



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

**PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA VINAZA EN EL MEJORAMIENTO DE  
LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS FRICCIONANTES UTILIZADOS  
EN SUBRASANTES EN CARRETERAS**

**Antonio José Toledo Cáceres**

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, enero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA VINAZA EN EL MEJORAMIENTO DE  
LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS FRICCIONANTES UTILIZADOS  
EN SUBRASANTES EN CARRETERAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ANTONIO JOSÉ TOLEDO CÁCERES**

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordoñez Hernández
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA VINAZA EN EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS FRICCIONANTES UTILIZADOS EN SUBRASANTES EN CARRETERAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 20 de febrero de 2012.



**Antonio José Toledo Cáceres**

Guatemala, octubre de 2013

Ingeniero  
Guillermo Francisco Melini Salguero  
Coordinador de Área de Materiales y Construcciones Civiles  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Melini

Luego de un breve saludo, sírvame la presente para informarle que el trabajo de graduación "**PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA VINAZA EN EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS FRICCIONANTES UTILIZADOS EN SUB-RASANTES EN CARRETERAS**", elaborado por el estudiante Antonio José Toledo Cáceres con carné 200815262, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular,

Atentamente,

OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ  
INGENIERO CIVIL  
COLEGIADO No. 6842

*Omar E. Medrano Méndez*  
Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez

Colegiado 6842

Jefe de Sección de Mecánica de Suelos



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



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

Guatemala,  
28 de octubre de 2013

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA VINAZA EN EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS FRICCIONANTES UTILIZADOS EN SUB-RASANTES EN CARRETERAS, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Antonio José Toledo Cáceres quien contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, reading 'Guillermo Melini'.

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



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
USAC

Más de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua  
10 feb.





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Antonio José Toledo Cáceres, titulado **PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA VINAZA EN EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS FRICCIONANTES UTILIZADOS EN SUB-RASANTES EN CARRETERAS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero 2014.  
/bbdeb.

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





DTG. 032.2014

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 PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA VINAZA EN EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS FRICCIONANTES UTILIZADOS EN SUBRASANTES EN CARRETERAS**, presentado por el estudiante universitario **Antonio José Toledo Cáceres**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 29 de enero de 2014

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por ser mi fuente inagotable de sabiduría y ser el guía perfecto durante mi vida personal y espiritual.

### **María Auxiliadora**

Por ser más que mi madre, por ser mi refugio y mi intercesora incondicional en las situaciones de mayor dificultad en mi vida.

### **Don Bosco**

Por enseñarme con mano firme y cariñosa el valor del trabajo, la templanza y el amor por María Auxiliadora.

### **Familiares y amigos**

Por haberme ayudado, de una u otra manera, en distinta medida y en distintas etapas de mi vida, que fueron fundamentales para mi desarrollo personal y académico.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XV
GLOSARIO .....	XVII
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN .....	XXVII
1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
1.1. Definición de suelos .....	1
1.2. Origen de los suelos.....	2
1.3. Tipos de suelos .....	2
1.3.1. Clasificación de los suelos.....	5
1.3.1.1. Sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS.....	6
1.3.1.2. Sistema de clasificación de los suelos AASHTO.....	12
1.4. Características de los suelos.....	15
1.5. Propiedades de los suelos y su determinación.....	15
1.6. Carreteras.....	16
1.6.1. Subrasante .....	17
1.6.2. Subbase .....	18
1.6.3. Base .....	18
1.6.4. Rasante o superficie de rodadura.....	19
1.6.4.1. Carreteras pavimentadas .....	19
1.6.4.2. Terracería .....	19

1.7.	Estabilización de suelos .....	20
1.7.1.	Formas de estabilización de suelos .....	21
1.7.1.1.	Estabilización mecánica .....	21
1.7.1.2.	Estabilización volumétrica .....	21
1.7.2.	Materiales para estabilizaciones de suelos utilizados en subrasantes de carreteras .....	22
1.8.	Antecedentes de utilización de la vinaza en carreteras.....	24
1.8.1.	Historia .....	24
1.8.2.	Vinaza .....	25
2.	ENSAYOS DE LABORATORIO .....	27
2.1.	Análisis de los suelos .....	27
2.2.	Ensayos de laboratorio.....	27
2.2.1.	Ensayo de proctor modificado .....	28
2.2.2.	Ensayo capacidad soporte california .....	30
2.2.3.	Ensayo granulométrico.....	31
2.2.4.	Ensayo límites de Atterberg .....	32
2.2.4.1.	Límite líquido (L.L.).....	33
2.2.4.2.	Límite plástico (LP).....	34
2.2.4.3.	Índice de plasticidad (I.P.) .....	34
2.2.5.	Ensayo triaxial .....	35
2.2.5.1.	Cambios de volumen en esfuerzos de corte .....	36
2.3.	Forma de aplicar la vinaza a los suelos .....	36
2.3.1.	En forma líquida .....	37
2.3.1.1.	Pasos para la aplicación de la vinaza ..	38
2.4.	Dosificación de vinaza.....	41
2.5.	Ensayos a muestras de suelo estabilizado .....	42

3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	43
3.1.	Resultados de laboratorio.....	43
3.1.1.	Arena limosa color café oscuro.....	43
3.1.1.1.	Granulometría.....	43
3.1.1.2.	Límites de Atterberg .....	44
3.1.1.3.	Proctor modificado.....	44
3.1.1.3.1.	Proctor modificado con 0% de vinaza – 100 % H <sub>2</sub> O.....	44
3.1.1.3.2.	Proctor modificado con 25 % de vinaza – 75 % H <sub>2</sub> O .....	45
3.1.1.3.3.	Proctor modificado con 50 % de vinaza – 50 % H <sub>2</sub> O .....	46
3.1.1.3.4.	Proctor modificado con 75% de vinaza – 25% H <sub>2</sub> O.....	46
3.1.1.3.5.	Proctor modificado con 100% de vinaza – 0% H <sub>2</sub> O.....	47
3.1.1.4.	Valor soporte california (CBR) .....	48
3.1.1.4.1.	CBR con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O.....	48
3.1.1.4.2.	CBR con 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O ...	49
3.1.1.4.3.	CBR con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O ...	51

3.1.1.4.4.	CBR con 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O ....	52
3.1.1.4.5.	CBR con 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O .....	53
3.1.1.5.	Ensayo triaxial .....	56
3.1.1.5.1.	Triaxial con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O .....	56
3.1.1.5.2.	Triaxial con 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O ....	57
3.1.1.5.3.	Triaxial con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O ....	58
3.1.1.5.4.	Triaxial con 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O ....	59
3.1.1.5.5.	Triaxial con 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O .....	60
3.1.1.6.	Pérdida de humedad (evaporación) .....	61
3.1.1.6.1.	Evaporación con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O .....	62
3.1.1.6.2.	Evaporación con 25 % de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O .....	63
3.1.1.6.3.	Evaporación con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O .....	64
3.1.1.6.4.	Evaporación con 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O .....	65

	3.1.1.6.5.	Evaporación con 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O.....	66
3.1.2.		Arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez .....	67
	3.1.2.1.	Granulometría.....	67
	3.1.2.2.	Límites de Atterberg .....	67
	3.1.2.3.	Proctor modificado.....	67
	3.1.2.3.1.	Proctor modificado con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O.....	68
	3.1.2.3.2.	Proctor modificado con 25% de vinaza – 75% H <sub>2</sub> O.....	68
	3.1.2.3.3.	Proctor modificado con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O.....	69
	3.1.2.3.4.	Proctor modificado con 75% de vinaza – 25% H <sub>2</sub> O.....	70
	3.1.2.3.5.	Proctor modificado con 100\$ de vinaza – 0% H <sub>2</sub> O.....	71
3.1.2.4.		Valor soporte california (CBR) .....	71
	3.1.2.4.1.	CBR con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O.....	72
	3.1.2.4.2.	CBR con 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O ...	73

3.1.2.4.3.	CBR con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O.....	74
3.1.2.4.4.	CBR con 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O.....	76
3.1.2.4.5.	CBR con 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O.....	77
3.1.2.5.	Ensayo triaxial.....	79
3.1.2.5.1.	Triaxial con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O.....	80
3.1.2.5.2.	Triaxial con 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O.....	81
3.1.2.5.3.	Triaxial con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O.....	82
3.1.2.5.4.	Triaxial con 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O.....	83
3.1.2.5.5.	Triaxial con 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O.....	84
3.1.2.6.	Pérdida de humedad (evaporación).....	85
3.1.2.6.1.	Evaporación con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O.....	85
3.1.2.6.2.	Evaporación con 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O.....	86
3.1.2.6.3.	Evaporación con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O.....	87

	3.1.2.6.4.	Evaporación con 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O.....	88
	3.1.2.6.5.	Evaporación con 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O.....	89
3.2.	Interpretación de resultados .....		90
	3.2.1.	Arena limosa color café oscuro.....	90
		3.2.1.1. Proctor modificado.....	91
		3.2.1.2. Valor soporte california (CBR) .....	94
		3.2.1.3. Triaxial .....	100
		3.2.1.4. Pérdida de humedad (evaporación)...	103
	3.2.2.	Arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez .....	105
		3.2.2.1. Proctor modificado.....	105
		3.2.2.2. Valor soporte california (CBR) .....	109
		3.2.2.3. Triaxial .....	115
		3.2.2.4. Pérdida de humedad (evaporación)...	117
CONCLUSIONES .....			121
RECOMENDACIONES .....			125
BIBLIOGRAFÍA.....			127
ANEXOS.....			129



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Clasificación composicional de los suelos.....	3
2.	Gráfico de plasticidad para el sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS .....	7
3.	Procedimiento auxiliar para la clasificación de suelos en laboratorio SUCS .....	9
4.	Cuadros para utilización en el sistema de clasificación <i>AASHTO</i> .....	14
5.	Corte transversal de una carretera.....	17
6.	Curva de humedad densidad seca.....	29
7.	Determinación del índice CBR .....	30
8.	Curva Granulométrica .....	31
9.	Estados de consistencia de los suelos.....	33
10.	Rectas de resistencia intrínseca de los suelos.....	35
11.	Escarificación del suelo a 0,20m de profundidad .....	38
12.	Aplicación de vinaza al suelo .....	39
13.	Formación de cajuela .....	39
14.	Evitar rocas en la superficie de rodadura .....	40
15.	Conformado y compactado de material.....	40
16.	Penetración – deformación (0% de vinaza – 100% H <sub>2</sub> O).....	49
17.	Penetración – deformación (25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O).....	50
18.	Penetración – deformación (50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O).....	51
19.	Penetración – deformación (75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O).....	53
20.	Penetración – deformación (100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O).....	54
21.	Círculos de Mohr para triaxial con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O.....	56

22.	Círculos de Mohr para triaxial con 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O .....	57
23.	Círculos de Mohr para triaxial con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O .....	58
24.	Círculos de Mohr para triaxial con 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O .....	59
25.	Círculos de Mohr para triaxial con 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O .....	60
26.	Evaporación – Tiempo 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O (arena limosa color café oscuro) .....	62
27.	Evaporación – Tiempo 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O (arena limosa color café oscuro) .....	63
28.	Evaporación – Tiempo 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O (arena limosa color café oscuro) .....	64
29.	Evaporación – Tiempo 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O (arena limosa color café oscuro) .....	65
30.	Evaporación – Tiempo 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O (arena limosa color café oscuro) .....	66
31.	Penetración – deformación (0% de vinaza – 100% H <sub>2</sub> O).....	72
32.	Penetración – deformación (25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O).....	74
33.	Penetración – deformación (50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O).....	75
34.	Penetración – deformación (75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O).....	76
35.	Penetración – deformación (100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O).....	78
36.	Círculos de Mohr para triaxial con 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O .....	80
37.	Círculos de Mohr para triaxial con 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O .....	81
38.	Círculos de Mohr para triaxial con 50% de vinaza – 50% de H <sub>2</sub> O .....	82
39.	Círculos de Mohr para triaxial con 75% de vinaza – 25% de H <sub>2</sub> O .....	83
40.	Círculos de Mohr para triaxial con 100% de vinaza – 0% de H <sub>2</sub> O .....	84
41.	Evaporación – Tiempo 0% de vinaza – 100% de H <sub>2</sub> O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez) .....	86
42.	Evaporación – Tiempo 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez) .....	87

43.	Evaporación – Tiempo 50% de vinaza – 50% de H2O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez).....	88
44.	Evaporación – Tiempo 75% de vinaza – 25% de H2O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez).....	89
45.	Evaporación – Tiempo 100% de vinaza – 0% de H2O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez).....	90
46.	Comparación en porcentaje de vinaza para Proctor .....	92
47.	Comparación de densidad seca máxima - porcentaje de vinaza .....	93
48.	Comportamiento de humedad óptima - porcentaje de vinaza .....	94
49.	Incidencia de la vinaza en la compactación .....	95
50.	Incidencia de la vinaza en el Porcentaje CBR.....	96
51.	Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (65 golpes).....	98
52.	Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (30 golpes).....	99
53.	Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (10 golpes).....	100
54.	Incidencia de la vinaza en el ángulo de fricción interna .....	101
55.	Incidencia de la vinaza en la cohesión .....	102
56.	Evaporación – Tiempo .....	104
57.	Comparación en porcentaje de vinaza para Proctor .....	106
58.	Comparación de densidad seca máxima - porcentaje de vinaza .....	107
59.	Comportamiento de humedad óptima - porcentaje de vinaza .....	108
60.	Incidencia de la vinaza en la compactación .....	110
61.	Incidencia de la vinaza en el Porcentaje CBR.....	111
62.	Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (65 golpes).....	112
63.	Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (30 golpes).....	113
64.	Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (10 golpes).....	115
65.	Incidencia de la vinaza en el ángulo de fricción interna .....	116
66.	Incidencia de la vinaza en la cohesión .....	117
67.	Evaporación – Tiempo .....	119

## TABLAS

I.	Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) incluyendo identificación y descripción.....	8
II.	Materiales para terraplenes.....	10
III.	Suelos de cimentaciones.....	11
IV.	Sistema de clasificación <i>AASHTO</i> .....	13
V.	Características de la lechada de cal.....	23
VI.	Compuestos básicos de la vinaza .....	26
VII.	Clasificación granulométrica.....	32
VIII.	Valores típicos de consistencia en los suelos.....	34
IX.	Proctor con 0% de vinaza – 100% H <sub>2</sub> O.....	44
X.	Proctor con 25% de vinaza – 75% H <sub>2</sub> O.....	45
XI.	Proctor con 50% de vinaza – 50% H <sub>2</sub> O.....	46
XII.	Proctor con 75% de vinaza – 25% H <sub>2</sub> O.....	47
XIII.	Proctor con 100% de vinaza – 0% H <sub>2</sub> O.....	47
XIV.	Resistencia a la penetración.....	48
XV.	Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación.....	49
XVI.	Resistencia a la penetración.....	50
XVII.	Porcentaje CBR vs. Porcentaje compactación .....	50
XVIII.	Resistencia a la penetración.....	52
XIX.	Porcentaje CBR vs. Porcentaje compactación .....	52
XX.	Resistencia a la penetración.....	52
XXI.	Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación.....	53
XXII.	Resistencia a la penetración.....	54
XXIII.	Porcentaje CBR vs. Porcentaje compactación .....	54
XXIV.	Resistencia al corte a 65 golpes.....	55
XXV.	Resistencia al corte a 30 golpes.....	55
XXVI.	Resistencia al corte a 10 golpes.....	55

