcillas cocidas y el material selecto utilizado como referencia, como se puede observar en la figura 29, la densidad seca del material selecto está por debajo de las arcillas cocidas, el cual indica que el grado de compactación es mayor para las arcillas cocidas, también se puede observar que aunque la densidad seca es distinta, las humedades óptimas están relativamente cercanas.

Tabla XIV. **Proctor arcilla cocida versus material selecto**

	Material selecto	Arcilla cocida baja	Arcilla cocida media	Arcilla cocida alta
%H. promedio	19,4	20,5	20	21,5
PUS (lb/pie ³)	87,6	91,25	94,7	92,9

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

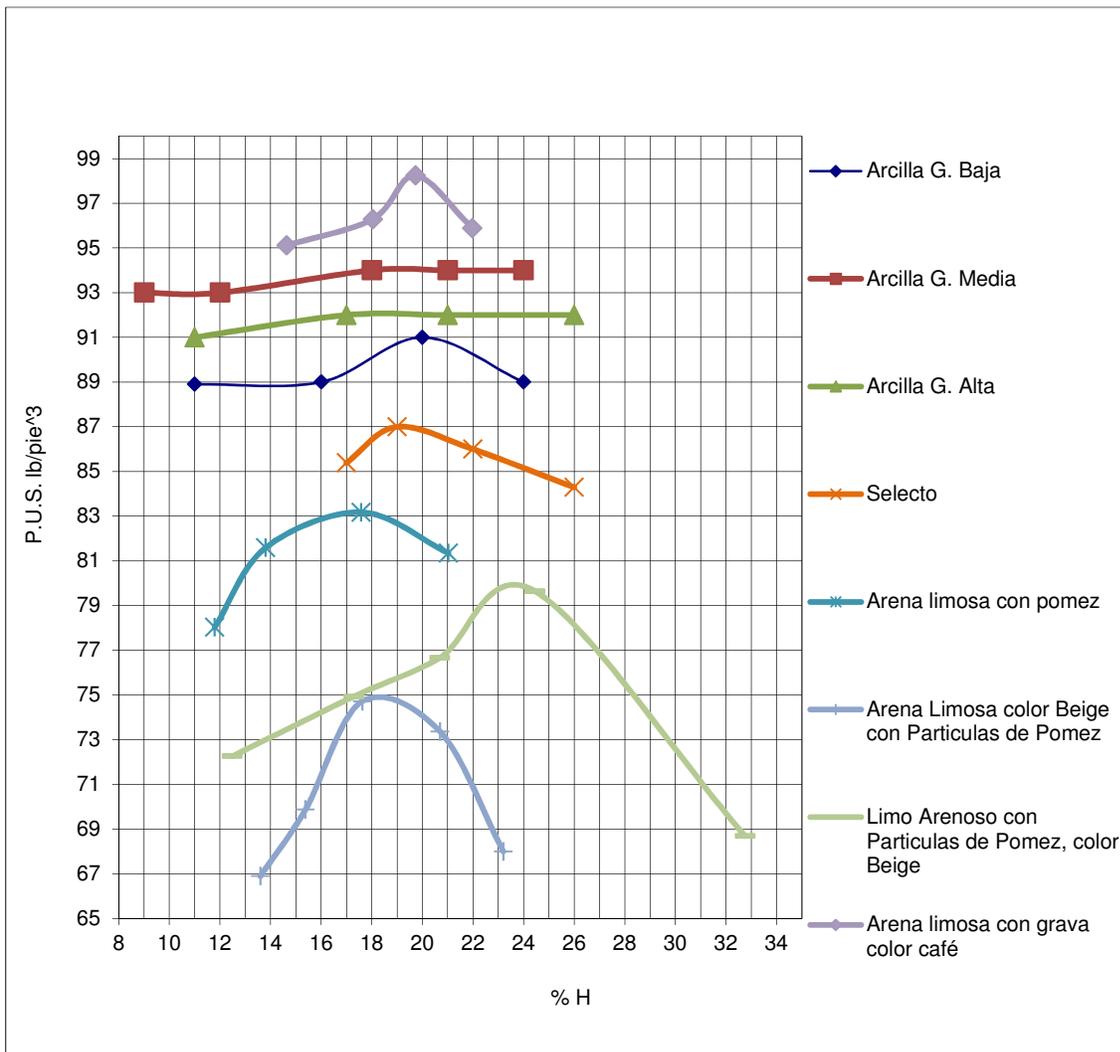
Figura 31. **Gráfica de densidad seca – humedad, arcilla cocida versus material selecto**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Se realizó una gráfica de comparación con distintos suelos para poder determinar si la arcilla cocida es similar a un suelo ya analizado.

