



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

**PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE ORIGEN VOLCÁNICO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ; A TRAVÉS DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES**

**Daisy Lorena Nájera Lima**

Asesorado por el Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE ORIGEN VOLCÁNICO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ; A TRAVÉS DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**DAISY LORENA NÁJERA LIMA**

ASESORADO POR EL ING. DARÍO FRANCISCO LUCAS MAZARIEGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Milton Lenin Hernández González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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:

**PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE ORIGEN VOLCÁNICO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ; A TRAVÉS DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 8 de noviembre de 2016.



**Daisy Loreña Nájera Lima**

Guatemala, 10 de agosto de 2018.

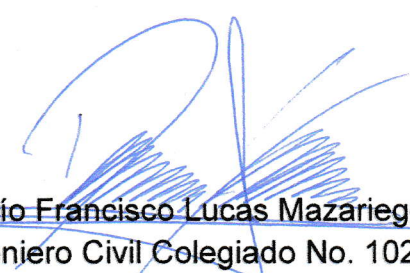
Ingeniero  
José Gabriel Ordóñez Morales  
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Guatemala

Ingeniero Ordóñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE ORIGEN VOLCÁNICO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ; A TRAVÉS DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES" elaborado por la estudiante Daisy Lorena Nájera Lima, con carné 201114711, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo trabajado y de las conclusiones del mismo.

Atentamente,



~~Dario Francisco Lucas Mazariegos~~  
Ingeniero Civil Colegiado No. 10266

**Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos**  
Colegiado 10,266



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
 21 de septiembre de 2018

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

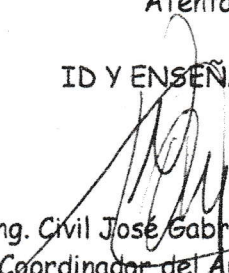
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE ORIGEN VOLCÁNICO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ; A TRAVÉS DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Daisy Lorena Nájera Lima quien contó con la asesoría del Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos.

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 José Gabriel Ordóñez Morales  
 Coordinador del Área de Materiales y  
 Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
 AREA DE MATERIALES Y  
 CONSTRUCCIONES CIVILES  
**USAC**

/mrrm.



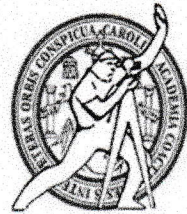
*Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua*




**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación de la estudiante Daisy Lorena Nájera Lima PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE ORIGEN VOLCÁNICO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ; A TRAVÉS DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2018

/mmm.



*Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua*

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

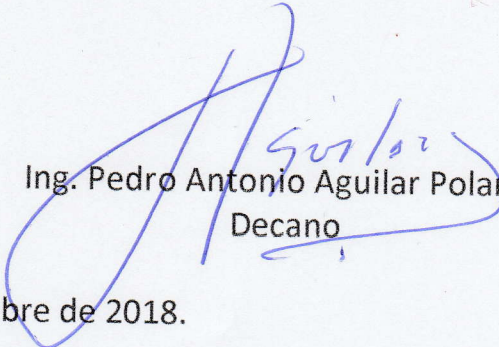


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 516.2018

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: **“PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE ORIGEN VOLCÁNICO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ; A TRAVÉS DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES”** presentado por la estudiante universitaria: **Daisy Lorena Nájera Lima** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala noviembre de 2018.

/echm





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por darme la vida, por su gran amor hacia mí y por brindarme la capacidad de alcanzar mis metas y mis sueños.
- Mis padres** Álvaro Nájera y Lorena Lima de Nájera, por impulsarme a alcanzar mis ideales, por su apoyo, su amor y porque sus enseñanzas me acompañarán toda la vida.
- Mis hermanos** Bryan Nájera y Steven Nájera, por ser mi apoyo y por estar conmigo en los buenos y malos momentos.
- Mis abuelos** Salvador Lima, Marta Cruz de Lima, Ricardo Nájera (q.e.p.d.) y Adela Cruz de Nájera (q.e.p.d.), por su especial cariño.
- Mi novio** Leonel Berduo, por creer en mí y por estar conmigo incondicionalmente.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por estar conmigo en todo momento.
<b>Mi familia</b>	Por todo su apoyo, cariño y comprensión.
<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la casa de estudios que me brindó las herramientas y conocimientos necesarios para convertirme en una profesional.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Por hacer que los años en la universidad fueran agradables e inolvidables.
<b>Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos</b>	Por su asesoría para realizar este trabajo de graduación.
<b>Ing. José Juan Istupe Ibáñez</b>	Por su valiosa ayuda, asesoría y apoyo brindado.
<b>Ing. José Guillermo Castaneda Calacan</b>	Por su colaboración y facilitación en la obtención de materiales para realizar ensayos.
<b>Ing. Ludwing Benjamin López Manrique</b>	Por los conocimientos compartidos y por su apoyo en la realización de ensayos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR .....	3
2.1. Historia .....	3
2.2. Localización e identificación .....	4
2.3. Condiciones ambientales.....	5
2.3.1. Clima .....	6
2.3.2. Temperatura .....	6
2.3.3. Precipitación y humedad relativa .....	6
2.4. Geología.....	6
2.5. Instalaciones subterráneas existentes.....	7
3. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO ACTUAL .....	9
3.1. Funciones que cumple el pavimento .....	9
3.1.1. Drenaje pluvial .....	9
3.1.2. Circulación vehicular.....	9
3.1.3. Camino peatonal.....	9
3.2. Elementos que componen la estructura del pavimento .....	10

3.2.1.	Subrasante .....	10
3.2.2.	Carpeta de rodadura .....	10
3.3.	Geometría de las calles.....	14
3.4.	Fallas que presentan las calles .....	15
3.5.	Mantenimiento.....	17
3.6.	Metodología para evaluar el pavimento existente .....	20
3.6.1.	Compactación Proctor .....	21
3.6.2.	Razón soporte California CBR .....	22
3.6.3.	Límites de Atterberg .....	22
3.6.4.	Granulometría .....	23
3.7.	Metodología para elaborar y evaluar propuesta de pavimento.....	24
3.7.1.	Determinación de pH.....	25
3.7.2.	Compresión no confinada.....	26
3.7.3.	Permeabilidad .....	26
3.7.4.	Deflexión de pavimento con carga estática .....	27
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	29
4.1.	Ensayos para evaluar el pavimento existente .....	29
4.1.1.	Compactación Proctor modificado.....	29
4.1.2.	Razón soporte California CBR .....	41
4.1.3.	Límites de Atterberg .....	60
4.1.4.	Granulometría .....	65
4.2.	Ensayos para elaborar propuesta de pavimento .....	80
4.2.1.	Determinación de pH (ensayo de Eades y Grim) ....	80
4.2.2.	Compactación Proctor estándar .....	86
4.2.3.	Razón soporte California CBR .....	95
4.2.4.	Compresión no confinada.....	111
4.2.5.	Permeabilidad .....	122

4.2.6.	Conformación de tramos de pavimento de prueba .....	132
4.2.7.	Densidad de campo.....	135
4.2.8.	Deflexión de pavimento con carga estática .....	142
5.	PROPUESTA DE DISEÑO DE PAVIMENTO.....	153
5.1.	Propuesta 1 .....	153
5.1.1.	Subrasante .....	153
5.1.2.	Carpeta de rodadura.....	157
5.1.3.	Tráfico permitido .....	161
5.2.	Propuesta 2 .....	161
5.2.1.	Subrasante .....	161
5.2.2.	Sub-base .....	163
5.2.3.	Base .....	164
5.2.4.	Carpeta de rodadura.....	165
5.2.5.	Tráfico permitido .....	167
	CONCLUSIONES .....	169
	RECOMENDACIONES.....	173
	BIBLIOGRAFÍA.....	175
	ANEXOS.....	177



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Tabujía .....	8
2.	Calle con cinta colocada en ambos sentidos .....	11
3.	Calle con cinta colocada en sentido longitudinal.....	12
4.	Dimensiones de las rocas utilizadas como cinta .....	12
5.	Dimensiones de las rocas utilizadas para cajones, vista en elevación.....	13
6.	Mapa de calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez.....	14
7.	Desprendimiento de rocas .....	15
8.	Falla por hundimiento.....	16
9.	Falla por abultamiento.....	16
10.	Inundación de calle .....	17
11.	Compactación manual de la subrasante .....	18
12.	Ensayo de densidad de campo .....	18
13.	Colocación de rocas cinta .....	19
14.	Colocación de rocas cajón .....	19
15.	Tramo con estuque recién colocado .....	20
16.	Peso del material para primer punto de humedad .....	30
17.	Muestra compactada previo a tomar su peso .....	31
18.	Gráfica densidad seca – humedad de muestra 1 .....	37
19.	Gráfica densidad seca – humedad de muestra 2.....	38
20.	Gráfica densidad seca – humedad de muestra 3.....	39
21.	Preparación del material y equipo a utilizar.....	43
22.	Medición de deformación de probetas .....	44

23.	Colocación de probeta en prensa de ensayo con capacidad de 1 000 lb .....	45
24.	Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra 1 .....	55
25.	Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra 2 .....	56
26.	Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra 3 .....	57
27.	Carta de plasticidad .....	62
28.	Serie de tamices con porciones de suelo retenido .....	66
29.	Obtención de pesos acumulados .....	67
30.	Curva de distribución granulométrica de muestra 1 .....	71
31.	Curva de distribución granulométrica de muestra 2 .....	73
32.	Curva de distribución granulométrica de muestra 3 .....	75
33.	Identificación de muestras de suelo modificado con cal .....	81
34.	Determinación de pH de muestra de suelo sin cal .....	82
35.	Determinación de pH de muestra de suelo con 1 % de cal .....	83
36.	Determinación de pH de muestra de suelo con 2 % de cal .....	83
37.	Determinación de pH de muestra de suelo con 3 % de cal .....	84
38.	Determinación de pH de muestra de suelo con 4 % de cal .....	84
39.	Gráfica densidad seca – humedad de muestra de suelo sin cal .....	91
40.	Gráfica densidad seca – humedad de muestra de suelo +1 % de cal ..	92
41.	Gráfica densidad seca – humedad de muestra de suelo +3 % de cal ..	93
42.	Muestra tratada con 1 % de cal, previo a mezclarse .....	96
43.	Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de suelo sin cal .....	106
44.	Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra de suelo + 1 % de cal .....	107



45.	Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra de suelo + 3 % de cal .....	108
46.	Probeta en el molde de compactación .....	113
47.	Extracción de probeta de suelo, del molde de compactación .....	113
48.	Toma de peso de probeta .....	114
49.	Medición de dimensiones de las probetas .....	114
50.	Colocación de la muestra en el dispositivo de carga .....	115
51.	Falla de probeta posterior a ser sometida al ensayo de compresión .	116
52.	Permeámetro de compactación previo a ser armado.....	124
53.	Permeámetro de compactación armado .....	125
54.	Detalle del montaje para el método de cabeza constante.....	126
55.	Proceso de excavación en área donde se construirán los tramos de empedrado .....	133
56.	Ensayo densidad de campo .....	136
57.	Peso de picnómetro 3 .....	137
58.	Esquema y principio de operación de la viga Benkelman .....	144
59.	Colocación de la punta de prueba en el punto de medida .....	145
60.	Alineamiento de la punta de prueba con el eje de carga.....	146
61.	Carga ejercida sobre el punto de medida.....	147
62.	Compactación de capas de material que conforma la subrasante del pavimento.....	156
63.	Configuración de las rocas en la carpeta de rodadura, vista en planta .....	158
64.	Colocación de rocas.....	160
65.	Colocación de mortero de enlace entre las rocas .....	160
66.	Propuesta 1 de estructura del pavimento.....	161
67.	Sección transversal de propuesta 2 .....	167

## TABLAS

I.	Ubicación de la toma de muestras de suelo .....	29
II.	Parámetros de ensayo Proctor modificado .....	33
III.	Datos obtenidos del ensayo Proctor modificado para muestra 1 .....	34
IV.	Resumen de cálculos de porcentajes de humedad promedio y densidad unitaria seca de muestra 1 .....	36
V.	Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado muestra 1 .....	37
VI.	Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado muestra 2 .....	38
VII.	Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado muestra 3 .....	39
VIII.	Resultados del ensayo Proctor modificado .....	40
IX.	Humedad actual de muestra 1 .....	46
X.	Humedad de ensayo de muestra 1 .....	46
XI.	Peso unitario seco de especímenes compactados de muestra 1 .....	47
XII.	Lecturas diales de expansión de especímenes compactados de muestra 1 .....	47
XIII.	Penetración y lecturas de anillo de especímenes compactados de muestra 1 .....	48
XIV.	Humedad óptima y peso unitario seco máxima de muestra 1 .....	49
XV.	Porcentajes de compactación de especímenes compactados de muestra 1 .....	49
XVI.	Porcentajes de expansión de especímenes compactados de muestra 1 .....	50
XVII.	Datos de carga – penetración de los especímenes compactados de muestra 1 .....	51
XVIII.	Valores de carga unitaria .....	52
XIX.	Porcentajes de CBR para especímenes de muestra 1 .....	53
XX.	Porcentajes de CBR y de compactación para cada muestra .....	54
XXI.	Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra 1 .....	58

XXII.	Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra 2 .....	58
XXIII.	Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra 3 .....	58
XXIV.	Porcentajes de CBR al 95 % de compactación.....	59
XXV.	Criterios para describir la plasticidad.....	61
XXVI.	Clasificación de los suelos según su índice plástico (IP) .....	61
XXVII.	Sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS.....	63
XXVIII.	Límites de Atterberg y clasificación del suelo.....	64
XXIX.	Datos obtenidos del ensayo de granulometría para muestra 1 .....	68
XXX.	Porcentajes de muestra 1 que pasan por cada tamiz .....	70
XXXI.	Porcentajes de muestra 2 que pasan por cada tamiz .....	72
XXXII.	Porcentajes de muestra 3 que pasan por cada tamiz .....	74
XXXIII.	Sistema de clasificación AASHTO .....	77
XXXIV.	Análisis granulométrico por tamizado de muestra 1 .....	78
XXXV.	Análisis granulométrico por tamizado de muestra 2.....	78
XXXVI.	Análisis granulométrico por tamizado de muestra 3.....	79
XXXVII.	Porcentajes de materiales contenidos en las muestras .....	79
XXXVIII.	Clasificación del suelo.....	79
XXXIX.	Niveles de pH de muestras de suelo.....	85
XL.	Datos obtenidos del ensayo Proctor estándar para muestra de suelo sin cal .....	88
XLI.	Resumen de cálculos de porcentajes de humedad promedio y densidad unitaria seca de muestra de suelo sin cal.....	90
XLII.	Resumen de resultados de ensayo Proctor estándar muestra de suelo sin cal .....	91
XLIII.	Resumen de resultados de ensayo Proctor estándar de muestra de suelo + 1 % de cal.....	92
XLIV.	Resumen de resultados de ensayo Proctor estándar de muestra de suelo + 3 % de cal.....	93
XLV.	Resultados del ensayo Proctor estándar.....	94

XLVI.	Humedad actual de muestra de suelo sin cal .....	98
XLVII.	Humedad de ensayo de muestra de suelo sin cal .....	98
XLVIII.	Peso unitario seco de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal .....	99
XLIX.	Lecturas diales de expansión de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal .....	99
L.	Penetración y lecturas de anillo de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal .....	100
LI.	Humedad óptima y peso unitario seco máxima de muestra de suelo sin cal .....	101
LII.	Porcentajes de compactación de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal .....	101
LIII.	Porcentajes de expansión de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal .....	102
LIV.	Datos de carga – penetración de los especímenes compactados de muestra de suelo sin cal .....	103
LV.	Porcentajes de CBR para especímenes de muestra de suelo sin cal.	104
LVI.	Porcentajes de CBR y de compactación para cada muestra.....	105
LVII.	Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra de suelo sin cal .....	109
LVIII.	Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra de suelo + 1 % de cal .....	109
LIX.	Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra de suelo + 3 % de cal .....	110
LX.	Porcentajes de CBR al 95 % de compactación .....	110
LXI.	Datos de probetas para ensayo de compresión no confinada .....	117
LXII.	Factores de corrección por esbeltez .....	119
LXIII.	Datos obtenidos de ensayo de compresión no confinada.....	120
LXIV.	Resistencia a compresión de muestras de suelo.....	121

LXV.	Datos del ensayo para determinar el coeficiente de permeabilidad de muestra de suelo sin cal.....	128
LXVI.	Valores promedio del coeficiente de permeabilidad.....	130
LXVII.	Coeficientes de permeabilidad.....	131
LXVIII.	Características de tramos de pavimento a ensayar.....	134
LXIX.	Datos tomados en ensayo de densidad de campo.....	138
LXX.	Pesos unitarios secos en campo y en laboratorio.....	141
LXXI.	Pesos unitarios y porcentajes de compactación.....	142
LXXII.	Datos obtenidos de ensayo de deflexión con carga estática.....	148
LXXIII.	Cálculo de deflexiones de tramos pavimento.....	150
LXXIV.	Deflexiones de tramos de pavimento.....	151



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico
<b><i>k</i></b>	Coeficiente de permeabilidad
<b><math>\gamma_d</math></b>	Densidad seca máxima
<b>°C</b>	Grado centígrado
<b>g</b>	Gramo
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gramo sobre centímetro cúbico
<b>in</b>	Pulgada
<b>in<sup>3</sup></b>	Pulgada cúbica
<b>in/min</b>	Pulgada por minuto
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramo sobre metro cúbico
<b>km</b>	Kilómetro
<b>km/h</b>	Kilómetro por hora
<b>kPa</b>	Kilopascal
<b>lb</b>	Libra
<b>lb/pie<sup>3</sup></b>	Libra sobre pie cúbico
<b>lb/in<sup>2</sup></b>	Libra sobre pulgada cuadrada
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>min</b>	Minuto

<b>ml</b>	Mililitro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>N</b>	Newton
<b>Pa</b>	Pascal
<b><math>\pi</math></b>	Pi, constante equivalente a 3,1416
<b>pie<sup>2</sup></b>	Pie cuadrado
<b>pie<sup>3</sup></b>	Pie cúbico
<b>%</b>	Porcentaje
<b>%C</b>	Porcentaje de compactación
<b>%E</b>	Porcentaje de expansión
<b>%H</b>	Porcentaje de humedad
<b>pH</b>	Potencial de hidrogeno
<b><math>\sigma_c</math></b>	Resistencia a la compresión
<b>psi</b>	Libra sobre pulgada cuadrada
<b>ton</b>	Tonelada
<b>ton/pie<sup>2</sup></b>	Tonelada sobre pie cuadrado
<b><math>\Delta T</math></b>	Variación en la temperatura
<b><math>\eta</math></b>	Viscosidad



## GLOSARIO

<b>AASHTO</b>	Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials).
<b>Aglomerante</b>	Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, por efectos de tipo exclusivamente físico.
<b>Arcilla</b>	Partículas de suelo de un tamaño menor de 0,002 milímetros de diámetro. Constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, que procede de la descomposición de minerales de aluminio.
<b>Arena</b>	Partículas de suelo de diámetro entre 0,05 y 2,00 milímetros.
<b>Asentamiento</b>	Deformación vertical en la superficie de un terreno proveniente de la aplicación de cargas o debido al peso propio de las capas.
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials).

<b>Base</b>	Capa de agregados pétreos compactados, bien graduados y provenientes de un proceso de producción mecanizada de trituración y selección.
<b>Bombeo</b>	Pendiente transversal en las entretangencias horizontales de la vía, que tiene por objeto facilitar el escurrimiento superficial del agua.
<b>Cal</b>	Sustancia alcalina constituida por óxido de calcio, de color blanco o blanco grisáceo, con diversos usos en la construcción. Se denomina cal viva cuando su proceso de producción acaba en la calcinación de sus componentes, e hidratada cuando se aplica agua posterior a la calcinación.
<b>Calicata</b>	Excavación de profundidad pequeña a media realizada para estudiar en forma detallada el perfil de un suelo o de una formación superficial.
<b>Carga estática</b>	Peso que soporta una estructura, y que se encuentra en reposo.
<b>Carga uniaxial</b>	Fuerza que se le aplica a una probeta en una dirección coincidente con su eje, manteniendo el resto de cargas nulas.
<b>Carpeta de rodadura</b>	Última capa que se aplica en la estructura de un pavimento, por donde circula el tráfico.

<b>CBR</b>	Relación de soporte de California (California Bearing Ratio).
<b>Cohesión</b>	Atracción entre las partículas del suelo, originada por las fuerzas moleculares y la tensión capilar de las películas de agua.
<b>Compactar</b>	Comprimir el suelo por métodos mecánicos, haciéndolo más denso.
<b>Compresión no confinada</b>	Ensayo en el que se determina la resistencia a la compresión, donde el testigo es sometido únicamente a cargas axiales, sin soportes laterales.
<b>Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala</b>	Entidad descentralizada, encargada del cuidado, protección, restauración y conservación de los bienes muebles e inmuebles nacionales, municipales o de particulares, situados en La Antigua Guatemala y sus áreas circundantes.
<b>Curado</b>	Tratamiento que se da al suelo modificado con cal después de su colocación a fin de mantener húmeda su superficie, lo cual suaviza la retracción del material y evita su agrietamiento por desecación brusca.
<b>Deflexión</b>	Deformación que sufre un elemento por el efecto de las flexiones internas inducidas por la aplicación de una carga.

<b>Densidad</b>	Relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.
<b>Escarificar</b>	Consiste, en la disgregación de la superficie del terreno y su posterior compactación a efectos de homogeneizar la superficie de apoyo.
<b>Fragoso</b>	Terreno que posee pendientes muy pronunciadas.
<b>Granulometría</b>	Es la distribución de los tamaños de las partículas del suelo.
<b>Grava</b>	Conjunto de piedras pequeñas que proceden de la fragmentación y disgregación de rocas. El diámetro de sus partículas está comprendido entre 2 y 64 milímetros.
<b>Limo</b>	Tipo de material muy fino que ha sido llevado a un lugar a través de los ríos o arrastrado por el viento o la lluvia. El diámetro de sus partículas varía de 0,0039 a 0,0625 milímetros.
<b>Mortero</b>	Mezcla plástica aglomerante, que resulta de la combinación de arena y agua con un material cementante.
<b>NTG</b>	Norma técnica guatemalteca.

<b>Pavimento</b>	Estructura de las vías de comunicación terrestre, formada por una o más capas de materiales colocados sobre el terreno acondicionado, que tiene como función el permitir el tránsito de vehículos.
<b>Permeabilidad</b>	Capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.
<b>Plasticidad</b>	Propiedad mecánica, de algunos tipos de suelo capaces de sufrir una deformación irreversible y permanente cuando son sometidos a una tensión, sin sufrir fisuras.
<b>Probeta</b>	Muestra de cualquier sustancia o material para probar sus características físicas o propiedades mecánicas.
<b>Pulverizar</b>	Reducir a partículas muy pequeñas un cuerpo sólido.
<b>SUCS</b>	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
<b>Sub-base</b>	Capa de la estructura del pavimento, destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas de tránsito proveniente de las capas superiores del pavimento, de manera que el suelo de la subrasante las pueda soportar.

<b>Subrasante</b>	Superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte o relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.
<b>Tabujía</b>	Colector de ladrillo tayuyo protegido con un recubrimiento de mortero, empleado desde el siglo XVII.
<b>UNESCO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization).
<b>Vehículos tipo C-2</b>	Es un camión o autobús, consistente en un automotor con eje simple (eje direccional) y un eje de rueda doble (eje de tracción).
<b>Vehículos tipo C-3</b>	Es un camión o autobús, consistente en un automotor con eje simple (eje direccional) y un eje de doble o tándem (eje de tracción).

## RESUMEN

Las calles de Antigua Guatemala sufren deterioros con mucha frecuencia, dificultando la circulación vehicular y el correcto drenaje del agua pluvial, por lo que se considera necesario proponer un pavimento flexible empedrado, mediante el mejoramiento de las componentes del diseño actual, cuyo desempeño y tiempo de vida útil sean mayores.

Uno de los factores principales en el desempeño de un pavimento empedrado es la calidad del suelo que lo soporta, ya que a este se transmiten las cargas vehiculares. Se realizan ensayos para caracterizar la estructura del pavimento actual, identificando y clasificando el tipo de suelo de la subrasante. Al ser necesario mejorar la calidad del suelo, se propone adicionarle cal para aumentar su resistencia. De igual forma se plantea emplear nuevas técnicas en la colocación de las rocas para mejorar la manera en la que las cargas son transmitidas al suelo. Se evalúa el nuevo diseño de pavimento y con base en sus resultados se realizan las propuestas.

Los cambios planteados sugieren que la aplicación del diseño propuesto mejoraría considerablemente el desempeño y tiempo de vida útil de las calles de la ciudad, tomando en cuenta también las correctas prácticas en su construcción.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Proponer un pavimento flexible de rocas de origen volcánico para las calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a través del mejoramiento de sus componentes.

### **Específicos**

1. Evaluar las propiedades de los componentes de la carpeta de rodadura del pavimento existente.
2. Evaluar el tipo de suelo que conforma la subrasante del pavimento.
3. Diseñar un pavimento que resuelva las deficiencias que presenta el diseño actual.
4. Proponer un pavimento flexible empedrado, basado en parámetros de diseño actuales.



## INTRODUCCIÓN

Antigua Guatemala es una ciudad colonial que conserva estilos arquitectónicos del pasado, uno de sus principales atractivos son sus calles empedradas, por lo que cobra importancia el diseño del pavimento que las forma, así como la calidad de sus componentes, para aumentar su vida útil y su óptimo funcionamiento.

El trabajo de investigación consiste en proponer un pavimento flexible empedrado, para emplear en las calles de Antigua Guatemala, cuyas componentes cumplan con las normas ASTM correspondientes a cada tipo de material o elemento constructivo, además su diseño estará basado en parámetros de diseño actuales.

El estudio requiere de la ejecución de calicatas para explorar los estratos de suelo que conforman el pavimento, obteniendo muestras representativas para ser ensayadas en laboratorio, siguiendo las especificaciones y métodos de ensayo de las normas AASHTO, cumpliendo con la división 300 bases y sub-bases, de las especificaciones generales, para la construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos. Con los resultados obtenidos en los ensayos se identificarán deficiencias y se realizará una propuesta en la que se mejoren las propiedades de todos sus componentes, para obtener así, calles de buena calidad y aumentar su tiempo de vida útil.



## 1. ANTECEDENTES

Antigua Guatemala es una ciudad que hasta el día de hoy conserva características coloniales, tales como la arquitectura de sus edificaciones y el diseño del pavimento que conforma sus calles. Con el paso del tiempo y con el apareamiento de los automotores, conjuntamente con el crecimiento poblacional del lugar, el empedrado como carpeta de rodadura ya no respondió a esta necesidad, hablando de la calidad estructural que requieren estos servicios, propios de la época moderna.

Debido a las condiciones predominantes del lugar, y a que la ciudad fue declarada "*patrimonio cultural de la humanidad*" es necesario el diseño de un nuevo pavimento de empedrado, esto para conservar las características originales del lugar y que el mismo sea capaz de soportar el tránsito previsto. En Guatemala no se ha establecido una normativa o manual que rijan la construcción de este tipo de pavimentos, su empleo se realiza de manera empírica.

En 2004, en Quito, Ecuador, la Organización Internacional del Trabajo creó el "Manual andino para la construcción y mantenimiento de empedrados", dado el deterioro que sufrían las capas de rodadura por prácticas inadecuadas tanto en su colocación como en su mantenimiento. Se realizaron estudios sobre cada elemento que constituye un pavimento flexible de este tipo, concluyendo que los suelos que prestan mejores condiciones, para la ejecución de empedrados son los limos, limos arcillosos o arcillas de baja compresibilidad, clasificaciones que corresponden a las rocas de origen volcánico. Estos suelos

deben poseer características adecuadas de soporte, medidas con indicadores de resistencia del suelo como el CBR (California Bearing Ratio).

La experiencia adquirida con empedrados existentes, demuestra que las ondulaciones que presentan con determinado tiempo de uso, no disminuyen perceptiblemente el nivel de servicio original luego de 30 o 40 años de servicio del camino. Existen varios factores que inciden en la duración del empedrado, estos factores principalmente son: la calidad del suelo de soporte o cimentación del empedrado, la calidad de la roca, la buena elaboración del empedrado, la eficiencia del drenaje superficial, la cantidad y distribución del tráfico y un régimen adecuado de mantenimiento.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR**

### **2.1. Historia**

La ciudad de Santiago de los Caballeros de Guatemala, cuyo nombre oficial e histórico es Muy Noble y Muy Leal Ciudad de Santiago de los Caballeros de Guatemala y popularmente nombrada en la actualidad como Antigua Guatemala, es cabecera del departamento de Sacatepéquez, Guatemala.

Durante la época de la colonia era conocida como “Santiago de los Caballeros de Guatemala”, y fue la capital de la Capitanía General de Guatemala, entre 1541 y 1776, año en que la capital fue trasladada a la ciudad de Nueva Guatemala de la Asunción luego que los terremotos de Santa Marta arruinaran la ciudad por tercera ocasión en el mismo siglo y las autoridades civiles utilizaran eso como excusa para debilitar a las autoridades eclesiásticas, siguiendo las recomendaciones de las Reformas Borbónicas emprendidas por la corona española en la segunda mitad del siglo XVIII, obligando a las órdenes regulares a trasladarse de sus majestuosos conventos a frágiles estructuras temporales en la nueva ciudad.

Fue designada como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1979. En el siglo XXI es un importante destino turístico guatemalteco por su bien preservada arquitectura barroca española con fachadas barrocas del Nuevo Mundo, así como un gran número de ruinas de iglesias católicas, incluso aún después de que sus estructuras fueran severamente dañadas por el abandono en que estuvieron entre 1776 y 1940 y por los terremotos de 1874,

de 1917 y de 1976. También es reconocida por las solemnes procesiones de Semana Santa que se han realizado anualmente desde antes del traslado de la capital a la Nueva Guatemala.

Las calles de Antigua Guatemala eran y siguen siendo los espacios para la ordenación de las casas y para trasladarse de un lugar a otro, o de una casa a otra. Pero las bien trazadas calles de Santiago de los Caballeros de Guatemala servían también como espacios públicos.

La calle es en primer lugar el teatro de las procesiones. El recorrido de la procesión del Santo Entierro, por ejemplo, salía de Santo Domingo, tomaba por la calle de la Nobleza y descendía hasta la plaza mayor, transitando por la calle de Concepción para pasar frente al atrio de la Catedral.

Algunas calles, como la de Santo Domingo, eran utilizadas como mercado. Las calles también dieron lustre y prestigio a quienes las habitaban, como el caso de la Calle de la Nobleza, también la Alameda de Santa Rosa que se convirtió en una zona aristocrática. El nombre que las calles recibían se debía a los oficios que en ellas se practicaban: herreros, plateros y otros.

## **2.2. Localización e identificación**

El departamento de Sacatepéquez tiene un área aproximada 465 kilómetros cuadrados. Colinda al norte con el departamento de Chimaltenango, al este con el departamento de Guatemala, al sur con el de Escuintla, al oeste con el de Chimaltenango. Cuenta además con 16 municipios entre los que se encuentra la Antigua Guatemala. Según la estimación del último censo, realizado en 2002, el departamento de Sacatepéquez cuenta con 248 019



habitantes, con una densidad de 533 habitantes por kilómetro cuadrado, mientras que la cantidad de habitantes de Antigua Guatemala es de 41 097.

La ciudad de Antigua Guatemala está situada en la parte suroeste de la república guatemalteca. Asentada en el Valle de Panchoy, a una altura de 1 530 metros sobre el nivel del mar. Está localizada a 14°33'30" de latitud norte y 90°43'50" longitud oeste del meridiano de Greenwich. Está limitada al norte por los municipios de Jocotenango y San Bartolomé Milpas Altas, al sur por Santa María de Jesús, al oeste por San Antonio Aguas Calientes, Ciudad Vieja y Santa Catarina Barahona y al este por Santa María de Jesús y Santa María Milpas Altas, todos municipios del departamento de Sacatepéquez.

Entre Antigua Guatemala y la capital de la República hay 45 kilómetros por la carretera Interamericana. La Antigua está bordeada al sur por los volcanes de Agua y Fuego y al oeste por el de Acatenango. Además, circundando el área se encuentran los cerros de Carmona, Manzanillo, El Portal, San Cristóbal el Alto y otros, con alturas mayores a los 2 000 metros sobre el nivel del mar.

### **2.3. Condiciones ambientales**

Las condiciones ambientales de mayor interés para el diseño del pavimento en Antigua Guatemala son el clima, la temperatura, la precipitación y la humedad relativa.

### **2.3.1. Clima**

El clima en Antigua es templado, a pesar de su posición geográfica, que hace que los rayos solares los reciba casi perpendicularmente durante todo el año. La declinación solar es de 9° al norte y 38° al sur.

### **2.3.2. Temperatura**

La temperatura media es de 18,4° centígrados, promedio de máxima 22,7° promedio de mínima 14,0°; absoluta máxima 28,5° y absoluta mínima 4.0°.

### **2.3.3. Precipitación y humedad relativa**

La precipitación total es de 952,5 milímetros, en época de lluvia, con 83 días de lluvia y humedad relativa media de 75 %. Su clima puede designarse como predominantemente templado. La diversidad orográfica del territorio determina una gran variedad climática e importantes diferencias térmicas y pluviométricas entre las distintas áreas. En términos generales, el clima es tropical con una pluviosidad muy elevada que alcanza los 4 000 mm anuales en la alta montaña. La época lluviosa es de mayo a octubre, teniendo en junio la mayor precipitación.

## **2.4. Geología**

La región está constituida por rocas sedimentarias del Cuaternario, y rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias. La actual ciudad está rodeada tanto hacia el sur como al oeste del valle por los volcanes de Agua, de Fuego y de Acatenango. Los suelos predominantes pertenecen al grupo que se ha designado clases misceláneas de terreno, lo que incluye áreas frías, los

volcanes, suelos de valles no diferenciados, un grupo en que no predomina tipo particular alguno. Dentro de la riqueza mineral cabe indicar la existencia de pedernal, cuarzo, arcilla, cristal de roca, pirita y otros minerales.