XXVII.	Ángulo de fricción interna y cohesión .....	61
XXVIII.	Proctor con 0% de vinaza – 100% H <sub>2</sub> O .....	68
XXIX.	Proctor con 25% de vinaza – 75% H <sub>2</sub> O .....	69
XXX.	Proctor con 50% de vinaza – 50% H <sub>2</sub> O .....	69
XXXI.	Proctor con 75% de vinaza – 25% H <sub>2</sub> O .....	70
XXXII.	Proctor con 100% de vinaza – 0% H <sub>2</sub> O .....	71
XXXIII.	Resistencia a la penetración .....	73
XXXIV.	Porcentaje CBR vs. Porcentaje compactación .....	73
XXXV.	Resistencia a la penetración .....	73
XXXVI.	Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación .....	74
XXXVII.	Resistencia a la penetración .....	75
XXXVIII.	Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación .....	75
XXXIX.	Resistencia a la penetración .....	76
XL.	Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación .....	77
XLI.	Resistencia a la penetración .....	77
XLII.	Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación .....	77
XLIII.	Resistencia al corte a 65 golpes .....	78
XLIV.	Resistencia al corte a 30 golpes .....	79
XLV.	Resistencia al corte a 10 golpes .....	79
XLVI.	Ángulo de fricción interna y cohesión .....	85
XLVII.	Densidad seca máxima y humedad óptima con adición de vinaza.....	91
XLVIII.	Densidad seca máxima - porcentaje de vinaza .....	92
XLIX.	Humedad óptima - porcentaje de vinaza .....	93
L.	Porcentaje de compactación - porcentaje de vinaza.....	94
LI.	Porcentaje CBR – porcentaje de vinaza .....	96
LII.	Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (65 golpes) .....	97
LIII.	Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (30 golpes) .....	98
LIV.	Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (10 golpes) .....	99

LV.	Porcentaje de vinaza - ángulo de fricción interna .....	101
LVI.	Porcentaje de vinaza – cohesión.....	102
LVII.	Evaporación – Tiempo.....	103
LVIII.	Densidad seca máxima y humedad óptima con adición de vinaza.....	106
LIX.	Densidad seca máxima - porcentaje de vinaza .....	107
LX.	Humedad óptima - porcentaje de vinaza .....	108
LXI.	Porcentaje de compactación - porcentaje de vinaza .....	109
LXII.	Porcentaje CBR – porcentaje de vinaza .....	110
LXIII.	Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (65 golpes) .....	112
LXIV.	Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (30 golpes) .....	113
LXV.	Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (10 golpes) .....	114
LXVI.	Porcentaje de vinaza - Ángulo de fricción interna.....	115
LXVII.	Porcentaje de vinaza – cohesión.....	116
LXVIII.	Evaporación – Tiempo.....	118

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<i>PH</i>	Acidez, alcalinidad de los suelos
<i>H<sub>2</sub>O</i>	Agua
<i>CBR</i>	California Bearing Ratio
<i>c. c.</i>	Centímetros cúbicos.
<i>°C</i>	Grados Celsius
<i>Kg.</i>	Kilogramo
<i>lb.</i>	Libra
<i>&gt;</i>	Mayor que
<i>&lt;</i>	Menor que
<i>m</i>	Metro
<i>m<sup>2</sup></i>	Metro cuadrado
<i>m<sup>3</sup></i>	Metro cúbico
<i>mm</i>	Milímetros
<i>min.</i>	Minuto
<i>P. U. S.</i>	Peso unitario seco
<i>%</i>	Porcentaje
<i>%H</i>	Porcentaje de humedad
<i>%m/m</i>	Porcentaje de masa en masa



## GLOSARIO

<b>Ácido láctico</b>	Compuesto químico que desempeña importantes roles en procesos bioquímicos, como la fermentación láctica.
<b>Alcoquímica</b>	Parte de la química que se encarga del estudio y procesamiento de alcoholes.
<b>Aldehído</b>	Compuestos orgánicos caracterizados por poseer el grupo funcional CHO (carbono, hidrógeno y oxígeno).
<b>Análisis granalométrico</b>	Es el estudio de la distribución por tamaño de las de una muestra de suelo.
<b>Ángulo de fricción interna</b>	Ángulo de resistencia al deslizamiento causado por la fricción entre superficies de contacto de las partículas del suelo.
<b>Asientos máximos diferenciales</b>	Diferencia de asentamientos entre dos cimentaciones separadas, de la misma estructura a una distancia determinada.
<b>Asientos máximos volumétricos</b>	Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo mediante la reducción de los índices de hinchamiento o expansión volumétrica del suelo ante la presencia de humedad.

<b>Atmósfera</b>	Capa gaseosa que rodea un cuerpo celeste u otro cuerpo cualquiera.
<b>Biósfera</b>	Conjunto de los medios donde se desarrollan los seres vivos.
<b>Cenizas volantes</b>	Residuos sólidos que se obtienen por precipitación o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.
<b>Cetona</b>	Compuesto orgánico caracterizado por la presencia de un grupo carbonilo.
<b>Cohesión</b>	Fuerza de atracción entre partículas producida por el agua de constitución del suelo.
<b>Compactabilidad</b>	Grado en que un cuerpo opone resistencia a la compactación.
<b>Confinamiento</b>	Acción de reducir un cuerpo dentro de límites.
<b>Curva de penetración</b>	Gráfica utilizada en el ensayo de CBR que relaciona la penetración obtenida con el pistón vrs. la presión requerida para realizarlo.
<b>Curva granulométrica</b>	Representación gráfica de los resultados obtenidos de la granulometría.

<b>Densidad húmeda</b>	Cantidad de masa de suelo húmedo contenido en un volumen determinado.
<b>Densidad seca</b>	Cantidad de masa de suelo seco contenido en un volumen determinado.
<b>Densificación</b>	Aumento de la cantidad de masa de un material en un mismo volumen.
<b>Estabilización</b>	Proceso para mejorar las propiedades mecánicas y físicas de los suelos, a través de métodos confiables.
<b>Ester</b>	Compuesto orgánico que resulta de sustituir un átomo de hidrógeno de un ácido por un radical alcohólico.
<b>Glicerol</b>	Producto intermedio de la fermentación alcohólica ( $C_3H_8O_3$ ). Es un alcohol con tres grupos hidroxilos.
<b>Grava artificial</b>	Material pétreo triturado mediante procesos controlados hasta obtener un diámetro esperado.
<b>Intemperización</b>	Cambios ambientales a los que la roca sólida se encuentra expuesta en la superficie terrestre, experimentando demolición y degradación.
<b>Litósfera</b>	Envoltura rocosa que constituye la corteza exterior sólida del globo terrestre.

<b>Módulo de balastro</b>	Relación existente entre la fuerza aplicada al terreno y el asentamiento.
<b>Potencial de expansión</b>	Propiedad física de los suelos en hincharse debido a la absorción de agua.
<b>Puzolana</b>	Material silíceo o aluminosilíceo a partir del cual se producía históricamente el cemento.
<b>Resistencia al corte</b>	Capacidad del suelo de soportar esfuerzos transversales a la dirección de la carga.
<b>Roca madre</b>	Roca no modificada por la acción de los organismos, la cual subyace a la primera capa de suelo.
<b>Suelo estabilizado</b>	Suelo que inicialmente no cumple con ciertas propiedades físicas y mecánicas pero que por la adición de sustancias logra alcanzarlas.
<b>Suelo friccionante</b>	Suelos que su clasificación está dentro de las arenas y/o las gravas.
<b>Talud natural</b>	Acumulación de suelos en su estado original. Típicamente poseen una forma cóncava hacia arriba y el grado de inclinación corresponde al ángulo de reposo del suelo.

<b>Tensión superficial</b>	Fuerza atractiva ejercida en la superficie de separación entre materiales en diferentes estados físicos (sólidos/líquidos, líquidos/gas).
<b>Trabajabilidad</b>	Propiedad que determina el esfuerzo
<b>Turba</b>	Suelo constituido por material orgánico, de color pardo oscuro y rico en carbono.
<b>Valor soporte</b>	Capacidad de carga del suelo por unidad de área.
<b>Vinaza</b>	Subproducto líquido de la destilación del mosto de la fermentación del etanol.



## RESUMEN

El presente trabajo de graduación pretende ser una guía teórico-demostrativa de los beneficios físicos y mecánicos que se alcanzan al adicionar vinaza a los suelos.

En el primer capítulo se presentan las definiciones y conceptos básicos de mecánica de suelo, las propiedades y características de la vinaza y una breve reseña histórica de la utilización de la misma en caminos de terracería en Guatemala; de una forma fácil, rápida y sencilla, con el fin de que lector se pueda familiarizar con el tema, aún si no posee grandes conocimientos ingenieriles o químicos.

En el segundo capítulo se dan a conocer los ensayos más relevantes en el análisis de suelos, así como las normas nacionales e internacionales que los rigen, a su vez se da una breve explicación de las posibles interpretaciones que se les pueden dar a los resultados de los ensayos.

En el tercer capítulo se muestran los resultados de todos los ensayos realizados a la arena limosa color café y a la arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez, de tal forma que el lector tenga la opción de tomar dichos resultados y realizar un análisis de resultados paralelo al mostrado para así obtener sus propias conclusiones. Por otro lado, en este mismo capítulo, la interpretación de resultados se realiza por medio de gráficas que muestran tendencias con lo cual se buscan patrones de comportamiento de los suelos ante la presencia de distintos porcentajes de la relación vinaza - agua.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones, donde se indica que los mejores resultados en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos friccionantes utilizados en subrasantes de carreteras, se obtuvieron con la arena limosa color café oscuro la cual tenía mayor presencia de limo, por lo que se recomienda hacer mayores investigaciones con arenas que contengan abundante presencia de limo.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Desarrollar una propuesta para el aprovechamiento de la vinaza en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos friccionantes utilizados en subrasantes en carreteras.

### **Específicos**

1. Formular una dosificación de suelo-vinaza, adecuada para los suelos friccionantes utilizados en subrasantes.
2. Comparar, mediante pruebas de laboratorio, la pérdida de humedad en suelos dosificados con vinaza y suelos dosificados solamente con agua.
3. Analizar, mediante pruebas de laboratorio, el comportamiento físico y mecánico de suelos empleados en subrasantes con presencia de vinaza.
4. Establecer, mediante pruebas de laboratorio, un rango de porcentaje adecuado de vinaza que al agregarla a determinada muestra de suelo, se obtenga un óptimo comportamiento del mismo.
5. Definir un método confiable para agregar vinaza a las muestras del suelo.

6. Determinar cuantitativamente el comportamiento hidráulico del suelo mezclado con vinaza.

## INTRODUCCIÓN

En general, una buena tesis debe ser aplicable en la práctica, máxime en un campo tan concreto como la ingeniería civil; más aún debe ser aplicable en el país donde se vive. En este sentido, el presente trabajo de graduación se enfoca principalmente en las necesidades y los recursos concretos de Guatemala en el presente.

En este trabajo de graduación, se propone hacer una investigación esencialmente teórico-demostrativo aplicable en el medio, por lo que se recurre a pruebas de laboratorio para sustentar lo dicho. Pero, por otro lado, también se pretende darle una sólida fundamentación teórica para lo cual se recurre a las consultas bibliográficas correspondientes.

La riqueza de un país no consiste solamente en la abundancia de recursos, sino también en la utilización racional de los mismos tomando en cuenta la integración de sus procesos.

Siendo Guatemala un país cañero, ha logrado integrar casi totalmente los correspondientes procesos industriales; es decir, produce en forma útil: azúcar, bagazo, alcoholes y biogás, pero queda vinaza como residuo final que falta ser debidamente procesada para lograr óptimos beneficios de la caña.

Guatemala, por otro lado es un país tropical con necesidades permanentes de comunicación terrestre, no sólo a través de grandes carreteras pavimentadas, sino también por caminos vecinales y de otro tipo que perfectamente pueden ser tratados con vinaza para su mejor desempeño.

Si bien es cierto que el diseño, construcción y mantenimiento de las redes viales se implementan atendiendo a necesidades reales de la comunidad, también es cierto que se ha de aprovechar al máximo los recursos disponibles como: espacio, condiciones del terreno, presupuesto, material disponible, tecnología, etc.

La vinaza en la costa de Guatemala es un recurso disponible de bajo costo y de fácil aplicación que, convenientemente aplicado, se propone para mejorar sustancialmente el comportamiento físico y mecánico del suelo que va a convertirse en subrasante de carreteras.

La sabiduría de los planes de desarrollo de un país consistente, no sólo en echar a andar buenos proyectos, sino también supervisarlos estrictamente utilizando en la mejor forma, los recursos disponibles en ese país.

Debe entenderse que presente trabajo de graduación es una propuesta para el aprovechamiento de la vinaza, pero que no exime al profesional de la ingeniería civil de su responsabilidad de continuar con los ensayos correspondientes para la concepción de nuevos proyectos utilizando este método, ni de la facultad de aplicar su criterio para obtener mejores resultados.

# **1. CONCEPTOS BÁSICOS**

Mecánica de Suelos es la rama de la Mecánica que trata de la acción de las fuerzas sobre la masa de los suelos. El Dr. Karl Terzaghi definió la Mecánica de Suelos como la aplicación de las leyes de Mecánica e Hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producto de la desintegración química y mecánica de las rocas.

Para una mejor comprensión del presente trabajo de graduación, es importante establecer cierta terminología para que los conceptos del autor y del lector sean lo más similares posibles en todo momento.

## **1.1. Definición de suelos**

Cualquier persona tiene en mente el concepto de suelo, sin embargo, su definición depende del punto de vista del que se intente dar, pues es distinta la definición del geólogo, del agrónomo o del ingeniero civil.

Desde el punto de vista del ingeniero civil, el suelo puede definirse como la delgada capa de material terroso no consolidado sobre la corteza terrestre que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas, y que se puede ver afectado por actividades humanas.

Debido a que el suelo es el soporte de todas las obras de ingeniería civil, es necesario estudiarlo como una estructura inherente a cualquier proyecto; para el cual están dadas sus características como: densidad, porosidad, módulo

de balasto, talud natural, cohesión y ángulo de fricción interna; las cuales, a su vez, determinan las propiedades resistentes ante diversas fuerzas como la compresión, corte, reflejadas en magnitudes como la tensión admisible o los asientos máximos y diferenciales.