Figura 32. **Gráfica de densidad seca – humedad, arcilla cocida versus distintos suelos**



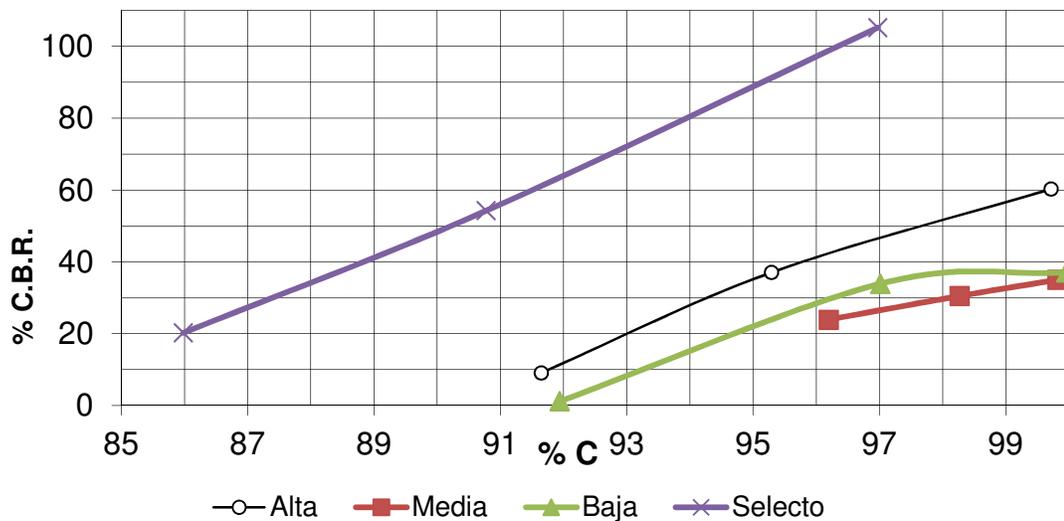
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Como se puede observar la arcilla cocida se presenta en un rango de arena limosa con grava, lo que quiere decir que la arcilla cocida se puede clasificar como una arena limosa con partículas de grava.

4.3. CBR

Se compararon los resultados de porcentaje de CBR en función del porcentaje de compactación, para el material selecto contra las arcillas cocidas. Como se puede observar en la figura 32, según los parámetros de diseño de carreteras, el porcentaje mínimo de CBR debe ser mayor o igual a 40 cuando esté en un 95 por ciento de compactación, el cual solo el material selecto cumplió con este parámetro, aunque la arcilla cocida con granulometría alta resultó con un 35 por ciento de CBR para un 95 por ciento de compactación.

Figura 33. **Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje C, arcilla cocida versus material selecto**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

4.4. Permeabilidad

Según la tabla III, rangos de permeabilidad se establecieron ciertos valores, donde se puede clasificar el material y determinar si la arcilla cocida es permeable o impermeable, según la tabla XVI los coeficientes de permeabilidad, tanto del material selecto como las arcillas se encuentran en el mismo rango de 1×10^{-3} - 1×10^{-7} , la cual se clasifica como arenas muy finas, limos, mezcla de arena, limo y arcilla, depósitos de arcilla estratificada.