## **2.5. Instalaciones subterráneas existentes**

La distribución de servicios públicos, como red de agua potable, drenajes, instalaciones eléctricas, y otras como cableado de internet y telefonía, se encuentran ubicadas de manera subterránea.

En 1984 se inició un proyecto para mejora del paisaje urbano-arquitectónico, para ello se eliminaron los postes del tendido eléctrico y alumbrado público en las regiones central y oriental de la ciudad, se canalizó subterráneamente el cableado y diseñaron lámparas adosadas a los muros de las edificaciones. Existen pequeñas zonas de la ciudad en las que todavía existen postes de tendido eléctrico y alumbrado público, donde se planea continuar con el proyecto.

Adicional a la red de alcantarillado y red de distribución de agua potable que prestan servicio en la actualidad, se encuentran bajo las calles elementos de una red de tuberías llamadas tabujías, que cumplían con esas funciones y datan del siglo XVII; las cuales forman parte de las obras de construcción preservadas por el Consejo Nacional para la protección de La Antigua Guatemala.

Figura 1. **Tabujía**



Fuente: elaboración propia, 4.ª calle oriente, entre 2.ª y 3.ª avenida norte, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

### **3. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO ACTUAL**

#### **3.1. Funciones que cumple el pavimento**

El pavimento empedrado que conforma las calles y avenidas de Antigua Guatemala cumple con varias funciones; además de facilitar la circulación vehicular, también funciona como drenaje pluvial y como paso peatonal.

##### **3.1.1. Drenaje pluvial**

Las calles no cuentan con cunetas, por lo que se diseñaron para funcionar como canales que transporten el agua proveniente de la lluvia.

##### **3.1.2. Circulación vehicular**

Diariamente en la ciudad circulan vehículos livianos, como motocicletas o vehículos de pasajeros; y vehículos pesados tipo C2 y C3, como buses destinados al transporte público extraurbano o camiones que transportan mercancías.

##### **3.1.3. Camino peatonal**

Siendo uno de los lugares turísticos más concurridos, sus calles también son frecuentadas por cientos de personas al día.

### **3.2. Elementos que componen la estructura del pavimento**

La estructura de este tipo de pavimento se conforma únicamente por la subrasante y la carpeta de rodadura.

#### **3.2.1. Subrasante**

Es la capa natural del terreno que soporta la estructura del pavimento.

#### **3.2.2. Carpeta de rodadura**

Este elemento está compuesto por rocas de origen volcánico, enlazadas entre sí por un mortero.

##### **3.2.2.1. Rocas**

En la antigüedad se empleaban rocas de canto rodado fracturadas, sin embargo, al realizar trabajos de reparación de las calles, se ha optado por sustituirlas por rocas de origen volcánico (andesitas y basaltos), fracturadas, ya que estas poseen una densidad alta, su forma propicia el buen acople entre ellas, su textura es adecuada para brindar a la carpeta de rodadura la fricción necesaria para que los vehículos transiten con seguridad, y a la vez le brinda a las rocas buena adherencia con el mortero de enlace.

Las rocas volcánicas son provenientes del cerro El Rodeo, ubicado en el municipio Pastores, Sacatepéquez. Se seleccionan dos tipos de rocas de acuerdo a su forma y geometría.

Las primeras son utilizadas como líneas maestras o cintas, poseen formas similares a las de un paralelepípedo y son de mayor tamaño que el resto de las rocas. Sirven para confinar el empedrado por tramos, son colocadas de manera transversal y longitudinal a la calle, formando cuadros o cajones. Se ubican a una distancia de 1 a 1,5 m de distancia entre ellas. A pesar de su gran utilidad no se encuentran colocadas en todas las calles, en algunas solo se encuentran en uno de los dos sentidos.

Figura 2. **Calle con cinta colocada en ambos sentidos**



Fuente: elaboración propia, 4.ª calle oriente, entre 1.ª y 2.ª avenida norte, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

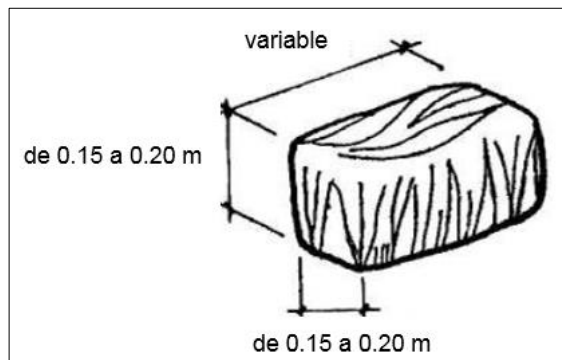
Figura 3. **Calle con cinta colocada en sentido longitudinal**



Fuente: elaboración propia, 2.<sup>a</sup> avenida norte, entre 3.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup> calle oriente, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

Las rocas utilizadas como cinta tienen dimensiones variables, que se encuentran en su mayoría comprendidas los rangos mostrados en la figura 4.

Figura 4. **Dimensiones de las rocas utilizadas como cinta**

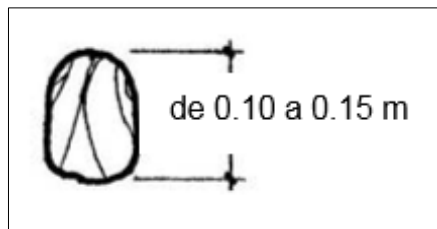


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.



El otro tipo de roca que se emplea son las rocas para los cajones, que son los cuadros que se forman con la colocación de las rocas cinta. Poseen formas irregulares, y son colocadas de manera que su cara más plana quede en la parte superior. Sus dimensiones más comunes son las que se muestran en la figura 5.

Figura 5. **Dimensiones de las rocas utilizadas para cajones, vista en elevación**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

### **3.2.2.2. Mortero**

En la carpeta de rodadura se emplean dos tipos de morteros. Se le llama estuque a un mortero compuesto por cemento portland, cal viva y arena limosa, en proporciones volumétricas 1:1/2:4, respectivamente. Es empleado como ciza para las rocas que componen el empedrado, rellenando los espacios entre ellas y adhiriéndolas entre sí.

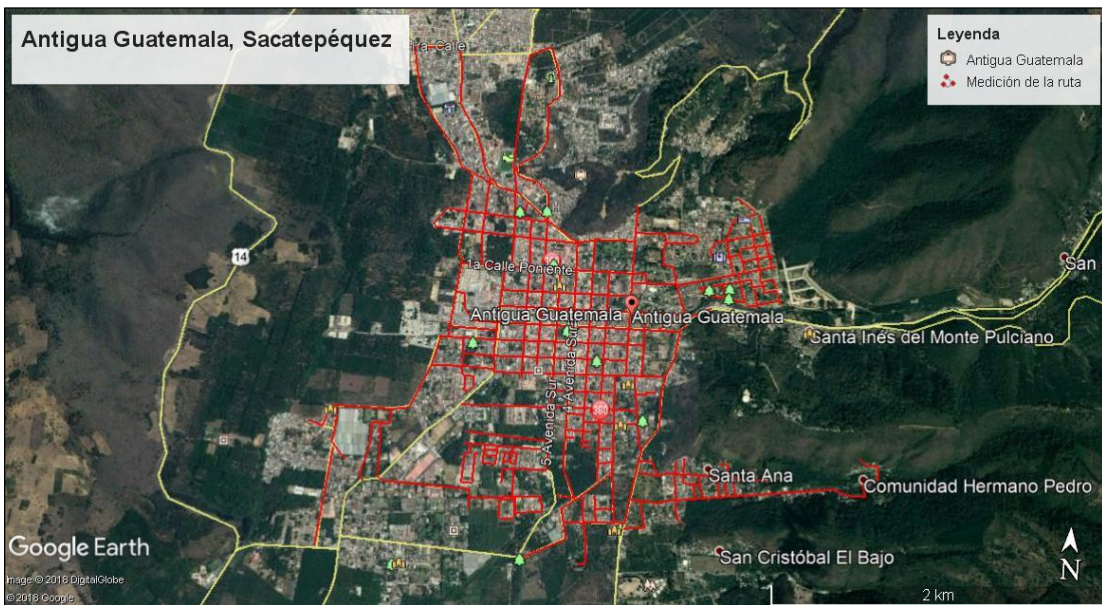
Asimismo se emplea un mortero nombrado mezclón, cuya proporción volumétrica es 1:3/2:6, compuesto también por cemento portland, cal viva y arena limosa. Se coloca sobre la subrasante, en una capa de aproximadamente 3 cm de espesor y su función es absorber las irregularidades y diferencias de tamaño de las rocas.

### 3.3. Geometría de las calles

Las calles no cuentan con cunetas, por lo que, para conducir el agua procedente de la lluvia, están diseñadas para funcionar como canales. Tienen un bombeo de 3 a 4 % hacia el eje central del trazo de las calles.

La ciudad de Antigua Guatemala cuenta con aproximadamente 66 kilómetros lineales de calles empedradas (dato obtenido de Google Earth Pro, ver mapa de calles en figura 6 y anexos).

Figura 6. Mapa de calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez



Fuente: Google Earth 2018.

### **3.4. Fallas que presentan las calles**

Los principales problemas que presentan los empedrados de las calles de Antigua Guatemala son deformaciones, desprendimiento de rocas e inundaciones. Deformaciones tales como hundimientos y abultamientos se presentan en la mayoría de las calles, sin embargo, se perciben con mayor frecuencia en las calles transitadas por los buses de transporte colectivo, como es el caso de la calle Pila del Rubio, la 1.<sup>a</sup> avenida norte y la calle de Manche. Las calles que se ha observado que son más susceptibles a sufrir inundaciones en época de lluvia son, la Calle Ancha de los Herreros, la 7.<sup>a</sup> calle poniente y la 1.<sup>a</sup> calle poniente, en donde en ocasiones queda imposibilitado el paso vehicular debido al nivel que alcanza el agua pluvial.

Figura 7. **Desprendimiento de rocas**



Fuente: elaboración propia, 1.<sup>a</sup> calle poniente, entre 6.<sup>a</sup> y 7.<sup>a</sup> avenida norte, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

Figura 8. **Falla por hundimiento**



Fuente: elaboración propia, 7.ª avenida norte, entre 1.ª y 2.ª calle poniente, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

Figura 9. **Falla por abultamiento**



Fuente: elaboración propia, Calle de Recolectos, entre 1.ª y 2.ª calle poniente, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

Figura 10. **Inundación de calle**



Fuente: elaboración propia, Calle Ancha de los Herreros, entre 3.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup> avenida norte, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

### **3.5. Mantenimiento**

No se cuenta con un plan de mantenimiento periódico, se realizan reparaciones cada vez que un tramo deja de ser funcional o cuando se acerca la época de lluvia.

Las reparaciones se realizan en las áreas que presenten desprendimiento de rocas, hundimientos o abultamientos. Para ello se retiran las rocas, se nivela y compacta manualmente la subrasante, controlando la densidad con el ensayo de densidad de campo.

Figura 11. **Compactación manual de la subrasante**



Fuente: elaboración propia, 3.ª avenida sur, entre 2.ª y 3.ª calle oriente, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

Figura 12. **Ensayo de densidad de campo**



Fuente: elaboración propia, 3.ª avenida sur, entre 2.ª y 3.ª calle oriente, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

Se coloca una capa de mezclón de aproximadamente 3 cm de espesor y sobre este, las rocas. Si es un tramo que posee cintas, se colocan primero las rocas que las conforman y posteriormente las rocas de los cajones.

Figura 13. **Colocación de rocas cinta**



Fuente: elaboración propia, 3.<sup>a</sup> avenida sur, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

Figura 14. **Colocación de rocas cajón**



Fuente: elaboración propia, 3.<sup>a</sup> avenida sur, Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

Después de colocar y nivelar las rocas, se coloca el estuque, por estética se deja al descubierto aproximadamente 1 cm de profundidad entre las rocas. El paso vehicular se habilita 48 horas después de concluidas las reparaciones, para permitir el proceso de fraguado del mortero.

Figura 15. **Tramo con estuque recién colocado**



Fuente: elaboración propia, 3.<sup>a</sup> avenida sur y 8.<sup>a</sup> calle oriente Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

### **3.6. Metodología para evaluar el pavimento existente**

Para determinar las características del diseño de pavimento del empedrado actual y su desempeño, se realizan ensayos para evaluar el suelo que conforma la subrasante. Ya que la estructura del pavimento no cuenta con base y sub-base, únicamente se evalúa la subrasante.

Los tipos de morteros empleados en la carpeta de rodadura no se consideran aptos para ser sometidos a cargas de compresión, dadas las proporciones de materiales de los mismos y la falta de control, en cuanto a su



calidad; razón por la que se decide analizar solamente el suelo que conforma la subrasante y el pavimento en conjunto, proponiendo un diseño en el cual el mortero solo sirva para enlazar las rocas entre sí, más no para soportar las cargas del tránsito vehicular. El mortero no puede ser modificado como debería, dadas las limitaciones originadas por las leyes que protegen los procedimientos constructivos de las calles, siendo una de ellas que los materiales empleados no pueden cambiarse, y que la mezcla no debe contener mayor cantidad de aglomerante (cemento o cal), puesto que su aspecto debe ser lo más cercano al color natural del suelo.

Los ensayos para caracterizar el suelo que conforma la subrasante son los que a continuación se explican.

### **3.6.1. Compactación Proctor**

El propósito de un ensayo de compactación en laboratorio es determinar la curva de compactación para una determinada energía de compactación. Esta curva considera en abscisas el contenido de humedad y en ordenadas la densidad seca. A partir de ella, se podrá obtener la humedad, llamada óptima, que es la que corresponde a la densidad máxima. Con estos resultados se podrá determinar la cantidad de agua de amasado a usar cuando se compacta el suelo en campo, para obtener la máxima densidad seca para una determinada energía de compactación. Para cumplir este propósito, en el ensayo de laboratorio se debe considerar un tipo de compactación similar a la desarrollada en campo con los equipos de compactación.

Se compacta el suelo que conforma la subrasante para disminuir futuros asentamientos, aumentar la resistencia al corte y disminuir la permeabilidad.

### **3.6.2. Razón soporte California CBR**

El comportamiento de un suelo no depende solamente de su grado de compactación sino también del tipo de partículas que lo constituyen. Por eso, se hace necesario un parámetro adicional que considere la capacidad soporte del suelo en sí mismo, para esas condiciones de compactación.

El ensayo de soporte de California es una forma de clasificar la capacidad de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en construcción de calles y carreteras.

El ensayo CBR mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. Permite obtener un número asociado a la capacidad de soporte.

### **3.6.3. Límites de Atterberg**

La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg, que separan cuatro estados de consistencia de los suelos cohesivos.

Los mencionados límites son: límite líquido (L.L.), límite plástico (L.P.) y límite de contracción (L.C.), y mediante ellos se puede dar una idea del tipo de suelo en estudio. Todos los límites de consistencia se determinan empleando suelo que pase por la malla No. 40. La diferencia entre los valores del límite líquido y del límite plástico da el llamado índice plástico (I.P.) del suelo. Los

límites líquido y plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo, pero el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla.

Cuando no se puede determinar el límite plástico de un suelo se dice que es no plástico (N.P.), y en este caso el índice plástico se dice que es igual a cero. El índice de plasticidad indica el rango de humedad a través del cual los suelos con cohesión tienen propiedades de un material plástico.

Estos ensayos junto con el ensayo de granulometría por tamizado, se requieren para la clasificación del suelo.

#### **3.6.4. Granulometría**

El análisis granulométrico se realiza para determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una muestra de suelo estadísticamente representativa. Según sean las características de los materiales finos de la muestra, el análisis por tamices se hace con la muestra entera, o bien, lavado. El proceso de tamizado no provee información sobre la forma de los granos de suelo, es decir si son angulares o redondeados, solamente brinda información sobre los granos que pueden pasar a través de una malla de abertura rectangular de cierto tamaño.

La información del análisis granulométrico se presenta en forma curva; para poder comparar suelos y visualizar fácilmente la distribución de los tamaños de grano presentes. Los datos obtenidos se utilizan para clasificar el suelo.

### **3.7. Metodología para elaborar y evaluar propuesta de pavimento**

Como se menciona en la sección 3.6., la propuesta de diseño de pavimento se enfocará principalmente en evaluar y mejorar la subrasante, y la estructura del pavimento en conjunto.

Cuando la densidad de un suelo aumenta, mayor es la magnitud de carga que este soporta, sin embargo, esto depende de la eficacia del método de compactación que se emplee. En Antigua Guatemala no se realizan trabajos de compactación, en la subrasante, empleando maquinaria, dado que las vibraciones que se producen son muy altas y podrían dañar las edificaciones e instalaciones subterráneas antiguas. El método que se practica es la compactación con pisones de mano, sin embargo, dicho proceso no garantiza un alto grado de compactación.

Para mejorar la capacidad portante del suelo se propone entonces ser estabilizado o modificado. La estabilización de un suelo para mejorar su desempeño puede hacerse agregándole cierto contenido de cemento o cal, sin embargo, el tipo de suelo que se encuentra en Antigua Guatemala, no aplica para ser estabilizado, por su plasticidad nula y por su bajo contenido de arcilla. Se opta entonces por modificarse, agregándole cierto contenido de cal hidratada. Típicamente se utiliza del 1 al 4 % de cal en peso con respecto al suelo para la modificación, que es generalmente una menor cantidad que la utilizada para la estabilización permanente en suelos.

Los suelos modificados o tratados con cal deben ser sometidos a ciertos ensayos, primero se debe determinar el porcentaje adecuado de cal a agregar; para ello se realiza el ensayo de pH. Para determinar los cambios en el comportamiento y las características del suelo modificado, se realizan los

ensayos de compresión no confinada y permeabilidad. Asimismo, se realizan nuevamente los ensayos de compactación Proctor y de razón soporte California, tanto en el suelo sin cal como en el suelo modificado, pero ahora con el método estándar. Se emplea este método porque se realiza con menor energía de compactación, esto, para que los resultados se asemejen más al tipo de compactación que se realiza en campo.

Para los pavimentos empedrados no existe un método de diseño científico, ni parámetros o ensayos que evalúen su desempeño. Considerando este tipo de pavimento como tipo flexible, se opta por evaluarlo haciendo uso de la viga Benkelman para medir su deformación. Para ello se simula un tramo de pavimento construido como actualmente se realiza, y otro con el diseño propuesto, para observar su desempeño y comparar sus resultados.

### **3.7.1. Determinación de pH**

El pH es una medida de la concentración de hidrógeno, expresado en términos logarítmicos. Los valores del pH se reducen a medida que la concentración de los iones de hidrógeno incrementa, variando entre un rango de 0 a 14. El pH representa la concentración de iones  $H^+$ , que es dependiente de la relación suelo-agua. El fin del ensayo es determinar el requerimiento de cal del suelo, entendiendo como tal a la cantidad de cal mínima que satisface la capacidad de absorción de cal por intercambio iónico.

Cuando se obtienen valores de pH en la solución acuosa de alrededor de 12, lo cual corresponde a la solución saturada de hidróxido de calcio, esto significa que se satisface la capacidad de intercambio catiónico entre los minerales del suelo y los iones de calcio. Otro elemento adicional que se tiene en cuenta en este ensayo es la presencia de materia orgánica que confiere

acidez al medio, consumiendo activamente el calcio. Se define una cantidad óptima de cal, cuando el pH medido en la solución supera los 12,4 y permanece constante con el agregado adicional de cal.

### **3.7.2. Compresión no confinada**

Este ensayo consiste en la aplicación de carga axial con una velocidad controlada sobre una probeta sin soporte lateral y en condiciones no drenadas; por lo que se considera un ensayo uniaxial.

Tiene por finalidad determinar la resistencia a la compresión no confinada de un cilindro de suelo cohesivo o semi-cohesivo. Las probetas de suelo modificado con cal son sometidas a ensayos a distintas edades, para verificar el incremento de su resistencia conforme su edad aumenta.

### **3.7.3. Permeabilidad**

El suelo es un material con arreglo variable de sus partículas, que dejan entre ellas una serie de poros conectados unos con otros, para formar una compleja red de canales de diferentes magnitudes que se comunican tanto con la superficie del terreno, como con las fisuras y grietas de la masa del mismo. La permeabilidad es la capacidad que tiene un suelo de permitirle a un flujo que lo atraviese por sus poros sin alterar su estructura interna.

Para medir que tan permeable es un material, existe el ensayo de permeabilidad, que determina un coeficiente que es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso.

#### **3.7.4. Deflexión de pavimento con carga estática**

El pavimento flexible es aquel cuya estructura total se flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. Las deflexiones producidas en la superficie de un pavimento flexible, por acción de cargas vehiculares, pueden ser determinadas haciendo uso de deflectómetros como la viga Benkelman.

El deflectómetro Benkelman funciona según el principio de la palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, consta esencialmente de dos partes; un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos y un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo, mediante una articulación de giro o pivote, uno de cuyos extremos apoya sobre el terreno y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical.

El ensayo mide la deformación que sufre el pavimento, y si este se recupera después de retirarse la carga, o queda deformado permanentemente.





## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1. Ensayos para evaluar el pavimento existente

Para evaluar el pavimento existente se analiza el suelo que conforma la subrasante. Se obtuvo tres muestras de suelo representativas en tres distintas ubicaciones, y se realizan los siguientes ensayos para cada una de ellas.

Tabla I. **Ubicación de la toma de muestras de suelo**

Muestra	Coordenadas		Dirección
	Latitud	Longitud	
1	14°33'26,33"	90°43'52,26"	4. <sup>a</sup> calle oriente, 1. <sup>a</sup> av. norte
2	14°33'26,25"	90°43'53,82"	4. <sup>a</sup> calle oriente, 2. <sup>a</sup> av. norte
3	14°33'26,26"	90°43'55,39"	4. <sup>a</sup> calle oriente, 3. <sup>a</sup> av. norte

Fuente: elaboración propia, empleando datos obtenidos de Google Earth.

#### 4.1.1. Compactación Proctor modificado

Ensayo según norma AASHTO T-180

##### 4.1.1.1. Equipo y material utilizado

- Cilindro Proctor de compactación de 4 in
- Martillo de compactación de 10 lb de peso y 18 in de caída
- Tamiz No. 4
- Balanza de 20 kg de capacidad y aproximación de 1 g
- Balanza de 3 escalas de 0,01 g de aproximación

- Horno con capacidad de mantener una temperatura de 110°C con aproximación de 5°C.
- Tarros metálicos para determinación de humedad.
- Espátula, cucharón para mezclar, rodillo, regla de acero de 12 in.

#### 4.1.1.2. Procedimiento de ensayo

- Se debe secar al aire o en un horno a 60°C, una muestra de aproximadamente 25 kg de material.
- Se toman 3 kg de suelo, pulverizado lo suficiente para pasar a través del tamiz No. 4.

Figura 16. **Peso del material para primer punto de humedad**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se mezcla la cantidad de agua necesaria para hacer el incremento de humedad, amasando a fondo la muestra para formar una mezcla uniformemente húmeda.
- Se divide la mezcla húmeda en cinco porciones iguales aproximadamente.

- Se pesa el molde de compactación (tara) en la balanza de 20 kg, sin el collarín. Posteriormente se coloca el collarín al molde y se sitúa sobre un apoyo firme.
- Se coloca una porción de suelo en el molde, nivelando la superficie con la mano o con el martillo de compactación.
- Se asienta el martillo de compactación dentro del molde y se eleva sobre el mango hasta que el pistón alcanza la parte superior de la guía, se suelta permitiendo que este caiga libremente sobre la muestra, sin someterlo a algún impulso adicional con la mano.
- Se repite el paso anterior, cubriendo sistemáticamente la superficie de la muestra, hasta completar 25 golpes para cada capa de suelo (5 capas en total).
- Se retira el collarín y con la regla se enrasa la superficie del molde de compactación.

Figura 17. **Muestra compactada previo a tomar su peso**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se quita el exceso de material que haya quedado fuera del molde y se procede a tomar su peso en la balanza de 20 kg, dato que se denomina PBH (peso bruto húmedo).

- Para verificar el contenido de humedad, se toman dos muestras de 10 a 25 g cada una en los tarros metálicos, se toman los pesos (pbh) y se colocan en el horno por 24 horas, luego se vuelven a tomar los pesos (pbs).
- Se repite el procedimiento anterior para otra porción de suelo, agregando aproximadamente del dos al tres por ciento más de humedad a la muestra.
- El ensayo se detiene cuando al pesar la muestra compactada se muestre un decremento en relación al aumento del contenido de humedad.

Tabla II. **Parámetros de ensayo Proctor modificado**

Característica	Siglas	Denominación	Fórmula
Peso bruto húmedo	PBH	Peso del material + Peso del cilindro	PM + Tara [kg]
Peso neto húmedo	PNH	Peso bruto húmedo - Peso del cilindro	PBH - Tara [kg]
Peso unitario húmedo	PUH	Peso por unidad de volumen húmedo	$(PNH \times 2,205) \times 30^*$ [lb/pie <sup>3</sup> ]
Peso unitario seco	PUS	Peso por unidad de volumen seco	$[(PUH/\%H+100)] \times 100$ [lb/pie <sup>3</sup> ]
Peso bruto húmedo	pbh	Peso de la muestra húmeda + tarro	pmh + tarro [g]
Peso bruto seco	pbs	Peso de la muestra seca + tarro	pms + tarro [g]
Diferencia	Dif	Peso bruto húmedo - peso bruto seco	pbh - pbs [g]
Peso neto seco	pns	Peso bruto seco - tarro	pbs - tarro [g]
Porcentaje de humedad	%H	Relación de humedad sobre peso del suelo seco	$(Dif/pns) \times 100$ [%]
Porcentaje de humedad promedio	%H	Promedio de humedades	$(\%H1 + \%H2)/2$ [%]

\*El factor 30 se debe a que la capacidad volumétrica del cilindro de compactación es de 1/30pie<sup>3</sup> (molde de 4 in de diámetro).

Fuente: HERNANDEZ, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 10.

#### 4.1.1.3. Datos obtenidos

Del ensayo Proctor modificado se obtuvieron los datos para cada muestra de suelo.

Tabla III. Datos obtenidos del ensayo Proctor modificado para muestra 1

Punto de humedad	1		2		3		4	
PBH [kg]	5,92		6,12		6,20		6,22	
TARA [kg]	4,50		4,50		4,50		4,50	
Tarro	E-2	E-4	E-9	E-5	E-10	E-8	E-0	E-1
pbh [g]	271,55	290,49	265,47	269,65	245,00	301,36	321,20	325,40
pbs [g]	257,02	273,83	241,72	245,75	216,92	266,02	273,23	277,28
tara [g]	46,93	45,68	44,90	46,49	42,65	45,87	46,10	46,20

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1.4. Cálculos efectuados

Posterior a realizar el ensayo, se procede a calcular los parámetros descritos en la tabla II. Debido a que el cálculo es el mismo para cada punto de humedad, solo se tomará de referencia el primer punto y los siguientes se determinan de la misma manera, obteniendo así los datos de la tabla IV. Se realiza el mismo procedimiento para las tres muestras de suelo.

$$PBH = 5,92 \text{ kg}$$

$$Tara = 4,50 \text{ kg}$$

$$PNH = 5,92 \text{ kg} - 4,50 \text{ kg} = 1,42 \text{ kg}$$

$$PUH = \frac{(1,42 \text{ kg})(2,205 \text{ lb}/1 \text{ kg})}{1/30 \text{ pie}^3} = 93,93 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

Tarro E-2

$$Dif = 271,55 \text{ g} - 257,02 \text{ g} = 14,53$$

$$pns = 257,02 \text{ g} - 46,93 \text{ g} = 210,09 \text{ g}$$

$$\%H = \left( \frac{14,53 \text{ g}}{210,09 \text{ g}} \right) \times 100 = 6,92$$

Tarro E-4

$$Dif = 290,49 \text{ g} - 273,83 \text{ g} = 16,66$$

$$pns = 273,83 \text{ g} - 45,68 \text{ g} = 228,15 \text{ g}$$

$$\%H = \left( \frac{16,66 \text{ g}}{228,15 \text{ g}} \right) \times 100 = 7,30$$

$$\%H_{promedio} = \frac{(6,92 \% + 7,30 \%)}{2} = 7,11$$

$$PUS = \frac{93,93 \text{ lb}/\text{pie}^3}{100 + 7,11} \times 100 = 87,70 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

Tabla IV. **Resumen de cálculos de porcentajes de humedad promedio y densidad unitaria seca de muestra 1**

Punto de humedad	1		2		3		4	
PBH [kg]	5,92		6,12		6,20		6,22	
TARA [kg]	4,50		4,50		4,50		4,50	
PNH [kg]	1,42		1,62		1,70		1,72	
PUH [lb/pie <sup>3</sup> ]	93,93		107,16		112,46		113,78	
TARRO	E-2	E-4	E-9	E-5	E-10	E-8	E-0	E-1
pbh [g]	271,55	290,49	265,47	269,65	245,00	301,36	321,20	325,40
pbs [g]	257,02	273,83	241,72	245,75	216,92	266,02	273,23	277,28
Tara [g]	46,93	45,68	44,90	46,49	42,65	45,87	46,10	46,20
Dif [g]	14,53	16,66	23,75	23,90	28,08	35,34	47,97	48,12
pns [g]	210,09	228,15	196,82	199,26	174,27	220,15	227,13	231,08
% H	6,92	7,30	12,07	11,99	16,11	16,05	21,12	20,82
% H promedio	7,11		12,03		16,08		20,97	
PUS [lb/pie <sup>3</sup> ]	87,70		95,66		96,87		94,05	

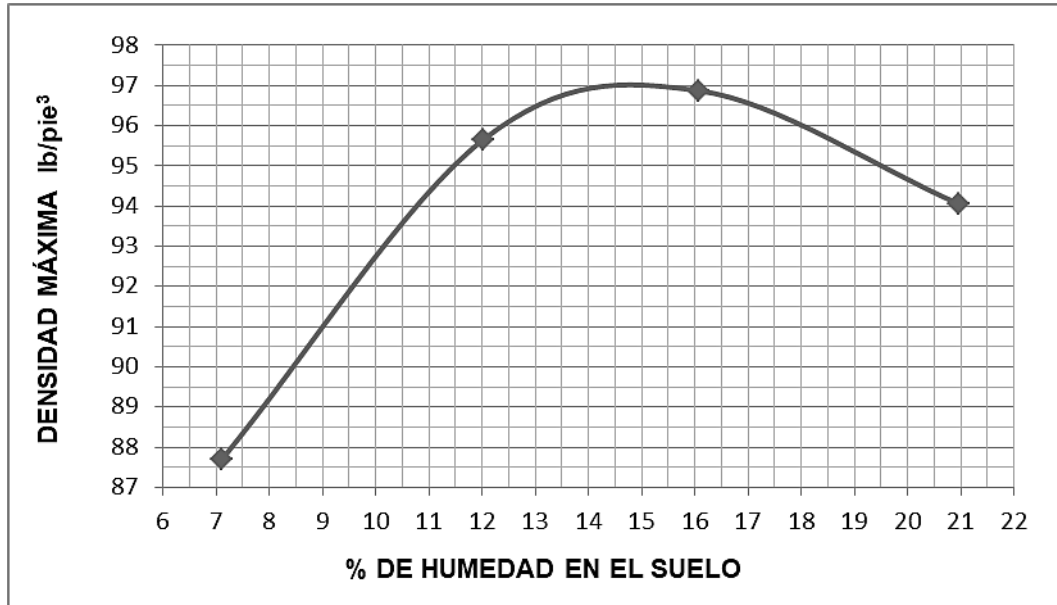
Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1.5. Resultados obtenidos

Se ubica en el eje de las abscisas el contenido de humedad promedio ( $\%H_{promedio}$ ) y en el eje de las ordenadas la densidad seca (PUS). Se localiza cada uno de los puntos de humedad con su respectiva densidad seca y se unen trazando una curva parabólica, en esta se determina la cresta y los puntos PUS máximo y el %H óptimo.