## **1.2. Origen de los suelos**

El suelo procede de la interacción entre la litósfera, la atmósfera y la biósfera. El suelo resulta de la descomposición de la roca madre por factores climáticos y la acción de los seres vivos, esto implica que el suelo tiene una fracción mineral y otra biológica; por lo que los suelos, por su origen, se pueden clasificar en dos grupos: suelos orgánicos y suelos inorgánicos.

Los suelos inorgánicos se forman por la intemperización de las rocas. Cuando estos suelos se forman en el sitio, se denominan suelos residuales; por el contrario, si el suelo procede de distintas áreas por efectos de agentes externos (gravedad, agua, viento, glaciares) se denominan suelos transportados.

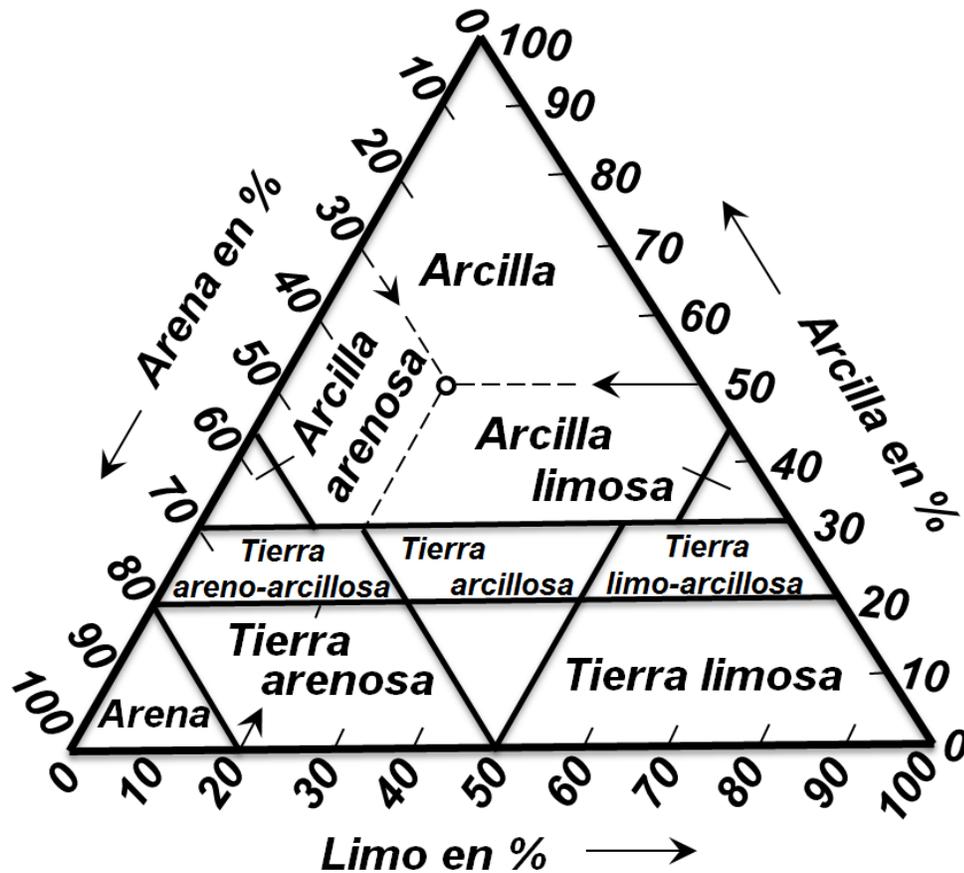
Los suelos orgánicos, por lo general, se forman en el sitio. Estos se forman por presencia de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta o en estado de descomposición

## **1.3. Tipos de suelos**

El tipo de suelo depende de muchos factores, sin embargo, se puede dar una primera aproximación tomando en cuenta el tipo de partícula que lo compone y el tamaño de la misma.

La figura 1, clasificación composicional de los suelos, ilustra gráficamente este concepto.

Figura 1. Clasificación composicional de los suelos



Fuente: Manual de carreteras: construcción y mantenimiento (Chile). Sección 15, p. 2.

Para clasificar el suelo en el diagrama triangular de clasificación de suelos dada por la Comisión del Río Mississippi se trazan tres rectas, una en cada lado del triángulo midiendo el porcentaje que posee el suelo de limo, arcilla y arena, como se muestra en la figura anterior, y su punto en común da la clasificación del suelo.

La clasificación anterior tiene la ventaja de ser sencillo y poder hacer una rápida clasificación; sin embargo, posee el inconveniente de que su relación con las principales características físicas del suelo es indirecta, pues el tamaño de los granos es sólo uno de los diferentes factores de los cuales dependen ciertas propiedades físicas.

En la naturaleza rara vez se encuentran diferenciados los suelos tan marcadamente, sin embargo básicamente existen cuatro tipos de suelo:

- **Gravas:** las gravas también se denominan suelos áridos o piedras, las cuales se forman de material pétreo, y se originan a partir de la fragmentación de las rocas de la corteza terrestre ya sea de forma natural o artificial. Las gravas varían desde 76,2 mm (3") hasta 2,0 mm. La forma de las gravas y su relativa frescura mineralógica depende de la historia de su formación, encontrándose variaciones desde elementos rodados a los poliédricos.
- **Arenas:** el tamaño de las arenas varía desde 2,00 mm hasta 0,05 mm de diámetro y su formación es muy similar a la de las gravas. A menudo se encuentran juntas en el mismo depósito. Las arenas, estando limpias, no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.
- **Limos:** el diámetro de las partículas de los limos varía desde 0,05 mm a 0,005 mm y se componen de material suelto con una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla. Los limos son materiales sedimentados clásticos incoherentes transportados en suspensión por corrientes de agua y/o por el viento, los cuales se depositan en el lecho

de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. Edificar en dichos suelos es problemático, debido a su falta de cohesión por lo que es necesario adoptar sistemas especiales de cimentación que contrarresten esta característica.

- Arcillas: las arcillas son partículas menores de 0,005mm y están formadas de silicato de alúmina hidratado, aunque en raras ocasiones contienen silicatos de hierro o de magnesio hidratados. Su principal característica es que se vuelven altamente moldeables en presencia de agua.

### **1.3.1. Clasificación de los suelos**

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la Mecánica de Suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene prácticamente su campo de aplicación según la necesidad y uso que las haya fundamentado.

Es importante resaltar que cualquier clasificación que se haga del suelo, sin importar el punto de vista del que se analice, debe abarcar las propiedades físicas y mecánicas del mismo.

Las clasificaciones de los suelos que se utilizan en ingeniería civil en Guatemala, básicamente son dos: el sistema de clasificación de los suelos AASHTO (*American Association of State High-way and Transportation Officials*) y el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos SUCS o USCS (*Unified Soil Classification System*) también llamado sistema de clasificación ASTM (*American Society for Testing Materials*).

### **1.3.1.1. Sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS**

Este sistema fue presentado por Arthur Casagrande en 1942, como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial para el diseño de aeropuertos. En 1952 el Cuerpo de Ingenieros en cooperación con el *US. Bureau Reclamation*, revisaron el sistema creado y es aún en la actualidad, es uno de los más usados por los ingenieros en la clasificación de suelos.

La tabla I presenta la clasificación del sistema unificado de los suelos SUCS. Como puede observarse en dicha tabla, los suelos de partículas gruesas y los suelos de partículas finas se distinguen mediante el tamizado del material por la malla No. 200. Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicha malla y los finos, a los que pasan por la misma. Así, un suelo se considera grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en la malla No. 200, y fino, si más del 50% de sus partículas son menores que dicha malla.

La figura 2 muestra la gráfica que ideó Casagrande al relacionar el límite líquido con el índice de plasticidad de un suelo. Este diagrama también es conocido como la Carta de Casagrande de suelos cohesivos.

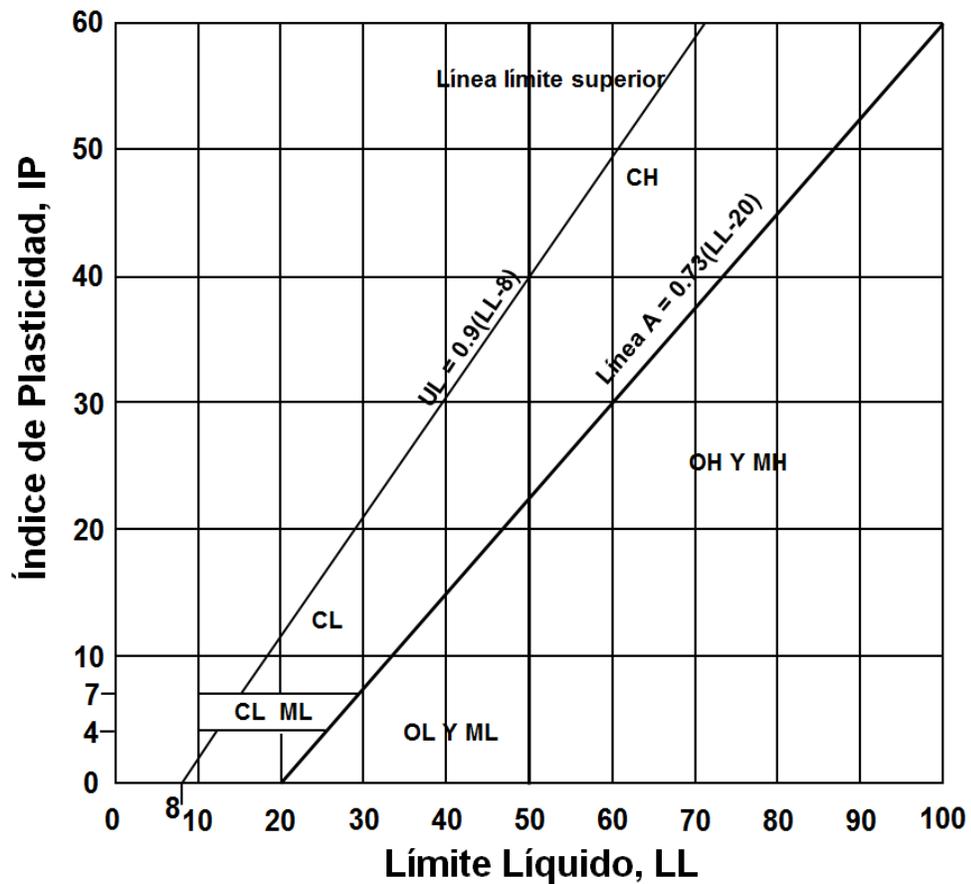
La figura 3 muestra el procedimiento auxiliar para la clasificación de suelos en laboratorio SUCS, el cual sirve para clasificar de una manera más rápida los suelos analizados.

La tabla II muestra la forma de designar los suelos por grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de

los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos como se muestra en la tabla III.

Es importante notar, que siempre se debe agregar una descripción visual del suelo conjuntamente con el símbolo unificado para completar la clasificación de la misma forma como se realiza para el Sistema de Clasificación *AASHTO*.

Figura 2. **Gráfico de plasticidad para el sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS**



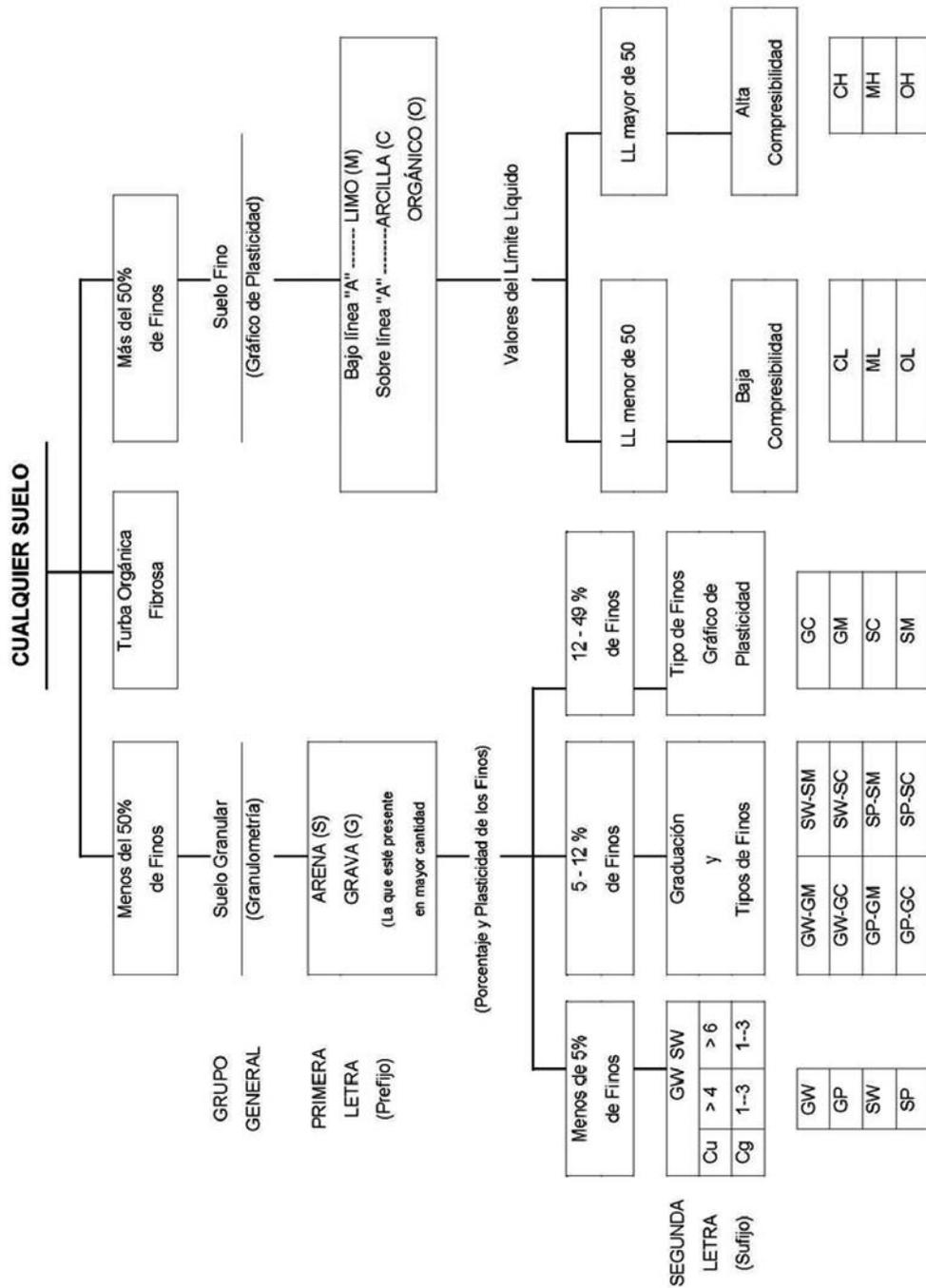
Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones, p. 84.