Figura 34. **Coeficientes de permeabilidad, arcilla cocida versus material selecto**

	Material selecto	Arcilla cocida baja	Arcilla cocida media	Arcilla cocida alta
Coefficiente de Permeabilidad cm/s	$1,67 \times 10^{-3}$	$2,13 \times 10^{-4}$	$1,664 \times 10^{-4}$	$6,82 \times 10^{-5}$

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

4.5. Límites de Atterberg

Los materiales por ser granulares no presentan límites de Atterberg. Por lo tanto se clasifican las arcillas cocidas como arenas.

4.6. Ensayo de abrasión

Para la construcción de carreteras y puentes. El valor de abrasion debe ser menor o igual a 50 por ciento, por lo tanto la arcilla cocida presenta un porcentaje de abrasion del 73 por ciento lo que significa que esta 23 por ciento arriba del maximo permisible.

CONCLUSIONES

1. El material de arcilla cocida presenta características físicas y propiedades mecánicas muy similares a una arena, debido a que a la cristalización de la arcilla dentro del proceso de cocción del ladrillo, no presenta límites de Atterberg y no presenta cohesibilidad.
2. La arcilla cocida se puede clasificar como una arena limosa con partículas de grava.
3. Para obtener una graduación adecuada más parecida al material selecto utilizado en esta investigación se considera necesario agregar un tamaño de partícula menor a $\frac{3}{4}$ pulgadas.
4. Los valores de humedad óptima de las arcillas cocidas, dentro del ensayo de Proctor presentó una similitud al material selecto utilizado en esta investigación, aunque la densidad seca para las arcillas cocidas es mayor que algunos materiales selectos comúnmente utilizados en subbases en Guatemala.
5. El material de arcilla cocida es muy abrasivo lo cual restringe obtener un buen comportamiento durante la compactación. Al momento de realizar el ensayo de CBR, las partículas de mayor tamaño se desintegran fácilmente y dejan vacíos dentro de la muestra lo que altera su desempeño.

6. El material de arcilla cocida debe ser mezclado con un material menos abrasivo como el concreto reciclado, para mejorar su comportamiento, siempre con el enfoque de reutilizar materiales de construcción para subbases en pavimentos
7. No existe una granulometría de la arcilla cocida que presente un mejor comportamiento, tanto de compactación, permeabilidad o humedad óptima.
8. El material selecto utilizado en la investigación presenta propiedades mecánicas y características físicas que la hacen ideal para realizar una subbase dentro de una carretera.
9. Se puede observar que la granulometría que se obtuvo del material selecto utilizado en esta investigación, no está dentro de las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes, sin embargo presenta un gran porcentaje de compactación, siendo adecuado para su utilización en subbases en pavimentos.
10. Un buen material para subbase debe presentar un mayor porcentaje de arena para obtener una buena compactación.
11. La arcilla cocida no presenta una granulometría óptima para mejorar su comportamiento, por que las características físicas y propiedades mecánicas no dependen de la granulometría misma, si no de la cristalización de la arcilla en su procedimiento de cocción.

RECOMENDACIONES

1. La arcilla cocida presenta buenas propiedades de permeabilidad, la permite utilizarse como un agregado para obras menores de ingeniería, tales como drenajes franceses, o carreteras de bajo tráfico diario.
2. Realizar un estudio para determinar si es viable como un material alternativo para carreteras de bajo tráfico vehicular como son las calles de una colonia residencial, o parqueos de comercio.
3. Utilizar el material de arcilla cocida como base para adoquín peatonal, o utilizarlo como agregado para un concreto permeable o drenaje francés.
4. Realizar la investigación agregando partícula menor a $\frac{1}{2}$ pulgadas, para evitar la fracturación de la arcilla cocida y alterar su granulometría.
5. Realizar la investigación con la inclusión de un material menos abrasivo como es el concreto reciclado, para determinar si mejora su comportamiento.
6. Obtener otra muestra de material selecto para realizar los mismos ensayos y observar si presenta las mismas características que el material utilizado para esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Association The Brick Industry*. [en línea] 2009.
<http://www.generalshale.com/pdf/BIaporcentaje20Techporcentaje20Noteporcentaje2048porcentaje20Sustainability.pdf>. [Consulta: 13 de marzo de 2012]
2. BERRY, Peter ; REID, David. *Mecánica de suelos*. Mexico : McGraw-Hill. 1993. 415 p.
3. BLÁZQUEZ BAÑÓN, Luis ; BEVIÁ. *Manual de carreteras*. Chile :Departamento de Estudios Viales, Subdirecccon de Desarrollo de la Direccion de Vialidad. 2010. tomo 2. 675 p.
4. Caracterización estructural y analítica de los ladrillos de la fachada del palacio de Pedro I. [en línea] http://humanidades.cchs.csic.es/ih/congreso_iberico/54.PDF. [Consulta: 25 de mayo de 2013].
5. Envirometal Presercation Industries Company. EPIC. [en línea] <http://www.epickw.com/s/uploads/pages/81cb182c08326d4774a26c81c08a7963.png>. [Consulta: 22 de febrero de 2012]
6. CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Mexico : Limusa, 2004. 652 p.
7. DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Mexico : Thompson, 2001. 594 p.