Figura 18. Gráfica densidad seca – humedad de muestra 1



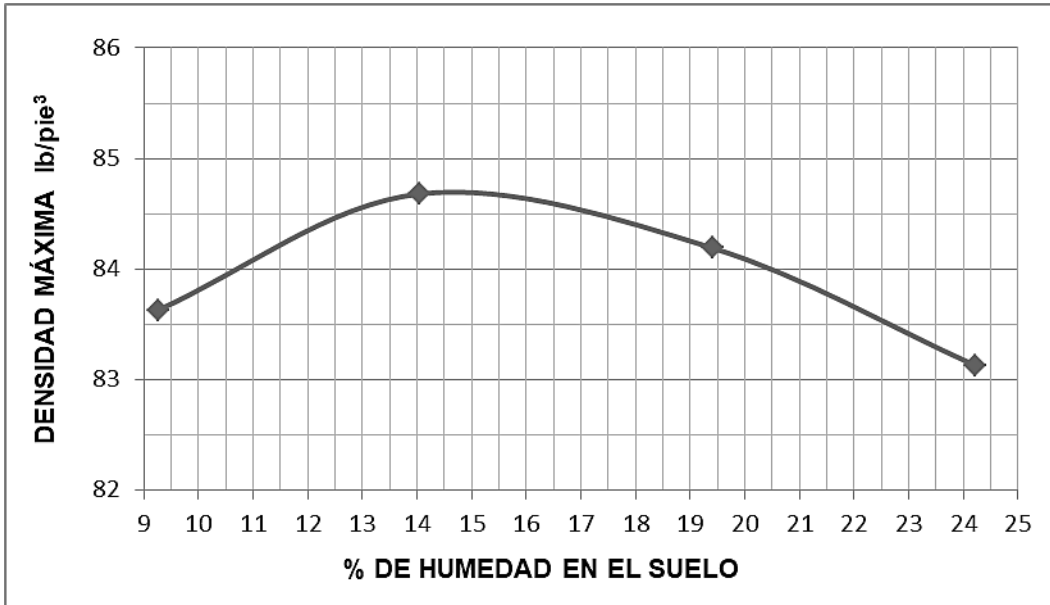
Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado muestra 1

Punto de humedad	1	2	3	4
% H promedio	7,11	12,03	16,08	20,97
PUS [lb/pe <sup>3</sup> ]	87,70	95,66	96,87	94,05
Densidad seca máxima	<b>97,00 lb/pe<sup>3</sup></b>			
Humedad óptima	<b>14,75 %</b>			

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfica densidad seca – humedad de muestra 2**



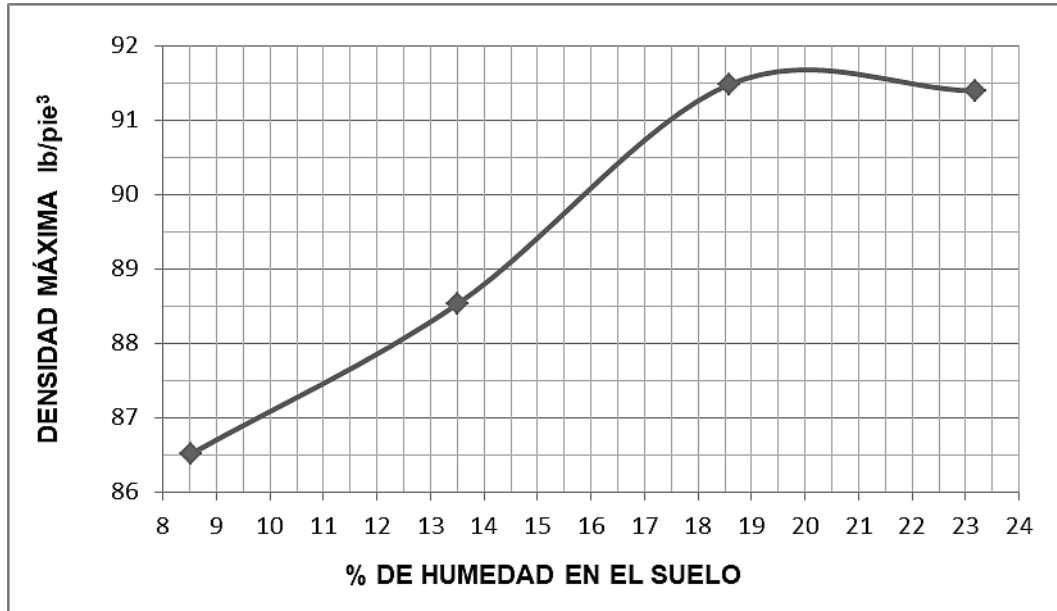
Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado muestra 2**

Punto de humedad	1	2	3	4
% H promedio	9,26	14,05	19,41	24,21
PUS [lb/pie <sup>3</sup> ]	83,63	84,68	84,19	83,13
Densidad seca máxima	<b>84,75 lb/pie<sup>3</sup></b>			
Humedad óptima	<b>14,75 %</b>			

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfica densidad seca – humedad de muestra 3**



Fuente: elaboración propia, empleando resultados del ensayo.

Tabla VII. **Resumen de resultados de ensayo Proctor modificado muestra 3**

Punto de humedad	1	2	3	4
% H promedio	8,52	13,51	18,59	23,18
PUS [lb/pie <sup>3</sup> ]	86,51	88,53	91,48	91,39
Densidad seca máxima	<b>91,60 lb/pie<sup>3</sup></b>			
Humedad óptima	<b>20,00 %</b>			

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1.6. Presentación de resultados

En la tabla VIII se muestra el resumen de resultados obtenidos para las tres muestras de suelo.

Tabla VIII. Resultados del ensayo Proctor modificado

Muestra	Porcentaje de humedad óptima	Densidad seca máxima	
		[lb/pie <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	14,75	97,00	1 553,94
2	14,75	84,75	1 357,70
3	20,00	91,60	1 467,43

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1.7. Análisis de resultados

Las muestras de suelo ensayadas presentaron resultados similares en cuanto a sus densidades máximas, la muestra 1 alcanzó el dato más alto, siendo este de 1 553,94 lb/pie<sup>3</sup>. Las muestras 1 y 2 poseen iguales porcentajes de humedad óptima (14,75 %).

El ensayo de compactación es de utilidad para conocer la densidad máxima que puede alcanzar un tipo de material, sin embargo, no produce las mismas densidades que las obtenidas en la obra por el equipo de construcción. En el proceso de construcción de las calles de Antigua Guatemala no se opta por un sistema de compactación mecánico, solo se realiza la compactación de forma manual, dadas las condiciones de protección con las que la ciudad cuenta. Los resultados obtenidos son válidos principalmente para poder ser

comparados con los parámetros que determinan, si un material es apto para conformar la subrasante del pavimento.

#### **4.1.2. Razón soporte California CBR**

Ensayo según norma AASHTO T-193

##### **4.1.2.1. Equipo y material utilizado**

- Prensa de ensayo con capacidad de por lo menos 10 000 lb, equipada con cabezal o base móvil que avance a razón de 0,05 in/min, para forzar el pistón de penetración dentro del espécimen. La máquina deberá estar equipada con indicadores de carga, legibles cada 10 lb o menos, un dispositivo indicador de carga con lecturas de curso no menor que 2 in (50 mm).
- Pistón de penetración metálico, de 1,92 in de diámetro y no menos de 4 in de longitud.
- Micrómetro de reloj, con sensibilidad legible 0,001 in para medir penetración.
- 3 moldes cilíndricos metálicos de diámetro interno de  $6 \pm 0,03$  in ( $152,4 \pm 0,7$  mm) y con una altura de  $7 \pm 0,004$  in ( $177,8 \pm 0,1$  mm), provistos de collar de extensión de 2 in de altura (50,8 mm) y una plancha de base perforada de  $3/8$  in de espesor (9,5 mm). Las perforaciones de la plancha no deberán exceder un diámetro de  $1/16$  in (1,60 mm).
- 3 discos separadores de  $5-15/16$  in de diámetro (150,8 mm) y 2,416 in de espesor (61,4 mm).
- Aparato para medir expansión, compuesto por placa metálica provista de un vástago ajustable de metal con perforación de diámetro menor o igual a 1,6

mm y un trípode metálico para sujetar el micrómetro de reloj de 0,01 in para medir el hinchamiento.

- Sobrecargas, una metálica anular y varias metálicas ranuradas de 5 lb de peso cada una (2,27 kg), 5 5/8 in de diámetro externo (149,2 mm) y 2 1/8 in de diámetro interno (54 mm).
- Martillo de compactación de 10 lb de peso con guía para 18 in de caída.
- 2 tamices para el cribado del material según sus características No. 4 y 3/4 in.
- Balanza con capacidad de 100 kg y balanza para humedad de 1 kg.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en 110±5°C.
- Bandeja para mezcla, regla metálica, tanque de inmersión, papel filtro, cucharones, balanzas, tarros para medición de humedades y cronómetro.

#### 4.1.2.2. Procedimiento de ensayo

- Se calcula el agua a agregar, partiendo de la humedad óptima obtenida en el ensayo compactación Proctor.

$$\frac{(\%H_{\text{óptimo}} - \%H_{\text{actual}})(\text{Peso del material en g})}{100 + \%H_{\text{actual}}} = [cm^3]$$

- Se pesan 15 kg de material, tamizado por el mismo diámetro que se utilizó en el ensayo de compactación Proctor.
- Se identifican los tres cilindros a utilizar y se pesa cada uno sin collarín.

Figura 21. **Preparación del material y equipo a utilizar**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se preparan los cilindros colocando el espaciador y los filtros (filtro de malla y papel filtro).
- Se agrega la cantidad de agua calculada previamente, al material, distribuyéndola uniformemente.
- Se compacta cada muestra con 5 capas de material.
- Cada cilindro se compacta con distinta energía de compactación, siendo esta, 65, 30 y 10 golpes por cada capa, respectivamente.
- Después de compactar el material en cada cilindro, se retira el collarín, se enrasa cada probeta y se les colocan filtros.
- Se toma el peso de cada cilindro con material compactado.
- Se coloca de nuevo el collarín, se introduce la placa metálica perforada provista del vástago regulable, así como las sobrecargas con un peso mínimo de 10 lb.
- Se calibra la expansión a través del trípode, que se instala con el comparador de dial, de tal modo que su punta palpable quede tocando el vástago.

- Se sumergen las probetas ya calibradas en el estanque con agua hasta lograr una saturación completa del material. Para un ensayo de saturación normal se deja el molde sumergido durante 96 horas, cada día se mide la deformación (expansión o contracción) que sufre cada probeta.

Figura 22. **Medición de deformación de probetas**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Una vez transcurrido el tiempo de saturación, se sacan las probetas y se dejan drenar durante 15 minutos.
- Después de drenadas se llevan las probetas a la máquina de ensayo para determinar la resistencia a la penetración.



Figura 23. **Colocación de probeta en prensa de ensayo con capacidad de 1 000 lb**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se apoya el pistón de penetración con una carga lo más pequeña posible y se colocan los diales de lectura de tensión y deformación en cero. La velocidad será de 0,05 in/min.
- Se anotan las lecturas de carga, en los niveles de penetración: 0,025, 0,050, 0,075, 0,1, 0,2 y 0,3 in.
- Obtenida la última lectura deben haber transcurrido seis minutos exactos, que es el tiempo total que dura la penetración.

#### 4.1.2.3. Datos obtenidos

Los datos obtenidos en el ensayo de la muestra 1 se presentan en las tablas siguientes.

Tabla IX. **Humedad actual de muestra 1**

<b>Humedad actual</b>		
<b>Tarro</b>	<b>E-2</b>	<b>E-4</b>
<b>pbh [g]</b>	271,55	290,49
<b>pbs [g]</b>	257,89	276,11
<b>Tara [g]</b>	46,93	45,68
<b>Dif [g]</b>	13,66	14,38
<b>pns [g]</b>	210,96	230,43
<b>% H</b>	6,48	6,24
<b>% H promedio</b>	<b>6,36</b>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Humedad de ensayo de muestra 1**

<b>Humedad de ensayo</b>		
<b>Tarro</b>	<b>E-2</b>	<b>E-4</b>
<b>pbh [g]</b>	292,32	300,49
<b>pbs [g]</b>	261,16	267,74
<b>Tara [g]</b>	46,93	45,68
<b>Dif [g]</b>	31,16	32,75
<b>pns [g]</b>	214,23	222,06
<b>% H</b>	14,55	14,75
<b>% H promedio</b>	<b>14,65</b>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Peso unitario seco de especímenes compactados de muestra 1**

Parámetros	Especímenes compactados		
	65 golpes	30 golpes	10 golpes
<b>PBH [kg]</b>	10,88	10,70	10,57
<b>Tara [kg]</b>	7,24	7,24	7,26
<b>PNH [kg]</b>	3,64	3,46	3,31
<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	1/13,33	1/13,33	1/13,33
<b>PUH [kg]</b>	106,99	101,70	97,29
<b>% H</b>	14,65	14,65	14,65
<b>PUS [kg]</b>	93,32	88,70	84,86

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Lecturas diales de expansión de especímenes compactados de muestra 1**

<b>65 golpes</b>		
Inmersión y expansión	Sobrepesos 10 lb	
Día/Hora:	1 / 12:10	5 / 11:00
Lectura Dial:	0	6,87
Expansión en pulgada:	0	0,00687
<b>30 golpes</b>		
Inmersión y expansión	Sobrepesos 10 lb	
Día/Hora:	1 / 12:10	5 / 11:00
Lectura Dial:	0	15,12
Expansión en pulgada:	0	0,01512
<b>10 golpes</b>		
Inmersión y expansión	Sobrepesos 10 lb	
Día/Hora:	1 / 12:10	5 / 11:00
Lectura Dial:	0	110,91
Expansión en pulgada:	0	0,11091

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Penetración y lecturas de anillo de especímenes compactados de muestra 1**

<b>65 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	98	151	202	269	470	441
<b>30 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	37	58	89	153	286	269
<b>10 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	18	23	29	37	60.44	72

Fuente: elaboración propia.

#### **4.1.2.4. Cálculos efectuados**

Antes de iniciar el ensayo se calcula la humedad actual del suelo, mostrada en la tabla IX, teniendo en cuenta los parámetros descritos en la tabla II. Con este dato y con la humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación Proctor, se calcula la cantidad de agua a agregar a la muestra de suelo a ensayar, para proporcionarle la humedad óptima para ser compactado. Debido a que los cálculos son los mismos para cada muestra, solo se tomará de referencia la muestra 1 y las demás se calcularán de la misma manera.

Tabla XIV. **Humedad óptima y peso unitario seco máxima de muestra 1**

Peso de martillo: 10 lb Capas: 5 Golpes por capa: 25	Peso unitario seco máximo	97,00 lb/pie <sup>3</sup>
	Porcentaje de humedad óptima	14,75 %

Fuente: elaboración propia.

- Agua a agregar:

$$\frac{(14,75 - 6,36)(15\ 000\ g)}{100 + 6,36} = 1\ 183,25\ cm^3$$

- Porcentaje de compactación de cada espécimen, se ejemplifica el cálculo para la probeta de 65 golpes.

$$\%C = \frac{PUS_{CBR}}{PUS_{PROCTOR}} \times 100$$

$$\%C = \frac{93,32\ lb/pie^3}{97,00\ lb/pie^3} \times 100 = 96,2$$

Tabla XV. **Porcentajes de compactación de especímenes compactados de muestra 1**

Parámetros	Especímenes compactados		
	65 golpes	30 golpes	10 golpes
PUS [kg]	93,32	88,70	84,86
% C	96,2	91,4	87,5

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de expansión de muestra del cilindro compactado a distinta cantidad de golpes; como porcentaje de la altura inicial, se ejemplifica con probeta de 65 golpes.

$$\%E = \frac{E}{4,583} \times 100$$

Donde:

- $\%E$ : Porcentaje de expansión
- $E$ : Expansión [in] (E=lectura final – lectura inicial)
- 4,583: Altura de la probeta [in] (Altura del molde menos la altura del espaciador)

$$\%E = \frac{0,00687}{4,583} \times 100 = 0,15$$

Tabla XVI. **Porcentajes de expansión de especímenes compactados de muestra 1**

Parámetros	Especímenes compactados		
	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Expansión [in]	0,0069	0,0151	0,111
% E	0,15	0,33	2,42

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de carga para las penetraciones de cada probeta. La ecuación del anillo de 1 000 lb empleado en el ensayo es:

$$Carga [lb] = 4,5409X + 10,0588$$

Donde:

X: Lectura dial de deformación del anillo

Tabla XVII. **Datos de carga – penetración de los especímenes compactados de muestra 1**

<b>65 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	98	151	202	269	470	441
Carga [lb]	1 003,42	1 534,10	2 044,74	2 715,59	4 726,34	4 437,77
<b>30 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	37	58	89	153	286	269
Carga [lb]	392,65	602,92	913,31	1 554,12	2 889,41	2 715,59
<b>10 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	18	23	29	37	60,44	72
Carga [lb]	202,408	252,471	312,548	392,649	627,346	743,093

Fuente: elaboración propia.

- Utilizando los valores de penetración mostrados en la tabla XVII, se calcula el %CBR para 0,1 y 0,2 in de penetración dividiendo la carga en lb por 3 000 y 4 500 respectivamente, que es el factor de la carga unitaria patrón en libras, según la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Valores de carga unitaria**

Penetración		Carga unitaria patrón		Carga estándar
[mm]	[in]	[Mpa]	[lb/in <sup>2</sup> ]	[lb]
2,5	0,10	6,9	1 000	3 000
5,0	0,20	10,3	1 500	4 500
7,5	0,30	13,0	1 900	5 700
10,0	0,40	16,0	2 300	6 100
12,7	0,50	18,0	2 600	7 800

Fuente: BOWLES, Joseph. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. p 190.

Se ejemplifica el cálculo de %CBR para 0,1 y 0,2 in de la probeta compactada con 65 golpes.

$$\%CBR = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} \times 100$$

$$\%CBR_{0,1} = \frac{2\,715,59\text{ lb}}{3\,000\text{ lb}} \times 100 = 90,52$$

$$\%CBR_{0,2} = \frac{4\,726,34\text{ lb}}{4\,500\text{ lb}} \times 100 = 105,03$$

De los valores de %CBR obtenidos se toma el mayor



Tabla XIX. **Porcentajes de CBR para especímenes de muestra 1**

Parámetros	Especímenes compactados		
	65 golpes	30 golpes	10 golpes
<b>Carga [lb]</b>	4 726,34	2 889,41	627,35
<b>%C</b>	96,2	91,4	87,5
<b>%CBR</b>	105,03	64,21	13,94

Fuente: elaboración propia.

- Con los valores de %C y %CBR de la tabla XIX se procede a encontrar el valor del porcentaje de CBR de la muestra 1, para 95 % de compactación, por interpolación.

$$y = y_1 + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right)(y_2 - y_1)$$

Donde:

$$y = \text{Valor a encontrar} \quad x = 95,0$$

$$y_1 = 64,21 \quad x_1 = 91,4$$

$$y_2 = 105,03 \quad x_2 = 96,2$$

$$y = 64,21 + \left(\frac{95,0 - 91,4}{96,2 - 91,4}\right)(105,03 - 64,21) = 94,83 \approx 95$$

El valor de CBR para 95 % de compactación es entonces de 95 %.

#### 4.1.2.5. Resultados obtenidos

Los cálculos efectuados con los datos obtenidos en el ensayo CBR para cada muestra de suelo, originan los resultados mostrados en las siguientes tablas y gráficas.

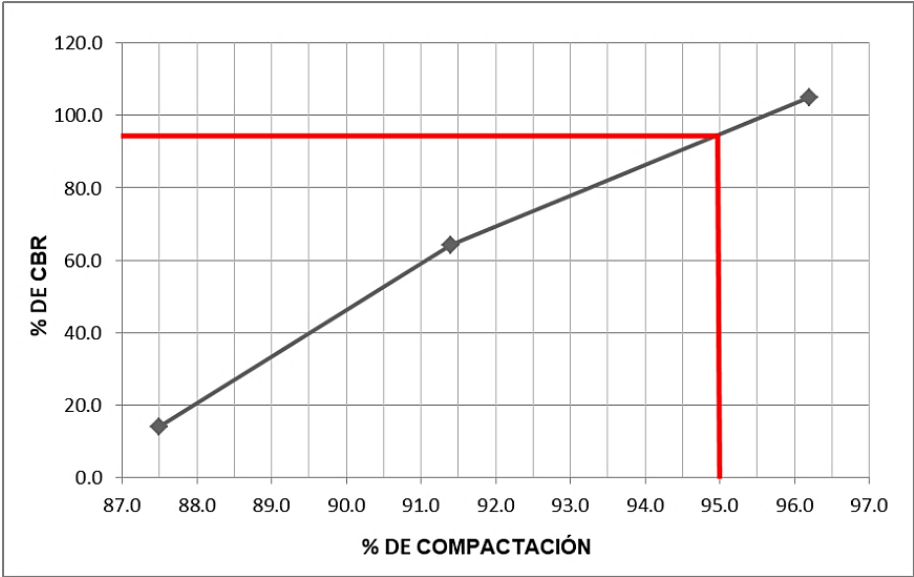
Tabla XX. **Porcentajes de CBR y de compactación para cada muestra**

Muestra	Parámetros	Especímenes compactados		
		65 golpes	30 golpes	10 golpes
1	%C	96,2	91,4	87,5
	%CBR	105,03	64,21	13,94
2	%C	98,3	95,5	90,3
	%CBR	76,89	32,44	13,94
3	%C	98,0	95,3	90,0
	%CBR	108,81	76,89	29,87

Fuente: elaboración propia.

De los valores obtenidos en la tabla XX se configuran las gráficas de porcentaje CBR versus porcentaje de compactación para cada una de las muestras.

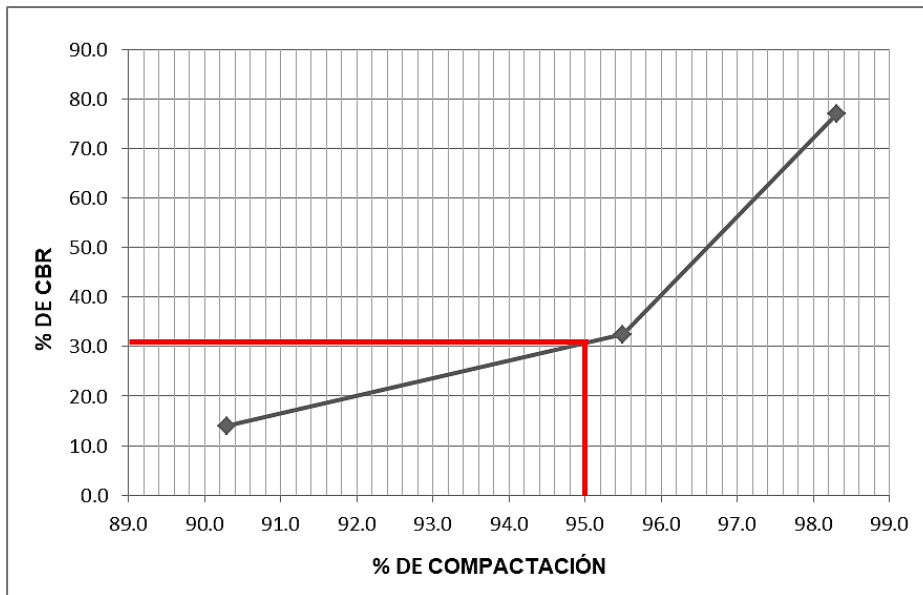
Figura 24. **Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra 1**



Fuente: elaboración propia.

De la gráfica mostrada en la figura 24 y por interpolación, se determina el porcentaje CBR al 95 % de compactación, y tiene un valor aproximado de 95 %.

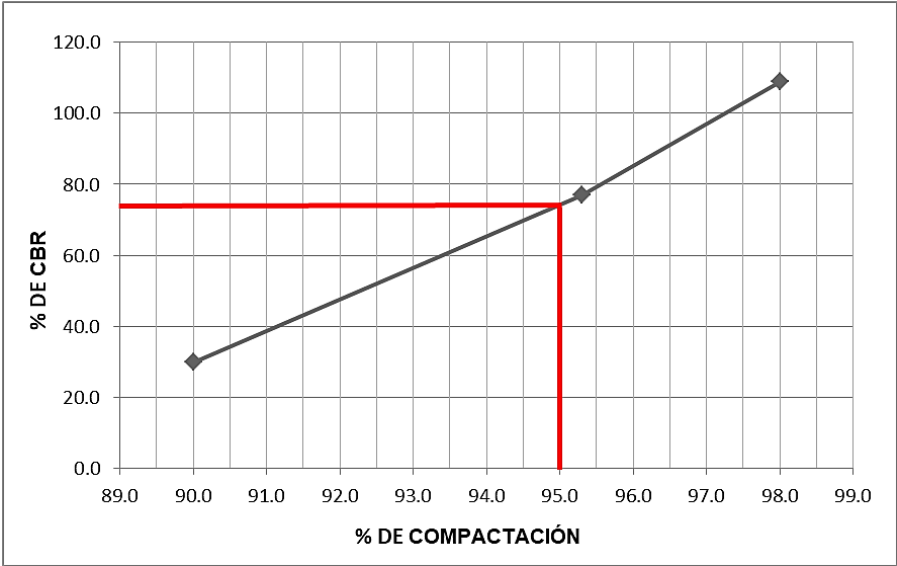
Figura 25. **Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra 2**



Fuente: elaboración propia.

De la gráfica mostrada en la figura 25 y por interpolación, se determina el porcentaje CBR al 95 % de compactación, que tiene un valor aproximado de 31 %.

Figura 26. **Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra 3**



Fuente: elaboración propia.

De la gráfica mostrada en la figura 26 y por interpolación, se determina el porcentaje CBR al 95 % de compactación, este tiene un valor aproximado de 74 %.

#### 4.1.2.6. Presentación de resultados

El resumen de resultados obtenidos para cada muestra de suelo, se presenta en las tablas siguientes.

Tabla XXI. **Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra 1**

Probeta No.	Golpes No.	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	γd (lb/pie <sup>3</sup> )			
1	65	14,65	93,32	96,2	0,15	105,03
2	30	14,65	88,70	91,4	0,33	64,21
3	10	14,65	84,86	87,5	2,42	13,94

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra 2**

Probeta No.	Golpes No.	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	γd (lb/pie <sup>3</sup> )			
1	65	20,62	83,34	98,3	2,03	76,89
2	30	20,62	80,90	95,5	2,44	32,44
3	10	20,62	76,51	90,3	4,36	13,94

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra 3**

Probeta No.	Golpes No.	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	γd (lb/pie <sup>3</sup> )			
1	65	20,54	89,73	98,0	1,94	108,81
2	30	20,54	87,29	95,3	1,94	76,89
3	10	20,54	82,42	90,0	1,90	29,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Porcentajes de CBR al 95 % de compactación**

<b>Muestra</b>	<b>%CBR</b>	<b>Clasificación general</b>
1	95	Excelente
2	31	Bueno
3	74	Excelente

Fuente: elaboración propia.

#### **4.1.2.7. Análisis de resultados**

Los porcentajes de CBR obtenidos fueron altos, por lo que el material se considera apto para ser empleado como subrasante de un pavimento. El valor de relación soporte de mayor magnitud fue el de la muestra 1, que alcanzó un valor de 95 %; el más bajo fue el de la muestra 2 (31 %), sin embargo el resultado de esta última no es confiable, porque se vio afectado por una humedad de ensayo significativamente mayor, a la humedad óptima calculada en el ensayo de compactación Proctor.

El problema principal de este ensayo radica en preparar en el laboratorio una muestra que tenga, prácticamente la misma densidad y humedad que se proyecta alcanzar en el sitio donde se construirá el pavimento. Los resultados obtenidos demuestran que se cuenta con materiales con capacidad de soporte alta, pero solo si se les proporciona la humedad óptima y si se alcanza el mismo grado de compactación con que fueron compactados en el laboratorio.

### **4.1.3. Límites de Atterberg**

Ensayo según norma AASHTO T-89 y T-90

#### **4.1.3.1. Resultados obtenidos**

Previo a iniciar los ensayos, por inspección visual se conjeturó que las muestras de suelo estaban conformadas predominantemente por arena y que por ende no tendrían cohesión. Para exponerlo se realizó la prueba de tenacidad. Se tomó una pequeña porción de cada muestra de suelo, se humedeció y se intentó moldear formando cilindros, sin embargo no se consiguió moldear el suelo, incluso variando su contenido de humedad. Cuando esto sucede no es posible determinar el límite plástico, por lo que se dice que el suelo es no plástico (N.P.), tomando como referencia los criterios de la tabla XXV.



Tabla XXV. **Criterios para describir la plasticidad**

Descripción	Criterios
No plástico	No pueden formarse rollos de 3 mm con ningún contenido de humedad.
Baja plasticidad	Difícilmente pueden formarse rollitos y terrones cuando está más seco que el límite plástico.
Media plasticidad	Es fácil de formar el rollito y pronto alcanza el límite plástico. No puede volverse a enrollar la misma muestra después de que alcanza el límite plástico. Los terrones se desmoronan cuando se secan por debajo del límite plástico.
Alta plasticidad	Toma considerable tiempo formar rollos y remodelarlos para alcanzar el límite plástico, pero puede volverse a enrollar varias veces la misma muestra, después de alcanzar el límite plástico. Pueden formarse terrones sin que se desmoronen cuando están más secos que el límite plástico.

Fuente: Instituto Nacional de Vías. *Descripción e identificación de suelos, procedimiento visual y manual*. p 19.

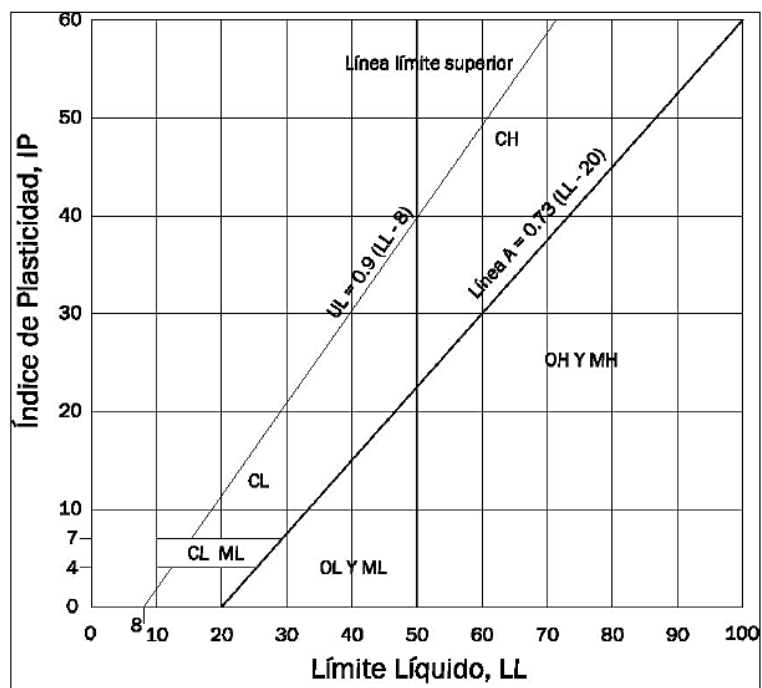
Tabla XXVI. **Clasificación de los suelos según su índice plástico (IP)**

Condición	Criterio
Si $IP = 0$	Si no es posible determinar uno de los dos límites (LL o LP), o si la diferencia es negativa (IP), el suelo se clasifica como no plástico (NP).
Si $IP < 7$	El suelo tiene una baja plasticidad.
Si $7 < IP < 17$	El suelo es medianamente plástico.
Si $IP > 17$	Suelo altamente plástico.

Fuente: BOWLES, Joseph. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. p 21.

Dependiendo de los límites de consistencia de las muestras de suelo y el porcentaje de finos contenido en ellas, se pueden clasificar de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación, como SM, cuya descripción es arena limosa. Ver tabla XXVII y figura 27.

Figura 27. **Carta de plasticidad**



Fuente: BOWLES, Joseph. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. p 75.

Tabla XXVII. Sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS

Divisiones mayores		Símbolo de grupo	Nombres típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares			
Suelos de grano grueso	Gravas (Si menos del 50 % de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino.	$C_u = D_{60} / D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60} < 3$			
		GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino.	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW.			
		GM	d/u	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $IP < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < IP < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo.	
		GC		Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcillosas.	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $IP > 7$		
	Arenas (Si más del 50 % de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.	$C_u = D_{60} / D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60} < 3$		
			SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW.		
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	SM	d/u	Arenas limosas, mezclas arena-limo.	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $IP < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 < IP < 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo.
			SC		Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $IP > 7$	
	Suelos de grano fino	Limos y arcillas (Limite Líquido < 50)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad.	1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva granulométrica. 2. Dependiendo del porcentaje de finos (fracción que pasa el tamiz No. 200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5 % - GW, GP, SW, SP Mas del 12 % - GM, GC, SM, SC De 5 a 12 % - Casos de frontera que requieren doble símbolo.		
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras.			
OL			Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.				
Limos y arcillas (Limite Líquido > 50)		MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatómicos, suelos elásticos.				
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.				
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.				
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos.				

Fuente: BOWLES, Joseph. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. p 74.

#### 4.1.3.2. Presentación de resultados

De acuerdo a los límites obtenidos para cada muestra de suelo, el suelo se clasifica como se indica en la tabla XXVIII.

Tabla XXVIII. Límites de Atterberg y clasificación del suelo

Muestra	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	Clasificación*	Descripción del suelo
1	N.P.	N.P.	N.P.	SM	Arena color café oscuro con presencia de pómez
2	N.P.	N.P.	N.P.	SM	Arena color café oscuro con presencia de pómez
3	N.P.	N.P.	N.P.	SM	Arena color café claro con presencia de pómez

\*Clasificación según carta de plasticidad.

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.3.3. Análisis de resultados

Los límites de consistencia y los índices de consistencia sirven principalmente para determinar separaciones marcadas entre distintos tipos de suelo y se basan en ellas, y en la granulometría para diferenciarlos. Las tres muestras analizadas coinciden en su clasificación SUCS como arena limosa (SM), ya que todas poseen menos del 50 % de finos y no tienen límites, por lo que se consideran suelos no plásticos. La carencia de plasticidad en el suelo es una ventaja, en cuanto a que la retención de agua es menor, lo que se traduce en una menor contracción de secado y una posibilidad nula de formación de grietas.

#### **4.1.4. Granulometría**

Ensayo según norma ASTM D 6913-04

##### **4.1.4.1. Equipo y material utilizado**

- Juego de tamices (3", 2", 1 ½", ¾", 3/8", No. 4, No. 10, No. 20, No. 40, No. 60, No. 100, No. 140 y No. 200 y fondo); de arriba hacia abajo en ese orden.
- Máquina tamizadora.
- Balanza de 20 kg de capacidad y aproximación de 1 g o una de 35 lb de capacidad y aproximación de 0,01 lb.
- Martillo, formón, cepillo.

##### **4.1.4.2. Procedimiento de ensayo**

- Se obtiene una muestra representativa del suelo (mayor a 500 g), se coloca en el horno para secar por completo.
- Se coloca la muestra de suelo seca en el tamiz No. 200 de lavado. Se lava cuidadosamente el material a través del tamiz, utilizando agua común, hasta que el agua que pasa a través del tamiz mantenga su transparencia.
- Se vierte cuidadosamente el residuo, con la ayuda de agua, en un recipiente de secado y se espera por un periodo de tiempo suficiente hasta lograr que el agua en la parte superficial de la suspensión se vuelva transparente. Se bota tanto como se pueda el agua contenida y se coloca el recipiente en el horno de secado.
- Al día siguiente, se pesa el residuo secado al horno (PBS). Se hace pasar la muestra a través de una serie de tamices que varíen desde los diámetros mayores hasta los diámetros menores en un agitador eléctrico automático.

Como el objetivo del ensayo es lograr una curva semilogarítmica del porcentaje de material más fino contra el tamaño de las partículas, será necesario que se obtenga una distribución razonable de puntos a lo largo del rango potencial de diámetros presentes en la muestra.