Tabla I. **Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)**  
**Incluyendo identificación y descripción**

Divisiones Mayores		Símbolos de Grupo		Nombres Típicos	Criterios de Clasificación para Suelos granulares		
Suelos de grano grueso Si menos del 50% del material pasa el tamiz No. 200	Gravas (Si más del 50% de la fricción No. 4) gruesa pasa el tamiz No. 4)	Gravas limpias (pocos o ningún fino)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino	Cu = D <sub>60</sub> /D <sub>10</sub> > 4 Cc = 1 < D <sub>30</sub> <sup>2</sup> /D <sub>10</sub> x D <sub>60</sub> < 3		
			GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava, arena, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW		
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	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 al línea A con 4<IP<7 se considera de frontera y se le 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 fricción No. 4) gruesa pasa el tamiz No. 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	Cu = D <sub>60</sub> /D <sub>10</sub> > 6 Cc = 1 < D <sub>30</sub> <sup>2</sup> /D <sub>10</sub> x D <sub>60</sub> < 3		
			SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, poco o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación		
		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 finos del 50% del material pasa el tamiz No. 200	Limos y arcillas (Límite Líquido LL < 50)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad	Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. Dependiendo del porcentaje de finos (fracción menor que el tamiz No. 200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% --- GW, GP, SW, SP Más del 12% --- GM, GC, SM, SC De 5 a 12% --- Casos de frontera que requieren doble símbolo		
			CL	Limos inorgánicos, 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 (Límite Líquido LL > 50)		MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos				
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas				
		OH	Arcillas orgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas				
Suelos altamente orgánicos		PI	Turba y otros suelos altamente orgánicos				

Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones, p. 89.

Figura 3. Procedimiento auxiliar para la clasificación de suelos en laboratorio SUCS



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

Tabla II. **Materiales para terraplenes**

Tipo de suelo	Permeabilidad	Resistencia a la tubificación	Resistencia al cortante	Compresibilidad	Susceptibilidad al agrietamiento	Susceptibilidad a la licuación	Manejabilidad		
GW	Permeable	Alta	Muy alta	De baja compresibilidad siempre que hayan sido colocados y compactados adecuadamente. Su compactación es fundamental.	No susceptible al agrietamiento	No susceptible a la licuación cuando se están bien compactados	Muy buena		
GP	Permeable a muy permeable	De alta a media	Alta				Muy buena		
SW	Permeable	Alta a media	Muy alta				Muy buena		
SP	Semipermeable a permeable	Baja a muy baja	Alta				De buena a correcta		
GM	Semipermeable	Alta a media	Alta	Compresibilidad baja si más del 60% del material es grueso (tamaño superior a la malla No. 4). Si el material contiene menos de 35% de material grueso, se pueden estimar los asentamientos con base en la compresibilidad de finos.	Control de humedad de compactación muy importante	Mediana a alta	Media si mal compactados	Muy buena	
GC	Impermeable	Muy alta	Alta			Baja	Muy buena		
SM	Semipermeable a impermeable	Media a baja	Alta			Mediana a alta	Muy susceptible si mal compactados	Buena a correcta	
SC	Impermeable	Alta	Alta a media			Mediana a baja	Muy baja	Buena a correcta	
ML	Impermeable	Baja a muy baja	Media a baja			Los asentamientos pueden ser grandes y se calculan con base en pruebas de consolidación.	Muy susceptibles: deben colocarse con alto grado de saturación	Mediana a alta si mal compactados	Correcta a muy pobre
MH	Muy impermeable	Media a alta	Baja					Muy baja	Buena a correcta
CL	Impermeable	Alta	Media	Mediana a alta	Mediana a alta si mal compactados			Pobre a muy pobre	
CH	Muy impermeable	Muy alta	Baja a media		Muy baja			Muy pobre	
OL	Impermeable	Media	Baja		Muy baja			Correcta a pobre	

Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones, p. 90.

Tabla III. **Suelos de cimentaciones**

<i>Clase de Suelo</i>	<i>Suelos gruesos limpios (GW, GP, SW, SP)</i>	<i>Suelos gruesos con finos (GM, GC, SM, SC)</i>	<i>Suelos finos (MH, ML, CH, CL, OL)</i>
Permeabilidad	Permeables. Las pruebas de permeabilidad en el campo son las únicas representativas.	Semipermeable a impermeables. Las pruebas de permeabilidad de campo son las más adecuadas para un contenido de finos menos del 25 por ciento.	Suelos impermeables en caso de no ser fisurados. La determinación del coeficiente de permeabilidad durante una prueba de consolidación es adecuada.
Compresibilidad y expansibilidad	Los asentamientos son pequeños cuando los materiales son compactos y la magnitud de los esfuerzos reducida. Si los depósitos son heterogéneos pueden dar lugar a irregularidades importantes en la compresibilidad.	La compresibilidad varía considerablemente según la compacidad del depósito. Las arenas finas limosas pueden presentar asentamientos bruscos en caso de saturarse bajo carga.	Es indispensable efectuar pruebas de consolidación en el laboratorio. Los suelos limosos no saturados pueden presentar asentamientos bruscos al saturarse bajo carga. Los suelos arcillosos en estado seco pueden presentar expansión al aumentar su contenido de agua.
Resistencia al corte	Muy variable dependiendo de la compacidad de los depósitos y su homogeneidad. Se relaciona, salvo el caso de arenas sueltas saturadas, con el número de golpes en una prueba de penetración estándar.	Es indispensable estudiarla en laboratorio efectuando pruebas triaxiales con especímenes inalterados. Se han de tomar en consideración las posibles variaciones del contenido de agua y la heterogeneidad del manto al definir las condiciones de las pruebas.	Es indispensable estudiarla en laboratorio efectuando pruebas triaxiales con especímenes inalterados. Puede ser útil en ciertos casos efectuar una prueba de veleta.
Tubificación	Salvo los materiales de los grupos SW y SP, presentan buena resistencia a la tubificación. Es muy importante en este aspecto la heterogeneidad de los depósitos.	Las arenas limosas presentan una resistencia a la tubificación media a baja, mientras los otros materiales de este grupo tienen una resistencia a la tubificación de alta a media. Es muy importante en este aspecto la heterogeneidad.	Los limos presentan baja resistencia a la tubificación y las arcillas de media a alta. Es muy importante en este aspecto la heterogeneidad de los depósitos.
Clase de suelo	Suelos gruesos limpios (GW, GP, SW, SP)	Suelos gruesos con finos (GM, GC, SM, SC)	Suelos finos (MH, ML, CH, CL, OL)
Licuación	Las arenas sueltas finas y saturadas son muy susceptibles a la licuación. Los otros materiales de este grupo son, por lo general, poco sensibles a la licuación.	Las arenas finas, limosas, uniformes y en estado suelto son sensibles.	Susceptibilidad prácticamente nula.

Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones, p. 91.

### **1.3.1.2. Sistema de clasificación de los suelos AASHTO**

La clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) nació de la necesidad de clasificar los suelos utilizados en las carpetas de las carreteras, y fue originalmente desarrollada por los geotécnicos Terzaghi y Hogentogler para *Bureau of Public Roads* norteamericano.

Esta clasificación está destinada principalmente a clasificar los suelos de acuerdo con su adaptabilidad para ser usados en la construcción de pavimentos en carreteras y caminos. El sistema AASHTO se usa principalmente para la clasificación de las capas de carreteras. Este sistema no se utiliza para clasificar los suelos utilizados en cimentaciones.

Este sistema los clasifica en siete grupos principales que van desde A-1 hasta A-7, basado en el tamaño del grano (granulometría) y en la plasticidad (límite líquido e índice de plasticidad) cómo lo muestra la tabla IV y la figura 4; sin embargo, en la clasificación se podría agregar el grupo A-8 en el cual se clasifica la turba y es identificada por inspección visual.

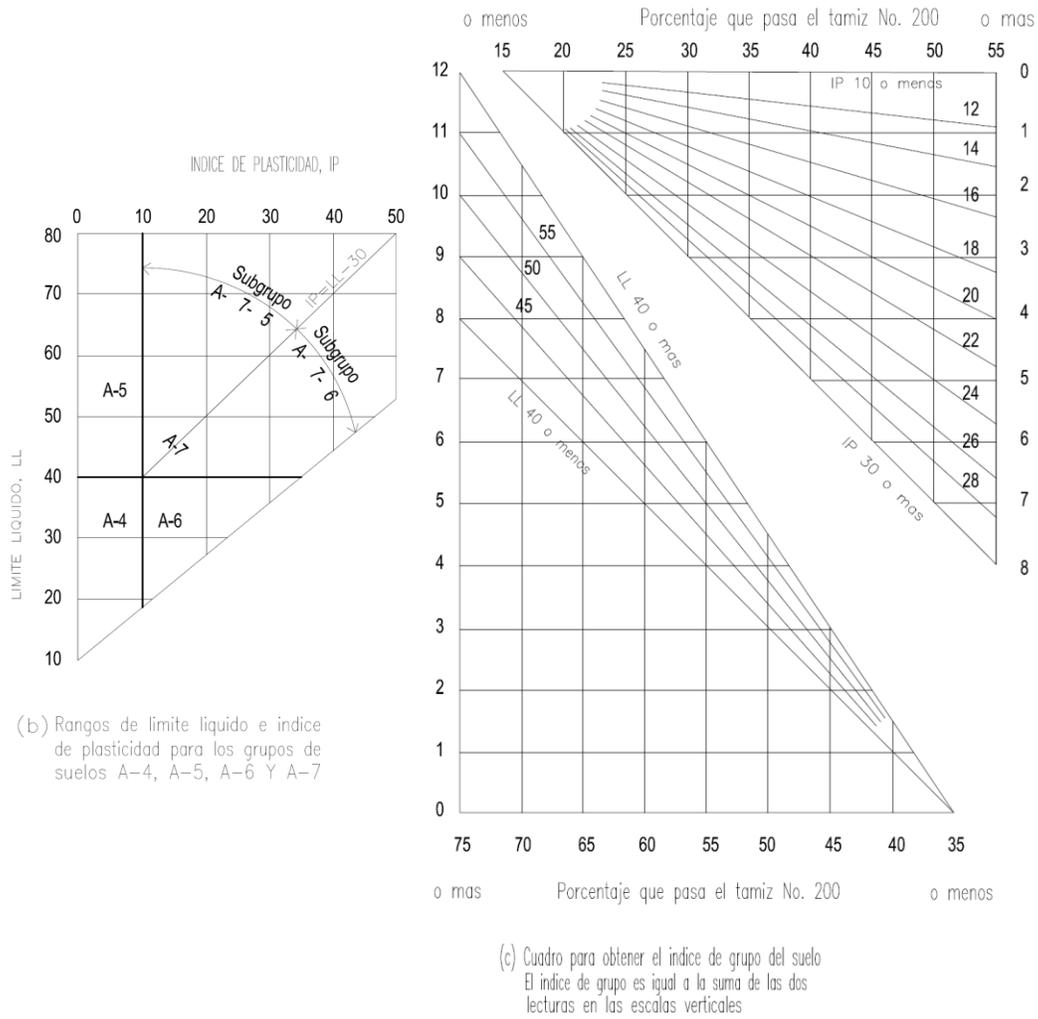
Los únicos ensayos necesarios para encuadrar un suelo dentro de un grupo u otro son el análisis granulométrico y los límites de Atterberg. Si queremos determinar su posición relativa dentro del grupo, es necesario introducir el concepto de índice de grupo (IG), expresado como un número entero con un valor comprendido entre 0 y 20 en función del porcentaje de suelo que pasa a través del tamiz #200 ASTM (0.080 UNE)

Tabla IV. Sistema de clasificación AASHTO

GRUPO SUB-GRUPO	Suelos Granulares: 35% o menos pasa malla · 200							Suelos Arcillosos y Limosos: Más de 36% malla · 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 No. 40 No. 200	50max 30max 15max		51min 10max	35min	35min	35min	35min	36min	36min	36min	36min		
Plasticidad Pasa la malla · 40 LL IP				40max 10max	41min 10max	40max 11min	41min 11min	40max 10max	41min 10max	40max 11min	41min 11min		
Índice de Grupo *	0	0	0	0	0	0	4 max	8 max	12 max	6 max	20 max		
Materiales Constructivos	Piedra, grava y arena	Fragmentos de arena	Arena Fina	Grava y/o arena limosa	Grava y/o arena arcillosa	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 que LL -30 *Índice de Grupo = IG = (F200 - 35) (0.2 + 0.005 (LL - 40) + 0.01) (F200 - 15) * (IP - 10)													

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

Figura 4. **Cuadros para utilización en el sistema de clasificación AASHTO**



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

#### **1.4. Características de los suelos**

El conocimiento de las principales características físicas de los suelos es de mucha importancia en el estudio de la Mecánica de Suelos, pues mediante su adecuada interpretación se puede predecir el comportamiento de un terreno bajo cargas cuando dicho terreno presente diferentes contenidos de humedad.

Las principales características de los suelos son:

- Peso volumétrico
- Densidad
  - Densidad absoluta
  - Densidad aparente
  - Densidad relativa
- Absorción
- Granulometría
- Estructura

#### **1.5. Propiedades de los suelos y su determinación**

Conocidos los principales tipos de suelos existentes, el siguiente paso es establecer una serie de procedimientos científicos que permitan caracterizarlos en función de diferentes propiedades físicas, químicas o mecánicas.

Los ensayos que definen las principales propiedades de los suelos en carreteras son: Análisis Granulométrico, Límites de Atterberg, Equivalente de Arena, Proctor Normal y Modificado y la determinación de la capacidad soporte mediante el índice de CBR.

## 1.6. Carreteras

Una carretera es la disposición de una franja de terreno sobre la cual pueden transitar vehículos. Según el tráfico promedio diario anual (TPDA) es necesario definir: el ancho, el alineamiento y la pendiente de la carretera. Las carreteras se pueden clasificar en:

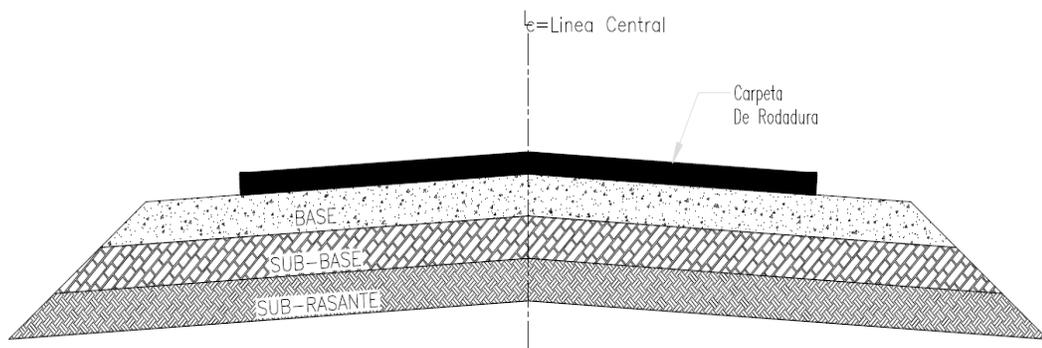
- Tipo "A1", para un TPDA de cinco mil (5,000) a veinte mil (20,000) vehículos
- Tipo "A2", para un TPDA de tres mil (3,000) a cinco mil (5,000) vehículos
- Tipo "B", para un TPDA de mil quinientos (1,500) a tres mil (3,000) vehículos
- Tipo "C", para un TPDA de quinientos (500) a mil quinientos (1,500) vehículos
- Tipo "D", para un TPDA de cien (100) a quinientos (500) vehículos
- Tipo "E", para un TPDA de hasta cien (100) vehículos

Las normas geométricas de las carreteras clasificadas de acuerdo a lo anterior, varían según las características topográficas del terreno que atraviesen, para lo cual los tipos de terreno se consideran: plano, ondulado y montañoso.