8. . *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 4a Ed. Mexico : Thompson, 2001. 743 p.
9. DIAZ RODRIGUEZ, Abraham. *Dinámica de suelos*. Mexico : Limusa, 2006. 310 p.
10. Direct Industry. [en línea] <http://www.directindustry.es/prod/oxford-instruments/espectrometros-de-fluorescencia-de-rayos-x-por-energia-dispersiva-edxrf-16640-215527.html>. [Consulta: 13 de abril de 2012].
11. Europe, Tiles and Bricks of. The Clay Life Cycle, Demolition and Recycling. [en línea] <http://www.tiles-bricks.eu/en/downloads/the-clay-life-cycle>. [Consulta: 13 de abril de 2012].
12. *Geotechnical Properties of Recycled Crushed Brick in Pavement Applications*. ASCE, 2011, 9 p.
13. GONZALES, Daniel. La prensa .[en línea] <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=997425>. [Consulta: 25 de julio de 2012].
14. Delta Group. [En línea] http://www.deltagroup.com.au/media/subSections/52/_hero.jpg. [Consulta: 2 de marzo de 2012].
15. JUAREZ, Eulalio. *Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos*. Mexico : Limusa, 2005, 646 p.

16. Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Guatemala : MICIV, 2000.724 p.
17. Old Red Brick Co. [en línea] 2011. <http://www.oldredbrickco.com.au/crushed.html>. [Consulta: 22 de abril del 2012].
18. Thormark, C. 2000. Environmental analysis of a building with reused materials. [En línea] 2000. <http://dspace.mah.se/bitstream/handle/2043/9844/Staffanstorp.pdf?sequence=1>. [Consulta: 6 de abril del 2013].
19. VAN OLPHEN, H. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. Washington : Wiley-Interscience Publication, 1977. 318 p.

ANEXOS

Anexo 1



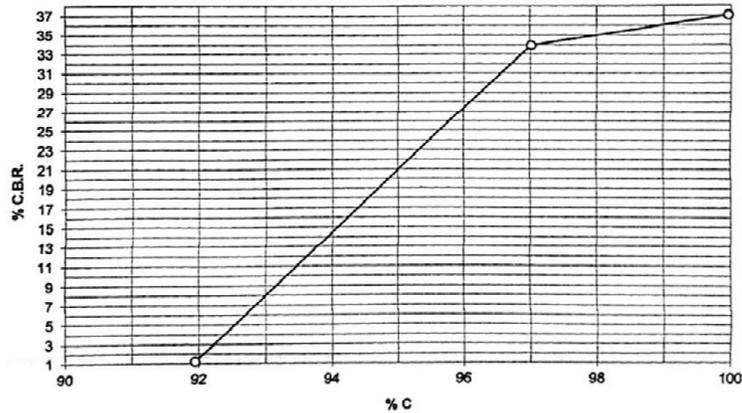
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No.: 0454 S.S. O.T. No.: 30,692
 Interesado: Oscar Andres Garcia Valdes
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O.T-193
 Proyecto: Tesis "Comparacion del Material de desecho procedente de Arcilla cocida y Material Selecto para la Utilizacion de Sub-base en Carreteras"
 Ubicación: USAC
 Muestra No.: 1
 Fecha: 28 de noviembre del 2012