- Se retira la serie de tamices del agitador mecánico y se obtiene el peso del material que quedó retenido en cada tamiz. Se suman estos pesos y se compara el total con el peso obtenido en el paso cuatro (el residuo de material procedente del secado al horno con el cual se empezó). Esta operación permite detectar cualquier pérdida de suelo durante el proceso de tamizado mecánico. Si se tiene una pérdida de más del 2 % con respecto al peso original, se considera no satisfactorio.

Figura 28. **Serie de tamices con porciones de suelo retenido**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 29. **Obtención de pesos acumulados**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se calcula el porcentaje de cada tamiz dividiendo el peso retenido en cada uno de ellos por el peso de la muestra original obtenido en el primer paso, esto es válido ya que el material que haya pasado a través del matiz No. 200 pasaría cualquier otro por encima de la serie.
- Se calcula el porcentaje que pasa (o el porcentaje más fino), empezando por 100 % y se sustrae el porcentaje retenido en cada tamiz como un proceso acumulado.
- Se traza la curva granulométrica, colocando en el eje de las abscisas en escala semilogarítmica el diámetro en milímetros y en el eje de las ordenadas en escala aritmética el porcentaje que pasa.

#### 4.1.4.3. Datos obtenidos

Para la muestra 1 se obtuvo los siguientes datos, previo al lavado con el tamiz No. 200:

Peso bruto seco (PBS)= 800,00 g

Tara = 220,08 g

Los datos obtenidos después del lavado de la muestra 1 fueron los siguientes:

Peso bruto seco (PBS)= 696,19 g

Tara = 220,08 g

Tabla XXIX. **Datos obtenidos del ensayo de granulometría para muestra 1**

Tamiz	Abertura	Peso bruto que pasa [g]	Tara [g]
3"	75 mm	800,00	220,08
2"	50 mm	800,00	220,08
1 1/2"	37.5 mm	800,00	220,08
1"	25 mm	766,60	220,08
3/4"	19.0 mm	755,23	220,08
3/8"	9.5 mm	734,12	220,08
4	4.75 mm	722,93	220,08
10	2.00 mm	643,65	220,08
20	850 mm	552,66	220,08
40	425 mm	458,72	220,08
60	250 mm	401,31	220,08
100	150 mm	365,23	220,08
140	106 mm	337,92	220,08
200	75 mm	323,89	220,08

Fuente: elaboración propia.



#### 4.1.4.4. Cálculos efectuados

Posterior a obtener los pesos que pasan por cada tamiz, se procede a calcular los porcentajes que pasan por cada uno, respecto al peso total de la muestra. Debido a que el cálculo es el mismo para cada muestra, solo se tomará de referencia la muestra 1 y las demás se determinan de la misma manera.

- Peso neto seco previo al lavado:

$$PNS = PBS - Tara$$
$$PNS = 800,00 \text{ g} - 220,08 \text{ g} = 579,92 \text{ g}$$

- Peso neto seco posterior al lavado:

$$PNS = PBS - Tara$$
$$PNS = 696,19 \text{ g} - 220,08 \text{ g} = 476,11 \text{ g}$$

- Porcentaje que pasa el tamiz No. 200:

$$\% \text{ que pasa por tamiz No. 200} = \frac{PNS_{\text{previo al lavado}} - PNS_{\text{posterior al lavado}}}{PNS_{\text{previo al lavado}}} \times 100$$
$$\% \text{ que pasa por tamiz No. 200} = \frac{579,92 \text{ g} - 476,11 \text{ g}}{579,92 \text{ g}} \times 100 = 17,90$$

- Porcentaje que pasa por cada tamiz:

$$\% \text{ que pasa por tamiz} = \frac{\text{Peso que pasa tamiz No. 200} + \text{Peso acumulado}}{PNS_{\text{previo al lavado}}} \times 100$$

$$\% \text{ que pasa por tamiz No. 140} = \frac{103,81 \text{ g} + 14,03 \text{ g}}{579,92 \text{ g}} \times 100 = 20,32$$

$$\% \text{ que pasa por tamiz No. 100} = \frac{103,81 \text{ g} + 41,34 \text{ g}}{579,92 \text{ g}} \times 100 = 25,03$$

$$\% \text{ que pasa por tamiz No. 60} = \frac{103,81 \text{ g} + 77,42 \text{ g}}{579,92 \text{ g}} \times 100 = 31,25$$

Se efectúa el mismo cálculo con cada tamiz, hasta llegar al de mayor abertura, obteniendo los datos de la tabla XXX.

Tabla XXX. **Porcentajes de muestra 1 que pasan por cada tamiz**

Tamiz	Abertura	Peso bruto [g]	Tara [g]	Peso neto [g]	Porcentaje que pasa
3"	75 mm	800,00	220,08	579,92	100,00
2"	50 mm	800,00	220,08	579,92	100,00
1 1/2"	37,5 mm	800,00	220,08	579,92	100,00
1"	25 mm	766,60	220,08	546,52	94,24
3/4"	19,0 mm	755,23	220,08	535,15	92,28
3/8"	9,5 mm	734,12	220,08	514,04	88,64
4	4,75 mm	722,93	220,08	502,85	86,71
10	2,00 mm	643,65	220,08	423,57	73,04
20	850 mm	552,66	220,08	332,58	57,35
40	425 mm	458,72	220,08	238,64	41,15
60	250 mm	401,31	220,08	181,23	31,25
100	150 mm	365,23	220,08	145,15	25,03
140	106 mm	337,92	220,08	117,84	20,32
200	75 mm	323,89	220,08	103,81	17,90

Fuente: elaboración propia.

- Porcentajes de materiales contenidos en la muestra:

$$\% \text{ de grava} = 100 - \% \text{ que pasa tamiz No. 4}$$

$$\% \text{ de grava} = 100 - 86,71 = 13,29$$

$\% \text{ de arena} = \% \text{ que pasa tamiz No. 4} - \% \text{ que pasa tamiz No. 200}$

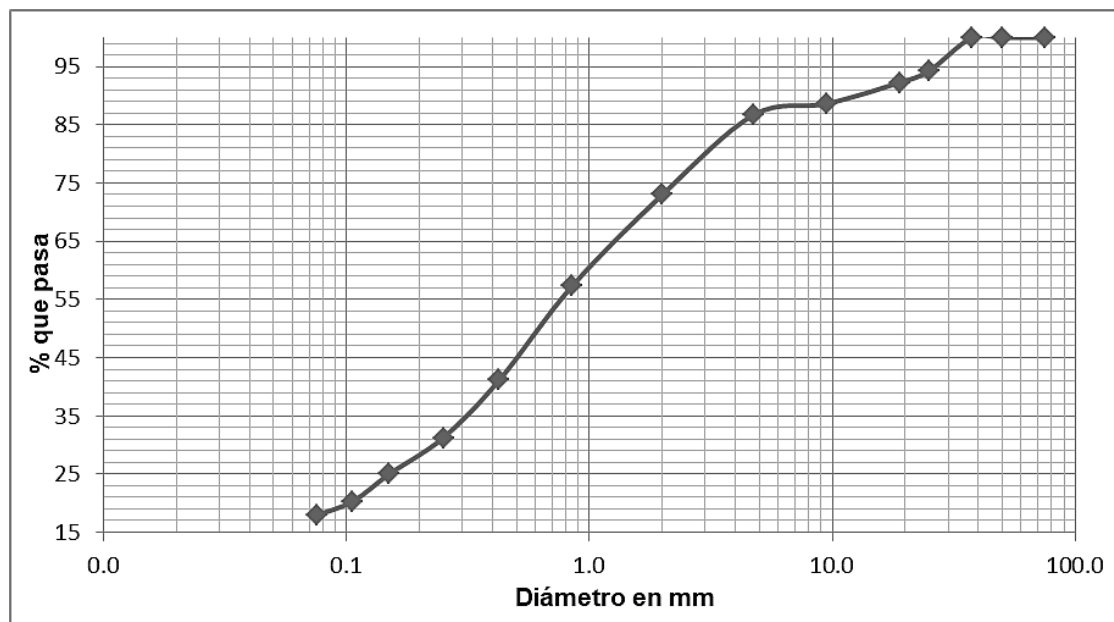
$\% \text{ de arena} = 86,71 - 17,90 = 68,81$

$\% \text{ de finos} = \% \text{ que pasa tamiz No. 200}$

$\% \text{ de finos} = 17,90$

- Se traza una gráfica con las aberturas de los tamices en mm en el eje de las abscisas, y los porcentajes de partículas que pasan, en las ordenadas, obteniendo cada punto de la tabla XXX.

Figura 30. **Curva de distribución granulométrica de muestra 1**



Fuente: elaboración propia.

- A partir de la curva de distribución se obtienen los diámetros característicos  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  y  $D_{60}$ , donde D es el tamaño del grano o diámetro aparente y el subíndice (10, 30 y 60) denota el porcentaje de material más fino.

$D_{10} = \text{Diámetro efectivo no aplica.}$

$D_{30} = 0,25 \text{ mm}$

$D_{60} = 0,95 \text{ mm}$

#### 4.1.4.5. Resultados obtenidos

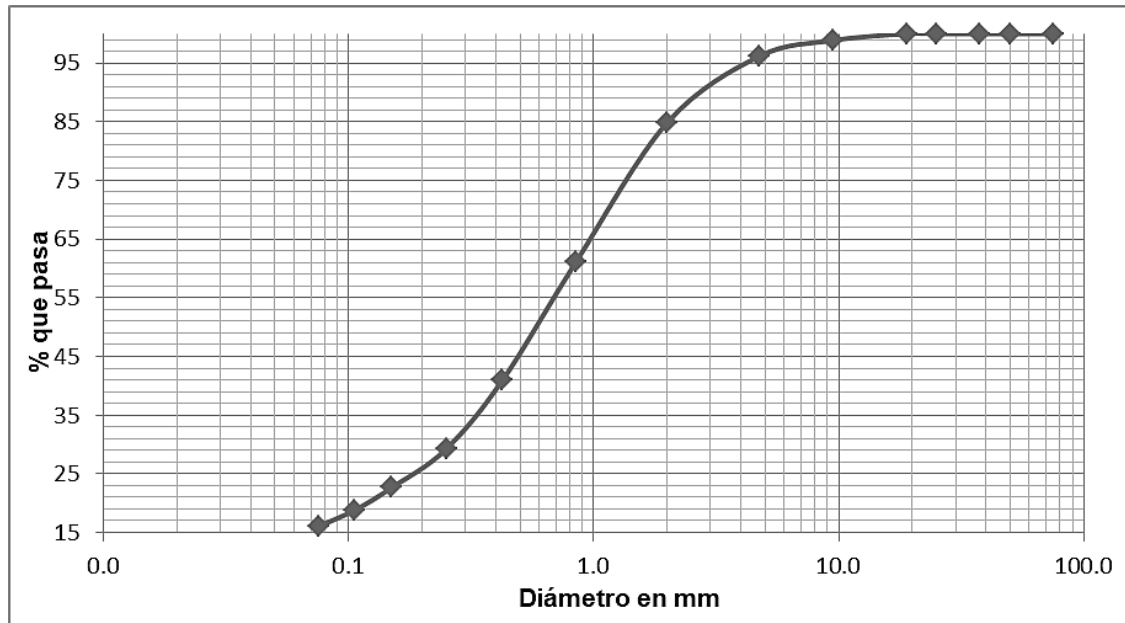
Los resultados obtenidos para las muestras 2 y 3, se presentan en las tablas y gráficas siguientes.

Tabla XXXI. **Porcentajes de muestra 2 que pasan por cada tamiz**

Tamiz	Abertura	Peso bruto [g]	Tara [g]	Peso neto [g]	Porcentaje que pasa
3"	75 mm	800,00	217,11	582,89	100,00
2"	50 mm	800,00	217,11	582,89	100,00
1 1/2"	37,5 mm	800,00	217,11	582,89	100,00
1"	25 mm	800,00	217,11	582,89	100,00
3/4"	19,0 mm	800,00	217,11	582,89	100,00
3/8"	9,5 mm	793,47	217,11	576,36	98,88
4	4,75 mm	777,73	217,11	560,62	96,18
10	2,00 mm	712,10	217,11	494,99	84,92
20	850 mm	574,07	217,11	356,96	61,24
40	425 mm	456,21	217,11	239,10	41,02
60	250 mm	387,49	217,11	170,38	29,23
100	150 mm	349,31	217,11	132,20	22,68
140	106 mm	326,87	217,11	109,76	18,83
200	75 mm	310,49	217,11	93,38	16,02

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Curva de distribución granulométrica de muestra 2



Fuente: elaboración propia.

% de grava = 3,82  
% de arena = 80,16  
% de finos = 16,02

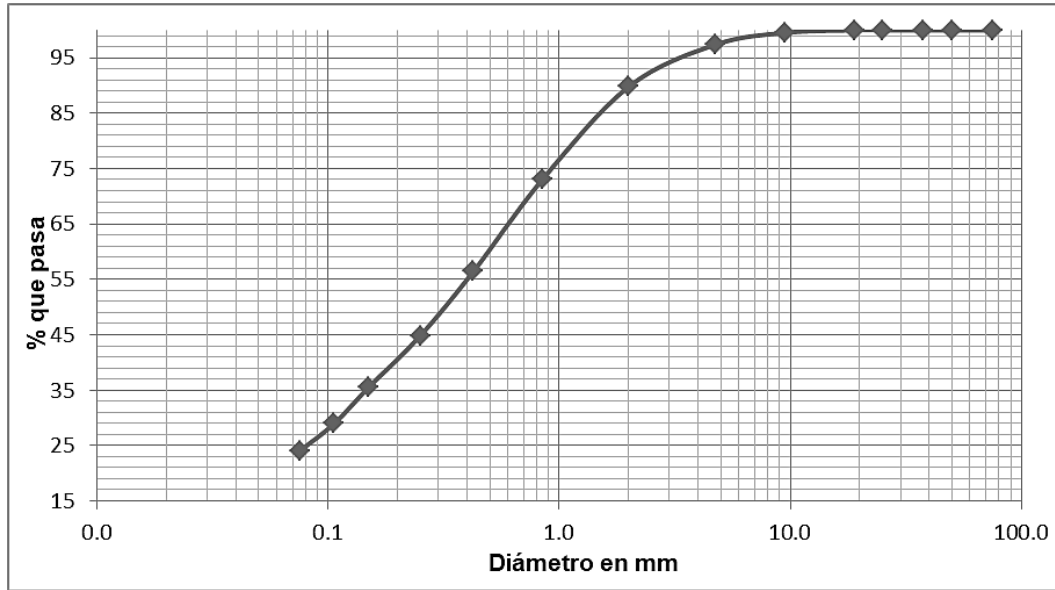
$D_{10}$  = Diametro efectivo no aplica.  
 $D_{30}$  = 0,25 mm  
 $D_{60}$  = 0,80 mm

Tabla XXXII. **Porcentajes de muestra 3 que pasan por cada tamiz**

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura</b>	<b>Peso bruto [g]</b>	<b>Tara [g]</b>	<b>Peso neto [g]</b>	<b>Porcentaje que pasa</b>
3"	75 mm	800,00	220,84	579,16	100,00
2"	50 mm	800,00	220,84	579,16	100,00
1 1/2"	37,5 mm	800,00	220,84	579,16	100,00
1"	25 mm	800,00	220,84	579,16	100,00
3/4"	19,0 mm	800,00	220,84	579,16	100,00
3/8"	9,5 mm	797,22	220,84	576,38	99,52
4	4,75 mm	784,88	220,84	564,04	97,39
10	2,00 mm	741,04	220,84	520,20	89,82
20	850 mm	644,61	220,84	423,77	73,17
40	425 mm	547,78	220,84	326,94	56,45
60	250 mm	480,36	220,84	259,52	44,81
100	150 mm	426,91	220,84	206,07	35,58
140	106 mm	388,62	220,84	167,78	28,97
200	75 mm	359,78	220,84	138,94	23,99

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Curva de distribución granulométrica de muestra 3



Fuente: elaboración propia.

% de grava = 2,61	$D_{10}$ = Diametro efectivo no aplica.
% de arena = 73,40	$D_{30}$ = 0,12 mm
% de finos = 23,99	$D_{60}$ = 0,49 mm

- Clasificación del suelo, ejemplificada con la muestra 1:
  - Según sistema de clasificación AASHTO
 

De acuerdo a la tabla XXXIII, sistema de clasificación AASHTO, se tiene que el porcentaje que pasa el tamiz No. 200 es 17,90, se ubica en el grupo de suelos granulares (35 % o menos pasa el tamiz No. 200). Dado que no presentan propiedades plásticas se busca entre los grupos A-1 y A-3. Por lo tanto, se realiza el criterio por tamices. El porcentaje que pasa el tamiz No. 40 es 41,15 < 50, y el porcentaje que pasa el tamiz No. 200 es 17,90 < 30, por lo que

se encuentra en el subgrupo A-1-b. El índice de grupo para este suelo es cero.

Entonces la clasificación para el suelo de la muestra 1, arena limosa color café oscuro, es: A-1-b, fragmentos de piedra, grava y arena. De calidad excelente a buena para subrasante.

- Según sistema unificado de clasificación de los suelos.  
De acuerdo con la tabla XXVII, sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS, se tiene que el porcentaje que pasa el tamiz No. 200 es  $17,90 < 50$ ; se ubica en los suelos de grano grueso. El porcentaje que pasa el tamiz No. 4 es de  $86,71 > 50$ ; se ubica en el grupo de arenas. Dado el porcentaje que pasa el tamiz No. 200, se considera una arena con finos; por lo tanto, se ubica en entre las categorías SM o SC. Según los criterios de clasificación para suelos granulares para arenas con finos SM se debe cumplir:  $IP < 4$ , condición que se cumple, dado que el suelo que se analiza posee un  $IP=0$ .

La clasificación según el SUCS es entonces SM, arena limosa.



Tabla XXXIII. Sistema de clasificación AASHTO

GRUPO SUB-GRUPO	Suelos Granulares: 35 % o menos pasa malla No. 200						Suelos Arcillosos y Limosos: Mas de 35 % pasa malla No. 200					
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	A-7-5* A-7-6*
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					
Porcentaje de material que pasa el tamiz												
No. 10	50 máx											
No. 40	30 máx	50 máx	51 mín									
No. 200	15 máx	30 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Plasticidad pasa el tamiz No. 40												
LL												
IP	6 máx		NP					40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	41 mín
Índice de Grupo**	0	0	0	0	0	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx		
Materiales constructivos	Fragmentos de piedra, grava y arena	Arena Fina	Grava y/o Arena limosa	Grava y/o Arena arcillosa	Suelos Limosos	Suelos Arcillosos						
Calidad (Subrasante)	Excelente a Buena						Regular a Mala					

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

\*\* Índice de Grupo = IG = (F200 - 35)[0,2 + 0,005 (LL-40)] + 0,01 (F200 - 15) x (IP - 10)

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

#### 4.1.4.6. Presentación de resultados

Tabla XXXIV. **Análisis granulométrico por tamizado de muestra 1**

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100,00	10	2,00 mm	73,04
2"	50 mm	100,00	20	850 mm	57,35
1 1/2"	37,5 mm	100,00	40	425 mm	41,15
1"	25 mm	94,24	60	250 mm	31,25
3/4"	19,0 mm	92,28	100	150 mm	25,03
3/8"	9,5 mm	88,64	140	106 mm	20,32
4	4,75 mm	86,71	200	75 mm	17,90

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Análisis granulométrico por tamizado de muestra 2**

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100,00	10	2,00 mm	84,92
2"	50 mm	100,00	20	850 mm	61,24
1 1/2"	37,5 mm	100,00	40	425 mm	41,02
1"	25 mm	100,00	60	250 mm	29,23
3/4"	19,0 mm	100,00	100	150 mm	22,68
3/8"	9,5 mm	98,88	140	106 mm	18,83
4	4,75 mm	96,18	200	75 mm	16,02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Análisis granulométrico por tamizado de muestra 3**

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100,00	10	2,00 mm	89,82
2"	50 mm	100,00	20	850 mm	73,17
1 1/2"	37,5 mm	100,00	40	425 mm	56,45
1"	25 mm	100,00	60	250 mm	44,81
3/4"	19,0 mm	100,00	100	150 mm	35,58
3/8"	9,5 mm	99,52	140	106 mm	28,97
4	4,75 mm	97,39	200	75 mm	23,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Porcentajes de materiales contenidos en las muestras**

Muestra	Porcentajes		
	Gravas	Arenas	Finos
1	13,29	68,81	17,90
2	3,82	80,16	16,02
3	2,61	73,40	23,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Clasificación del suelo**

Muestra	Clasificación	
	S.C.U.	AASHTO
1	SM	A-1-b
2	SM	A-1-b
3	SM	A-2-4

Fuente: elaboración propia.

#### **4.1.4.7. Análisis de resultados**

Según el análisis granulométrico por tamices, se determinó que la clasificación de las tres muestras de suelo, en el sistema unificado corresponde a arenas limosas. Todas las muestras exponen contenidos similares de gravas, arenas y finos. La clasificación de las muestras 1 y 2 según AASHTO es A-1-b, y de la muestra 3 es A-2-4, pertenecientes a suelos granulares y de calidad excelente a buena para subrasante.

#### **4.2. Ensayos para elaborar propuesta de pavimento**

Para elaborar la propuesta de pavimento se realiza el ensayo de pH, compactación Proctor estándar, razón soporte California CBR, compresión no confinada y permeabilidad.

##### **4.2.1. Determinación de pH (ensayo de Eades y Grim)**

Ensayo según norma ASTM D6276

##### **4.2.1.1. Equipo y material utilizado**

- Balanza de 3 escalas de 0,01 g de aproximación
- Tamiz No. 40
- Frascos con tapa roscada
- Potenciómetro o papel pH

#### 4.2.1.2. Procedimiento de ensayo

- Se toma una muestra de suelo de aproximadamente 2 kg y se seca
- Se tamiza la muestra con una malla No. 40 (425 micras), procurando deshacer todos los grumos manualmente para hacer pasar todo el material a través de la malla.
- Se pesa una serie de muestras de 20 g cada una y se colocan en frascos individuales con tapa roscada.
- Se pesan por separado una serie de muestras de cal equivalentes al 1, 2, 3, y 4 % del peso de la muestra de suelo.
- Se adiciona a cada uno de los frascos una de las muestras de cal y se marca cada frasco con la cantidad adicionada, como en la figura 33.

Figura 33. **Identificación de muestras de suelo modificado con cal**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se mezcla perfectamente las muestras de suelo y cal en los frascos.
- Se agrega 100 ml de agua destilada a cada uno de los frascos, se cierra perfectamente cada frasco y se agita vigorosamente cada 15 a 20 minutos, durante 1 hora.

- Posteriormente se medirá el pH de la solución obtenida, con ayuda de un potenciómetro o papel pH (con escala 1-14).
- La mezcla que produzca como resultado un pH de 12,4, indicará el porcentaje de cal que habrá de ser adicionado al suelo para lograr una estabilización completa. Si dos mezclas presentan resultados iguales de 12,4, se considerará como referencia el porcentaje de adición menor.

#### 4.2.1.3. Resultados obtenidos

El potencial de hidrógeno de cada muestra de suelo-cal se obtuvo de acuerdo al color indicado en el papel pH.

Figura 34. **Determinación de pH de muestra de suelo sin cal**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 35. **Determinación de pH de muestra de suelo con 1 % de cal**



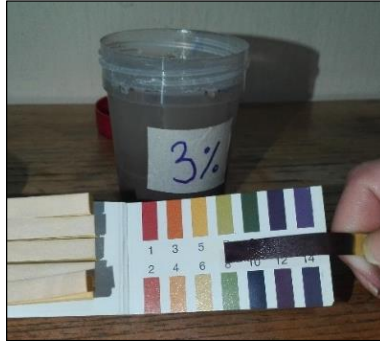
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 36. **Determinación de pH de muestra de suelo con 2 % de cal**



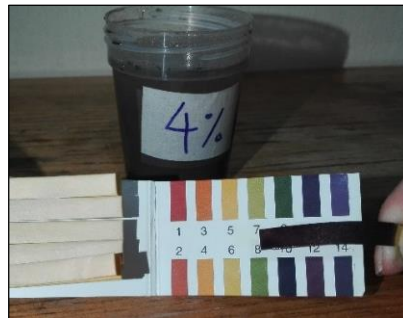
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 37. **Determinación de pH de muestra de suelo con 3 % de cal**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 38. **Determinación de pH de muestra de suelo con 4 % de cal**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.



#### 4.2.1.4. Presentación de resultados

De acuerdo a los colores indicados por el papel pH en cada muestra de suelo-cal, se obtienen los valores de pH mostrados en la tabla XXXIX.

Tabla XXXIX. Niveles de pH de muestras de suelo

Muestra No.	Descripción	Nivel de pH
1	Arena limosa color café.	7
2	Arena limosa color café + 1 % de cal.	8
3	Arena limosa color café + 2 % de cal.	10
4	Arena limosa color café + 3 % de cal.	12
5	Arena limosa color café + 4 % de cal.	12

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1.5. Análisis de resultados

El ensayo de determinación de pH estableció que el mínimo porcentaje de cal que satisface la capacidad de intercambio catiónico del suelo y que es absorbido por el mismo, es de 3 %. Las muestras 4 y 5, con 3 y 4 % de cal respectivamente, presentaron el mismo resultado de pH, situado en la escala entre 12 y 13, el ensayo buscaba obtener un valor de pH de 12,4. Se toma como ideal el menor porcentaje de cal en cumplir con la condición, y la mezcla suelo-cal óptima es la que contiene 3 % de cal.

## **4.2.2. Compactación Proctor estándar**

Ensayo según norma AASHTO T-99

### **4.2.2.1. Equipo y material utilizado**

- Cilindro Proctor de compactación de 4 in
- Martillo de compactación de 5,5 lb de peso y 12 in de caída.
- Tamiz No. 4.
- Balanza de 20 kg de capacidad y aproximación de 1 g.
- Balanza de 3 escalas de 0,01 g de aproximación.
- Horno con capacidad de mantener una temperatura de 110°C con aproximación de 5°C.
- Tarros metálicos para determinación de humedad.
- Espátula, cucharón para mezclar, rodillo, regla de acero de 12 in.

### **4.2.2.2. Procedimiento de ensayo**

- Se debe secar al aire o en un horno a 60°C, una muestra de aproximadamente 25 kg de material.
- Se toman 3 kg de suelo, pulverizado lo suficiente para pasar a través del tamiz No. 4.
- Para las muestras tratadas con cal, se calcula la cantidad a agregar de acuerdo al porcentaje respecto al peso de la muestra. (Si es 1 %, se agrega 30 g de cal, si es 3 %; 90 g). Se debe mezclar hasta obtener una composición uniforme.
- Se mezcla la cantidad de agua necesaria para hacer el incremento de humedad, amasando a fondo la muestra para formar una mezcla uniformemente húmeda.

- Se divide la mezcla húmeda en tres porciones iguales aproximadamente.
- Se pesa el molde de compactación (tara) en la balanza de 20 kg, sin el collarín. Posteriormente se coloca el collarín al molde y se sitúa sobre un apoyo firme.
- Se coloca una porción de suelo en el molde, nivelando la superficie con la mano o con el martillo de compactación.
- Se asienta el martillo de compactación dentro del molde y se eleva sobre el mango hasta que el pistón alcanza la parte superior de la guía, se suelta permitiendo que este caiga libremente sobre la muestra, sin someterlo a algún impulso adicional con la mano.
- Se repite el paso anterior, cubriendo sistemáticamente la superficie de la muestra, hasta completar 25 golpes para cada capa de suelo (3 capas en total).
- Se retira el collarín y con la regla se enrasa la superficie del molde de compactación.
- Se quita el exceso de material que haya quedado fuera del molde y se procede a tomar su peso en la balanza de 20 kg, dato que se denomina PBH (peso bruto húmedo).
- Para verificar el contenido de humedad, se toman dos muestras de 10 a 25 g cada una en los tarros metálicos, se toman los pesos (pbh) y se colocan en el horno por 24 horas, luego se vuelven a tomar los pesos (pbs).
- Se repite el procedimiento anterior para otra porción de suelo, agregando aproximadamente del dos al tres por ciento más de humedad a la muestra.
- En ensayo se detiene cuando al pesar la muestra compactada se muestre un decremento en relación al aumento del contenido de humedad.

#### 4.2.2.3. Datos obtenidos

Para la muestra de suelo sin cal, del ensayo de compactación se obtuvieron los datos de la tabla XL.

Tabla XL. **Datos obtenidos del ensayo Proctor estándar para muestra de suelo sin cal**

Punto de humedad	1		2		3		4	
PBH [kg]	5,80		5,92		6,04		6,04	
TARA [kg]	4,50		4,50		4,50		4,50	
Tarro	A-10	C-32	A-21	C-28	E-10	D-2	B-1	C-18
pbh [g]	230,15	245,02	215,62	213,36	241,01	229,80	230,49	225,40
pbs [g]	203,02	214,97	184,77	181,91	196,23	188,92	180,09	176,58
tara [g]	45,83	44,25	45,86	46,49	42,65	45,87	43,99	45,07

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.4. Cálculos efectuados

Posterior a realizar el ensayo, se procede a calcular los parámetros descritos en la tabla II, los parámetros de Proctor modificado son equivalentes a los parámetros de este ensayo. Debido a que el cálculo es el mismo para cada punto de humedad, solo se tomará de referencia el primer punto y los siguientes se determinan de la misma manera, obteniendo así los datos de la tabla XLI para la muestra de suelo sin cal. Se realiza el mismo procedimiento para las muestras de suelo adicionadas con cal.

$$PBH = 5,80 \text{ kg}$$

$$Tara = 4,50 \text{ kg}$$

$$PNH = 5,80 \text{ kg} - 4,50 \text{ kg} = 1,30 \text{ kg}$$

$$PUH = \frac{(1,30 \text{ kg})(2,205 \text{ lb}/1 \text{ kg})}{1/30 \text{ pie}^3} = 86,00 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

#### Tarro A-10

$$Dif = 230,15 \text{ g} - 203,02 \text{ g} = 27,13$$

$$pns = 203,02 \text{ g} - 45,83 \text{ g} = 157,19 \text{ g}$$

$$\%H = \left( \frac{27,13 \text{ g}}{157,19 \text{ g}} \right) \times 100 = 17,26$$

#### Tarro C-32

$$Dif = 245,02 \text{ g} - 214,97 \text{ g} = 30,05$$

$$pns = 214,97 \text{ g} - 44,25 \text{ g} = 170,72 \text{ g}$$

$$\%H = \left( \frac{30,05 \text{ g}}{170,72 \text{ g}} \right) \times 100 = 17,60$$

$$\%H_{promedio} = \frac{(17,26 \% + 17,60 \%)}{2} = 17,43$$

$$PUS = \frac{86,00 \text{ lb}/\text{pie}^3}{100 + 17,43} \times 100 = 73,23 \text{ lb}/\text{pie}^3$$

Tabla XLI. **Resumen de cálculos de porcentajes de humedad promedio y densidad unitaria seca de muestra de suelo sin cal**

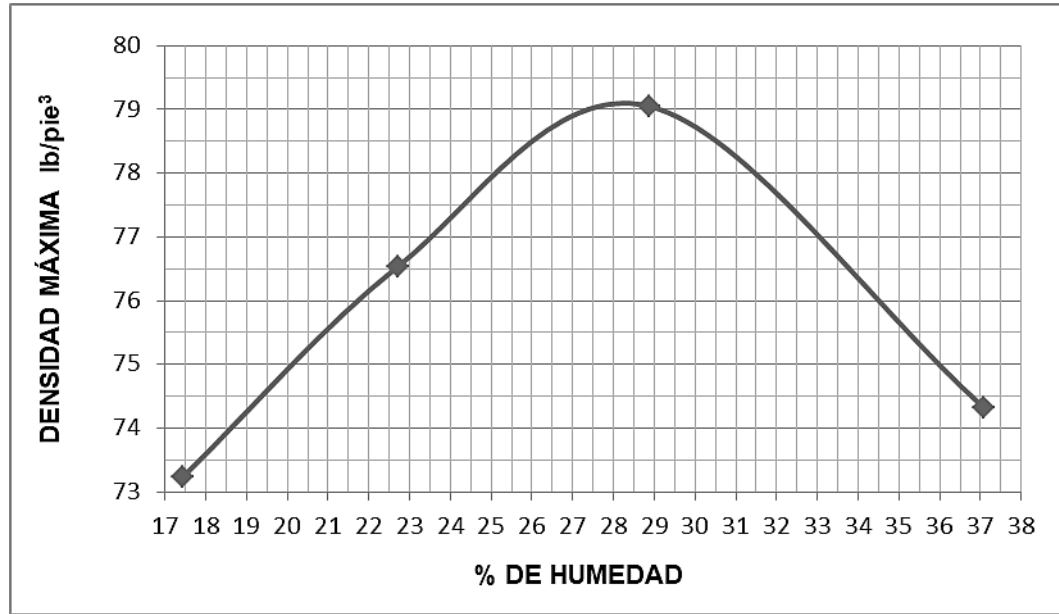
Punto de humedad	1		2		3		4	
PBH [kg]	5,80		5,92		6,04		6,04	
TARA [kg]	4,50		4,50		4,50		4,50	
PNH [kg]	1,30		1,42		1,54		1,54	
PUH [lb/pie <sup>3</sup> ]	86,00		93,93		101,87		101,87	
TARRO	A-10	C-32	A-21	C-28	E-10	D-2	B-1	C-18
pbh [g]	230,15	245,02	215,62	213,36	241,01	229,80	230,49	225,40
pbs [g]	203,02	214,97	184,77	181,91	196,23	188,92	180,09	176,58
Tara [g]	45,83	44,25	45,86	46,49	42,65	45,87	43,99	45,07
Dif [g]	27,13	30,05	30,85	31,45	44,78	40,88	50,40	48,82
pns [g]	157,19	170,72	138,91	135,42	153,58	143,05	136,10	131,51
% H	17,26	17,60	22,21	23,22	29,16	28,58	37,03	37,12
% H promedio	17,43		22,72		28,87		37,08	
PUS [lb/pie <sup>3</sup> ]	73,23		76,54		79,05		74,32	

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.5. Resultados obtenidos

Se ubica en el eje de las abscisas el contenido de humedad promedio ( $%H_{promedio}$ ) y en el eje de las ordenadas la densidad seca (PUS). Se localiza cada uno de los puntos de humedad con su respectiva densidad seca y se unen trazando una curva parabólica, en esta se determina la cresta y los puntos PUS máximo y el %H óptimo.