Cuando se va a construir un camino que presente un tráfico promedio diario anual mayor a 5,000 vehículos, es necesario que se construya bajo la subrasante, una capa conocida como subyacente; la cual deberá tener un espesor mínimo de 50 cm.

En corte transversal las carreteras constan básicamente de 4 capas, que son: subrasante, subbase, base y rasante o superficie de rodadura; las cuales se disponen respectivamente de abajo hacia arriba, como lo muestra la figura 5.

Figura 5. **Corte transversal de una carretera**



Fuente: elaboración propia.

### 1.6.1. Subrasante

Se le denomina subrasante a capa de la carretera que es propia del área, es decir; el suelo natural del sitio, por lo que el suelo no es selecto y en algunas ocasiones necesita ser estabilizado. La subrasante marca el perfil de la carretera sobre la cual se colocan las demás capas según los esfuerzos del terreno y las necesidades del proyecto.

La subrasante debe compensar cortes y rellenos, pero en algunas ocasiones existen puntos obligados que son puntos inamovibles como comunidades, ríos, barrancos, etc., los cuales no permiten un diseño idóneo y que se deben tomar en cuenta los siguientes elementos: pendientes máximas, pendientes mínimas y el tipo de terreno para el movimiento de tierras.

### **1.6.2. Subbase**

Esta capa se construye directamente sobre la subrasante, y tiene un fin puramente económico ya que permite el ahorro de material de la base impidiendo la mezcla de material de la subrasante con la base. Por otro lado, impide que el agua de la subrasante ascienda por capilaridad hacia la base que pudiera dar como resultado cambios volumétricos incidiendo en la disminución de la resistencia de la base.

### **1.6.3. Base**

Es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La rasante o carpeta de rodadura se colocada directamente sobre la base debido a que la capacidad de carga de ésta en su superficie es demasiado baja por lo que se le debe dotar con una capa que le provea de confinamiento.

Regularmente, la base, además de la compactación, necesita ser estabilizada para poder resistir las cargas del tránsito sin deformarse, además de transmitir las en forma adecuada a las capas inferiores.

El valor soporte, que no es más es la capacidad de carga de un material antes de su falla, junto con su compactabilidad son propiedades indispensables para proporcionar una sustentación adecuada a las carpetas asfálticas delgadas; en caso contrario, cuando las bases se construyen con materiales orgánicos y se comienza a transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales.

#### **1.6.4. Rasante o superficie de rodadura**

Existen distintas superficies de rodadura para la disposición del tráfico, y la selección de esta se hace dependiendo del tipo de carretera y el costo previsto de la misma.

##### **1.6.4.1. Carreteras pavimentadas**

En las carreteras pavimentadas, la superficie de rodadura puede estar formada por capas de concreto hidráulico, concreto asfáltico (tratamiento superficial bituminoso), o adoquines.

La losa de concreto hidráulico debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad absorbe gran parte de los esfuerzos que los vehículos ejercen sobre el pavimento, dando como resultado una buena distribución de esfuerzos; todo lo contrario sucede con el concreto asfáltico y los adoquines, al tener menor rigidez transmiten los esfuerzos hacia capas inferiores lo cual da como resultado esfuerzos mucho más punzonantes en las capas adyacentes.

La función principal de estas carpetas es proveer sustento a la superficie de la base contribuyendo a su capacidad de carga, aparte de confinar el material impidiendo su erosión.

##### **1.6.4.2. Terracería**

Se les denomina carreteras de terracería a aquellas carreteras que están compuestas de cortes y terraplenes, formadas principalmente por la subrasante y el cuerpo del terraplén.

Estas carreteras están constituidas, generalmente, por materiales no seleccionados y se dice que es la subestructura del pavimento.

### **1.7. Estabilización de suelos**

La estabilización busca el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos que no reúnen las condiciones necesarias para su utilización. La estabilización pretende aumentar la resistencia mecánica de los suelos entrelazando física o químicamente las partículas del suelo aumentando su densidad y obteniendo una mejor compactación.

Es importante recalcar que la estabilización siempre busca la reducción de costos, por lo que en algunos casos como los siguientes se debe evaluar la realización de una estabilización:

- Una subrasante desfavorable: muy arenosa o muy arcillosa
- Materiales para base o subbase en el límite de especificaciones
- Condiciones de humedad, fuera de norma
- Al reaprovechar materiales en una repavimentación

Hasta ahora los principales aditivos empleados han sido el cemento y la cal, sin embargo, la estabilización con estos aditivos aumentan los costos en la construcción. Por ello, se analizará la estabilización de suelos para subrasantes mediante la incorporación de vinaza, con el fin de obtener suelos con características físicas y mecánicas que reúnan las condiciones adecuadas para su uso.

### **1.7.1. Formas de estabilización de suelos**

La estabilización que se elija depende en gran parte de las características del suelo a mejorar, sin embargo influye mucho el criterio el ingeniero a cargo para seleccionar el tipo de estabilización a emplear.

#### **1.7.1.1. Estabilización mecánica**

La estabilización mecánica busca adicionar al suelo natural, mezclas de diversos materiales con el fin de obtener un suelo totalmente distinto que cumpla con los requerimientos para el que se desea.

Por lo general, con la estabilización mecánica se pretenden mejorar la plasticidad y la granulometría del suelo. La plasticidad afecta la susceptibilidad del material ante la presencia de agua; y la granulometría afecta la resistencia, trabajabilidad y compacidad del suelo.

La misión del ingeniero se debe centrar en determinar las proporciones a mezclar de los dos o tres materiales disponibles, valiéndose de tanteos previos, y empleando diagramas triangulares en caso se trate de tres materiales distintos.

#### **1.7.1.2. Estabilización volumétrica**

Por lo general, este tipo de estabilización busca reducir los índices de hinchamiento o expansión volumétrica del suelo ante la presencia de humedad; por lo que normalmente se aplica a suelos arcillosos, ya que si la humedad no se controla, las presiones pueden ocasionar graves deformaciones y rupturas en el pavimento.

### **1.7.2. Materiales para estabilizaciones de suelos utilizados en subrasantes de carreteras**

Para estabilizar suelos utilizados en subrasante de carreteras, no solo se deben seleccionar los materiales usados, sino además, se deben cumplir ciertos requisitos técnicos, como se enumera a continuación:

- Cal hidratada: debe cumplir con los requisitos establecidos en AASHTO M 216, ASTM C 977, ASTM C 206, ASTM 207 y NGO 41018
- Cal viva: debe cumplir con los requisitos establecidos en AASHTO M 216, ASTM C 977 y NGO 41018. La cal viva preferiblemente debe suministrarse en forma granular con partículas no mayores de 9,5mm (3/8")
- Granza de cal: debe cumplir con los requisitos de CaO (ASTM 110) de 50% mínimo y un tamaño máximo de 19 mm. La granza debe ser libre de impurezas como fragmentos de madera, hojas, raíces, grumos de arcilla y otros materiales extraños que afecten su comportamiento
- Puzolanas naturales o artificiales y cenizas volantes de carbón: deben cumplir con los requisitos de AASHTO M 295, ASTM C 618 o COGUANOR NG 41045. Está prohibido el empleo de cenizas volantes producidas por plantas que utilicen compuesto de sodio, amoníaco o azufre para controlar las emisiones de combustible
- Escoria granulada de alto horno: al emplearse como aditivo mineral debe cumplir con lo indicado en AASHTO M 302 y ASTM C 989, para grados 100 y 120

- Compuestos estabilizadores químicos orgánicos e inorgánicos: podrán usarse estabilizadores químicos y otros basados en resinas sintéticas como se indique en las disposiciones especiales o en los planos, el delegado residente debe requerir el certificado de calidad extendido por el fabricante o distribuidor
- Lechada de cal: puede hacerse con cal hidratada o cal viva pulverizada y debe llenar los requisitos siguientes:

Tabla V. **Características de la lechada de cal**

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>						
Composición química	El contenido de sólidos debe consistir de un mínimo de 87% en masa, de óxidos de calcio y magnesio.						
Residuo	<p>El porcentaje por masa del residuo retenido en los tamices indicados, para el contenido de sólidos de la lechada, no debe ser mayor de los siguientes límites:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamaño del tamiz</th> <th>Porcentaje retenido en masa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3,350 mm (N° 6)</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>0,600 mm (N° 30)</td> <td>4,0</td> </tr> </tbody> </table>	Tamaño del tamiz	Porcentaje retenido en masa	3,350 mm (N° 6)	0,2	0,600 mm (N° 30)	4,0
Tamaño del tamiz	Porcentaje retenido en masa						
3,350 mm (N° 6)	0,2						
0,600 mm (N° 30)	4,0						
Grado de la lechada	<p>Grado 1: el contenido de sólidos no debe ser mayor de 31% de la masa total de la lechada.</p> <p>Grado 2: el contenido de sólidos no debe ser mayor de 35% de la masa total de la lechada. Con contenidos mayores de sólidos, la lechada no puede ser bombeada ni rociada.</p>						

Fuente: elaboración propia.

## **1.8. Antecedentes de utilización de la vinaza en carreteras**

En retrospectiva, se tiene clara evidencia que en las culturas antiguas prestaban mucha atención al lugar y la composición del terreno donde erigían sus construcciones, prueba de ello son los hallazgos de los escritos detallados de cómo en la dinastía Chou de China (3 000 años antes de Cristo) se daban instrucciones claras a cerca de la construcción de caminos y puentes.

La aparición de la Mecánica de Suelos como tal en 1925 y las investigaciones posteriores hasta hoy en día, han ayudado fuertemente al mejoramiento de los métodos empíricos existentes en el pasado. Sin embargo, la metodología actual, aún no establece una condición única para la solución de problemas para mejorar la estabilización de los suelos en carreteras de terracería.

### **1.8.1. Historia**

En Guatemala, la utilización de la vinaza como un agente mejorador de suelos, comienza a principios de la década de los 60's con el riego de melaza (mezclada con agua) en los caminos por parte de los ingenios azucareros como un intento de dar mayor rigidez y mayor resistencia al suelo ante el desgaste en los caminos internos.

A pesar de que la melaza mejora los suelos considerablemente, se encontraron dos desventajas en su aplicación a través del tiempo: primero, que la melaza, por su contenido de fósforo y potasio, provoca corrosión en las áreas metálicas de los vehículos que transitan sobre las carreteras; y segundo, que la melaza tiene un valor comercial significativo, razón por la cual su costo / beneficio tuvo que ser analizado.

No obstante, a finales de los 90's los ingenios azucareros iniciaron a diversificar sus productos utilizando la Melaza para la producción de Alcohol Industrial, de este proceso se deriva la Vinaza cuyas características son muy similares para su utilización en la estabilización del suelos en las carreteras de terracería.

En contraparte a la melaza, la vinaza a los ingenios azucareros no les representaba ningún costo más allá que el de la misma actividad del riego, y produce prácticamente los mismos efectos que la melaza en el suelo. Se han realizado pruebas con otros productos derivados de enzimas orgánicas y los resultados han sido muy parecidos físicamente, aunque no se ha desarrollado un estudio como tal para poder determinar con certeza sus resultados.

### **1.8.2. Vinaza**

La vinaza es un subproducto de alto volumen, generado en una relación de 14 litros de vinaza por cada litro de alcohol producido aproximadamente. La vinaza se caracteriza por su bajo pH y alto contenido de materia orgánica disuelta y en suspensión.

La vinaza contiene una cantidad apreciable de sales inorgánicas compuestas de sulfatos y fosfatos de calcio, potasio, sodio y magnesio, lo cual la hace altamente contaminante si es mal manejada.

La disposición de la vinaza ha sido uno de los grandes retos de la industria alcohólica; durante los últimos años se han evaluado y desarrollado aplicaciones de fertilización por medio del riego, producción de abono, recuperación de suelos, vinaza para alimentación animal y la estabilización de suelos para caminos.

Los compuestos orgánicos de la vinaza y de mayor presencia son: glicerol (2,7%), ácido aconítico (1,8%), sorbitol (1,4%), ácido láctico (1,3%), ácido quínico (0,7%),  $\beta$ -fructofuranosa (0,5%) y alfa-glucopiranososa (0,3%). Otros compuestos orgánicos que tienen presencia en la vinaza son: alcoholes, aldehídos, acetonas, ésteres, ácidos y azúcares.

Adicionalmente, también posee compuestos volátiles como: 2,3 butanodiol, alcohol furfurílico, benzaldehído, 3-metoxiacetofenona y también se encuentran polisacáridos en un 3,38 %m/m. Además posee 2,3% de una fracción no dializable de la vinaza está constituida por mezclas de material polimérico y colorantes de alto peso molecular superiores a 12 000 Da.

Tabla VI. **Compuestos básicos de la vinaza**

Compuesto	Concentración (%m/m)
2,3 butanodiol	0,01
2-metil- 1,3 butanodiol	0,20
Glicerol	2,70
Sorbitol	1,40
Ácido láctico	1,30
Ácido succínico	0,07
Ácido málico	0,23
Ácido aspártico	0,05
Ácido aconítico	1,80
Ácido cítrico	0,80
Ácido quínico	0,70
$\beta$ - fructofuranosa	0,50
Alfa-glucopiranososa	0,30
Sacarosa	0,20
Trehalosa	0,30

Fuente: Cenicaña. Carta trimestral No. 3, p. 6.

## **2. ENSAYOS DE LABORATORIO**

Los ensayos de laboratorio, son de vital importancia para una investigación de carácter práctica, debido a que nos permiten tener condiciones controladas y repetibles.

### **2.1. Análisis de los suelos**

Por su origen, los suelos se pueden clasificar en dos grandes grupos: suelos orgánicos e inorgánicos. Los suelos inorgánicos se generan a partir de la meteorización de las rocas por agentes físicos o químicos, mientras que los suelos orgánicos son rocas meteorizadas pero que en su mayoría cuentan con partículas biológicas.