PROBETA No.	GOLPES No.	A LA COMPACTACION H (%)	γ_{c-1} b/ pie ³	C (%)	EXPANSION (%)	C.B.R. (%)
1	10	20.50	83.9	91.94	1.30	1.2
2	30	20.50	88.5	97.02	1.74	33.9
3	65	20.50	91.2	99.96	1.52	37.1

GRAFICA DE % C.B.R.-% DE COMPACTACION



Descripción del suelo: Arena limosa con partículas de grava color rojizo
 Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Dilma Yanez Mejicanos Jol
 DIRECTORA a.i. CI/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingenieria, Seccion de Mecanica de Suelos.

Anexo 2



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



Informe No: 449 S. S.

O.T. No.: 30,692

INTERESADO: Oscar Andres Garcia Valdes
PROYECTO: Tesis "Comparacion del Material de desecho procedente de Arcilla cocida y Material Selecto para la Utilizacion de Sub-base en Carreteras"
ASUNTO: ENSAYO DE PERMEABILIDAD
NORMA: AASHTO T125-66

FECHA: 28 de noviembre del 2012

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Arena limosa con particulas de grava color rojizo
(Granulometria Baja)

RESULTADO DEL ENSAYO:

Coefficiente de Permeabilidad= 2.13×10^{-4} cm/s

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Dilma Yanet Méjicanos Jol
DIRECTORA a.i. CI/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5 Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115, Planta 2418-8000 Exts. 66209 y 66221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.

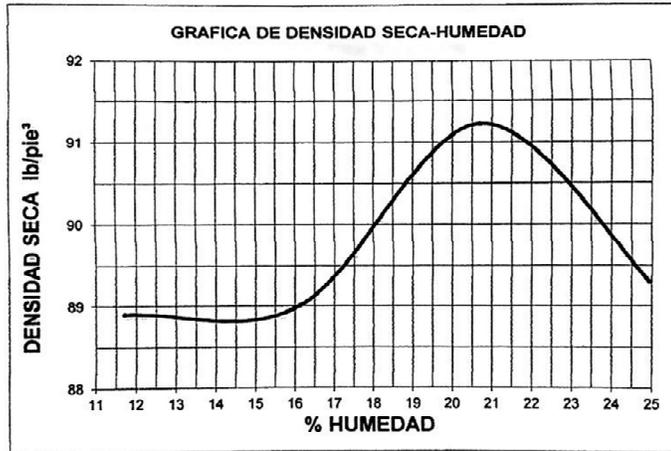
Anexo 3



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



INFORME No. 0453 S.S. O.T. No.: 30,692
 Interesado: Oscar Andres Garcia Valdes
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Estándar: () Norma:
 Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180
 Proyecto: Tesis "Comparacion del Material de desecho procedente de Arcilla cocida y Material
 Selecto para la Utilizacion de Sub-base en Carreteras"
 Ubicación: USAC
 Fecha: 28 de noviembre del 2012



Muestra No.: 1
 Descripción del suelo: Arena limosa con partículas de grava color rojizo
 Densidad seca máxima γ_d : 1,462 Kg/m³ 91.25 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 20.5 %

Atentamente,

Vo. Bo.:

[Signature]
 Inga. Dilma Yarel Mejicanos Jol
 DIRECTORA a.r. CI/USAC
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

[Signature]
 Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
 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://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.

Anexo 4



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



INFORME No. 448 S. S. O.T.: 30,692

Interesado: Oscar Andres Garcia Valdes
Proyecto: Tesis "Comparacion del Material de desecho procedente de Arcilla cocida y Material Selecto para la Utilizacion de Sub-base en Carreteras"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG
Norma: AASHTO T-89 Y T-90
Ubicación: USAC

FECHA: 28 de noviembre del 2012

RESULTADOS:

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	C.S.U.*	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	0	0	SP-SM	Arena limosa con particulas de grava color rojizo

(*) C. S. U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.