Figura 39. **Gráfica densidad seca – humedad de muestra de suelo sin cal**



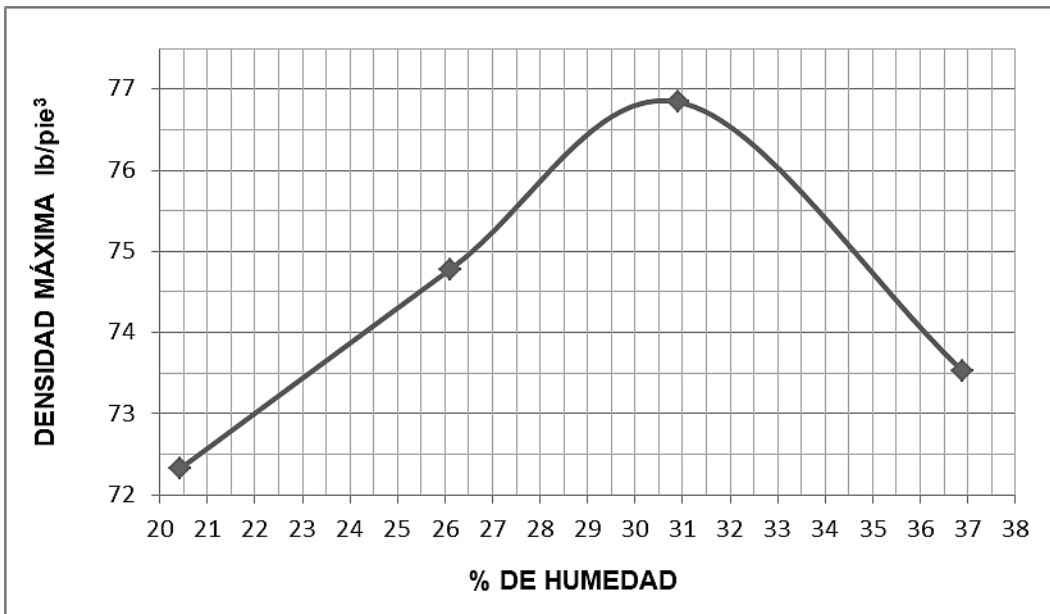
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Resumen de resultados de ensayo Proctor estándar muestra de suelo sin cal**

Punto de humedad	1	2	3	4
% H promedio	17,43	22,72	28,87	37,08
PUS [lb/pe <sup>3</sup> ]	73,23	76,54	79,05	74,32
Densidad seca máxima	<b>79,10 lb/pe<sup>3</sup></b>			
Humedad óptima	<b>28,30 %</b>			

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Gráfica densidad seca – humedad de muestra de suelo + 1 % de cal**



Fuente: elaboración propia.

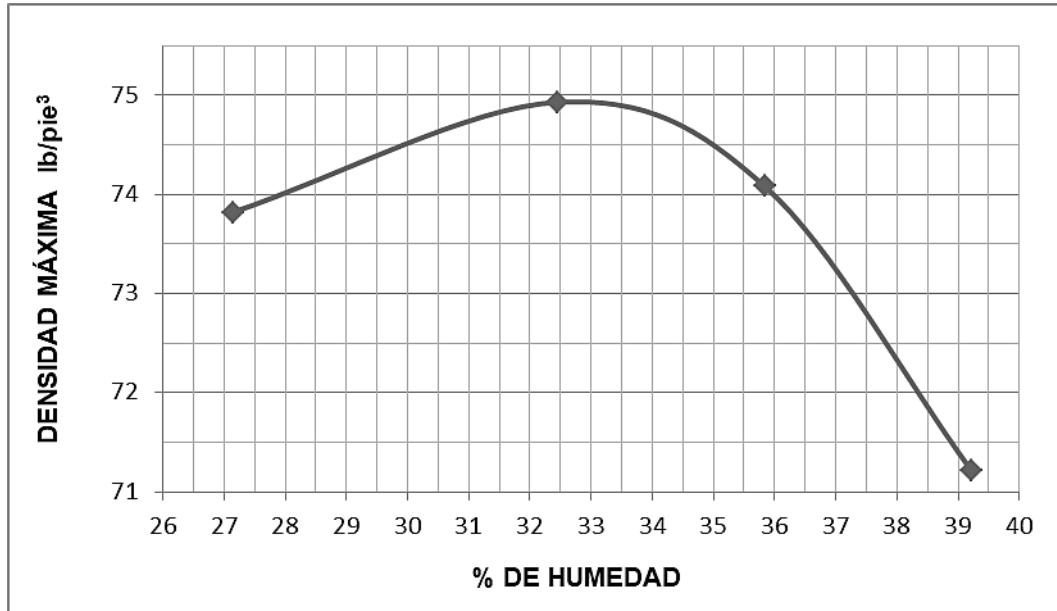
Tabla XLIII. **Resumen de resultados de ensayo Proctor estándar de muestra de suelo + 1 % de cal**

Punto de humedad	1	2	3	4
% H promedio	20,44	26,11	30,92	36,90
PUS [lb/pe³]	72,33	74,78	76,84	73,52
Densidad seca máxima	<b>76,95 lb/pe³</b>			
Humedad óptima	<b>30,05 %</b>			

Fuente: elaboración propia.



Figura 41. **Gráfica densidad seca – humedad de muestra de suelo + 3 % de cal**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Resumen de resultados de ensayo Proctor estándar de muestra de suelo + 3 % de cal**

Punto de humedad	1	2	3	4
% H promedio	27,14	32,46	35,84	39,21
PUS [lb/pe <sup>3</sup> ]	73,82	74,93	74,08	71,22
Densidad seca máxima	<b>74,95 lb/pe<sup>3</sup></b>			
Humedad óptima	<b>32,90 %</b>			

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.6. Presentación de resultados

Las densidades máximas obtenidas para cada muestra de suelo se presentan en la tabla XLV.

Tabla XLV. **Resultados del ensayo Proctor estándar**

Muestra	Descripción	Porcentaje de humedad óptima	Densidad seca máxima	
			[lb/pie <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	Suelo sin cal	28,30	79,10	1267,18
2	Suelo + 1 % de cal	30,05	76,95	1232,74
3	Suelo + 3 % de cal	32,90	74,95	1200,70

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.7. Análisis de resultados

Las muestras de suelo ensayadas presentaron resultados similares en cuanto a sus densidades máximas, siendo la muestra sin contenido de cal la que alcanzó el dato más alto (79.10 lb/pie<sup>3</sup>). La reacción entre el suelo y la cal produce una alteración de la relación densidad máxima-humedad óptima, que es dependiente del suelo, del tiempo de curado y de la cantidad de cal agregada.

Mientras mayor es la proporción de cal agregada al suelo, mayor es la humedad óptima del mismo y menor la densidad máxima. Este comportamiento de los suelos se debe a que la cal absorbe más humedad y a que su densidad es menor a la densidad del suelo.

Lo anterior se ve reflejado en los resultados obtenidos, siendo la muestra con mayor contenido de cal (3 %), la que presentó la densidad máxima de menor magnitud (74,95 lb/pie<sup>3</sup>) y el contenido de humedad óptimo, mayor (32,90 %).

El ensayo de compactación Proctor estándar se emplea ya que su energía de compactación es menor a la del ensayo de compactación Proctor modificado, y se asemeja más a las condiciones de compactación manual que se practican en campo.

#### **4.2.3. Razón soporte California CBR**

Ensayo según norma AASHTO T-193

##### **4.2.3.1. Equipo y material utilizado**

Se emplea el mismo material y equipo que el utilizado en la sección 4.1.2.1., con la única diferencia de que el martillo de compactación es de 5,5 lb de peso y 12 in de caída, esto debido a que las probetas para el ensayo CBR deben ser compactadas con la misma energía que en el ensayo de compactación Proctor.

##### **4.2.3.2. Procedimiento de ensayo**

- Se calcula el agua a agregar, partiendo de la humedad óptima obtenida en el ensayo compactación Proctor estándar.

$$\frac{(\%H_{\text{óptimo}} - \%H_{\text{actual}})(\text{Peso del material en g})}{100 + \%H_{\text{actual}}} = [cm^3]$$

- Se pesan 15 kg de material, tamizado por el mismo diámetro que se utilizó en el ensayo de compactación Proctor.
- Se identifican los tres cilindros a utilizar y se pesa cada uno sin collarín.
- Se preparan los cilindros colocando el espaciador y los filtros (filtro de malla y papel filtro).
- Para las muestras tratadas con cal, se calcula la cantidad a agregar de acuerdo al porcentaje respecto al peso de la muestra (si es 1 %, se agrega 150 g de cal, si es 3 %; 450 g). Se debe mezclar hasta obtener una composición uniforme.

Figura 42. **Muestra tratada con 1 % de cal, previo a mezclarse**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se agrega la cantidad de agua, calculada previamente, al material, distribuyéndola uniformemente.
- Se compacta cada muestra con 3 capas de material.
- Cada cilindro se compacta con distinta energía de compactación, siendo esta, 65, 30 y 10 golpes por cada capa, respectivamente.

- Después de compactar el material en cada cilindro, se retira el collarín, se engrasa cada probeta y se les colocan filtros.
- Se toma el peso de cada cilindro con material compactado.
- Se coloca de nuevo el collarín, se introduce la placa metálica perforada provista del vástago regulable, así como las sobrecargas con un peso mínimo de 10 lb.
- Se calibra la expansión a través del trípode, que se instala con el comparador de dial, de tal modo que su punta palpable quede tocando el vástago.
- Se sumergen las probetas ya calibradas en el estanque con agua hasta lograr una saturación completa del material. Para un ensayo de saturación normal se deja el molde sumergido durante 96 horas, cada día se mide la deformación (expansión o contracción) que sufre cada probeta.
- Una vez transcurrido el tiempo de saturación, se sacan las probetas y se dejan drenar durante 15 minutos.
- Después de drenadas se llevan las probetas a la máquina de ensayo para determinar la resistencia a la penetración.
- Se apoya el pistón de penetración con una carga lo más pequeña posible y se colocan los diales de lectura de tensión y deformación en cero. La velocidad será de 0,05 in/min.
- Se anotan las lecturas de carga, en los niveles de penetración: 0,025, 0,050, 0,075, 0,1, 0,2 y 0,3 in.
- Obtenida la última lectura deben haber transcurrido seis minutos exactos, que es el tiempo total que dura la penetración.

#### 4.2.3.3. Datos obtenidos

Los datos obtenidos en el ensayo de razón soporte California, para la muestra de suelo sin cal, se muestran en las tablas siguientes.

Tabla XLVI. **Humedad actual de muestra de suelo sin cal**

<b>Humedad actual</b>		
<b>Tarro</b>	A-2	A-4
<b>pbh [g]</b>	222,14	209,28
<b>pbs [g]</b>	208,19	196,74
<b>Tara [g]</b>	44,03	45,28
<b>Dif [g]</b>	13,95	12,54
<b>pns [g]</b>	164,16	151,46
<b>% H</b>	8,50	8,28
<b>% H promedio</b>	<b>8,39</b>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Humedad de ensayo de muestra de suelo sin cal**

<b>Humedad de ensayo</b>		
<b>Tarro</b>	C-20	A-6
<b>pbh [g]</b>	262,67	280,58
<b>pbs [g]</b>	215,36	228,47
<b>Tara [g]</b>	46,93	45,68
<b>Dif [g]</b>	47,31	52,11
<b>pns [g]</b>	168,43	182,79
<b>% H</b>	28,09	28,51
<b>% H promedio</b>	<b>28,30</b>	

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XLVIII. Peso unitario seco de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal**

Parámetros	Especímenes compactados		
	65 golpes	30 golpes	10 golpes
PBH [kg]	10,63	10,51	10,24
Tara [kg]	7,24	7,24	7,24
PNH [kg]	3,39	3,27	3,00
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1/13,33	1/13,33	1/13,33
PUH [kg]	99,66	96,01	88,19
% H	28,30	28,30	28,30
PUS [kg]	77,67	74,84	68,73

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XLIX. Lecturas diales de expansión de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal**

65 golpes		
Inmersión y expansión	Sobrepesos 10 lb	
Día/Hora:	1 / 10:15	5 / 9:45
Lectura Dial:	0	1,83
Expansión en pulgada:	0	0,00183
30 golpes		
Inmersión y expansión	Sobrepesos 10 lb	
Día/Hora:	1 / 12:10	5 / 11:00
Lectura Dial:	0	4,13
Expansión en pulgada:	0	0,00413
10 golpes		
Inmersión y expansión	Sobrepesos 10 lb	
Día/Hora:	1 / 12:10	5 / 11:00
Lectura Dial:	0	5,09
Expansión en pulgada:	0	0,00509

Fuente: elaboración propia.

**Tabla L. Penetración y lecturas de anillo de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal**

<b>65 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	50	64	71	83	129	136
<b>30 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	15	21	26	39	61	87
<b>10 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	3	5	6	8	13	17

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2.3.4. Cálculos efectuados**

Antes de iniciar el ensayo se calcula la humedad actual del suelo, mostrada en la tabla XLVI, teniendo en cuenta los parámetros descritos en la tabla II. Con este dato y con la humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación Proctor estándar, se calcula la cantidad de agua a agregar a la muestra de suelo a ensayar, para proporcionarle la humedad óptima para ser compactado. Debido a que los cálculos son los mismos para cada muestra, solo se tomará de referencia la muestra de suelo sin cal y las demás, se calcularán de la misma manera.



Tabla LI. **Humedad óptima y peso unitario seco máxima de muestra de suelo sin cal**

Peso de martillo: 5,5 lb Capas: 3 Golpes por capa: 25	Peso unitario seco máximo	79,10 lb/pie <sup>3</sup>
	Porcentaje de humedad óptima	28,30 %

Fuente: elaboración propia.

- Agua a agregar:

$$\frac{(28,30 - 8,39)(15\ 000\ g)}{100 + 8,39} = 2\ 755,33\ cm^3$$

- Porcentaje de compactación de cada espécimen, se ejemplifica el cálculo para la probeta de 65 golpes.

$$\%C = \frac{PUS_{CBR}}{PUS_{PROCTOR}} \times 100$$

$$\%C = \frac{77,68\ lb/pie^3}{79,10\ lb/pie^3} \times 100 = 98,2$$

Tabla LII. **Porcentajes de compactación de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal**

Parámetros	Especímenes compactados		
	65 golpes	30 golpes	10 golpes
PUS [kg]	77,67	74,84	68,73
% C	98,2	94,6	86,9

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de expansión de muestra del cilindro compactado a distinta cantidad de golpes; como porcentaje de la altura inicial, se ejemplifica con probeta de 65 golpes.

$$\%E = \frac{E}{4,583} \times 100$$

Dónde:

- $\%E$ : Porcentaje de expansión
- $E$ : Expansión [in] (E=lectura final – lectura inicial)
- 4,583: Altura de la probeta [in] (Altura del molde menos la altura del espaciador)

$$\%E = \frac{0,00183}{4,583} \times 100 = 0,04$$

Tabla LIII. **Porcentajes de expansión de especímenes compactados de muestra de suelo sin cal**

Parámetros	Especímenes compactados		
	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Expansión [in]	0,00183	0,00413	0,00509
% E	0,04	0,09	0,11

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de carga para las penetraciones de cada probeta. La ecuación del anillo de 1 000 lb empleado en el ensayo es:

$$Carga [lb] = 4,5409X + 10,0588$$

Donde:

- X: Lectura dial de deformación del anillo

Tabla LIV. **Datos de carga – penetración de los especímenes compactados de muestra de suelo sin cal**

<b>65 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	50	64	71	83	129	136
Carga [lb]	522,81	662,99	733,08	853,23	1312,71	1383,90
<b>30 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	15	21	26	39	61	87
Carga [lb]	172,37	232,45	282,51	412,67	637,26	893,28
<b>10 golpes</b>						
Penetración [in]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200	0,300
Lectura del anillo	3	5	6	8	13	17
Carga [lb]	52,22	72,24	82,26	102,28	155,85	192,40

Fuente: elaboración propia.

- Utilizando los valores de penetración mostrados en la tabla LIV, se calcula el %CBR para 0,1 y 0,2 in de penetración dividiendo la carga en lb por 3 000 y 4 500 respectivamente, que es el factor de la carga unitaria patrón en libras, según la tabla XVIII.

Se ejemplifica el cálculo de %CBR para 0,1 y 0,2 in de la probeta compactada con 65 golpes.

$$\%CBR = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} \times 100$$

$$\%CBR_{0,1} = \frac{853,23 \text{ lb}}{3\,000 \text{ lb}} \times 100 = 28,44$$

$$\%CBR_{0,2} = \frac{1\ 312,71\ lb}{4\ 500\ lb} \times 100 = 29,17$$

De los valores de %CBR obtenidos se toma el mayor.

Tabla LV. **Porcentajes de CBR para especímenes de muestra de suelo sin cal**

Parámetros	Especímenes compactados		
	65 golpes	30 golpes	10 golpes
<b>Carga [lb]</b>	1 312,71	637,26	155,85
<b>%C</b>	98,2	94,6	86,9
<b>%CBR</b>	29,17	14,16	3,46

Fuente: elaboración propia.

- Con los valores de %C y %CBR de la tabla LV se procede a encontrar el valor del porcentaje de CBR de la muestra de suelo sin cal, para 95 % de compactación, por interpolación.

$$y = y_1 + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right)(y_2 - y_1)$$

Donde:

$$y = \text{Valor a encontrar.} \quad x = 95,0$$

$$y_1 = 14,16 \quad x_1 = 94,6$$

$$y_2 = 29,17 \quad x_2 = 98,2$$

$$y = 14,16 + \left(\frac{95,0 - 94,6}{98,2 - 94,6}\right)(29,17 - 14,16) = 15,83 \approx 16$$

El valor de CBR para 95 % de compactación es entonces de 16 %.

#### 4.2.3.5. Resultados obtenidos

Los porcentajes de compactación y de CBR correspondiente a cada muestra de suelo se muestran en la tabla LVI.

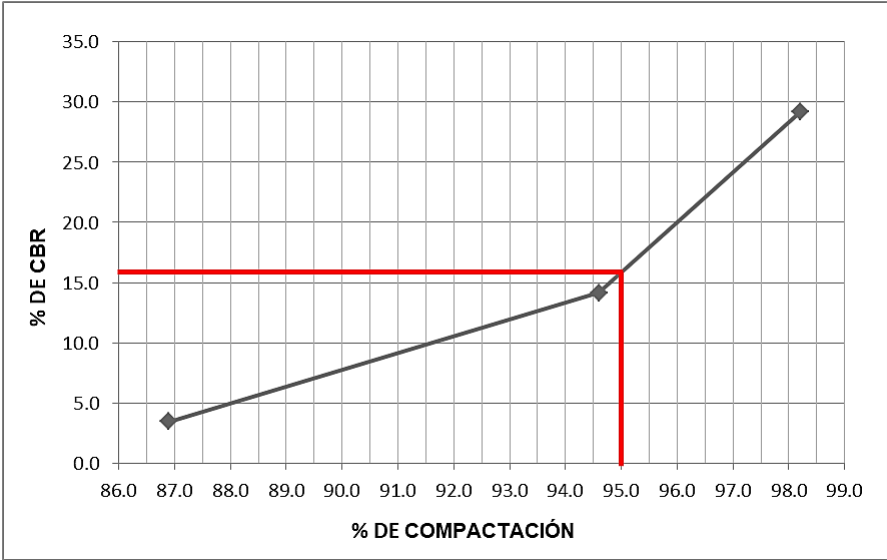
Tabla LVI. **Porcentajes de CBR y de compactación para cada muestra**

Muestra	Parámetros	Especímenes compactados		
		65 golpes	30 golpes	10 golpes
Suelo sin cal	%C	98,2	94,6	86,9
	%CBR	29,17	14,16	3,46
Suelo + 1 % de cal	%C	97,3	92,6	84,4
	%CBR	25,96	13,29	3,13
Suelo + 3 % de cal	%C	100,0	93,4	85,7
	%CBR	82,70	45,67	20,57

Fuente: elaboración propia.

De los valores obtenidos en la tabla LV se configuran las gráficas de porcentaje CBR versus porcentaje de compactación para cada una de las muestras.

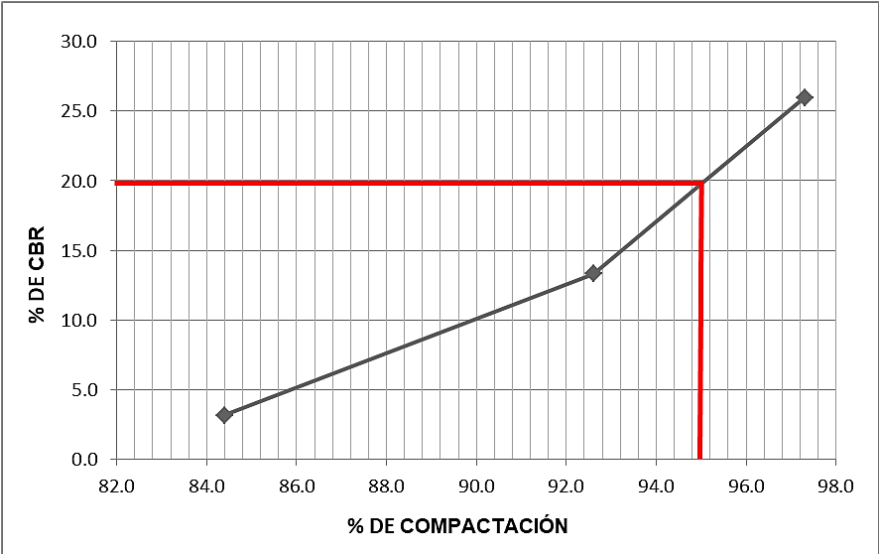
Figura 43. **Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de suelo sin cal**



Fuente: elaboración propia.

De la gráfica mostrada en la figura 43 y por interpolación, se determina el porcentaje CBR al 95 % de compactación, este tiene un valor aproximado de 16 %.

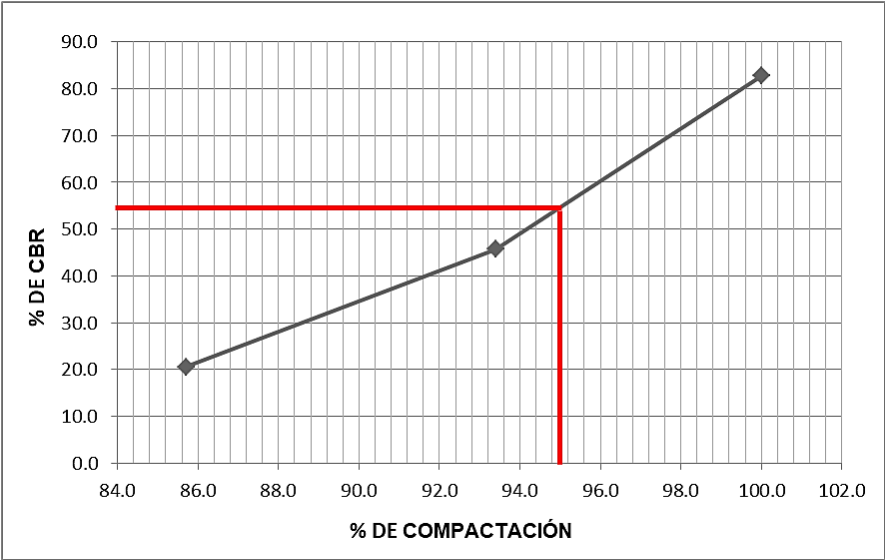
Figura 44. **Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra de suelo + 1 % de cal**



Fuente: elaboración propia.

De la gráfica mostrada en la figura 44 y por interpolación, se determina el porcentaje CBR al 95 % de compactación, este tiene un valor aproximado de 20 %.

Figura 45. **Gráfica de porcentaje CBR – porcentaje de compactación de muestra de suelo + 3 % de cal**



Fuente: elaboración propia.

De la gráfica mostrada en la figura 45 y por interpolación, se determina el porcentaje CBR al 95 % de compactación, y tiene un valor aproximado de 55 %.



#### 4.2.3.6. Presentación de resultados

Los datos obtenidos para cada muestra de suelo a distinta energía de compactación, se presentan en las tablas siguientes.

Tabla LVII. **Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra de suelo sin cal**

Probeta No.	Golpes No.	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	$\gamma_d$ (lb/pie <sup>3</sup> )			
1	65	28,30	77,67	98,2	0,04	29,17
2	30	28,30	74,84	94,6	0,09	14,16
3	10	28,30	68,73	86,9	0,11	3,46

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra de suelo + 1 % de cal**

Probeta No.	Golpes No.	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	$\gamma_d$ (lb/pie <sup>3</sup> )			
1	65	30,05	74,90	97,3	0,15	25,96
2	30	30,05	71,26	92,6	0,15	13,29
3	10	30,05	64,91	84,4	0,09	3,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Datos obtenidos del ensayo CBR para muestra de suelo + 3 % de cal**

Probeta No.	Golpes No.	A la compactación		C (%)	Expansión (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	γd (lb/pie <sup>3</sup> )			
1	65	32,90	74,97	100,00	0,09	82,70
2	30	32,90	70,03	93,4	0,02	45,67
3	10	32,90	64,20	85,7	0,00	20,57

Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Porcentajes de CBR al 95 % de compactación**

Muestra	%CBR	Clasificación general
Suelo sin cal	16	Regular
Suelo + 1 % de cal	20	Bueno
Suelo + 3 % de cal	55	Excelente

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.3.7. **Análisis de resultados**

Los porcentajes de CBR estándar obtenidos anteriormente, fueron significativamente menores a los obtenidos en el ensayo de valor soporte con la energía de compactación de Proctor modificado, debido a que el peso del martillo de compactación y la altura de la caída libre del mismo, son menores. Por lo tanto, el grado de compactación es también más bajo.

Los valores de CBR obtenidos de las muestras con 1 y 3 % de cal se encuentran clasificados como bueno y excelente (20 y 55 %), respectivamente, demostrando que el material se considera apto para ser empleado como subrasante de un pavimento.

Al observar el comportamiento del suelo sin cal, compactado con condiciones similares a las que se expone en campo, se demuestra que no es apto, para resistir las cargas transmitidas por la carpeta de rodadura, y que debe dársele un tratamiento, previo a formar parte de la estructura del pavimento.

#### **4.2.4. Compresión no confinada**

Ensayo según norma ASTM D-1632 y D-1633

##### **4.2.4.1. Equipo y material utilizado**

- Para preparar la probeta a ensayar, se debe utilizar el mismo equipo utilizado en el ensayo de compactación Proctor estándar, ver sección 4.2.1.1.
- Dispositivo de compresión. El dispositivo de compresión puede ser una báscula de plataforma equipada con un yugo de carga activado por tornillo, un dispositivo de carga hidráulica o cualquier otro dispositivo de compresión con suficiente capacidad y control, para proporcionar la tasa de carga prescrita. Debe poder medir la tensión de compresión en tres dígitos significativos con la tensión máxima, o dentro de 1kPa [0,01 ton/pie<sup>2</sup>], el que sea mayor.
- Extrusor de muestras, capaz de extruir el núcleo del suelo del tubo de muestreo a una velocidad uniforme en la misma dirección del recorrido en el que la muestra ingresó al tubo, y con una perturbación insignificante de la muestra. Las condiciones en el momento de la eliminación de la muestra pueden dictar la dirección de la eliminación, pero la principal preocupación

es reducir la posibilidad de perturbación adicional más allá de la incurrida durante el muestreo inicial.

- Indicador de deformación. El indicador de deformación debe ser un indicador de cuadrante graduado a 0,03 mm (0,00 in) o mejor y con un rango de recorrido de al menos 20 % de la longitud de la muestra de prueba, o algún otro dispositivo de medición, como un dispositivo de medición de deformación electrónica, cumpliendo con estos requisitos.
- Comparador de cuadrantes, u otro dispositivo adecuado, para medir las dimensiones físicas de la muestra dentro del 0,1 % de la dimensión medida.
- Cronómetro. Un dispositivo de temporización que indica el tiempo de prueba transcurrido al segundo más próximo, se utilizará para establecer la tasa de aplicación de deformación prescrita.
- Balanza. La balanza utilizada para pesar las muestras determinará la masa de la muestra dentro del 0,1 % de su masa total.

#### **4.2.4.2. Procedimiento de ensayo**

- Se compacta la muestra con la humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación Proctor estándar, siguiendo el procedimiento de ensayo de la sección 4.2.1.2.

Figura 46. **Probeta en el molde de compactación**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 47. **Extracción de probeta de suelo, del molde de compactación**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se identifican las probetas a ensayar, de acuerdo al porcentaje de cal contenida en ellas y se almacenan en un lugar con temperatura constante, verificando que no pierdan humedad.
- Se toma el peso, diámetro y altura de las probetas.

Figura 48. **Toma de peso de probeta**



Fuente: Laboratorio CETEC, Cementos Progreso.

Figura 49. **Medición de dimensiones de las probetas**



Fuente: Laboratorio CETEC, Cementos Progreso.

- Se coloca la muestra en el dispositivo de carga de modo que quede centrada en la placa inferior. Se ajusta el dispositivo de carga con cuidado, para que la placa superior solo haga contacto con la muestra. Se pone a cero el indicador de deformación o se registra la lectura inicial del dispositivo de deformación electrónica. Se aplica la carga para producir una tensión axial a una velocidad de 1/2 a 2 % min. La velocidad de deformación debe elegirse de modo que el tiempo hasta el fallo no exceda unos 15 min. Se continúa cargando hasta que los valores de carga disminuyan al aumentar la tensión, o hasta que se alcance un 15 % de tensión. Se indica la velocidad de deformación en el informe de los datos de prueba, según sea necesario.

Figura 50. **Colocación de la muestra en el dispositivo de carga**



Fuente: Laboratorio CETEC, Cementos Progreso.

- Se hace un boceto, o se toma una fotografía, de la falla de la muestra de prueba y se mide el ángulo de inclinación de la superficie de falla del ángulo, si es posible medirlo.

Figura 51. **Falla de probeta posterior a ser sometida al ensayo de compresión**



Fuente: Laboratorio CETEC, Cementos Progreso.



#### 4.2.4.3. Datos obtenidos

Del ensayo de compresión no confinada, para las probetas de cada mezcla suelo-cal, se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla LXI. Datos de probetas para ensayo de compresión no confinada

Descripción del material	Probeta No.	Edad [días]	Masa [g]	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Carga máxima [N]
Suelo natural	1	7	1449,5	102,0	116,3	880,0
	2	7	1392,4	102,0	117,4	1520,0
Suelo + 1 % de cal	3	15	1456,7	102,0	116,7	1320,0
	4	32	1578,4	104,5	116,3	120,0
	5	32	1577,7	104,7	116,4	280,0
	6	57	1482,8	102,3	116,4	1240,0
	7	57	1482,1	103,3	116,9	400,0
Suelo + 3 % de cal	8	15	1543,3	102,0	117,4	3800,0
	9	15	1547,4	102,0	116,7	3280,0
	10	32	1537,5	102,5	117,0	3360,0
	11	32	1562,1	102,9	116,7	5080,0
	12	57	1444,3	102,4	117,1	4440,0
	13	57	1513,9	102,4	117,6	3000,0

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.4.4. Cálculos efectuados

Con los datos obtenidos en la tabla LXI se procede a realizar los cálculos siguientes. Debido a que los cálculos son los mismos para cada probeta, solo se tomará de referencia la probeta No. 1 y las demás se calcularán de la misma manera.

- Área de sección transversal.

$$D(\text{Diámetro}) = 102 \text{ mm}$$

$$A(\text{Área}) = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} (102 \text{ mm})^2 = 8\,171,3 \text{ mm}^2$$

- Resistencia a la compresión.

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

Donde:

$\sigma_c$ : Resistencia a la compresión

$P$ : Carga máxima

$A$ : Área de sección transversal

$$\sigma_c = \frac{880 \text{ N}}{8\,171,3 \text{ mm}^2} = 0,108 \text{ N/mm}^2 = 107,7 \text{ kPa}$$

- Factor de corrección por esbeltez.

$$\text{Relación altura – diámetro} = \frac{a}{D}$$

$$\frac{a}{D} = \frac{116,3 \text{ mm}}{102,0 \text{ mm}} = 1,14$$

El factor de corrección por esbeltez corresponde a la relación entre la altura y el diámetro de la probeta, y se obtiene de la siguiente tabla.

Tabla LXII. Factores de corrección por esbeltez

Relación altura/ diámetro	Factor de corrección
2,00	1,00
1,75	0,98
1,50	0,96
1,25	0,94
1,10	0,90

Fuente: PÉREZ, Mariano. *Materiales de construcción*. p 47.

Como el valor obtenido no se encuentra en la tabla, se procede a interpolar para encontrarlo.

$$y = y_1 + \left( \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) (y_2 - y_1)$$

Donde:

$$y = \text{Valor a encontrar} \quad x = 1,14$$

$$y_1 = 0,90 \quad x_1 = 1,10$$

$$y_2 = 0,94 \quad x_2 = 1,25$$

$$y = 0,90 + \left( \frac{1,14 - 1,10}{1,25 - 1,10} \right) (0,94 - 0,90) = 0,912$$

- Resistencia corregida por esbeltez.

$$\sigma_{C\text{corregida}} = \sigma_C \times y$$

$$\sigma_{C\text{corregida}} = 107,7\text{kPa} \times 0,912 = 98,08\text{kPa}$$

#### 4.2.4.5. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos para las probetas de distintas edades, correspondientes a cada muestra suelo-cal, se presentan en la tabla LXIII.