Debido a la gran variedad de suelos existentes, no existe un solo método para el estudio de los mismos; por lo tanto, es conveniente, antes de estudiar un suelo, explorar la zona y hacer una observación preliminar para determinar el tipo de suelo y en base a ello determinar el ensayo que debe realizarse.

### **2.2. Ensayos de laboratorio**

Los ensayos que definen las principales propiedades de los suelos en carreteras son: próctor estándar, próctor modificado, capacidad soporte california, análisis granulométrico, límites de Atterberg y equivalente de arena.

### **2.2.1. Ensayo de proctor modificado**

*AASHTO T180-01: standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4,54 kg (10 lb) Rammer and a 457 mm (18 in)*

El ensayo Proctor es uno de los ensayos más importantes para el estudio de los suelos. El ensayo sirve para encontrar la relación entre el peso unitario seco respecto del porcentaje de humedad óptima que permite el mejor acomodamiento entre partículas de los suelos, es decir, el más alto grado de compactación.

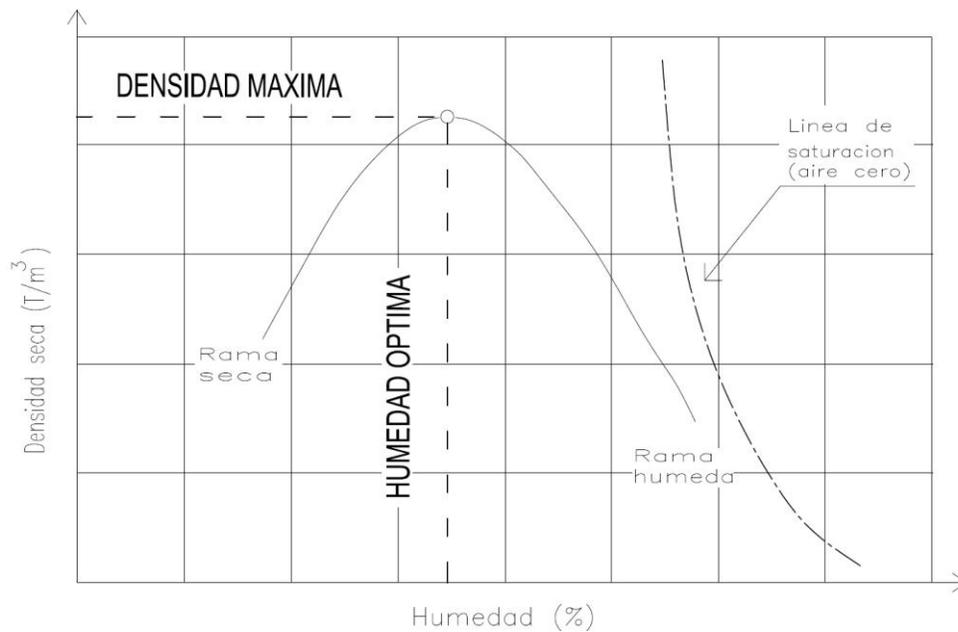
Básicamente existen dos tipos de ensayos de proctor: estándar y modificado. El modificado no es más que el aumento de la energía de compactación en relación de 1:4,5 respecto del estándar.

Es indispensable establecer la cantidad de agua adecuada debido a que la fricción entre las partículas es muy alta y no permite que se rellenen los vacíos, pero si la cantidad de agua es excesiva, ésta ocupará los volúmenes de vacíos que pudieran ocupar las partículas de los suelos.

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

De la anterior explicación, se deduce que existirá una humedad óptima con la que se obtenga una compactación máxima para una misma energía de compactación, así como lo muestra la figura 6.

Figura 6. **Curva de humedad densidad seca**



Fuente: Manual de carreteras: construcción y mantenimiento (Chile). Sección 15, p. 13.

En general, es conveniente compactar un suelo para los siguientes fines:

- Aumentar la resistencia al corte y por consiguiente, mejorar la estabilidad y la capacidad de carga de pavimentos
- Disminuir la compresibilidad y así reducir los asentamientos
- Disminuir la relación de vacíos y por consiguiente, reducir la permeabilidad
- Reducir el potencial de expansión o contracción para reducir las fisuras en la carpeta asfáltica

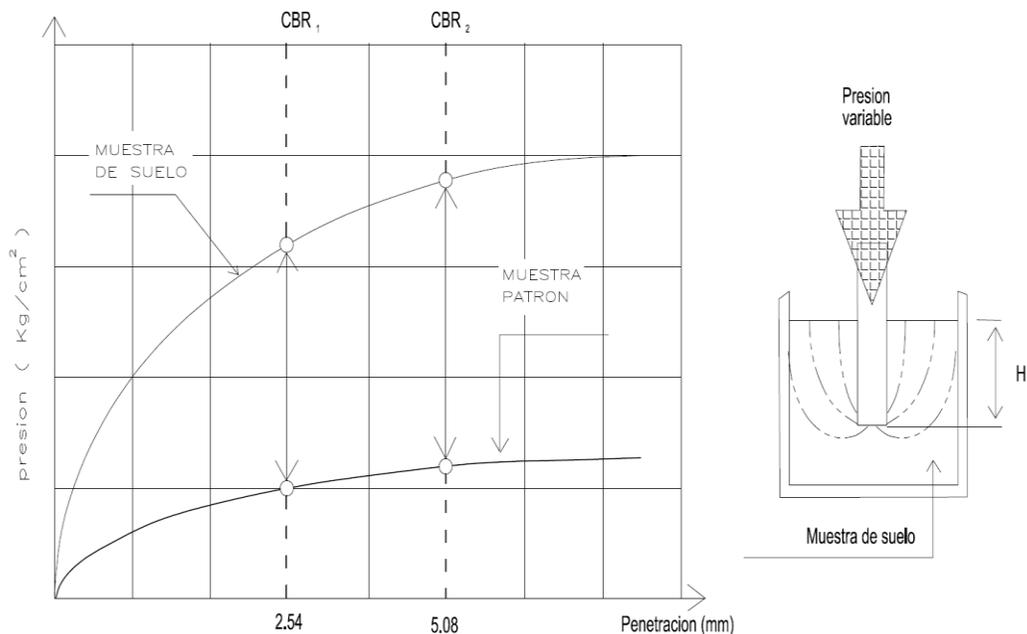
## 2.2.2. Ensayo capacidad soporte california

*AASHTO T193-99: Standard Method of Test for The California Bearing Ratio*

*ASTM D1883-07: Standard Test Method for CBR*

El ensayo de CBR (California Bearing Ratio) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener la relación de la carga unitaria a cierta profundidad de penetración respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado de excelente calidad, como lo ilustra la figura 7.

Figura 7. **Determinación del índice CBR**



Fuente: Manual de carreteras: construcción y mantenimiento (Chile). Sección 15, p. 18.

### 2.2.3. Ensayo granulométrico

*AASHTO T27: Standard Method of Test for The California Bearing Ratio*

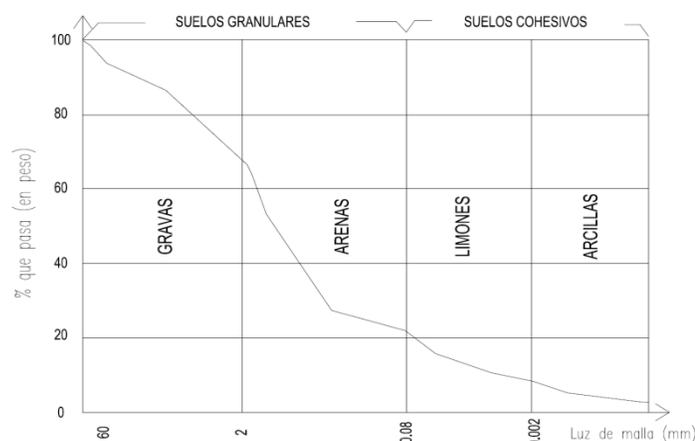
*AASHTO T11: Standard Method of Test for The California Bearing Ratio*

Este ensayo busca determinar las proporciones de los distintos tamaños de los granos de los suelos.

El ensayo se realiza por medio de una batería normada de tamices que se colocan en orden decreciente (el tamiz con la abertura mayor hasta arriba y el tamiz de la abertura menor hasta abajo), en función de su abertura por los cuales pasa una cantidad de suelo previamente pesada, como lo muestra la figura 8.

Una vez realizado el tamizado, se procede a pesar los suelos retenidos en cada tamiz, para finalmente construir una gráfica semilogarítmica donde se determinan los porcentajes de suelo que pasan cada uno de los tamices

Figura 8. **Curva Granulométrica**



Fuente: Manual de carreteras: construcción y mantenimiento (Chile). Sección 15, p. 6

La realización del ensayo debe poder establecer una clasificación genérica de suelos para atender a su granulometría.

Tabla VII. **Clasificación granulométrica**

Clasificación granulométrica de los suelos			
Tipo	Denominación		Tamaño
Suelos granulares	Bolos y bloques		> 60
	Grava	Gruesa	60 – 20
		Medio	20 – 6
		Fino	2 – 6
	Arena	Gruesa	0.6 – 2
		Medio	0,2 – 0,6
Fino		0,08 – 0,2	
Suelos cohesivos	Limo	Grueso	0,02 – 0,08
		Medio	0,006 – 0,02
		Fino	0,002 – 0,006
	Arcilla		< 0,002

Fuente: Manual de carreteras: construcción y mantenimiento (Chile). Sección 15, P. 8.

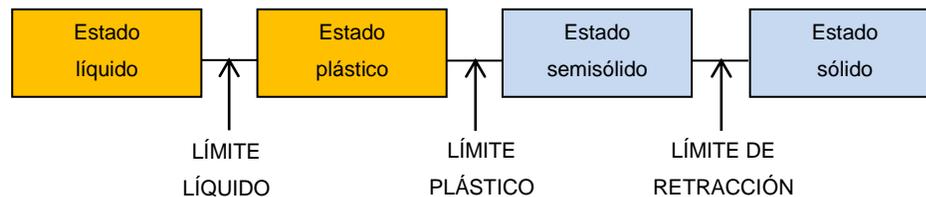
#### 2.2.4. **Ensayo límites de Atterberg**

Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que se define la plasticidad y se utiliza en la identificación y clasificación de un suelo. Atterberg dividió y consideró tres límites o estados de consistencia: el límite líquido (LL), el límite plástico (LP), y el límite de retracción (LR) cómo lo muestra la figura 9.

En los granos gruesos de suelos, las fuerzas de gravitación predominan fuertemente sobre cualquier otra fuerza, por lo que la mayoría de partículas gruesas tienen un comportamiento similar; sin embargo, en los suelos de granos muy finos fuerzas tensivas hidráulicas y las fuerzas electromagnéticas ejercen una mayor acción debido la relación área – volumen de estos suelos.

La presencia de agua en los suelos influye mucho en el comportamiento de los mismos: cuanto menores sean las partículas, mayor es la incidencia del agua en la cohesión del suelo.

Figura 9. **Estados de consistencia de los suelos**



Fuente: Manual de carreteras: construcción y mantenimiento (Chile). Sección 15, p. 9.

Los límites de Atterberg y los índices asociados resultan muy útiles para la identificación y clasificación de suelos. Frecuentemente los límites se utilizan directamente en las especificaciones para controlar los suelos a utilizar en terraplenes y en métodos semiempíricos de proyectos.

#### **2.2.4.1. Límite líquido (L.L.)**

*AASHTO T089-02: Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils*

*ASTM D423-66 (1982): Method of Test for Liquid Limit of Solis*

El límite líquido es el estado del suelo en el cual la humedad que contiene lo hace permanecer entre un estado plástico y el estado líquido, es decir, que es altamente moldeable pero puede llegar a perder su cohesión si se le aumenta de humedad.

### 2.2.4.2. Límite plástico (LP)

*AASHTO T090-00: Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity index of Soils*

*ASTM D424-54 (1982): Method of Test for Plastic Limit of Solis*

El límite plástico es el estado del suelo en el cual la humedad que contiene lo hace permanecer entre un estado semisólido y el estado plástico, es decir, que si permite ser moldeado, pero no con facilidad.

### 2.2.4.3. Índice de plasticidad (I.P.)

Es el índice que permite la clasificación del suelo, y es igual a la diferencia numérica entre L.L. y L.P. o sea  $I.P. = L.L. - L.P.$

En la tabla VIII, se muestran los rangos de valores más frecuentes de todos estos parámetros en diferentes tipos de suelos:

Tabla VIII. **Valores típicos de consistencia en los suelos**

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

Fuente: Manual de carreteras: construcción y mantenimiento (Chile). Sección 15, p. 9.

## 2.2.5. Ensayo triaxial

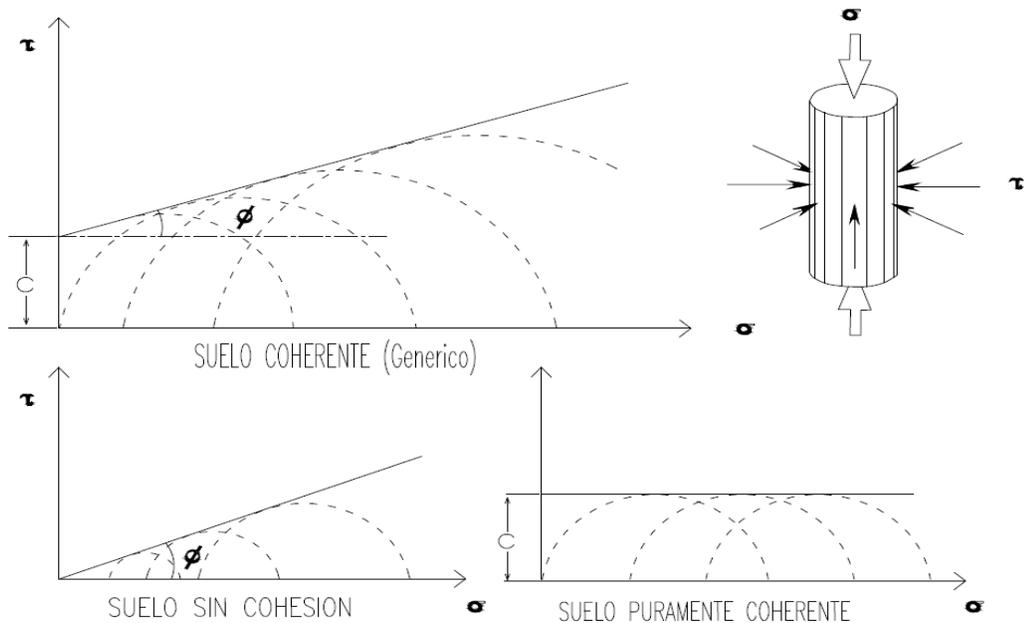
*AASHTO T296-05: Standard Method of Test for Unconsolidated, Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression*

El ensayo triaxial consiste en encontrar la relación esfuerzo-deformación, cohesión y el ángulo de fricción interna de los suelos. Este ensayo es el más utilizado en carreteras, junto con el de corte directo.