Inga. Dirlia Yañet Mejicanos, Col
DIRECTORA a.i. CIU/USAC


Ing. Omar Enrique Méndez 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://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.

Anexo 5

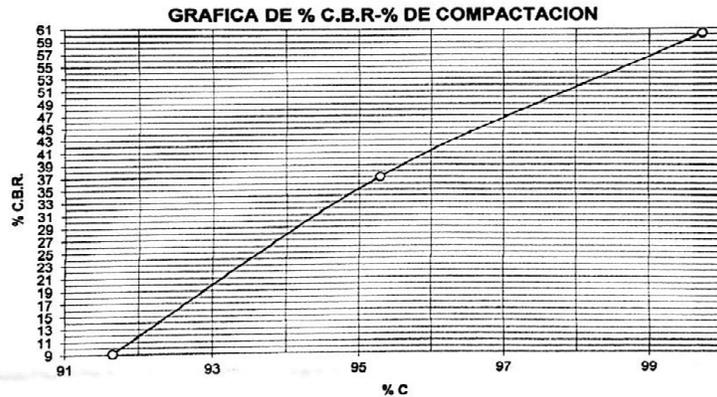


CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No.: 0452 S.S. O.T. No.: 30,692
 Interesado: Oscar Andres Garcia Valdes
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O.T-193
 Proyecto: Tesis "Comparacion del Material de desecho procedente de Arcilla cocida y Material Selecto para la Utilizacion de Sub-base en Carreteras"
 Ubicación: USAC
 Muestra No.: 1
 Fecha: 28 de noviembre del 2012

PROBETA No.	GOLPES No.	A LA COMPACTACION		C (%)	EXPANSION (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	γ_d b/ple ³			
1	10	21.50	85.1	91.6	0.00	9.1
2	30	21.50	88.5	95.3	0.00	37.1
3	65	21.50	92.6	99.7	0.00	60.3



Descripción del suelo: Arena limosa con partículas de grava color rojizo
 Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Dilma Yanet Mercepanos Jol
DIRECTORA EJECUTIVA USAC

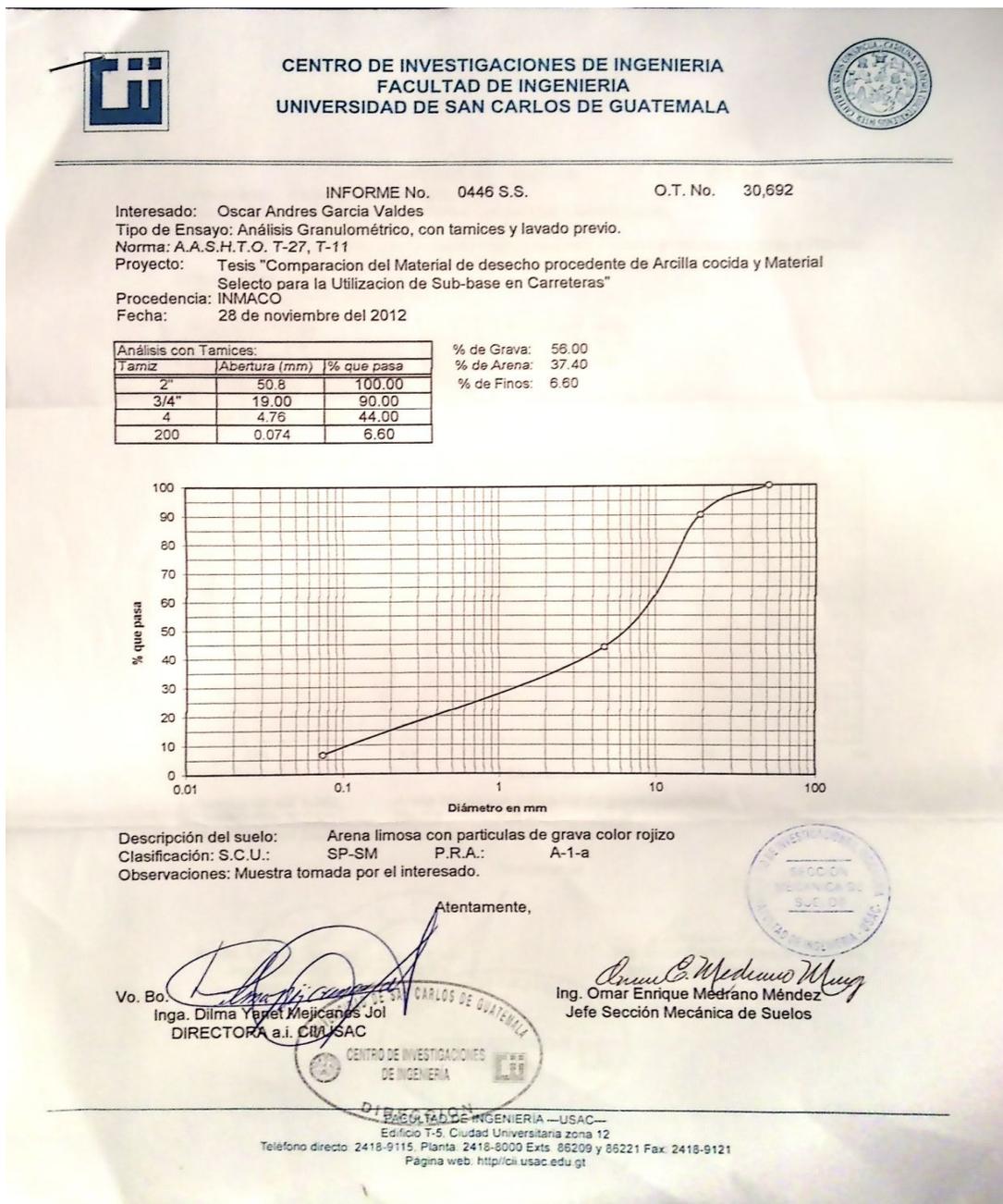
Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA—USAC—