Tabla LXIII. Datos obtenidos de ensayo de compresión no confinada

Descripción del material	No.	Edad [días]	Masa [g]	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Carga máxima [N]	Factor de corrección	Área sección transversal	Resistencia a compresión		
									kPa	psi	Mpa
Suelo	1	7	1449,5	102,0	116,3	880,0	0,923	8171,3	105,0	15	0,1
	2	7	1392,4	102,0	117,4	1520,0	0,924	8171,3	175,0	25	0,2
Suelo + 1 % de cal	3	15	1456,7	102,0	116,7	1320,0	0,924	8171,3	140,0	20	0,1
	4	32	1578,4	104,5	116,3	120,0	0,922	8576,7	13,0	2	0,0
	5	32	1577,7	104,7	116,4	280,0	0,922	8609,6	35,0	5	0,0
	6	57	1482,8	102,3	116,4	1240,0	0,923	8219,4	140,0	20	0,1
	7	57	1482,1	103,3	116,9	400,0	0,923	8380,9	35,0	5	0,0
Suelo + 3 % de cal	8	15	1543,3	102,0	117,4	3800,0	0,924	8171,3	420,0	60	0,4
	9	15	1547,4	102,0	116,7	3280,0	0,924	8171,3	385,0	55	0,4
	10	32	1537,5	102,5	117,0	3360,0	0,923	8251,6	385,0	55	0,4
	11	32	1562,1	102,9	116,7	5080,0	0,923	8316,1	564,0	82	0,6
	12	57	1444,3	102,4	117,1	4440,0	0,924	8235,5	490,0	70	0,5
	13	57	1513,9	102,4	117,6	3000,0	0,924	8235,5	350,0	50	0,4

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.4.6. Presentación de resultados

La resistencia a compresión de las muestras de suelo-cal se presentan en la tabla LXIV.

Tabla LXIV. **Resistencia a compresión de muestras de suelo**

Descripción del material	Resistencia a compresión		
	kPa	psi	Mpa
Suelo	140,0	20	0,1
Suelo + 1 % de cal	140,0	20	0,1
Suelo + 3 % de cal	527,0	76	0,5

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2.4.7. Análisis de resultados**

Para evaluar el aumento en la resistencia a compresión del suelo modificado con cal, se realizan dos probetas por cada edad de ensayo (15, 32 y 57 días) de las muestras con 1 y 3 % de cal, y dos probetas para evaluar el suelo sin cal, y, así comparar los resultados obtenidos.

Posterior a la elaboración de las probetas de suelo-cal, estas se debieron almacenar de manera que su humedad y temperatura se mantuvieran constantes, sin embargo, por malas condiciones de almacenamiento, algunas de las probetas sufrieron un cambio de humedad significativo, afectando tanto sus dimensiones como su resistencia a la compresión. Razón por la cual, sus resultados se descartaron y solo se tomó en cuenta las probetas que no sufrieron tal deterioro. Los valores de resistencia a tomar en cuenta son los que se muestran en la tabla LXIV y se obtuvieron, promediando los valores de resistencia de las probetas que fueron aceptables.

Los resultados obtenidos exponen que la muestra de suelo con 1 % de cal presenta valores de resistencia muy similares a los del suelo sin cal, por lo que la cantidad de cal añadida no era suficiente para reaccionar con el suelo y modificar su comportamiento. La muestra de suelo modificada con 3 % de cal alcanza una resistencia de 527,0 kPa, casi cuatro veces la resistencia del suelo sin modificar (140,0 kPa), cumpliendo así con lo esperado y confirmando el resultado obtenido en el ensayo de pH, siendo el porcentaje adecuado que se debe adicionar al suelo para aumentar significativamente su resistencia a la compresión.

#### **4.2.5. Permeabilidad**

Ensayo según norma ASTM D 5856-00

##### **4.2.5.1. Equipo y material utilizado**

- Permeámetro de compactación
- Martillo de compactación de 5,5 lb y 14 in de caída
- Termómetro
- Cronómetro
- Tamiz No. 100
- Balanza de 2 kg de capacidad de 0,1 g de sensibilidad
- Cilindro graduado
- Un depósito o tanque de almacenamiento y suministro de agua, que se comunica a la cámara mediante alguna conexión o válvula. El nivel del tanque puede mantenerse constante.

#### 4.2.5.2. Procedimiento de ensayo

- Se pesan 3 kg del material a ensayar.
- Para las muestras tratadas con cal, se calcula la cantidad a agregar de acuerdo al porcentaje respecto al peso de la muestra (si es 1 %, se agrega 30 g de cal, si es 3 %; 90 g). Se debe mezclar hasta obtener una composición uniforme.
- El material seco se coloca en 3 capas, apisonándolas con el martillo de 5,5 lb según lo indicado en la prueba de compactación Proctor estándar. Debido a que el método se realiza por medio del ensayo de compactación, en todo momento se procurará que el espesor de las capas, la intensidad y el número de golpes sean los requeridos para obtener la densidad máxima y por consiguiente la humedad óptima. Esto garantiza que el espécimen tenga una aproximación efectiva a la relación de vacíos que presenta el mismo compactado a la densidad máxima.
- Se enrasa cuidadosamente el material en el molde y se coloca una piedra porosa saturada en la base del permeámetro de compactación, sobre la piedra porosa colocar un círculo de papel filtro y sobre este conjunto se coloca el molde de manera tal que coincidan la piedra porosa y el papel filtro con el material compactado. Ajustar firmemente la base y el molde mediante las arandelas mariposa del mismo.

Figura 52. **Permeámetro de compactación previo a ser armado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se coloca en la parte superior de la muestra otra piedra porosa saturada y otro círculo de papel filtro, se ajusta firmemente la tapa del permeámetro mediante las arandelas mariposa. El permeámetro de compactación armado se presenta en la figura 53, obsérvese la dirección de la tubería de entrada y la de salida, este arreglo permite un flujo eficaz del agua a través de la muestra.



Figura 53. **Permeámetro de compactación armado**

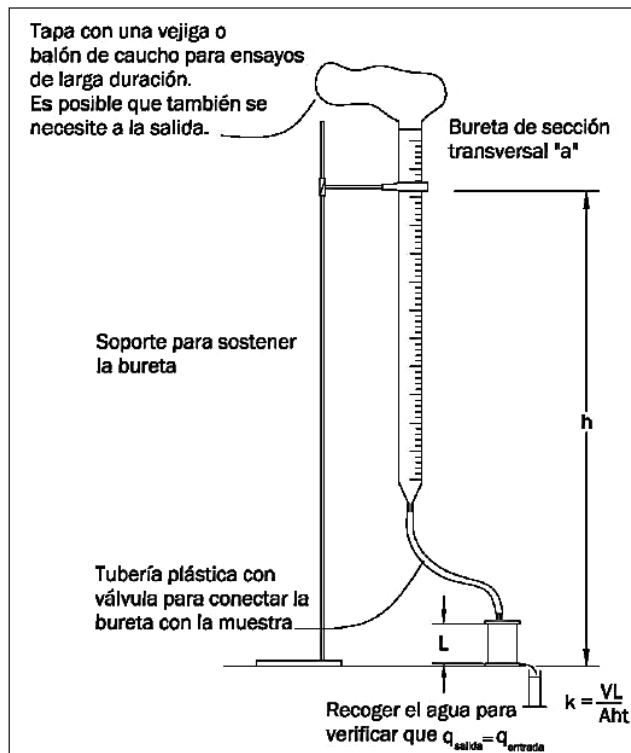


Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se conecta a la válvula de entrada una tubería plástica con válvula para conectar la bureta con la muestra.
- Se coloca el permeámetro en un recipiente lleno de agua de forma que la tapa del permeámetro quede sumergido por lo menos 5 cm debajo del nivel del agua. Debe asegurarse de que la válvula de salida del permeámetro esté abierta, de manera que el agua pueda entrar a través de la muestra para saturarla con una cantidad mínima de aire atrapado. Cuando el agua alcance la altura de equilibrio en la tubería plástica que se conectó a la válvula de entrada del permeámetro, se puede suponer que el proceso de saturación ha concluido. Un período de 24 horas permitirá mejores resultados en la saturación, pero para objetivo del experimento este período puede ser demasiado largo.
- Con el nivel de agua estabilizado en la tubería plástica de entrada, se cierra la válvula de salida o se tapa el tubo de plástico valiéndose de un artefacto adecuado (se obstaculiza la salida del agua de la tubería plástica). Se saca

el permeámetro del recipiente de inmersión y se conecta al tubo de entrada una tubería vertical graduada conectada a su vez a un recipiente de abastecimiento (ver figura 54).

Figura 54. **Detalle del montaje para el método de cabeza constante**



Fuente: BOWLES, Joseph. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. p 102.

- Se desairan las líneas de entrada a la muestra, abriendo la válvula de entrada del permeámetro y simultáneamente abriendo la válvula de drenaje que está en la tapa superior del permeámetro. Una vez se ha removido todo el aire que pudiera estar atrapado, se cierra la válvula de drenaje. Se mide la cabeza hidráulica a través de la muestra.

- La cabeza hidráulica medida (altura  $h$ ), se mantendrá constante durante todo el ensayo por medio del tanque de abastecimiento que se conecta a la tubería vertical graduada.
- En la primera etapa, se deja escurrir el agua por espacio de 15 minutos a fin de establecer el régimen; y una vez logrado esto, se procede a hacer las mediciones.
- Se utiliza un recipiente de 500 o 1 000  $\text{cm}^3$  (mayor si es posible) para recibir el agua a la salida del permeámetro. Registrar el tiempo necesario para almacenar entre 750 y 900  $\text{cm}^3$  de agua y registrar también la temperatura del agua.
- En la segunda etapa, repetir dos o tres mediciones similares adicionales utilizando un tiempo constante. La cantidad de agua recogida en ensayos sucesivos es decreciente; esto se debe a la formación de una barrera en la piedra porosa por acumulación de finos, o a la salida de aire en solución en el agua.
- Una vez terminada la prueba, se desconecta el permeámetro del sistema, se mide la altura final ( $L$ ), de la pastilla, se dibuja un croquis y se anotan todas las observaciones hechas durante el ensayo.
- Se calcula el coeficiente de permeabilidad  $k_T$ , para la temperatura ( $T$ ) del ensayo.
- Se calcula  $k_{20}$  para el ensayo con tiempo ( $t$ ) constante,  $t$  debería ser constante si el montaje es estable, de forma que es posible promediar  $V$  y calcular un valor único para  $k_T$ ; si no se cumplen estas condiciones, es necesario calcular el valor particular de  $k_T$  para cada ensayo y los correspondientes valores de  $k_{20}$ . Calcular el promedio de los valores de  $k_{20}$ .
- Se obtiene las correcciones de temperatura para la viscosidad a partir de la tabla adjunta en anexos.

#### 4.2.5.3. Datos obtenidos

Dimensiones de la muestra:

$$\text{Diámetro} = 4 \text{ in} = 10,16 \text{ cm}$$

$$A(\text{Área}) = \frac{\pi}{4} (4 \text{ in})^2 = 12,57 \text{ in}^2 = 81,10 \text{ cm}^2$$

$$L(\text{altura}) = 4,58 \text{ in} = 11,63 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen} = A \times L$$

$$\text{Volumen} = (81,10 \text{ cm}^2)(11,63 \text{ cm}) = 944 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen} = 944 \text{ cm}^3 = 57,60 \text{ in}^3 \approx \frac{1}{30} \text{ pie}^3$$

Tabla LXV. **Datos del ensayo para determinar el coeficiente de permeabilidad de muestra de suelo sin cal**

Experimento No.	Tiempo [s]	$V_{\text{salida}}$ [cm <sup>3</sup> ]	Temperatura °C	h [cm]
1	240	6,2	20,7	202
2	240	6,2	20,7	202
3	240	6,2	20,7	202
Promedio	240	6,2	20,7	202

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.5.4. Cálculos efectuados

Con los datos obtenidos en la tabla LXV se procede a realizar los cálculos siguientes. Debido a que los cálculos son los mismos para cada muestra, solo se tomará de referencia la muestra de suelo sin cal y las demás se calcularán de la misma manera.

- Coeficiente de permeabilidad

$$k_T = \frac{VL}{Aht}$$

Donde:

- $k_T$ : Coeficiente de permeabilidad.
- V: Volumen de salida promedio.
- L: Altura de la muestra.
- A: Área transversal de la muestra.
- h: Altura.
- t: Tiempo.

$$k_T = \frac{(6,2 \text{ cm}^3)(11,63 \text{ cm})}{(81,10 \text{ cm}^2)(202 \text{ cm})(240 \text{ s})} = 0.00001834 \text{ cm/s}$$

- Corrección de la viscosidad del agua

Variación de la temperatura:

$$\Delta T = 20,7^\circ\text{C} - 20,7^\circ\text{C} = 0$$

Para una temperatura promedio de 20,7 °C y una variación de la misma igual a cero, se obtiene el valor de la corrección de viscosidad siguiente (ver tabla de corrección de viscosidad del agua, en anexos).

$$\frac{\eta_T}{\eta_{20}} = 0,9833$$

- Coeficiente de permeabilidad  $k$ , refiriéndolo a la temperatura del agua a 20 °C  $k_{20^\circ\text{C}}$ .

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = \left(\frac{\eta_T}{\eta_{20}}\right)k_T$$

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = (0,9833)(0,00001834 \text{ cm/s}) = 0,0000180 \text{ cm/s}$$

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = 1,80 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

#### 4.2.5.5. Resultados obtenidos

- Muestra de suelo sin cal

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = 1,80 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

- Muestra de suelo +1 % de cal

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = 4,43 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

- Muestra de suelo +3 % de cal

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = 3,80 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Tabla LXVI. **Valores promedio del coeficiente de permeabilidad**

Descripción del suelo	Coficiente $k$ [cm/s]	Permeabilidad
Gravas limpias	$10^2$ a $1,0$	Alta
Arenas limpias, mezcla de arena y gravas limpias.	$1,0$ a $10^{-3}$	Media
Arenas muy finas, limos, mezcla de arena, limo y arcilla, depósitos de arcilla estratificada.	$10^{-3}$ a $10^{-7}$	Baja
Suelos impermeables como arcillas homogéneas bajo la zona de meteorización.	$10^{-7}$ a $10^{-9}$	Muy baja, casi nula.

Fuente: VILLALAZ, Crespo. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p 150.

#### 4.2.5.6. Presentación de resultados

Los coeficientes de permeabilidad de cada muestra de suelo-cal se presentan en la tabla LXVII.

Tabla LXVII. **Coefficientes de permeabilidad**

<b>Muestra</b>	<b>Descripción del suelo</b>	<b>Coefficiente de permeabilidad, <math>k_T</math> [cm/s]</b>
1	Arena limosa color café	$1,80 \times 10^{-5}$
2	Arena limosa color café + 1 % de cal	$4,43 \times 10^{-5}$
3	Arena limosa color café + 3 % de cal	$3,80 \times 10^{-6}$

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.5.7. Análisis de resultados

Los coeficientes de permeabilidad de las tres muestras de suelo ensayadas, se clasifican dentro del grupo de suelos descritos como, arenas muy finas, limos, mezcla de arena, limo y arcilla, depósitos de arcilla estratificada. Estos tipos de suelo poseen permeabilidades relativamente bajas, lo cual presenta ventajas para ser empleado como subrasante, porque su oposición a absorber agua, lo hace menos vulnerable a sufrir cambios volumétricos bruscos, es decir hundimientos o expansiones que podrían dañar la estructura del pavimento.

La muestra modificada con 3 % de cal obtuvo el valor más bajo de permeabilidad. El contenido de cal en el suelo, al alcanzar cierta magnitud, hace que la permeabilidad del suelo disminuya. La muestra con 1 % de cal fue más permeable que la muestra de suelo sin cal, esto puede deberse a que su

contenido no era suficiente para formar enlaces con la mayor parte de las partículas del suelo, facilitando el flujo de agua a través de él.

#### **4.2.6. Conformación de tramos de pavimento de prueba**

Para evaluar el desempeño del diseño del pavimento actual, como del diseño propuesto, se elaboraron tres pequeños tramos de empedrado. Uno de ellos simula las características del diseño actual de las calles de Antigua Guatemala; y los otros dos, cuentan con la subrasante modificada con distintos porcentajes de cal, así como nuevas proporciones de mortero. El tipo de suelo empleado, las rocas de origen volcánico y la cal viva se obtuvieron del depósito de materiales con que cuenta la dirección de proyectos municipales de Antigua Guatemala.

Para el proceso se hizo una zanja de 0,30 metros de profundidad, 0,60 metros de ancho y 1,80 metros de largo, colocando divisiones para formar tres tramos de iguales dimensiones.



Figura 55. **Proceso de excavación en área donde se construirán los tramos de empedrado**



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Se rellena uno de los espacios con la muestra de suelo proveniente de la subrasante actual, y los otros con el suelo modificado con 1 y 3 % de cal, colocándolo en dos capas de 10 cm, compactando cada una con pisón de mano. Se verifica el porcentaje de compactación con el ensayo de densidad de campo (ver sección 4.2.7.).

Posterior a la compactación, se elaboran las mezclas para los morteros que se colocan directamente sobre la subrasante y que servirán de soporte a las rocas (mezclón), a continuación se colocan las rocas, verificando que las caras planas queden hacia arriba y que sus formas encajen de la mejor manera entre sí.

Luego se rellenan los espacios vacíos entre las rocas, con otra mezcla de mortero (estruque), dejando aproximadamente 1 cm de profundidad de las rocas al descubierto.

Las características de cada tramo de pavimento se muestran en la tabla LXVIII.

Tabla LXVIII. **Características de tramos de pavimento a ensayar**

Tramo No.	Subrasante	Morteros			
		Mezclón		Estuque	
		Proporción volumétrica	Materiales	Proporción volumétrica	Materiales
1	Arena limosa.	1 : 3/2 : 6	Cemento portland, cal viva, arena limosa.	1 : 1/2 : 4	Cemento portland, cal viva, arena limosa.
2	Arena limosa + 1 % de cal.	1 : 3/2 : 6	Cemento portland, cal hidratada, arena limosa.	1 : 1/2 : 4	Cemento portland, cal hidratada, arena limosa.
3	Arena limosa + 3 % de cal.	1 : 1 : 4	Cemento portland, cal hidratada, arena limosa.	1 : 1 : 7	Cemento portland, cal hidratada, arena limosa.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la tabla LXIX, el tramo No. 1 simula el diseño del pavimento actual. El tramo No. 2 está conformado por el suelo de la subrasante modificado con 1 % de cal y morteros de iguales proporciones al tramo No. 1, con la diferencia de que se sustituye la cal viva por cal hidratada, ya que esta posee mejores propiedades de adherencia, resistencia y su aplicación es más simple.

El tramo No. 3 está conformado por el suelo de la subrasante, modificado con 3 % de cal. El mortero que cumple con la función de mezclón se diseñó teóricamente, disminuyendo la relación cemento-arena para aumentar la resistencia a la compresión. De igual manera, el mortero que cumple la función de estuque se diseñó teóricamente, aumentando la cantidad de cal para enlazar de mejor manera las rocas, evitando desprendimientos; y, la proporción se mantiene con un contenido relativamente alto de suelo para que, visualmente, no sea muy distinto al actual.

Después de un tiempo aproximado, de siete días de fraguado del mortero, se procede a someter el pavimento al ensayo de deflexión, como se describe a continuación.

#### **4.2.7. Densidad de campo**

Ensayo según norma ASTM D 1556-00

Este ensayo se realiza con el fin de conocer y controlar la compactación de la subrasante. Determina la densidad in situ para compararla con la obtenida en laboratorio (ensayo Proctor estándar) y ver si se alcanza como mínimo 95 % de compactación.

##### **4.2.7.1. Equipo y material utilizado**

- Cono de metal con válvula, llamado picnómetro
- 2 frascos grandes de plástico o vidrio adaptables al cono de metal
- Tamiz  $\frac{3}{4}$  in (19,1 mm) o No. 4 (4,75 mm)
- Bandeja de metal con un agujero circular al centro
- Arena calibrada Ottawa
- Balanza de 35 lb de capacidad y sensible a 0,01 lb
- Martillo, cuchara, cincel

##### **4.2.7.2. Procedimiento de ensayo**

- Del área de ensayo se elimina todo material suelto, después se nivela y se acomoda la bandeja en posición firme utilizando clavos para fijarla.
- Se sostiene el peso del recipiente de plástico con el cono de metal, lleno con la arena calibrada de Ottawa (picnómetro 1).

- Colocada la bandeja de metal con el agujero en el centro, se coloca el picnómetro lleno de arena; se abre la válvula hasta que no pase más arena, se retira y se pesa de nuevo el picnómetro (picnómetro 2) (ver figura 56).

Figura 56. **Ensayo densidad de campo**



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se recoge la arena y se limpia el área
- Se empieza a excavar con ayuda del cincel y del martillo, un agujero del mismo diámetro del orificio de la bandeja y unos 10 a 15 cm de profundidad (4 a 6 in).
- El material excavado se extrae del agujero y pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$  in o No. 4; dicho material se deposita en una tara, esta se tapa completamente con el fin de no perder humedad.
- Se procede a pesar la tara con el material extraído de la excavación, a este se le denomina peso neto húmedo del material excavado.

- Luego se coloca de nuevo, el cono sobre la bandeja que se encuentra sobre el agujero. Se abre la válvula y se deja correr la arena hasta que no pase más.
- Se cierra la válvula del cono y se pesa de nuevo el picnómetro con la arena que esté dentro del envase (picnómetro 3), (ver figura 57).

Figura 57. **Peso de picnómetro 3**



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se recoge la arena depositada en el agujero, tratando de recobrar la mayor cantidad posible, pero sin recoger demasiada impureza.
- Utilizar el equipo para determinación de humedad Speedy; mezclar 5 g de suelo húmedo extraído del agujero con 5 g de carburo de calcio dentro de la cámara de presión.
- Leer la presión en el manómetro de la cámara y determinar el porcentaje de humedad.
- Se procede a rellenar el agujero excavado con el material extraído y se hacen los cálculos correspondientes.

#### 4.2.7.3. Datos obtenidos

Tabla LXIX. Datos tomados en ensayo de densidad de campo

Muestra No.	Descripción	Pic 1 [lb]	Pic 2 [lb]	Pic 3 [lb]	Peso de material [lb]	Porcentaje de humedad
1	Suelo natural.	12,55	11,70	7,90	3,06	27,90
2	Suelo + 1 % de cal.	12,49	11,55	7,80	2,90	31,06
3	Suelo + 3 % de cal.	12,30	11,35	7,60	2,82	30,01

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.7.4. Cálculos efectuados

Con los datos obtenidos en la tabla LXIX se procede a realizar los cálculos siguientes. Debido a que los cálculos son los mismos para cada muestra, solo se tomará de referencia la muestra 1 y las demás se calcularán de la misma manera. Para obtener los porcentajes de compactación, se toma como base el peso unitario seco obtenido en el ensayo de Proctor estándar (ver sección 4.2.2.6.).

- Peso de arena en el cono

$$P_C = \text{pic 1} - \text{pic 2}$$

Donde:

$P_C$ : Peso de arena en el cono.

$Pic 1$ : Picnómetro 1.

$Pic 2$ : Picnómetro 2.

$$P_C = 12,55 \text{ lb} - 11,70 \text{ lb} = 0,85 \text{ lb}$$

- Peso de arena en el cono y el agujero

$$P_{C+a} = \text{pic 2} - \text{pic 3}$$

Donde:

$P_{C+a}$ : Peso de arena en el cono y en el agujero.

$\text{Pic 3}$ : Picnómetro 3.

$$P_{C+a} = 11,70 \text{ lb} - 7,90 \text{ lb} = 3,80 \text{ lb}$$

- Peso de la arena en el agujero

$$P_a = P_{C+a} - P_c$$

$$P_a = (\text{pic 2} - \text{pic 3}) - (\text{pic 1} - \text{pic 2})$$

Donde:

$P_a$ : Peso de arena en el agujero.

$$P_a = 3,80 \text{ lb} - 0,85 \text{ lb} = 2,95 \text{ lb}$$

- Volumen del agujero

$$V_a = \frac{P_a}{P_{\text{Arena Ottawa}}}$$

Donde:

$P_{\text{Arena Ottawa}}$ : Peso de arena calibrada Ottawa.

$$V_a = \frac{2,95 \text{ lb}}{94,20 \text{ lb}/\text{pie}^3} = 0,03 \text{ pie}^3$$

- Peso unitario húmedo

$$PUH = \frac{\text{Peso húmedo del material excavado}}{\text{Volumen del agujero}}$$

Donde:

*PUH*: Peso unitario húmedo.

$$PUH = \frac{3,06 \text{ lb}}{0,03 \text{ pie}^3} = 102,00 \text{ lb/pie}^3$$

- Peso unitario seco en campo

$$PUS_{\text{campo}} = \frac{PUH}{100 + \%H} \times 100$$

Donde:

*PUS<sub>campo</sub>*: Peso unitario seco en campo.

*%H*: Porcentaje de humedad.

$$PUS_{\text{campo}} = \frac{102,00 \text{ lb/pie}^3}{100 + 27,90} \times 100$$

$$PUS_{\text{campo}} = 79,75 \text{ lb/pie}^3$$

- Porcentaje de compactación

$$\%C = \frac{PUS_{\text{campo}}}{PUS_{\text{Laboratorio}}} \times 100$$



Donde:

$PUS_{Laboratorio}$ : Peso unitario seco obtenido en ensayo de Proctor estándar.

$\%C$ : Porcentaje de compactación.

$$\%C = \frac{79,75 \text{ lb/} \pi e^3}{79,10 \text{ lb/} \pi e^3} \times 100$$

$$\%C = 100,82$$

#### 4.2.7.5. Resultados obtenidos

En la tabla LXX se muestra la comparación de los pesos unitarios obtenidos en campo con los obtenidos en laboratorio y su respectivo porcentaje de compactación.

Tabla LXX. **Pesos unitarios secos en campo y en laboratorio**

<b>Muestra No.</b>	<b>Porcentaje de humedad</b>	<b><math>PUS_{Campo}</math> [lb/<math>\pi e^3</math>]</b>	<b><math>PUS_{Laboratorio}</math> [lb/<math>\pi e^3</math>]</b>	<b>Porcentaje de compactación</b>
1	27,90	79,75	79,10	100,82
2	31,06	74,18	76,95	96,40
3	30,01	73,03	74,95	97,44

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.7.6. Presentación de resultados

En la tabla LXXI se presentan los porcentajes de compactación alcanzados en campo para cada muestra de suelo.

Tabla LXXI. **Pesos unitarios y porcentajes de compactación**

<b>Muestra No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Peso unitario seco en campo [lb/pie<sup>3</sup>]</b>	<b>Porcentaje de compactación</b>
1	Suelo sin cal	79,75	100,82
2	Suelo + 1 % de cal	74,18	96,40
3	Suelo + 3 % de cal	73,03	97,44

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.7.7. Análisis de resultados

En las tres muestras de suelo sometidas a ensayo se obtuvo un peso unitario similar al obtenido en el ensayo de Proctor estándar, que es el dato que se toma como base para calcular el porcentaje de compactación alcanzado en campo. La finalidad del ensayo es verificar que la subrasante posea un grado de compactación aceptable, es decir mayor o igual a 95 %. Las tres muestras de suelo cumplieron con la condición, obteniendo valores mayores a 95 %.

#### 4.2.8. Deflexión de pavimento con carga estática

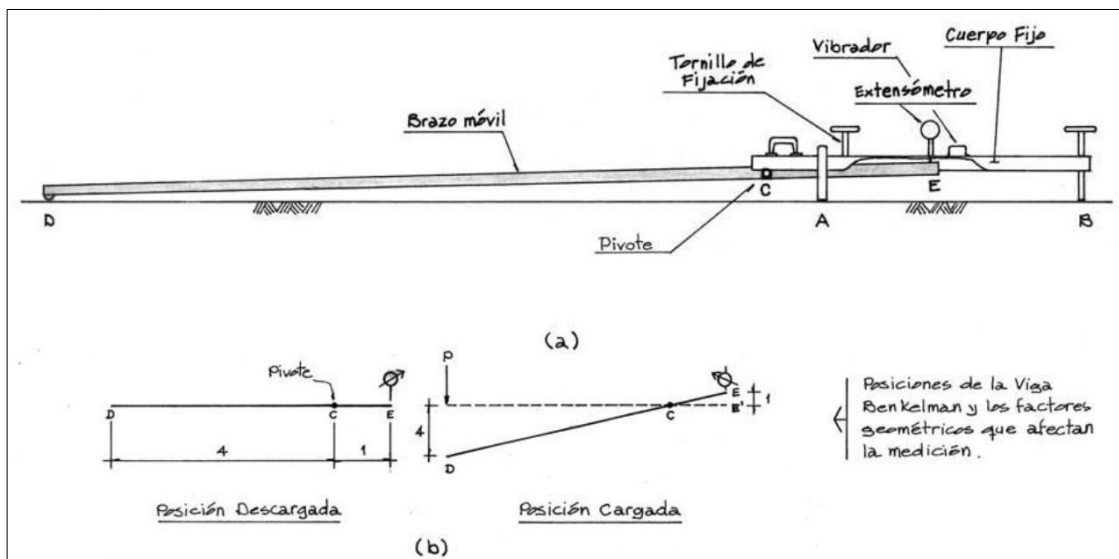
Actualmente no existe un ensayo que sea específicamente para evaluar los empedrados, sin embargo, al ser un pavimento flexible puede ser determinada su deformación a través del ensayo de deflexión con carga estática, haciendo uso de la viga Benkelman.

#### 4.2.8.1. Equipo y material utilizado

- Viga Benkelman. Es un defleómetro mecánico simple. Una palanca, suspendida en un bastidor, transmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador o dial medidor. Debe contar con los siguientes elementos.
  - Bastidor. Viga con tres pies de apoyos sobre el suelo, que sirve de sustentación a la palanca de medida y de soporte al comparador o dial medidor.
  - Palanca de medida. De 3,6 m de longitud, que se puede desmontar en tres partes durante el transporte. Se suspende al bastidor con un eje que la divide en dos partes con relación 2:1.
  - Suspensión. Un eje, punto de apoyo de la palanca, suspendido en dos rodamientos a bolas, estancos al polvo y solidarios al bastidor.
  - Puntos de apoyo. Son tres pies solidarios al bastidor, con regulación de su altura mediante tornillo; los dos anteriores están situados simétricamente con respecto al eje longitudinal de la viga a 170 mm del mismo y separados del posterior, situado en el extremo del batidor, 1 208 mm.
  - Pasador. Sujeto al bastidor por una cadenilla, sirve para bloquear la palanca, dejándola fija al bastidor.
  - Nivel. Para nivelar transversalmente la viga y, por tanto, poner horizontal el eje de rotación de la palanca, por medio de los tornillos de los apoyos anteriores.
  - Deformímetro. Aparato con limbo dividido en 0,01 mm y con un recorrido igual o superior a 10 mm. Se fija al bastidor con un soporte solidario de este, de modo que su vástago prolongado apoya en el extremo de la palanca de medida.

- Palpador. Pieza metálica que reposa sobre el suelo en el punto de medida.
- Nudos. Para unir los tramos en que se puede dividir la palanca de medida.

Figura 58. Esquema y principio de operación de la viga Benkelman



Fuente: Sitecal. <http://www.sitecal.com.bo/files/10.%20Medicion%20de%20deflexiones%20Viga%20Benkelman>, enero de 2018.

- Vehículo de carga. El vehículo que se emplea para cargar el pavimento, es un C-3, con una carga de prueba de 16,50 toneladas en el eje de doble rueda trasero.

#### 4.2.8.2. Procedimiento de ensayo

- Una vez elegida la situación del punto a ensayar, se sitúa el vehículo a 8 m aproximadamente del punto a ensayar, de manera que quede paralelo a la dirección elegida del movimiento.
- Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del vehículo, perpendicularmente al eje de carga, de modo que la punta de prueba del brazo coincida con el punto de ensayo y la viga no roce contra las llantas de la rueda dual, como se muestra en las figuras 59 y 60.

Figura 59. Colocación de la punta de prueba en el punto de medida



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 60. **Alineamiento de la punta de prueba con el eje de carga**



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se libera el seguro del brazo y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de manera que el brazo de medición quede en contacto con los diales.
- Se ajusta el dial del deformímetro de modo que su vástago tenga un recorrido libre. Se gira la esfera del dial hasta que las agujas queden en cero.
- Se hace avanzar suave y lentamente el vehículo hacia el punto de medida con velocidad constante inferior a 3 km/h. Deberá dirigirse por la dirección apropiada para que el centro de las ruedas de carga pase por la vertical del punto de medida y dichas ruedas no toquen al palpador ni a la palanca, ver figura 61.

Figura 61. **Carga ejercida sobre el punto de medida**



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Se anota la lectura máxima  $L_m$  en el comparador, que se produce generalmente en la proximidad del paso del eje de las ruedas sobre la vertical del punto de medida.
- El operador avisa al conductor el momento de invertir el sentido de la marcha, que será cuando el centro de la carga haya sobrepasado 0,3 m el punto de medida. La inversión de la marcha se hará con parada y arranque suave.
- El vehículo se aleja hasta que el eje de las ruedas de carga esté fuera del tramo de ensayo y se toma la lectura final  $L_f$ .

#### 4.2.8.3. Datos obtenidos

Del ensayo de deflexión se obtuvieron los datos de la tabla LXXII.

Tabla LXXII. Datos obtenidos de ensayo de deflexión con carga estática

Tramo	Descripción	Lecturas del dial del deformímetro [ $\times 0,001 \text{ in}$ ]		
		$L_0$	$L_f$	$L_m$
1	Representación de pavimento actual.	0	9	20
2	Subrasante compuesta por arena limosa + 1 % de cal.	0	0	4
3	Subrasante compuesta por arena limosa + 3 % de cal.	0	0	1

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.8.4. Cálculos efectuados

Con los datos obtenidos en la tabla LXX se procede a realizar los cálculos siguientes. Debido a que los cálculos son los mismos para cada tramo sometido a ensayo, solo se tomará de referencia el primer tramo y los demás se calcularán de la misma manera.