Figura 10. Rectas de resistencia intrínseca de los suelos

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi$$

donde  $\tau$  es la tensión tangencial o de cizalla aplicada de forma radial  
 $\sigma$  es la tensión normal o axial aplicada sobre la muestra  
 $C$  es la cohesión del suelo en  $\text{Kg}/\text{cm}^2$   
 $\phi$  es el ángulo de rozamiento interno del suelo



Fuente: Manual de carreteras: construcción y mantenimiento (Chile). Sección 15, p. 19

### **2.2.5.1. Cambios de volumen en esfuerzos de corte**

Se denomina como resistencia al corte de un suelo a la tensión de corte o fractura en el plano de corte y en el momento de la falla. Se debe entender la naturaleza de la resistencia al corte para analizar los problemas de capacidad de carga, estabilidad de taludes y presiones laterales sobre estructuras de contención de suelo.

Para las arenas sueltas, el volumen disminuye durante el corte, ya que las partículas en el plano de falla se desplazan y forman un arreglo más denso. Para grandes deformaciones cortantes del orden del 20%, la muestra se cizalla a volumen constante con un valor constante de esfuerzo cortante.

Los cambios de volumen tienen una influencia fundamental en el valor de la resistencia al corte de los suelos.

Los ensayos de CBR se realizan en probetas cilíndricas remoldeadas con una densidad seca máxima obtenida del ensayo de proctor modificado, se le aplican un esfuerzo de confinamiento en todas sus caras.

El ensayo triaxial constituye el método más versátil en el estudio de las propiedades esfuerzo-deformación; como lo muestra la figura 10 este ensayo es posible obtener una gran variedad de estados reales de carga.

### **2.3. Forma de aplicar la vinaza a los suelos**

En las áreas donde es común aplicar vinaza para el mejoramiento de los suelos se ha notado, por inspección visual, que dicha práctica mejora algunas de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos utilizados en subrasantes

de las carreteras de terracería; sin embargo se desconoce el alcance de dicha aplicación.

Al igual que los demás métodos para el mejoramiento de los suelos, la aplicación de la vinaza necesita una forma adecuada para poder reducir daños a la salud de los trabajadores y el adecuado cuidado de la maquinaria involucrada en la aplicación sin desestimar el adecuado proporcionamiento de suelo-vinaza.

La forma correcta o recomendable de aplicación de la vinaza es en forma líquida por medio de cisternas para riego.

### **2.3.1. En forma líquida**

Esta forma de aplicar la vinaza al suelo consiste en mezclar la vinaza con agua y dosificar un porcentaje de la mezcla de vinaza – agua al suelo dependiendo del volumen escarificado.

La aplicación de la vinaza en forma líquida al suelo permite su homogenización y permite que se llenen los espacios entre partículas de suelo rellenándose con sedimentos de la vinaza al evaporarse la humedad.

La desventaja que presenta la aplicación en forma líquida es que la maquinaria se va a ver afectada por la vinaza debido a que ésta es altamente corrosiva, de manera que las pipas deberán tener mayor mantenimiento y eventualmente mayor rotación.

### 2.3.1.1. Pasos para la aplicación de la vinaza

- Paso 1: se escarifica el material a una profundidad de 0,20m aproximadamente, como lo muestra la figura 11.

Figura 11. **Escarificación del suelo a 0,20m de profundidad**



Fuente: Escuintla, La Democracia, interior Finca Buganvilia, Ingenio Magdalena.

- Paso 2: se le aplica suficiente agua al suelo para poder escarificarlo fácilmente, pero cuidando de no utilizar demasiado como para afectar significativamente la mezcla vinaza - agua óptima.
- Paso 3: se aplica homogéneamente mezcla vinaza - agua sobre el suelo, como lo muestra la figura 12.

Figura 12. **Aplicación de vinaza al suelo**



Fuente: Escuintla, La Democracia, interior Finca Buganvilia, Ingenio Magdalena.

- Paso 4: se forman una cajuela estándar y se alterna con una cajuela inversa hasta que la mezcla de suelo con vinaza – agua sea homogénea.

Figura 13. **Formación de cajuela**



Fuente: Escuintla, La Democracia, interior Finca Buganvilia, Ingenio Magdalena.

- Nota: se debe procurar no tener rocas salientes debido a que esto provoca la temprana erosión de la superficie de rodadura, se recomienda el retiro de la grava manualmente, como lo muestra la figura 14.

Figura 14. **Evitar rocas en la superficie de rodadura**



Fuente: Escuintla, La Democracia, interior Finca Buganvilia, Ingenio Magdalena.

- Paso 5: una vez mezclado uniformemente el material, se esparce, se conforma y se compacta, como lo muestra la figura 15.

Figura 15. **Conformado y compactado de material**



Fuente: Escuintla, La Democracia, interior Finca Buganvilia, Ingenio Magdalena.

- Paso 6: el tramo se puede habilitar inmediatamente después de compactado el suelo.
  - Nota: se debe aplicar la mezcla de vinaza – agua en la superficie de rodadura cada vez que el suelo comience a presentar signos de deterioro.

#### **2.4. Dosificación de vinaza**

La dosificación adecuada de la vinaza es la que nos permita el mejoramiento en las propiedades físicas y mecánicas de los suelo, obteniendo así los valores soportes esperados.

La propuesta es reemplazar la utilización del agua por el de la mezcla vinaza - agua para suelos friccionantes utilizados en subrasantes en carreteras; lo cual podría subsanar deficiencias en el mantenimiento de las carreteras aprovechando de una mejor manera las características de la vinaza.

La relación vinaza – agua se dosificará en la muestra de suelo en variaciones del 25% para volúmenes iguales, es decir, las relaciones con las que se trabajarán son las siguientes: 0% vinaza – 100% agua, 25% vinaza – 75% agua, 50% vinaza – 50% agua, 75% vinaza – 25% agua, 100% vinaza – 0% agua, hasta llegar a un porcentaje adecuado en el cual el mejoramiento de la muestra de suelo sea apropiada.

La variación de los resultados de la utilización de la vinaza en el mejoramiento de los suelos son: la temperatura, la humedad dominante, la topografía de la zona en relación al drenaje natural, el porcentaje de finos del suelo y los límites de consistencia.

## 2.5. Ensayos a muestras de suelo estabilizado

Según las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes (Libro Azul de Caminos) en su sección 301,06 los ensayos que se le deben realizar a la subrasante son:

- Límite líquido: AASHTO T 89      Material Inadecuado      AASHTO M 145
- Límite plástico: AASHTO T 90
- Hinchamiento: AASHTO T 193
- Humedad de campo con carburo: AASHTO T 217
- Compactación: AASHTO T 180 y T 191

Sin embargo, por fines puramente comparativos los ensayos a realizarse son:

- CBR (Valor Soporte California): Norma AASHTO T193-99
- Granulometría: Norma AASHTO T-27 y T-11
- Límites de Atterberg: Norma ASSHTO T089-02 y T090-00
- Triaxial: Norma ASSHTO T296-05
- Control de evaporación: Este ensayo se utiliza para medir la evaporación de la humedad en las muestras de suelo con la mezcla vinaza – agua y se realizará en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería. Este ensayo no se regirá por ninguna norma, por lo que nos apegaremos a los parámetros de pérdida de humedad que relaciona el peso del material húmedo con el peso del material seco, para determinar la cantidad de líquido evaporado.

Los resultados de estos ensayos se utilizarán para establecer si la vinaza es eficaz para el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos en estudio.

### **3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Una vez realizados los ensayos de laboratorio al suelo estabilizado, es muy importante saber cómo interpretar dichos resultados. A continuación se detallan los resultados obtenidos y su interpretación.

#### **3.1. Resultados de laboratorio**

Todos los resultados de los ensayos de laboratorio que se detallan a continuación son datos entregados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos de Ingeniería, CII-USAC.

##### **3.1.1. Arena limosa color café oscuro**

La arena limosa color café oscuro se obtuvo del banco de material ubicado en Guatemala, Escuintla, La Democracia, finca Santa Rita, pante 1ª, lote 120143, colindando al norte con finca San Patricio, coordenadas UTM 14° 06' 59.92"N 90° 57' 53.82"O, a una altitud de 57m sobre el nivel del mar.

##### **3.1.1.1. Granulometría**

Este ensayo fue realizado acorde a las normas AASHTO T-27 y AASHTO T-11 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El material utilizado para este mejoramiento del suelo contiene los siguientes datos.

Grava = 24,86%

Arena = 54,97%

Finos = 20,17%

### 3.1.1.2. Límites de Atterberg

El material, por ser granular, no presenta límites de Atterberg en ninguno de los porcentajes de vinaza.

### 3.1.1.3. Proctor modificado

Este ensayo fue realizado acorde a las normas AASHTO T180-01 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### 3.1.1.3.1. Proctor modificado con 0% de vinaza – 100 % H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color café oscuro con 0% de vinaza – 100% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla IX. **Proctor con 0% de vinaza – 100% H<sub>2</sub>O**

Proctor con 0% de vinaza – 100% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	8,0	9,0	11,8	15,4
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	112,14	112,84	115,41	113,54

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

Resultados obtenidos:

- Humedad óptima: 11,8%
- Densidad seca máxima:  $115,41 \text{ lb/pie}^3 \approx 1848,87 \text{ kg/m}^3$

### 3.1.1.3.2. Proctor modificado con 25 % de vinaza – 75 % H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color café oscuro con 25% de vinaza – 75% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla X. Proctor con 25% de vinaza – 75% H<sub>2</sub>O

Proctor con 25% de vinaza – 75% de H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	8,7	9,4	12,1	17,5
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	113,85	114,32	118,61	109,21

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

Resultados obtenidos:

- Humedad óptima: 13,5%
- Densidad seca máxima:  $116,70 \text{ lb/pie}^3 \approx 1869,53 \text{ kg/m}^3$

### 3.1.1.3.3. Proctor modificado con 50 % de vinaza – 50 % H<sub>2</sub>O

Una arena limosa con 50% de vinaza – 50% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla XI. Proctor con 50% de vinaza – 50% H<sub>2</sub>O

Proctor con 50% de vinaza – 50% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	8,6	11,2	13,3	15,8
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	116,95	119,53	119,68	117,14

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

Resultados obtenidos:

- Humedad óptima: 12,4%
- Densidad seca máxima: 119,90 lb/pie<sup>3</sup> ≈ 1920,80 kg/m<sup>3</sup>

### 3.1.1.3.4. Proctor modificado con 75% de vinaza – 25% H<sub>2</sub>O

Una arena limosa con 75% de vinaza – 25% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla XII. **Proctor con 75% de vinaza – 25% H<sub>2</sub>O**

Proctor con 75% de vinaza – 25% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	8,9	11,4	14,3	16,3
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	112,97	118,74	118,62	114,89

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

Resultados obtenidos:

- Humedad óptima: 12,6%
- Densidad seca máxima: 119,30 lb/pie<sup>3</sup> ≈ 1911,19 kg/m<sup>3</sup>

### 3.1.1.3.5. **Proctor modificado con 100% de vinaza – 0% H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa con 100% de vinaza – 0% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla XIII. **Proctor con 100% de vinaza – 0% H<sub>2</sub>O**

Proctor con 100% de vinaza – 0% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	7,4	10,3	13,0	15,9
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	112,68	117,55	118,81	115,25

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

Resultados obtenidos:

- Humedad óptima: 12,7%
- Densidad seca máxima: 118,90 lb/pie<sup>3</sup> ≈ 1904,79 kg/m<sup>3</sup>

#### **3.1.1.4. Valor soporte california (CBR)**

Este ensayo fue realizado acorde a las normas AASHTO T193-99 y ASTM D1883-07 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

##### **3.1.1.4.1. CBR con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa color café oscuro con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte California, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 11,8 %
- Resultados obtenidos:

Tabla XIV. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	1463,15	918,24	341,81
Penetración 0,2 (lb)	5916,22	3418,72	511,64

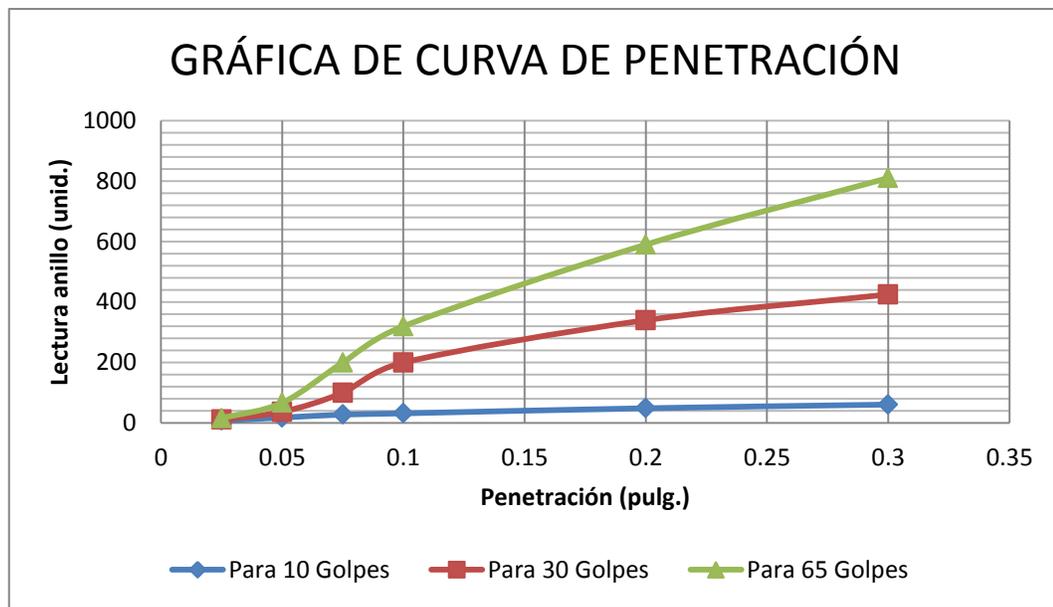
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Tabla XV. **Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	100,00	93,92	87,00
%CBR	62,4	30,6	11,4

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

Figura 16. **Penetración – deformación (0% de vinaza – 100% H<sub>2</sub>O)**



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

#### 3.1.1.4.2. **CBR con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa color café oscuro con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte california, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 13,5%
- Resultados obtenidos:

Tabla XVI. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	600,38	355,17	246,19
Penetración 0,2 (lb)	1485,85	768,39	509,56