Edificio J-5 CIG-IG-10 Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2418-9112 Planta 2418-8000 Exts 86209 y 86221 Fax 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.

Anexo 6



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.

Anexo 7



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



Informe No: 450 S. S. O.T. No.: 30,692

INTERESADO: Oscar Andres Garcia Valdes
PROYECTO: Tesis "Comparacion del Material de desecho procedente de Arcilla cocida y Material Selecto para la Utilizacion de Sub-base en Carreteras"
ASUNTO: ENSAYO DE PERMEABILIDAD
NORMA: AASHTO T125-66
FECHA: 28 de noviembre del 2012

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Arena limosa con partículas de grava color rojizo
(Granulometría Media)

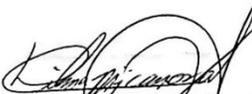
RESULTADO DEL ENSAYO:

Coefficiente de Permeabilidad= 1.6643×10^{-4} cm/s

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.


Inga Dilma Farfán Mejicanos Jc
DIRECTORA a.i. CI/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://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.

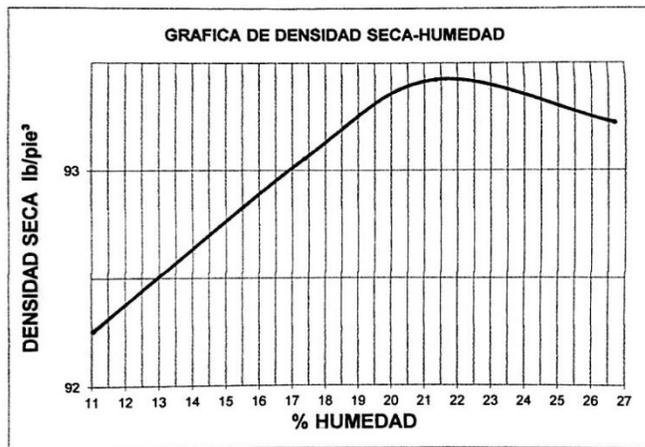
Anexo 8



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



INFORME No. 451 S.S. O.T. No.: 30,692
 Interesado: Oscar Andres Garcia Valdes
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Estándar: () Norma:
 Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180
 Proyecto: Tesis "Comparacion del Material de desecho procedente de Arcilla cocida y Material
 Selecto para la Utilizacion de Sub-base en Carreteras"
 Ubicación: USAC
 Fecha: 28 de noviembre del 2012