- Deflexión total. Para las dimensiones de la viga Benkelman descrita en la sección 4.2.6.1., la deflexión es el doble de la medida de la lectura del dial.

$$d_t = 2(L_m - L_0)$$

Dónde:

$d_t$ : Deflexión total.

$L_m$ : Lectura máxima del dial.

$L_0$ : Lectura inicial del dial.



$$d_t = 2(0,020 - 0) = 0,040 \text{ in} = 1,016 \text{ mm}$$

- Deflexión remanente o residual

$$d_r = 2(L_f - L_0)$$

Dónde:

$d_t$ : Deflexión total.

$L_f$ : Lectura final del dial.

$L_0$ : Lectura inicial del dial.

$$d_r = 2(0,009 - 0) = 0,009 \text{ in} = 0,229 \text{ mm}$$

- Deflexión elástica

$$d_e = 2(L_m - L_f)$$

Donde:

$d_t$ : Deflexión total.

$L_m$ : Lectura máxima del dial.

$L_f$ : Lectura final del dial.

$$d_e = 2(0,020 - 0,009) = 0,011 \text{ in} = 0,279 \text{ mm}$$

#### 4.2.8.5. Resultados obtenidos

Los tramos de pavimento sometidos a ensayo, sufrieron las deflexiones mostradas en la tabla LXXIII.

Tabla LXXIII. Cálculo de deflexiones de tramos pavimento

Tramo	Descripción	Lecturas del dial del deformímetro [ $\times 0,001$ in]			Deflexiones [in]		
		$L_0$	$L_f$	$L_m$	$d_t$	$d_r$	$d_e$
1	Representación de pavimento actual.	0	20	9	0,040	0,018	0,022
2	Subrasante compuesta por arena limosa + 1 % de cal.	0	4	0	0,008	0,000	0,008
3	Subrasante compuesta por arena limosa + 3 % de cal.	0	1	0	0,002	0,000	0,002

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.8.6. Presentación de resultados

Las deformaciones totales, residuales y elásticas para cada tramo de prueba, se presentan en la tabla LXXIV.

Tabla LXXIV. **Deflexiones de tramos de pavimento**

Tramo	Descripción	Deflexiones					
		Pulgadas (in)			Milímetros (mm)		
		$d_t$	$d_r$	$d_e$	$d_t$	$d_r$	$d_e$
1	Representación de pavimento actual.	0,040	0,018	0,022	1,016	0,457	0,559
2	Subrasante compuesta por arena limosa + 1 % de cal.	0,008	0,000	0,008	0,203	0,000	0,203
3	Subrasante compuesta por arena limosa + 3 % de cal.	0,002	0,000	0,002	0,051	0,000	0,051

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.8.7. Análisis de resultados

El comportamiento de los pavimentos flexibles consiste en sufrir deflexiones o deformaciones relativamente puntuales, bajo el efecto de cargas de tránsito. Dado el bajo nivel de rigidez de la carpeta de rodadura, transmiten los esfuerzos hacia las capas inferiores, esto trae como consecuencia, mayores tensiones en la subrasante, por lo que cobra importancia la buena calidad del suelo de la misma. El desempeño ideal de un pavimento es recuperar las deformaciones sufridas al retirarse las cargas que influyen sobre él.

El tramo 1, que representa el diseño de pavimento actual, fue el que sufrió la mayor deformación total y el único en sufrir una deformación remanente o residual. Al aplicarse la carga del vehículo, el punto de medida sufrió una deformación alta y no se recuperó por completo, es decir, quedó deformado permanentemente. En su falla se involucra la baja resistencia de la subrasante, pero, principalmente la casi nula resistencia del mortero que soporta las rocas de la capa de rodadura. El mal desempeño del mortero se predijo por análisis, teniendo en cuenta la falta de control de calidad de los agregados y por ser una

mezcla pobre, es decir, la relación cemento-agregado es muy pequeña, este tipo de mezclas produce una resistencia muy baja, por lo que no se consideran aptas para ser sometidos a cargas como las generadas por el tránsito vehicular.

Los tramos 2 y 3, cuya subrasante fue modificada con 1 y 3 % de cal respectivamente, presentaron deformaciones totales relativamente bajas, siendo estas de carácter elástico, es decir que la deformación sufrida por el pavimento fue recuperada en su totalidad. El tramo que presentó el mejor desempeño fue el 3, ya que fue el que sufrió la menor deformación, con lo que se demuestra la mejora tanto en la calidad del suelo de la subrasante, al ser modificado con cal, como en el desempeño del mortero que soporta las rocas.

Las nuevas proporciones de mortero mostraron un excelente desempeño, sin embargo, al adicionarse cal y/o cemento, su color cambia, perdiendo el aspecto natural que debe conservarse.

## **5. PROPUESTA DE DISEÑO DE PAVIMENTO**

Se elaboraron dos propuestas para mejorar el pavimento empedrado de las calles y avenidas de Antigua Guatemala, la propuesta 1 se realiza de manera similar a como se construye actualmente el pavimento, únicamente mejorando la calidad de la subrasante y del mortero de enlace entre las rocas; y la propuesta 2, se realiza teniendo en cuenta las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos.

### **5.1. Propuesta 1**

La estructura de pavimento empedrado que se propone, está conformada por la subrasante, modificada de acuerdo a los resultados, con cierto porcentaje de cal y la carpeta de rodadura.

#### **5.1.1. Subrasante**

Conforme al comportamiento observado de las muestras de suelo ensayadas, se sugiere que se emplee como subrasante el suelo propio del lugar, siendo este predominantemente, arena limosa, clasificación A-1-b según AASHTO, modificado con 3 % de cal hidratada para alcanzar un valor de CBR mayor a 20, o suelos que cumplan con las clasificaciones A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-3 de la AASHTO, que no posean plasticidad.

Se sugiere que la subrasante modificada con cal hidratada tenga un espesor mínimo de 18 cm, y se le dé un bombeo de 3 a 4 % hacia el eje central de la calle.

El proceso de adición de cal requerida en la subrasante, se realizará a través de las siguientes etapas:

- Escarificación

Se procede a remover los materiales que no sean suelos y que sean mayores que 3 pulgadas, como troncos y cualquier tipo de material orgánico. Se escarifica el suelo, en un espesor de 18 centímetros, como mínimo, haciendo uso de picos u otro tipo de herramientas manuales que sean necesarias.

- Suministro y aplicación de cal

La cal hidratada debe ser uniformemente extendida en el porcentaje especificado. Las bolsas de cal son espaciadas para la distribución requerida cuando la modificación se realiza por área; y cuando se realiza la modificación por volumen se agrega el porcentaje de cal a determinada cantidad de metros cúbicos de suelo, dependiendo del peso específico del mismo.

La distribución de la cal hidratada por bolsas por unidad de área se puede realizar de la siguiente manera:

$$e \times A \times \gamma_{mezcla} \times 0.03 = \frac{P_{cal}}{P_{bolsa\ cal}} = \text{Cantidad de bolsas de cal por área}$$

Donde:

$e$ :	Espesor de subrasante [m].
$A$ :	Área de suelo a tratar [m <sup>2</sup> ].
$\gamma_{mezcla}$ :	Densidad seca máxima de mezcla suelo-cal [kg/m <sup>3</sup> ].
0.03:	Porcentaje de cal hidratada a aplicar (3 %).
$P_{cal}$ :	Cantidad de cal a agregar, en peso [kg].
$P_{bolsa\ cal}$ :	Peso de bolsa de cal hidratada a emplear [kg].

- Incorporación de humedad

Independiente del método usado para la adición de agua, es esencial que la cantidad agregada de agua sea la adecuada, para asegurar la completa hidratación y llevar el contenido de humedad del suelo 3 % arriba de la óptima antes de la compactación, el 3 % adicional, se agrega por el tiempo que llevará el proceso de mezclado y depende también de las condiciones ambientales.

- Mezclado

Se requiere una mezcla preliminar para distribuir la cal dentro del suelo. Durante este proceso o inmediatamente después, el agua deberá agregarse. Para verificar la uniformidad de la mezcla se deberá cavar pequeños agujeros al azar y el suelo puede ser rociado con un indicador de pH, tal como la fenolftaleína. La fenolftaleína se torna a un color púrpura entre un pH de 12 a 13, lo cual indica una modificación completa.

- Compactación

La mezcla suelo-cal deberá ser compactada a la densidad requerida por la especificación, comúnmente, al menos, al 95 % de la densidad máxima del ensayo Proctor estándar. El valor de la densidad deberá basarse en la curva

Proctor de una muestra representativa de la mezcla de suelo-cal y no del suelo sin tratar.

La compactación deberá iniciar inmediatamente después de la mezcla final. Se recomienda realizar la compactación en dos capas, de 9 centímetros de espesor cada una, para completar los 18 centímetros que constituyen la subrasante modificada. El proceso de compactación debe realizarse utilizando pisones de mano (ver figura 62).

Para comprobar que se alcanzó la densidad requerida, se realiza el ensayo de densidad de campo, verificando que se obtenga como mínimo el 95 % de compactación, en relación a la compactación realizada en laboratorio (Proctor estándar).

Figura 62. **Compactación de capas de material que conforma la subrasante del pavimento**



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.



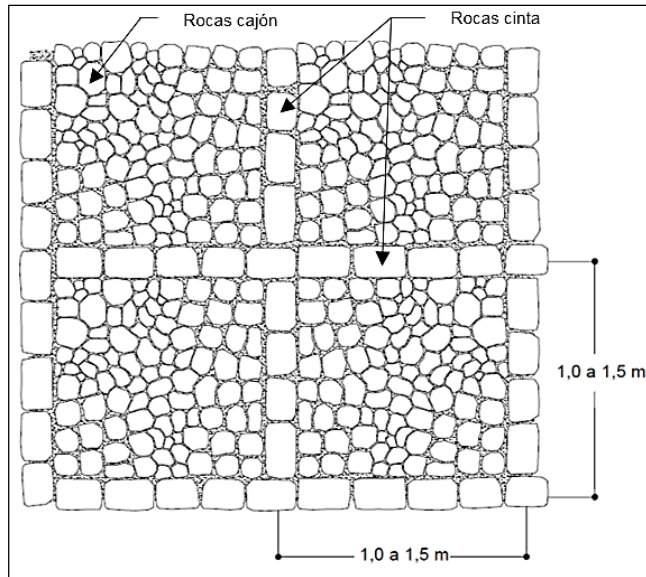
## **5.1.2. Carpeta de rodadura**

La carpeta de rodadura estará compuesta por rocas de origen volcánico y un mortero de enlace entre ellas.

### **5.1.2.1. Rocas**

Las rocas que conformarán la carpeta de rodadura son de origen volcánico (andesitas y basaltos), y sus densidades promedio oscilan entre 2,5 y 2,8 g/cm<sup>3</sup>. Proviene del cerro El Rodeo, ubicado en el municipio Pastores, Sacatepéquez, sus formas y dimensiones se especifican en la sección 3.2.2.1. Para su correcto confinamiento se colocarán líneas maestras o cintas en sentido longitudinal y transversal de las calles a una distancia de 1 a 1,5 m de separación entre sí, y los espacios entre ellas se rellenarán con rocas cajón, colocadas de manera que sus formas encajen bien entre sí, procurando que los espacios entre ellas sean pequeños. (Ver figura 63).

Figura 63. **Configuración de las rocas en la carpeta de rodadura, vista en planta**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

### 5.1.2.2. Mortero

Dado que se demostró que el mortero en el que se apoyan las rocas (mezclón), en el actual diseño no es apto para resistir las cargas del tránsito vehicular, y que tanto el control de calidad de sus materiales como su aspecto visual deben permanecer preferentemente sin modificar, se sugiere que las rocas sean apoyadas directamente en la subrasante. Solamente se usará el mortero de enlace (estruque), para rellenar los espacios vacíos entre las rocas y mantenerlas unidas. Las proporciones volumétricas del mortero de enlace son 1:1/2:4, está compuesto por cemento portland, cal hidratada y arena limosa, respectivamente. Las proporciones sugeridas son las mismas que las que se utilizan actualmente, la única variación es que se sugiere sustituir la cal viva por

cal hidratada, porque posee mejores propiedades de adherencia y su aplicación es más sencilla.

#### **5.1.2.3. Espesor**

La altura promedio de las rocas es de 15 cm, estas serán hincadas, quedando de 3 a 5 cm de su altura incrustada en la subrasante, y la carpeta de rodadura tendrá un espesor de aproximadamente 12 cm.

#### **5.1.2.4. Colocación**

A la subrasante terminada y compactada se escarificará un espesor de aproximadamente 3 cm, que servirá como cama de apoyo para la colocación de las rocas. Una vez disgregada la subrasante, se colocarán las rocas cinta en ambos sentidos. Conformadas las rocas cinta, se completa la carpeta, colocando las rocas cajón, de manera que se logre un confinamiento adecuado entre ellas, procurando disminuir al máximo hendiduras que se formen, para esto se hincarán las rocas con un martillo que sea adecuado (no debe dañar las rocas). Se deberá verificar en todo momento la nivelación de las rocas. (Ver figura 64).

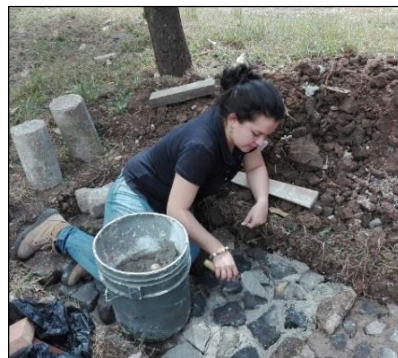
Figura 64. **Colocación de rocas**



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

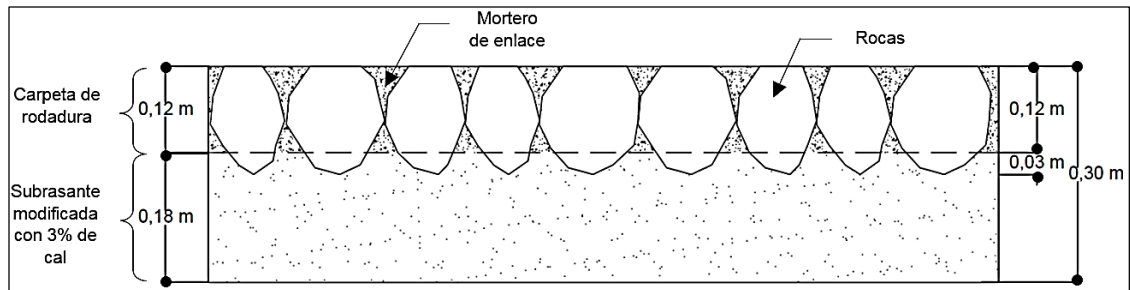
Posteriormente se esparcirá la mezcla de mortero enlace de manera que se rellenen los espacios entre las rocas (ver figura 65), aumentando la adherencia entre ellas y limitando la filtración del agua proveniente de las lluvias. Se deberá dejar aproximadamente 1 cm de profundidad de la roca al descubierto. Se recomienda esperar como mínimo 72 horas antes de habilitar el paso vehicular sobre los tramos recién colocados.

Figura 65. **Colocación de mortero de enlace entre las rocas**



Fuente: Estacionamiento de Área de prefabricados, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 66. **Propuesta 1 de estructura del pavimento**



Fuente: Elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

### 5.1.3. Tráfico permitido

Se recomienda, para este tipo de pavimento, un tránsito mediano (ver tabla de clasificación del tránsito, en anexos), permitiendo durante 24 horas, un total de 1 000 a 3 000 vehículos, de 250 a 700 camiones o autobuses (vehículos C-2 y C-3) y de 50 a 150 camiones pesados (vehículos que sobrepasen un peso total de 21,50 toneladas métricas).

## 5.2. Propuesta 2

Esta propuesta está basada en las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos, consta de subrasante, sub-base, base y carpeta de rodadura.

### 5.2.1. Subrasante

La conformación de la subrasante debe de procederse de la siguiente forma:

- Previo a retirar el material tomar las precauciones y acciones necesarias con las instalaciones de agua potable existentes, y algunas instalaciones eléctricas.
- Proceder a retirar el empedrado existente, teniendo en cuenta que las piedras que se retiren se volverán a colocar.
- Se procederá a realizarse un vaciado del material existente hasta la cota del diseño del pavimento, se sugiere que los espesores a utilizar sean los siguientes:
  - De 20 a 30 cm de sub-base
  - De 10 a 20 cm de base
  - La subrasante solamente se acomodará en una profundidad de 15 cm.

La subrasante en el área analizada cumple con las especificaciones de la Dirección General de Caminos, siendo suelos, en su mayoría, A-1-b y A-2-4, por lo que se consideran aptos para conformar un pavimento. Dado que el tipo de suelo es adecuado, solamente se debe acomodarse. Dicho proceso consiste en escarificar, homogenizar, conformar y compactar la subrasante, adecuando su superficie a la sección típica y elevaciones del proyecto establecidas.

Se debe escarificar aproximadamente 15 cm del suelo existente. La subrasante se reacondicionará con motoniveladora o máquina estabilizadora de suelos, luego debe ser compactada con rodo, comparando sus porcentajes de compactación y humedad con los porcentajes obtenidos en el ensayo Proctor modificado. El contenido de humedad debe estar dentro de  $\pm 3$  % de la humedad óptima, hasta lograr el 95 % de compactación respecto a la densidad máxima.

Se debe llevar un control de calidad con el ensayo de densidad de campo (método de cono y arena o densímetro nuclear), con la tolerancia del 2 %, respecto al porcentaje de compactación especificado anteriormente, para la subrasante reacondicionada. Se deben efectuar ensayos representativos cada 400 m<sup>2</sup> de subrasante o cuando el material cambie.

### **5.2.2. Sub-base**

La sub-base debe tener un espesor compactado mínimo de 20 cm. Debe estar constituida por materiales tipo granular en su estado natural (de clasificación A-1, A-2 o A-3) o mezclados, que formen y produzcan un material que cumpla con:

- CBR, mínimo de 30
- El índice de plasticidad debe ser menor a 6 y el límite líquido debe ser menor a 25.

Si el suelo no cumpliera con las especificaciones se deberá conseguir un material que cumpla con las especiaciones recomendadas y transportarse al proyecto.

Se debe colocar el volumen de material correspondiente al espesor de sub-base requerido por el diseño (entre 20 y 30 cm), sobre la subrasante, previamente preparada y reacondicionada, de acuerdo a la sección 5.2.1. El material puede ser colocado en pilas por medio de camiones de volteo, formando camellones o con máquina especial esparcidora. El material de sub-base, debe ser tendido en capas no mayores de 30 cm ni menores de 10 cm.

Al material debidamente homogenizado, se le agrega la cantidad de agua necesaria para lograr su compactación, hasta lograr el 100 % de la densidad máxima determinada por el ensayo de compactación Proctor modificado. Se debe compactar a una densidad de por lo menos 3 % respecto al porcentaje de compactación especificado, se debe realizar un ensayo representativo por cada 400 m<sup>2</sup> de cada una de las capas que se compacten.

### **5.2.3. Base**

Se propone emplear una base granular por las propiedades de densidad y permeabilidad que posee, dándole un espesor mínimo de 10 cm. Las propiedades con que debe cumplir el suelo son las siguientes:

- Debe tener un CBR mínimo de 70
- El material para la capa de base granular 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, de los que se indican en la tabla LXXV.
- El material de la capa de base granular, no debe tener un índice de plasticidad mayor de 6, ni un límite líquido mayor de 25.



**Tabla LXXV. Tipos de graduación para material de sub-base o base granular**

Standard mm	Tamiz N°	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)					
		TIPO "A" (Sub-base) 50 mm (2") máximo	TIPO "A" (Base) 50 mm (2") máximo		TIPO "B" (Sub-base y Base) 38.1 mm (1 ½") máximo		TIPO "C" (Sub-base y Base) 25 mm (1") máximo
		<u>A-1</u>	<u>A-1</u>	<u>A-2</u>	<u>B-1</u>	<u>B-2</u>	<u>C-1</u>
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	⅜"	-	-	-	-	-	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: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la construcción de carreteras y puentes*. p. 304-2.

Por el tipo de graduación se recomienda utilizar los suelos clasificados como C-1, ya que poseen menor cantidad de partículas de gran tamaño, que podrían dificultar la colocación de las rocas que conforman la capa de rodadura.

El material de base granular debe ser depositado sobre la sub-base previamente preparada y aceptada. Su colocación y ensayos de control de calidad deben realizarse de la misma manera que se realizan para la sub-base, según la sección 5.2.2.

#### **5.2.4. Carpeta de rodadura**

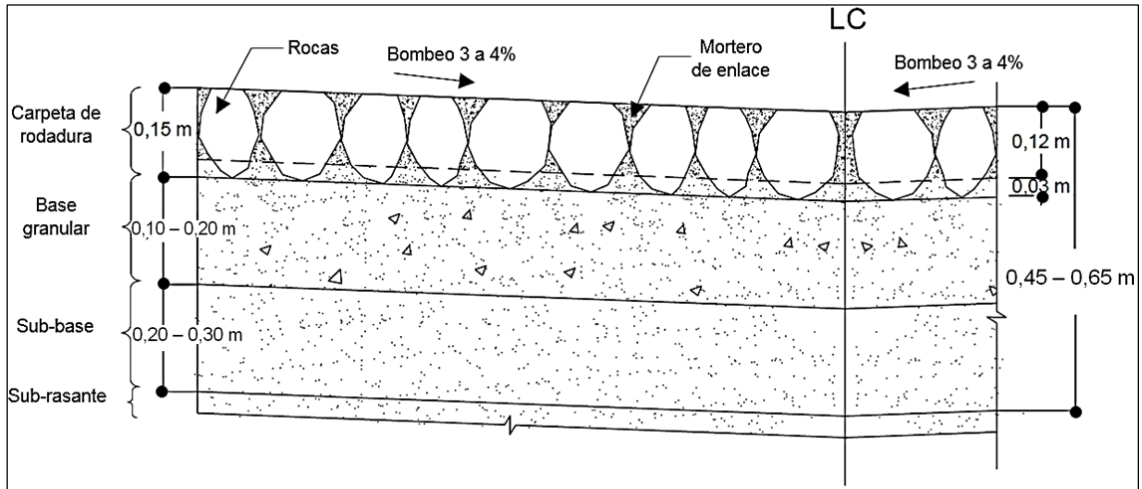
Sobre la base terminada y compactada se colocará una capa de mortero con un espesor de aproximadamente 3 cm, que servirá como cama de apoyo

para la colocación de las rocas. Dicho mortero tendrá una proporción volumétrica de 1:1/4:3, compuesto por cemento portland, cal hidratada y agregado fino, respectivamente, alcanzando una resistencia a compresión mínima a los 28 días de 175kg/cm<sup>2</sup>.

Posteriormente se colocarán las rocas cinta en ambos sentidos. Conformadas las rocas cinta, se completa la carpeta, colocando las rocas cajón, de manera que se logre un confinamiento adecuado entre las rocas, procurando disminuir al máximo hendiduras que se formen. Se deberá verificar en todo momento la nivelación de las rocas.

Se esparcirá la mezcla de mortero de enlace de manera que se rellenen los espacios entre las rocas, aumentando la adherencia entre ellas y limitando la filtración del agua proveniente de las lluvias. El mortero de enlace tendrá una proporción volumétrica de 1:1/2:4, compuesto por cemento portland, cal hidratada y agregado fino. Se deberá dejar aproximadamente 1 cm de profundidad de la roca al descubierto. Se recomienda esperar como mínimo 72 horas antes de habilitar el paso vehicular sobre los tramos recién colocados.

Figura 67. Sección transversal de propuesta 2



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

### 5.2.5. Tráfico permitido

Se recomienda para este tipo de pavimento un tránsito mediano (ver tabla de clasificación del tránsito, en anexos), permitiendo durante 24 horas, un total de 1 000 a 3 000 vehículos, de 250 a 700 camiones o autobuses (vehículos C-2 y C-3) y de 50 a 150 camiones pesados (vehículos que sobrepasen un peso total de 21,50 toneladas métricas).



## CONCLUSIONES

1. Se logró desarrollar una propuesta de pavimento flexible utilizando rocas de origen volcánico para las calles y avenidas de la ciudad de Antigua Guatemala, donde se incluyen mejoras a la calidad y colocación de las capas de suelo que conforman su estructura, como también a la carpeta de rodadura del mismo.
2. El empedrado actual, según análisis visual, muestra deficiencias en su estructura que afectan su comportamiento. Frecuentemente se observa desprendimiento de las rocas, esto, posiblemente se debe a la insuficiente adherencia entre las mismas y el mortero de enlace. Esto, según se observó, provoca que las rocas sufran mayor movimiento.
3. El desempeño de las rocas de origen volcánico empleadas demuestra su buena calidad, ya que no presentan ningún tipo de falla. Las rocas volcánicas poseen ventajas sobre las rocas de canto rodado, ya que sus formas favorecen el acople entre ellas y, por su textura brindan mayor fricción a las llantas de los vehículos, esto proporciona mayor seguridad en el tránsito vehicular. Las rocas volcánicas (andesitas y basaltos) por poseer texturas y formas irregulares también poseen mejor adherencia con el mortero de enlace.
4. El tipo de pavimento actual y el que se sugiere en la propuesta uno de este trabajo, no posee base ni sub-base, por lo que la subrasante debe ser de muy buena calidad. El tipo de suelo natural bajo las calles de Antigua Guatemala es predominantemente arena limosa. Las muestras

de suelo evaluadas en condiciones de compactación de laboratorio, presentaron excelentes resultados en cuanto a su resistencia, sin embargo, los métodos de compactación empleados en campo se realizan de forma manual, siendo menor la energía con que se realiza, en consecuencia, el suelo alcanza un menor grado de compactación, disminuyendo significativamente su resistencia.

5. El mejoramiento del diseño del pavimento empedrado de la propuesta uno de este trabajo, se enfoca principalmente en corregir la calidad de la subrasante, para que esta sea apta para resistir las cargas transmitidas por el tránsito vehicular sin sufrir deformaciones permanentes. La opción más factible es el tratamiento del suelo, añadiéndole 3 % de cal hidratada para aumentar su capacidad portante de manera permanente y de igual manera, aumentar el grado de compactación del suelo, teniendo en cuenta que este debe ser de al menos 98 % del grado de compactación óptimo, obtenido en los ensayos de laboratorio. El tramo de prueba con el diseño propuesto mostró excelentes resultados, presentando deflexiones recuperables en su totalidad.
6. En la segunda propuesta de este trabajo, se pretende que el diseño del pavimento cuente con sub-base y base, que cumplan con los requerimientos de la Dirección General de Caminos, mejorando la calidad del suelo, y los métodos de compactación.
7. La experiencia con empedrados existentes, demuestra que las deformaciones presentadas, no disminuyen sensiblemente el nivel de servicio original luego de 30 o 40 años de servicio del camino. Existen varios factores que inciden en la duración del empedrado, estos factores principalmente son: la calidad de la subrasante o suelo de soporte, la

calidad de la piedra, la buena ejecución del empedrado, la eficiencia del drenaje superficial, la cantidad y distribución del tráfico y un plan adecuado de conservación y mantenimiento.





## RECOMENDACIONES

1. Debido a que los empedrados, en la mayoría de los casos se construyen directamente sobre la subrasante o suelo natural, la selección de una adecuada subrasante es tan importante como la ejecución en sí del empedrado. La clasificación de un suelo que tenga buenas características para poder ser utilizado en la subrasante debe de tener una clasificación AASHTO A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-6 o A-3.
2. El pavimento empedrado empleado actualmente en las calles de Antigua Guatemala, no es apto para que sobre el transiten grandes cantidades de vehículos pesados, pesos mayores a 21,50 toneladas métricas, por lo que se recomienda limitar su ingreso, realizando una normativa que regule su circulación dentro de la ciudad. Asimismo, podrían diseñarse calles específicas para que sobre ellas transiten este tipo de vehículos, diseñándolas con mayor confinamiento, o bien construyéndolas con franjas de rocas de mayor tamaño, para la rodadura de las llantas.
3. En la ejecución de los empedrados debe tenerse especial cuidado en darle a las calles las pendientes necesarias, para que el agua proveniente de las lluvias no se estanque en ellas. Debe verificarse periódicamente la calidad de las calles, dándoles mantenimiento cada vez que presenten algún desperfecto, para que no presenten problemas en su desempeño, en época de invierno principalmente.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BOWLES, Joseph. *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1981. 213 p.
2. CRESPO Villalaz, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 5a ed. México: Limusa, 2004. 650 p.
3. Dirección General de Obras Públicas. *Análisis urbano de la ciudad de Antigua Guatemala*. Guatemala: s.n. 1967. 156 p.
4. HERNÁNDEZ Canales, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 466 p.
5. Ingenieros Consultores de Centro América, S.A. *Especificaciones Generales para la construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Dirección General de Caminos, 2001. 724 p.
6. JIMÉNEZ González, Marta Liliana. *Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos de grano fino estabilizados con cal*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 109 p.
7. JUÁREZ Badillo, Eulalio. *Mecánica de Suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. 3a ed. México: Limusa, 2005. 644 p.

8. National Lime Association. *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*. Estados Unidos de América: s.n. 2004. 42 p.
9. Organización Internacional del Trabajo. *Manual andino para la construcción y mantenimiento de empedrados*. Quito, Ecuador: s.n. 2004. 89 p.
10. QUINTANA Crespo, Enrique. *Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2005. 308 p.

## ANEXOS

Anexo 1. **Corrección de viscosidad del agua para  $\eta_T/\eta_{20}$**

°C	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	1.3012	1.2976	1.2940	1.2903	1.2867	1.2831	1.2795	1.2759	1.2722	1.2686
11	1.2650	1.2615	1.2580	1.2545	1.2510	1.2476	1.2441	1.2406	1.2371	1.2336
12	1.2301	1.2268	1.2234	1.2201	1.2168	1.2135	1.2101	1.2068	1.2035	1.2001
13	1.1968	1.1936	1.1905	1.1873	1.1841	1.1810	1.1777	1.1746	1.1714	1.1683
14	1.1651	1.1621	1.1590	1.1560	1.1529	1.1499	1.1469	1.1438	1.1408	1.1377
15	1.1347	1.1318	1.1289	1.1260	1.1231	1.1202	1.1172	1.1143	1.1114	1.1085
16	1.1056	1.1028	1.0999	1.0971	1.0943	1.0915	1.0887	1.0859	1.0830	1.0802
17	1.0774	1.0747	1.0720	1.0693	1.0667	1.0640	1.0613	1.0586	1.0560	1.0533
18	1.0507	1.0480	1.0454	1.0429	1.0403	1.0377	1.0351	1.0325	1.0300	1.0274
19	1.0248	1.0223	1.0198	1.0174	1.0149	1.0124	1.0099	1.0074	1.0050	1.0025
20	1.0000	0.9976	0.9952	0.9928	0.9904	0.9881	0.9857	0.9833	0.9809	0.9785
21	0.9761	0.9738	0.9715	0.9692	0.9669	0.9646	0.9623	0.9600	0.9577	0.9554
22	0.9531	0.9509	0.9487	0.9465	0.9443	0.9421	0.9399	0.9377	0.9355	0.9333
23	0.9311	0.9290	0.9268	0.9247	0.9225	0.9204	0.9183	0.9161	0.9140	0.9118
24	0.9097	0.9077	0.9056	0.9036	0.9015	0.8995	0.8975	0.8954	0.8934	0.8913
25	0.8893	0.8873	0.8853	0.8833	0.8813	0.8794	0.8774	0.8754	0.8734	0.8714
26	0.8694	0.8675	0.8656	0.8636	0.8617	0.8598	0.8579	0.8560	0.8540	0.8521
27	0.8502	0.8484	0.8465	0.8447	0.8428	0.8410	0.8392	0.8373	0.8355	0.8336
28	0.8318	0.8300	0.8282	0.8264	0.8246	0.8229	0.8211	0.8193	0.8175	0.8157
29	0.8139	0.8122	0.8105	0.8087	0.8070	0.8053	0.8036	0.8019	0.8001	0.7984
30	0.7967	0.7950	0.7934	0.7917	0.7901	0.7884	0.7867	0.7851	0.7834	0.7818
31	0.7801	0.7785	0.7769	0.7753	0.7737	0.7721	0.7705	0.7689	0.7673	0.7657
32	0.7641	0.7626	0.7610	0.7595	0.7579	0.7564	0.7548	0.7533	0.7517	0.7502
33	0.7486	0.7471	0.7456	0.7440	0.7425	0.7410	0.7395	0.7380	0.7364	0.7349
34	0.7334	0.7320	0.7305	0.7291	0.7276	0.7262	0.7247	0.7233	0.7218	0.7204
35	0.7189	0.7175	0.7161	0.7147	0.7133	0.7120	0.7106	0.7092	0.7078	0.7064



Fuente: BOWLES, Joseph. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. p 108.

Anexo 2. **Clasificación del tráfico**

TRAFICO TOTAL DURANTE 24 HORAS				
TIPO DE TRÁNSITO	TOTAL DE VEHÍCULOS	CAMIONES O AUTOBUSES	CAMIONES PESADOS	CARGA DE DISEÑO (Lbs./rueda)
PESADO	3000 MÍNIMO	700 MÍNIMO	150 MÍNIMO	14000
MEDIANO	1000-3000	250-700	50-150	12000
LIVIANO	1000 MÁXIMO	250 MÁXIMO	50 MÁXIMO	10000

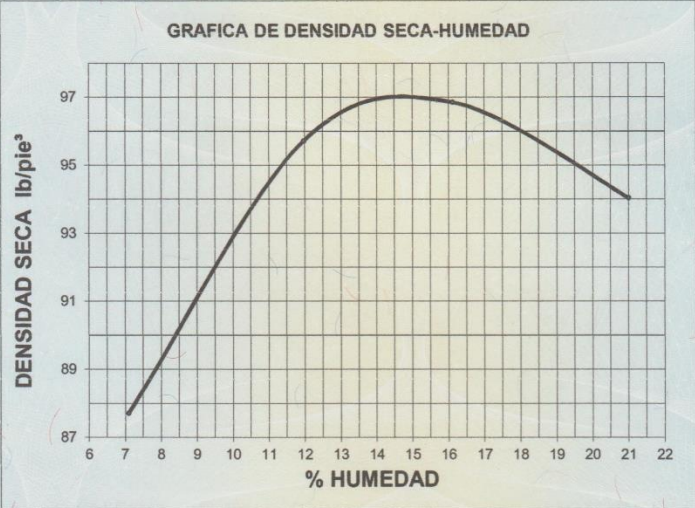
Fuente: OVALLE QUIROA. C. *Pavimento empedrado como una solución vial en el interior de la República de Guatemala.* p 43.

### Anexo 3. Resultados de ensayo de compactación de muestra 1

	<b>CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</b>	
INFORME No. 228 S.S.		O.T.: 37,379 <b>No. 11660</b>
Interesado:	Daisy Lorena Najera Lima	Proctor Estándar: ( ) Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
Asunto:	ENSAYO DE COMPACTACIÓN.	Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
Proyecto:	Trabajo de graduación "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE CANTO RODADO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ; A TRAVES DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES"	
Ubicación:	ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ	
Fecha:	miércoles, 21 de junio de 2017	Muestra: 1

**GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD**


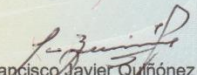



% Humedad	Densidad Seca (lb/ft³)
7	88
8	90
9	92
10	94
11	95.5
12	96.5
13	97
14	97
15	97
16	96.5
17	95.5
18	94.5
19	93.5
20	92.5
21	91.5


Descripción del suelo:	Arena Color Café Oscuro con presencia de Pomez	
Densidad seca máxima $\gamma_d$ :	1,553.94 Kg/m <sup>3</sup>	97.00 lb/ft <sup>3</sup>
Humedad óptima:	14.75 %	
Observaciones:	Muestra proporcionado por el interesado.	

Atentamente,

 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez Jefe Sección Mecánica de Suelos	Vo. Bo.	 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz DIRECTOR CII/USAC
--	---------	---




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




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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 4. **Resultados de ensayo de compactación de muestra 2**



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



---

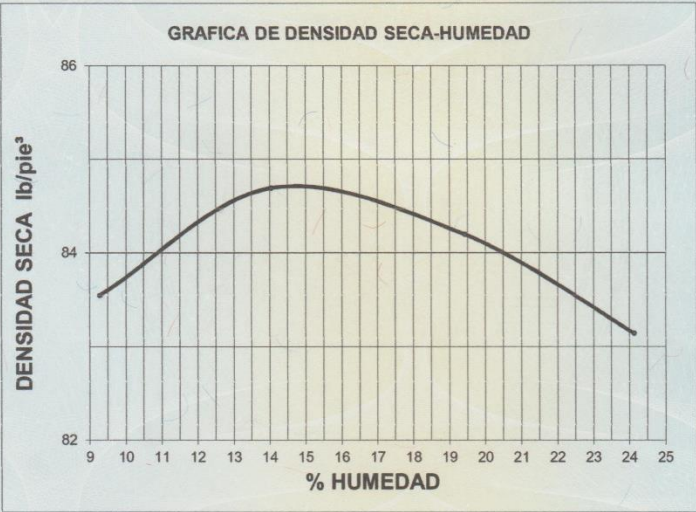
INFORME No. 232 S.S.

O.T.: 37,379

**No. 11665**

Interesado: Daisy Lorena Najera Lima      Proctor Estándar: ( ) Norma: A.A.S.H.T.O. T-99  
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN.      Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180  
 Proyecto: Trabajo de graduación "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE CANTO RODADO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ; A TRAVES DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES"  
 Ubicación: ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ  
 Fecha: miércoles, 21 de junio de 2017      Muestra: 2

**GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD**



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
9	83.5
10	84.0
11	84.5
12	84.8
13	85.0
14	85.1
15	85.0
16	84.8
17	84.5
18	84.2
19	83.8
20	83.4
21	83.0
22	82.6
23	82.2
24	81.8

Descripción del suelo: Arena limosa color café con presencia de pomez  
 Densidad seca máxima  $\gamma_d$ : 1,357.70 Kg/m³      84.75 lb/ft³  
 Humedad óptima: 14.75 %  
 Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.

Atentamente,

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

Vo. Bo.

*Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*  
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
 DIRECTOR CII/USAC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
SECCIÓN DE 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, USAC.



Anexo 5. **Resultados de ensayo de compactación de muestra 3**

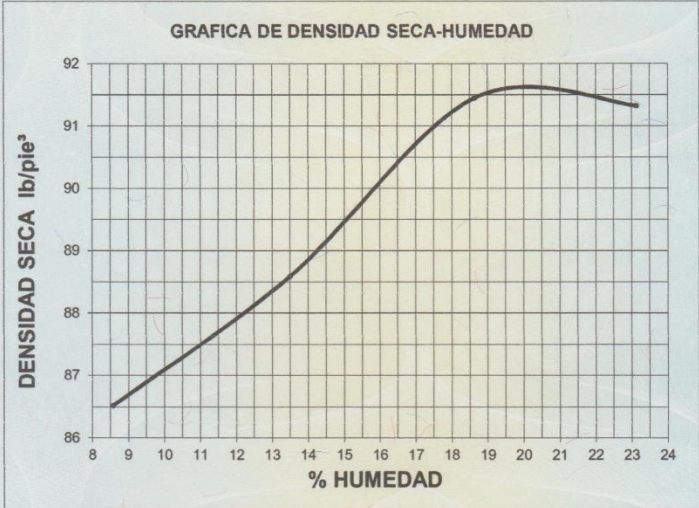
 **CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA** 

---

INFORME No. 236 S.S. O.T.: 37,379 **No. 11669**

Interesado: Daisy Lorena Najera Lima Proctor Estándar: ( ) Norma: A.A.S.H.T.O. T-99  
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180  
Proyecto: Trabajo de graduación "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE CANTO RODADO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ; A TRAVES DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES"  
Ubicación: ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ  
Fecha: miércoles, 21 de junio de 2017 Muestra: 3

**GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD**



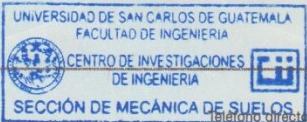

% Humedad	Densidad Seca (lb/ft³)
8	86.5
10	87.5
12	88.5
14	89.5
16	90.5
18	91.5
20	91.8
22	91.5
23	91.3

Descripción del suelo: Arena con presencia de pomez color café claro  
Densidad seca máxima  $\gamma_d$ : 1,467.43 Kg/m<sup>3</sup> 91.60 lb/ft<sup>3</sup>  
Humedad óptima: 20.00 %  
Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.

Atentamente,

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

Vo. Bo. *Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC


 

---


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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 6. **Resultados de ensayo CBR de muestra 1**



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



---

INFORME No. 229 S.S.

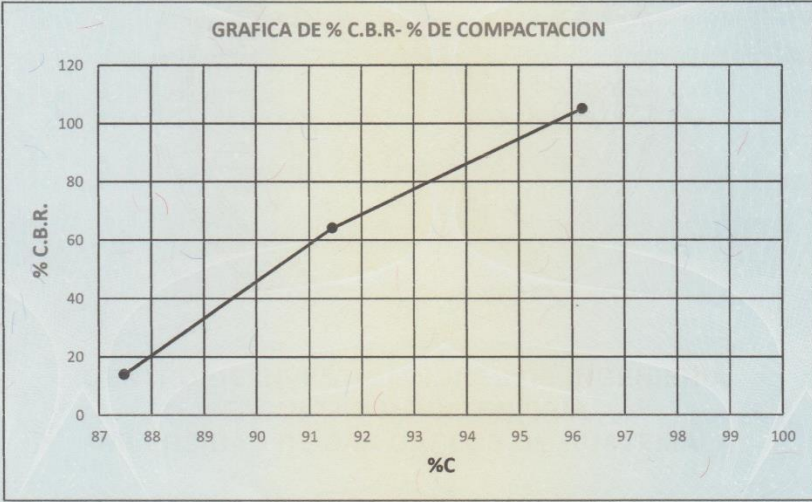
O.T. No. 37,379

No. 11661

Interesado: Daisy Lorena Najera Lima  
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O. T-193  
 Trabajo de graduación "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE CANTO RODADO,  
 Proyecto: PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ; A TRAVES DEL MEJORAMIENTO DE  
 LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES"  
 Ubicación: ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ  
 Descripción del suelo: Arena Color Café Oscuro con presencia de Pomez  
 Fecha: miércoles, 21 de junio de 2017

PROBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
No.	No.	H (%)	$\Psi_d$ (Lb/pie <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)
1	10	14.65	84.86	87.5	2.42	13.94
2	30	14.65	88.70	91.4	0.33	64.21
3	65	14.65	93.32	96.2	0.15	105.03

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



Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.


Atentamente,

Vo. Bo.

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

*Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*  
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
 DIRECTOR CII/USAC


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA


SECCIÓN DE 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, USAC.

## Anexo 7. Resultados de ensayo CBR de muestra 2



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



---

INFORME No. 233 S.S.

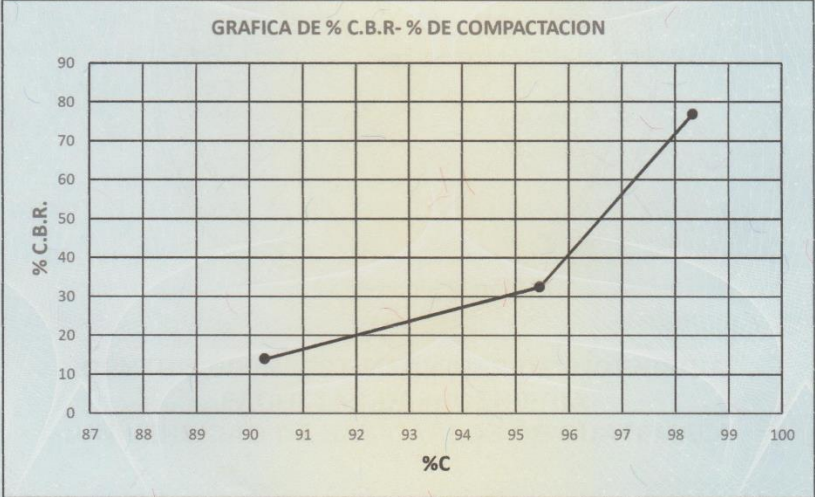
O.T. No. 37,379

No. 11666

Interesado: Daisy Lorena Najera Lima  
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O. T-193  
 Trabajo de graduación "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE CANTO RODADO,  
 PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ; A TRAVES DEL MEJORAMIENTO DE  
 LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES"  
 Proyecto: ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ  
 Ubicación: Arena limosa color café con presencia de pomez  
 Descripción del suelo: miércoles, 21 de junio de 2017

PROBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
No.	No.	H (%)	$\gamma_d$ (Lb/pie <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)
1	10	20.62	76.51	90.3	4.36	13.94
2	30	20.62	80.90	95.5	2.44	32.44
3	65	20.62	83.34	98.3	2.03	76.89

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




Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.


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

*Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*  
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
 DIRECTOR CII/USAC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
SECCIÓN DE 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, USAC.



Anexo 9. **Resultados de ensayo de límites de Atterberg de muestra 1**



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



---

INFORME No. 226 S.S.

O.T.: 37,379 **No. 11658**

Interesado: Daisy Lorena Nájera Lima

Proyecto: Trabajo de graduación "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE CANTO RODADO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ; A TRAVES DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ

FECHA: miércoles, 21 de junio de 2017

**RESULTADOS:**

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	N.P.	N.P.	ML	Arena Color Café Oscuro con presencia de Pomez

(\*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

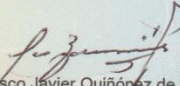
Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.

Atentamente,



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo.Bo.




Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC




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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 10. **Resultados de ensayo de límites de Atterberg de muestra 2**



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



---

INFORME No. 230 S.S.

O.T.: 37,379 **No. 11662**

Interesado: Daisy Lorena Nájera Lima

Proyecto: Trabajo de graduación "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE CANTO RODADO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ; A TRAVES DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ

FECHA: miércoles, 21 de junio de 2017


**RESULTADOS:**

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	2	N.P.	N.P.	ML	Arena limosa color café con presencia de pomez

(\*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

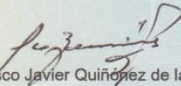
Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.

Atentamente,



Ing. Omar Enrique Medcaño Méndez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo.Bo.




Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC

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


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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 11. **Resultados de ensayo de límites de Atterberg de muestra 3**



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



---

INFORME No. 234 S.S.

O.T.: 37,379 **No. 11667**

Interesado: Daisy Lorena Nájera Lima

Proyecto: Trabajo de graduación "PROPUESTA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DE ROCAS DE CANTO RODADO, PARA LAS CALLES DE ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ; A TRAVES DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPEQUEZ

FECHA: miércoles, 21 de junio de 2017

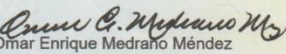
**RESULTADOS:**

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	3	N.P.	N.P.	ML	Arena con presencia de pomez color café claro

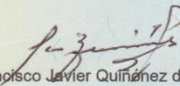
(\*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.

Atentamente, \_\_\_\_\_



Vo.Bo.  
Ing. Omar Enrique Medraño Méndez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC

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

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono: 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, USAC.











Anexo 15. **Resultados de ensayo de proctor estándar de muestra de suelo sin cal**



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



---

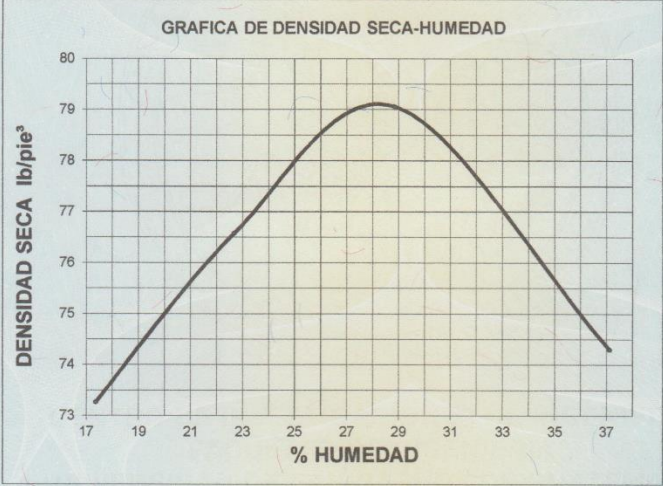
**No. 13112**

INFORME No. 597 S.S. O.T.: 37,990

Interesado: Daisy Lorena Nájera Lima  
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Estándar: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-99  
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Propuesta de Pavimento Flexible de Rocas de Canto Rodado, Para Las Calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a Través del Mejoramiento de Las Propiedades de Sus Componentes" Proctor Modificado: ( ) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180


Ubicación: Antigua Guatemala, Sacatepéquez  
 Fecha: martes, 28 de noviembre de 2017

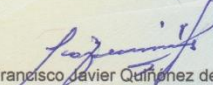
**GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD**





% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
17	73.5
19	75.0
21	76.5
23	77.8
25	78.8
27	79.5
28.30 (Hop.)	79.10
29	78.8
31	77.8
33	76.5
35	75.0
37	73.5

Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café  
 Densidad seca máxima  $\gamma_d$ : 1,267.18 Kg/m<sup>3</sup> 79.10 lb/ft<sup>3</sup>  
 Humedad óptima Hop.: 28.30 %  
 Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.  
 Atentamente,

  
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
 SUELOS

Vo. Bo.   
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
 DIRECTOR CII/USAC





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–  
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
 Contacto: 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, USAC.

Anexo 16. **Resultados de ensayo de proctor estándar de muestra de suelo + 1 % de cal**



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



---

No. **13113**

INFORME No. 598 S.S.

O.T.: 37,990

Interesado: Daisy Lorena Nájera Lima  
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN.  
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Propuesta de Pavimento Flexible de Rocas de Canto Rodado, Para Las Calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a Través del Mejoramiento de Las Propiedades de Sus Componentes"

Proctor Estándar: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-99  
 Proctor Modificado: ( ) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180

Ubicación: Antigua Guatemala, Sacatepéquez  
 Fecha: martes, 28 de noviembre de 2017

**GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD**



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/pe³
20	72.5
22	73.2
24	74.2
26	75.5
28	76.5
30	76.95
32	76.2
34	75.2
36	74.2

Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café + 1.0 % Cal  
 Densidad seca máxima  $\gamma_d$ : 1,232.74 Kg/m³      76.95 lb/pe³  
 Humedad óptima Hop.: 30.05 %  
 Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.  
 Atentamente,



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA



SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 17. **Resultados de ensayo de proctor estándar de muestra de suelo + 3 % de cal**



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



---

**No. 13114**

INFORME No. 599 S.S.

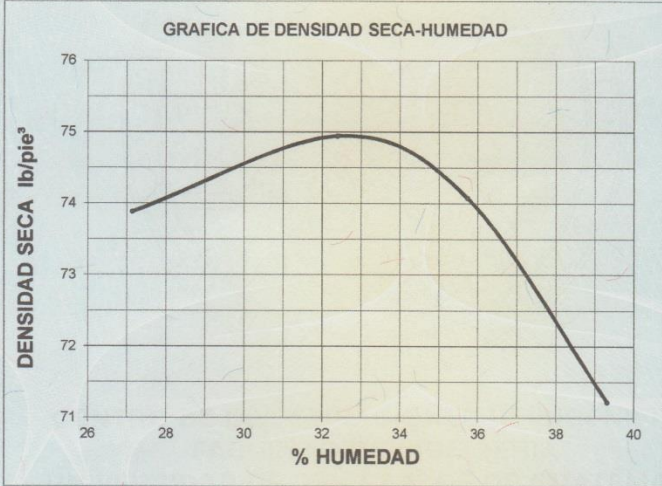
O.T.: 37,990

Interesado: Daisy Lorena Nájera Lima  
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN.  
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Propuesta de Pavimento Flexible de Rocas de Canto Rodado, Para Las Calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a Tráves del Mejoramiento de Las Propiedades de Sus Componentes"

Proctor Estándar: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-99  
 Proctor Modificado: ( ) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180

Ubicación: Antigua Guatemala, Sacatepéquez  
 Fecha: martes, 28 de noviembre de 2017

**GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD**



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
27	73.8
28	74.2
29	74.6
30	74.8
31	74.9
32	74.95
33	74.9
34	74.8
35	74.5
36	74.0
37	73.5
38	72.8
39	72.0
40	71.2

Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café + 3.0 % Cal  
 Densidad seca máxima  $\gamma_d$ : 1,200.70 Kg/m<sup>3</sup>      74.95 lb/ft<sup>3</sup>  
 Humedad óptima Hop.: 32.90 %  
 Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.  
 Atentamente,

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

Vo. Bo. *Francisco Javier Quiñonez*  
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
 DIRECTOR CII/USAC





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

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

Anexo 18. **Resultados de ensayo de CBR de muestra de suelo sin cal**



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



---

**No. 13115**

INFORME No. 600 S.S. O.T. No. 37,990


Interesado: Daisy Lorena Nájera Lima  
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O.T-193  
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Propuesta de Pavimento Flexible de Rocas de Canto Rodado, Para Las Calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a Través del Mejoramiento de Las Propiedades de Sus Componentes"  
 Ubicación: Antigua Guatemala, Sacatepéquez  
 Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café  
 Fecha: martes, 28 de noviembre de 2017

PROBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
		H (%)	$\gamma_d$ (Lb/pe <sup>3</sup> )			
1	10	28.30	68.73	86.9	0.11	3.46
2	30	28.30	74.84	94.6	0.09	14.16
3	65	28.30	77.67	98.2	0.04	29.17

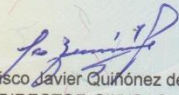
GRÁFICA DE % C.B.R. - % DE COMPACTACIÓN



Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.  
Atentamente,

  
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

Vo. Bo.

  
 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
 DIRECTOR CII/USAC





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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 19. **Resultados de ensayo de CBR de muestra de suelo + 1 % cal**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 20. **Resultados de ensayo de CBR de muestra de suelo + 3 % cal**



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



---

**No. 13117**

INFORME No. 602 S.S. O.T. No. 37,990

Interesado: Daisy Lorena Nájera Lima  
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O.T-193  
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Propuesta de Pavimento Flexible de Rocas de Canto Rodado, Para Las Calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a Través del Mejoramiento de Las Propiedades de Sus Componentes"

Ubicación: Antigua Guatemala, Sacatepéquez  
 Descripción del suelo: Arena Limosa Color Café + 3.0 % Cal  
 Fecha: martes, 28 de noviembre de 2017

PROBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
		H (%)	$\gamma_d$ (Lb/pie <sup>3</sup> )			
1	10	32.90	64.20	85.7	0.09	20.57
2	30	32.90	70.03	93.4	0.02	45.67
3	65	32.90	74.97	100.0	0.00	82.70

GRÁFICA DE % C.B.R. - % DE COMPACTACIÓN





Muestra proporcionado por el interesado.  
Atentamente,



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

Vo. Bo. *Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC




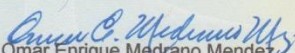
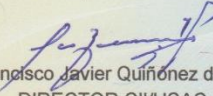

---

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.





Anexo 21. **Resultados de ensayo de permeabilidad de muestra de suelo sin cal**

	<b>CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</b>	
		<b>No. 13108</b>
<b>INFORME No.:</b> 594 S.S.		<b>O.T. No.:</b> 37,990
<b>INTERESADO:</b>	Daisy Lorena Nájera Lima	
<b>PROYECTO:</b>	Trabajo de Graduación "Propuesta de Pavimento Flexibe de Rocas de Canto Rodado, Para las Calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a Través del Mejoramiento de las Propiedades de sus Componentes"	
<b>ASUNTO:</b>	Ensayo de Permeabilidad Cabeza Constante por el método de molde de pared rígida	
<b>NORMA:</b>	ASTM D 5856-00	
<b>UBICACIÓN:</b>	Antigua Guatemala, Sacatepéquez	
<b>MUESTRA No.:</b> 1	<b>PROFUNDIDAD:</b>	X m
<b>DESCRIPCIÓN DEL SUELO:</b>	Arena Limosa Color Café	
<b>FECHA:</b>	martes, 28 de noviembre de 2017	
<b><u>RESULTADO DEL ENSAYO:</u></b>		
<b>COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD =</b>		<b>1.80 x 10<sup>-5</sup> cm/s</b>
<b>OBSERVACIONES:</b> Muestra proporcionada por el interesado.		
	Atentamente,	
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez Jefe Sección Mecánica de Suelos	Vo. Bo.	 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz DIRECTOR CII/USAC
		
<small>FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC– Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: <a href="http://cii.usac.edu.gt">http://cii.usac.edu.gt</a></small>		

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 22. **Resultados de ensayo de permeabilidad de muestra de suelo + 1 % de cal**

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

---

**No. 13109**

**INFORME No.:** 595 S.S. **O.T. No.:** 37,990

**INTERESADO:** Daisy Lorena Nájera Lima

**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Propuesta de Pavimento Flexible de Rocas de Canto Rodado, Para las Calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a Través del Mejoramiento de las Propiedades de sus Componentes"

**ASUNTO:** Ensayo de Permeabilidad Cabeza Constante por el método de molde de pared rígida

**NORMA:** ASTM D 5856-00

**UBICACIÓN:** Antigua Guatemala, Sacatepéquez

**MUESTRA No.:** 2 **PROFUNDIDAD:** X m


**DESCRIPCIÓN DEL SUELO:** Arena Limosa Color Café + 1.0 % Cal


**FECHA:** martes, 28 de noviembre de 2017

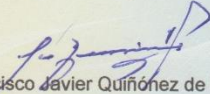

**RESULTADO DEL ENSAYO:**

**COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD =**  $4.43 \times 10^{-5}$  cm/s

**OBSERVACIONES:**  
Muestra proporcionada por el interesado.

 Atentamente,

  
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos



**Vo. Bo.**   
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC 

---

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 23. **Resultados de ensayo de permeabilidad de muestra de suelo + 3 % de cal**

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

---

**No. 13110**

**INFORME No.:** 596 S.S. **O.T. No.:** 37,990

**INTERESADO:** Daisy Lorena Nájera Lima

**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Propuesta de Pavimento Flexible de Rocas de Canto Rodado, Para las Calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez; a Través del Mejoramiento de las Propiedades de sus Componentes"

**ASUNTO:** Ensayo de Permeabilidad Cabeza Constante por el método de molde de pared rígida

**NORMA:** ASTM D 5856-00

**UBICACIÓN:** Antigua Guatemala, Sacatepéquez

**MUESTRA No.:** 3 **PROFUNDIDAD:** X m


**DESCRIPCIÓN DEL SUELO:** Arena Limosa Color Café + 3.0 % Cal


**FECHA:** martes, 28 de noviembre de 2017

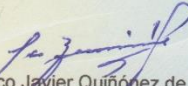
**RESULTADO DEL ENSAYO:**


**COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD =**  $3.80 \times 10^{-6}$  cm/s

**OBSERVACIONES:**  
Muestra proporcionada por el interesado.

 Atentamente,

  
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos

  
Vo. Bo. Ing. Francisco Javier Quirónez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC



---


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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 24. **Resultados de ensayos de compresión no confinada de muestras de suelo y suelo-cal**

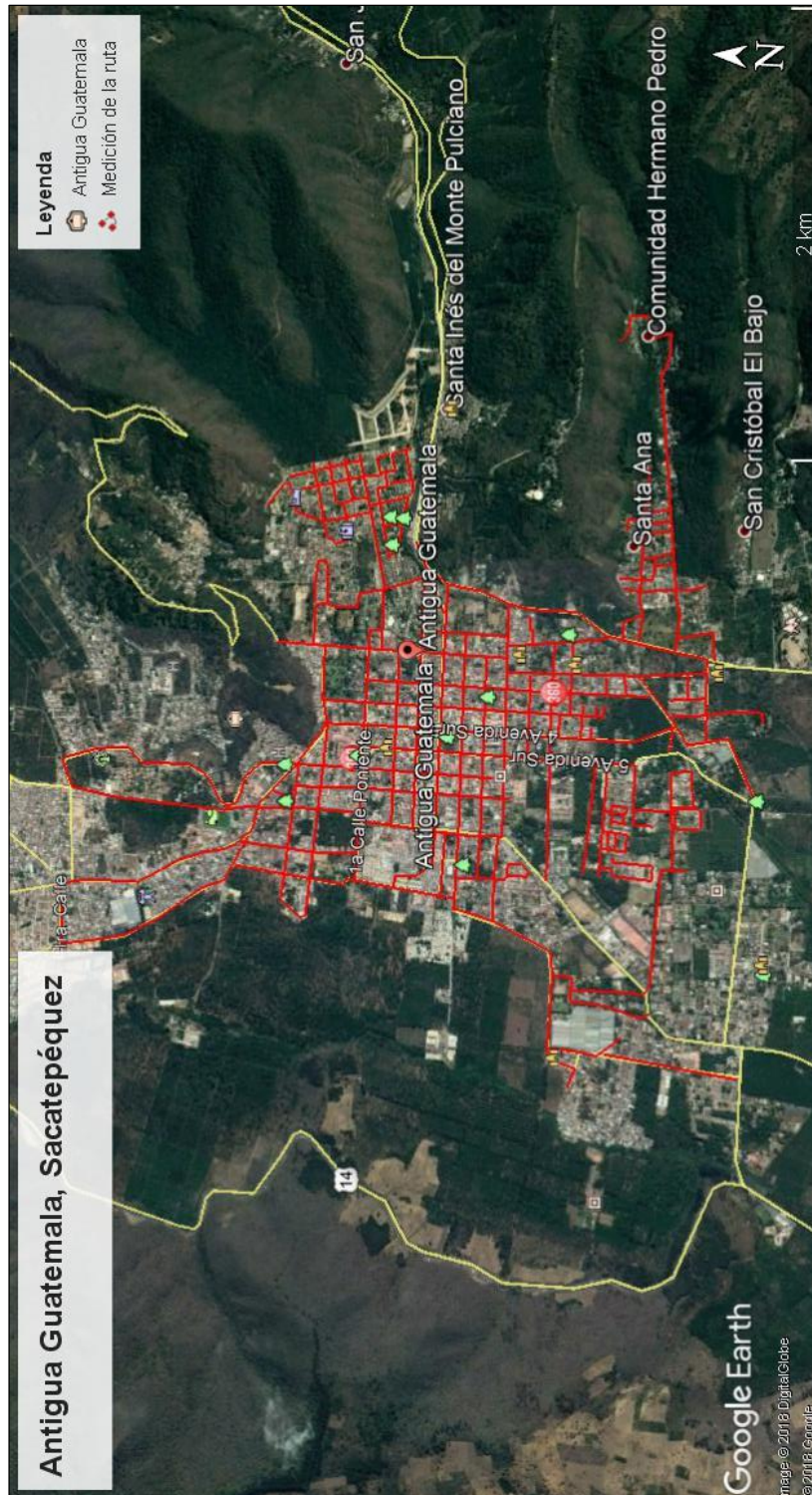
	<b>CEMENTOS PROGRESO, S.A.</b> <b>CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO</b> 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178, Fax: 22864181 email: LaboratorioCETEC@cempro.com										OT:	31170-1	
											FECHA OT:	2018/01/11	
											PAGINA:	1 de 1	
											IMPRESIÓN:	2018/01/11	
CLIENTE:		CI + D / CETEC											
CONTACTO:		BENJAMÍN LÓPEZ											
MUESTRA:		SUELO - CAL											
PROCEDENCIA:		TESIS											
PROYECTO:		TESIS DAISY NAJERA											
<b>INFORME DE ENSAYO</b> <b>RESISTENCIA A COMPRESIÓN NO CONFINADA DE PROBETAS DE SUELO</b> NORMA: ASTM D-1632 Y D-1633													
DATOS DE ENSAYO													
No.	Masa (g)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Carga Máxima (N)	Factor de Corrección	Área sección Transversal mm <sup>2</sup>	Resistencia Corregida por Esbeltez			Fecha de elaboración	Edad de ensayo	Fecha de rotura	Descripción del material
							kPa	psi	Mpa				
1	1543.3	102.0	117.4	3800.0	0.924	8171.3	420	60	0.4	2017-11-09	15	2017-11-24	SUELO + 3% CAL
2	1547.4	102.0	116.7	3280.0	0.924	8171.3	385	55	0.4	2017-11-09	15	2017-11-24	SUELO + 3% CAL
3	1537.5	102.5	117.0	3360.0	0.923	8251.6	385	55	0.4	2017-11-09	32	2017-12-11	SUELO + 3% CAL
4	1562.1	102.9	116.7	5080.0	0.923	8316.1	564	82	0.6	2017-11-09	32	2017-12-11	SUELO + 3% CAL
5	1444.3	102.4	117.1	4440.0	0.924	8235.5	490	70	0.5	2017-11-09	57	2018-01-05	SUELO + 3% CAL
6	1513.9	102.4	117.6	3000.0	0.924	8235.5	350	50	0.4	2017-11-09	57	2018-01-05	SUELO + 3% CAL
7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
 Analista		 Jefe de Laboratorio / Coordinador de Laboratorio											
Observaciones:		PROBETAS ELABORADAS POR EL CLIENTE											
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC. Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratoriocetec@cempro.com													
SGL-CT-SU-IE-06 REV. 1											No.08768 <b>CETEC</b>		

Continuación Anexo 24.

	<b>CEMENTOS PROGRESO, S.A.</b> <b>CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO</b> <b>15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera</b> Tel: 22864178, Fax: 22864181 email: LaboratorioCETEC@cempro.com										OT:	31170-1	
											FECHA OT:	2018/01/11	
											PAGINA:	1 de 1	
											IMPRESIÓN:	2018/01/11	
CLIENTE:	CI + D / CETEC												
CONTACTO:	BENJAMÍN LÓPEZ												
MUESTRA:	SUELO - CAL												
PROCEDENCIA:	TESIS												
PROYECTO:	TESIS DAISY NAJERA												
<b>INFORME DE ENSAYO</b> <b>RESISTENCIA A COMPRESIÓN NO CONFINADA DE PROBETAS DE SUELO</b> NORMA: ASTM D-1632 Y D-1633													
DATOS DE ENSAYO													
No.	Masa (g)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Carga Máxima (N)	Factor de Corrección	Área sección Transversal mm <sup>2</sup>	Resistencia Corregida por Esbeltez			Fecha de elaboración	Edad de ensayo	Fecha de rotura	Descripción del material
							kPa	psi	Mpa				
1	1449.5	102.0	116.3	880.0	0.923	8171.3	105	15	0.1	2017-11-17	7	2017-11-24	SUELO
2	1392.4	102.0	117.4	1520.0	0.924	8171.3	175	25	0.2	2017-11-17	7	2017-11-24	SUELO
3	1456.7	102.0	116.7	1320.0	0.924	8171.3	140	20	0.1	2017-11-09	15	2017-11-24	SUELO + 1% CAL
4	1578.4	104.5	116.3	120.0	0.922	8576.7	13	2	0.0	2017-11-09	32	2017-12-11	SUELO + 1% CAL
5	1577.7	104.7	116.4	280.0	0.922	8609.6	35	5	0.0	2017-11-09	32	2017-12-11	SUELO + 1% CAL
6	1482.8	102.3	116.4	1240.0	0.923	8219.4	140	20	0.1	2017-11-09	57	2018-01-05	SUELO + 1% CAL
7	1482.1	103.3	116.9	400.0	0.923	8380.9	35	5	0.0	2017-11-09	57	2018-01-05	SUELO + 1% CAL
8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
 Analista						 Jefe de Laboratorio / Coordinador de Laboratorio							
Observaciones:						PROBETAS ELABORADAS POR EL CLIENTE							
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC. Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratoriocetec@cempro.com													
SGL-CT-SU-IE-06 REV. 1 <span style="float: right;">No. 08769 CETEC</span>													

Fuente: Centro de investigaciones y desarrollo, Cementos Progreso, S.A.

Anexo 25. **Mapa de calles de Antigua Guatemala, Sacatepéquez**



Fuente: Google Earth 2018.