Muestra No.: 1
 Descripción del suelo: Arena limosa con partículas de grava color rojizo
 Densidad seca máxima γ_d : 1,488 Kg/m³ 92.9 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 21.5 %
 Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Dilma Yarey Mejicanos Jol
 DIRECTORA del CI/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.

Anexo 9



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



O.T. No. 30696

QUIND-LAFIQ No. Informe Lab. 51-12

Interesado: Oscar Andrés García Valdez
Muestra: 1 Muestra de Arcilla Cocida
Fecha: 15 de noviembre del 2012

Composición química de Óxidos metálicos en minerales por Fluorescencia de Rayos X.

Determinación	Porcentaje (%)
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	8.34 ± 0.42
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	23.54 ± 0.99
Óxido de Calcio (CaO)	1.89 ± 0.11
Óxido de Magnesio (MgO)	0.48 ± 0.035
Oxido de Silicio (SiO_2)	58.38 ± 2.52
Oxido de Potasio (K_2O)	1.045 ± 0.049
Oxido de Sodio (Na_2O)	1.45 ± 0.099
Trióxido de azufre (SO_3)	0.01 ± 0.001
Pérdida por Ignición	1.80 ± 0.03

* Muestra proporcionada por el interesado

MSc. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
Coordinadora LAFIQ/CI



Ing. César Alfonso García Guerra
Jefe de 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 E.N.C. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.

Anexo 10

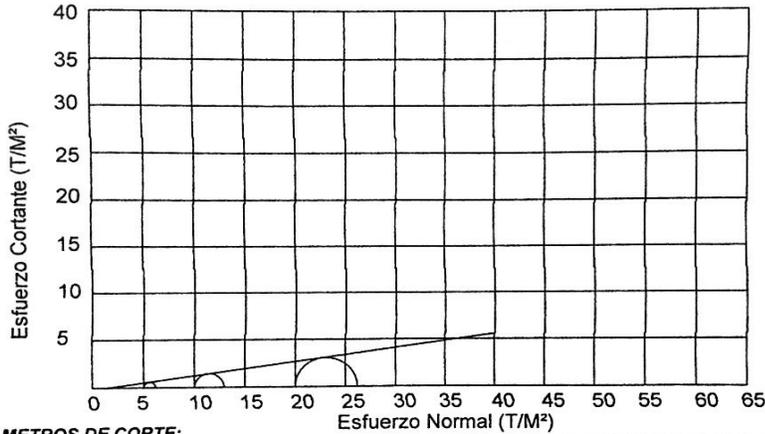


CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR

INFORME No.: 190 S.S. O.T.: 30,693
 INTERESADO: Oscar Andres Garcia Valdes
 PROYECTO: Tesis "Comparacion del Material de desecho procedente de Arcilla cocida y Material Selecto para la Utilizacion de Sub-base en Carreteras"
 Ubicación: USAC
 Fecha: 04 de marzo del 2013
 pozo: 0 Profundidad: 0 Muestra: 1



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 8.18^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 0 \text{ ton/m}^2$
--------------------------------------------------	-------------------------------------

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.
 DESCRIPCION DEL SUELO: Arena limosa con particulas de grava color rojizo
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"
 OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	1	1
PRESION LATERAL (T/m ²)	5	10	20
DESVIADOR EN ROTURA q (T/m ²)	68.50	79.95	98.38
PRESION INTERSTICIAL u (T/m ²)	x	x	x
DEFORMACION EN ROTURA E_r (%)	2.0	3.5	6.0
DENSIDAD SECA (T/m ³)	1.48	1.48	1.48
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.90	1.90	1.90
HUMEDAD (%H)	36.3	36.3	36.3

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Mora
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>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Sección de Mecánica de Suelos.