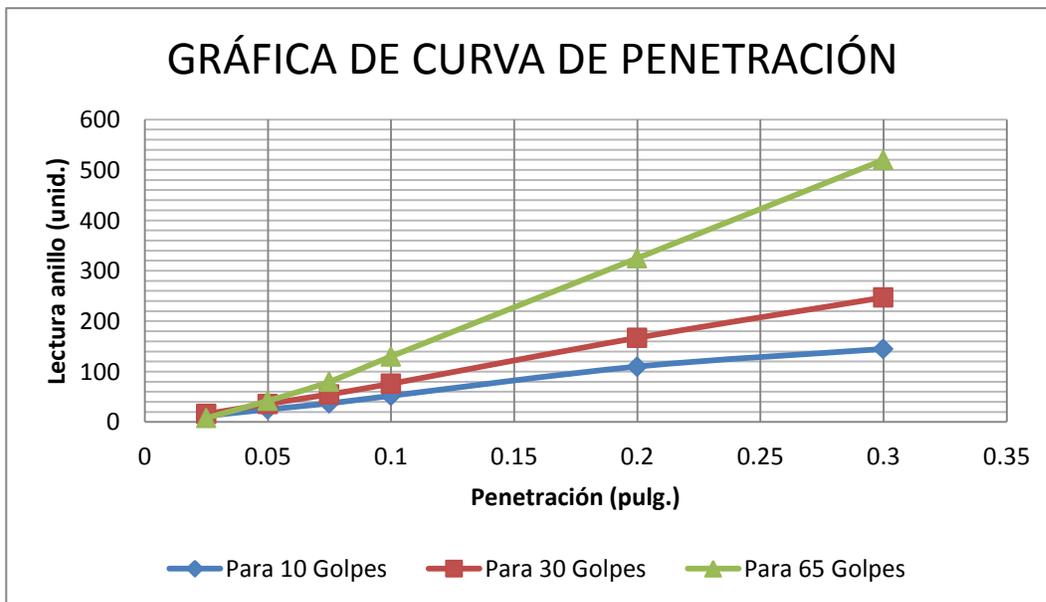
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Tabla XVII. **Porcentaje CBR vs. Porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	99,44	96,65	92,25
%CBR	29,2	13,7	8,2

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

Figura 17. **Penetración – deformación (25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O)**



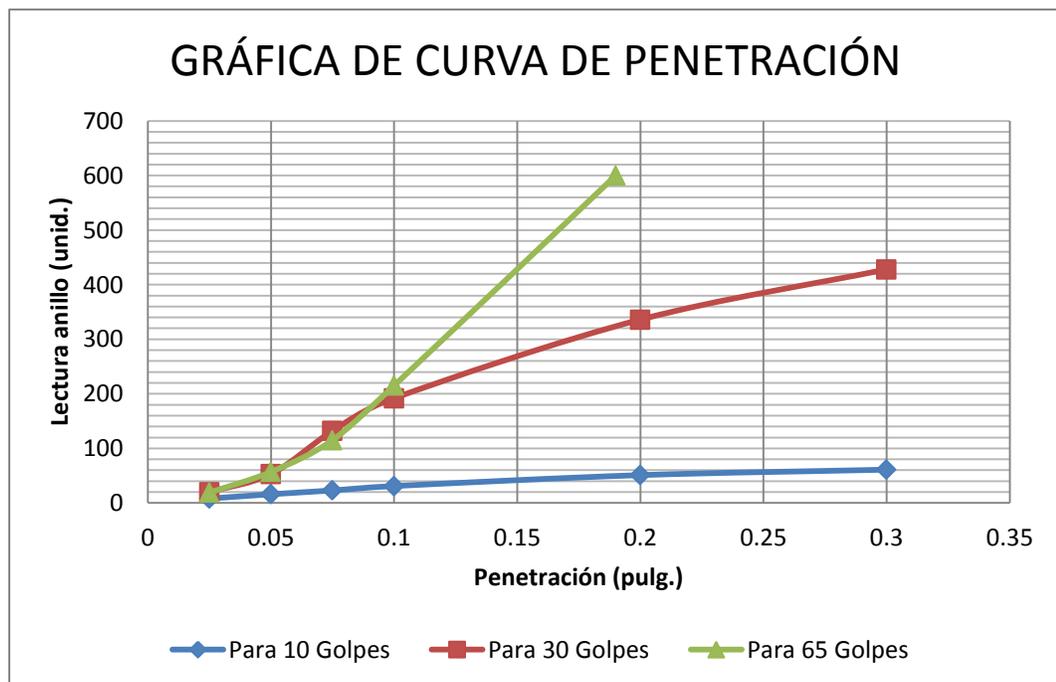
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

### 3.1.1.4.3. CBR con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color café oscuro con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte californiana, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 12,4%

Figura 18. Penetración – deformación (50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O)



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

- Resultados obtenidos:

Tabla XVIII. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	986,35	881,91	150,83
Penetración 0,2 (lb)	2734,60	1535,80	241,64

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

Tabla XIX. **Porcentaje CBR vs. Porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	99,57	95,44	86,96
%CBR	62,4	36,8	5,0

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

#### 3.1.1.4.4. **CBR con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa color café oscuro con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte California, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 12,6%
- Resultados obtenidos:

Tabla XX. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	554,97	691,19	100,88
Penetración 0,2 (lb)	1876,37	1662,95	205,32

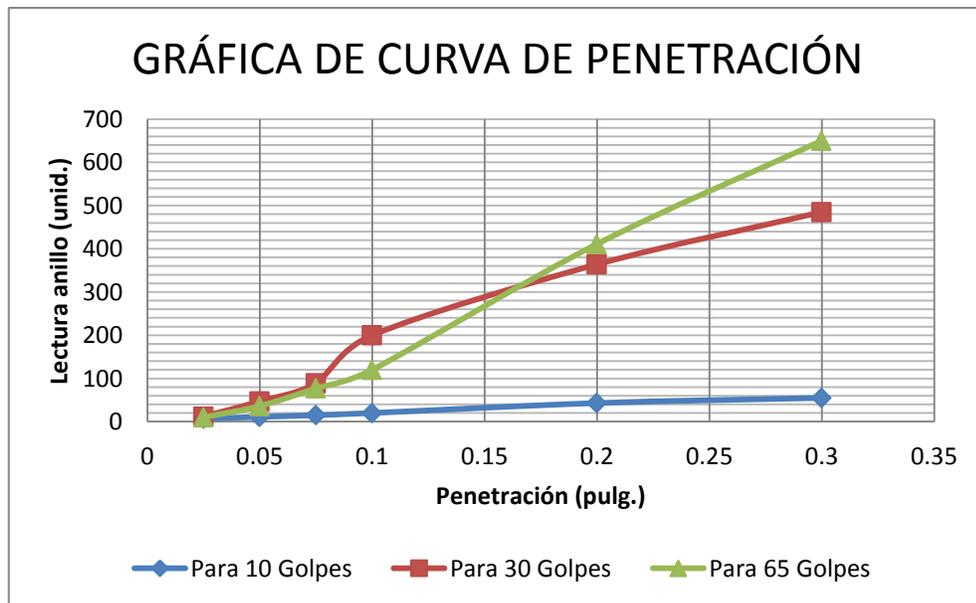
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Tabla XXI. **Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	99,46	95,51	88,50
%CBR	41,2	34,1	3,4

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

Figura 19. **Penetración – deformación (75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O)**



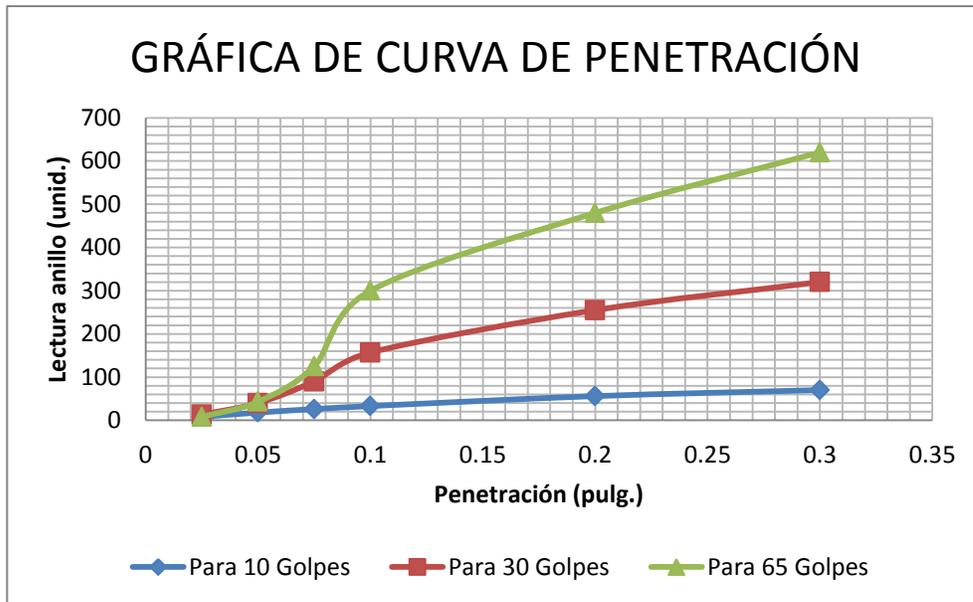
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

#### 3.1.1.4.5. **CBR con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa color café oscuro con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte California, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 12,7%

Figura 20. **Penetración – deformación (100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O)**



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

- Resultados obtenidos:

Tabla XXII. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	1372,33	722,98	159,91
Penetración 0,2 (lb)	2189,69	1167,99	264,35

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

Tabla XXIII. **Porcentaje CBR vs. Porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	98,13	91,92	85,35
%CBR	64,1	32,1	5,3

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

**Tabla XXIV. Resistencia al corte a 65 golpes**

Resistencia al corte vs. % de vinaza (65 golpes, arena limosa color café oscuro)		
% Vinaza	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,1"	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,2"
0%	1463,15	5916,22
25%	600,38	1485,85
50%	986,35	2734,60
75%	554,97	1876,37
100%	1372,33	2189,69

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

**Tabla XXV. Resistencia al corte a 30 golpes**

Resistencia al corte vs. % de vinaza (30 golpes, arena limosa color café oscuro)		
% Vinaza	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,1"	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,2"
0%	918,24	3418,72
25%	355,17	768,39
50%	881,91	1535,80
75%	691,19	1662,95
100%	722,98	1167,99

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

**Tabla XXVI. Resistencia al corte a 10 golpes**

Resistencia al corte vs. % de vinaza (10 golpes, arena limosa color café oscuro)		
% Vinaza	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,1"	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,2"
0%	341,81	511,64
25%	246,19	509,56
50%	150,83	241,64
75%	100,88	205,32
100%	159,91	264,35

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

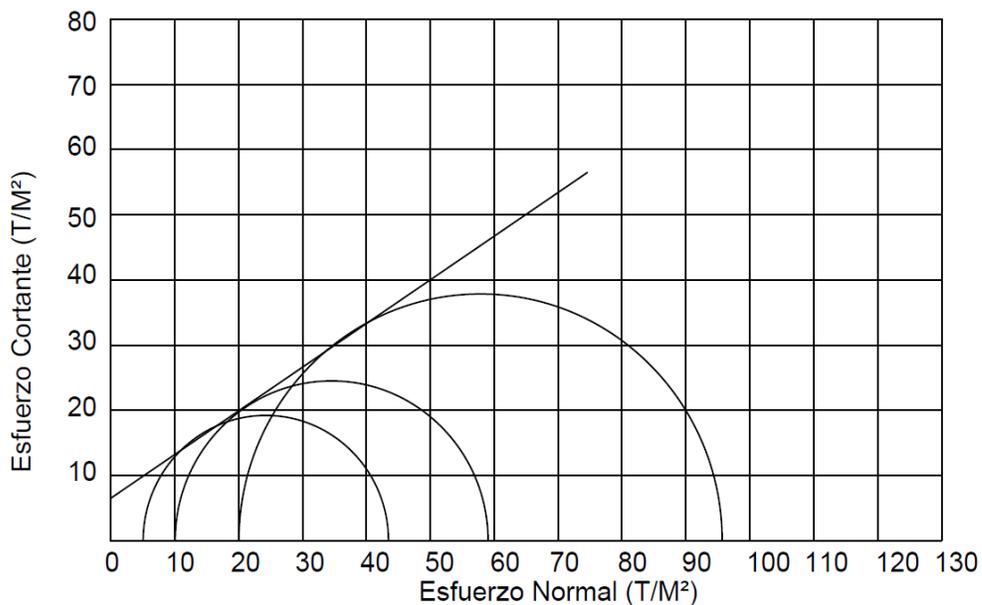
### 3.1.1.5. Ensayo triaxial

Este ensayo fue realizado acorde a las normas AASHTO T1296-05 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### 3.1.1.5.1. Triaxial con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color café oscuro, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O.

Figura 21. **Círculos de Mohr para triaxial con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O**



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

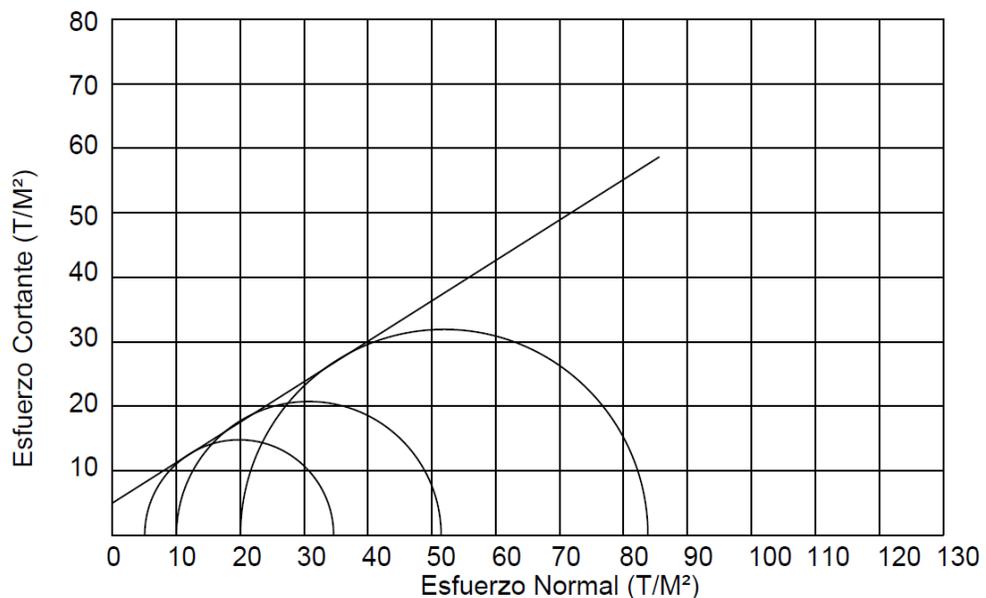
- Ángulo de fricción interna:  $33,81^\circ$
- Cohesión:  $6,55 \text{ t/m}^2$

La figura 21 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

### 3.1.1.5.2. Triaxial con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color café oscuro, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O.

Figura 22. **Círculos de Mohr para triaxial con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O**



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

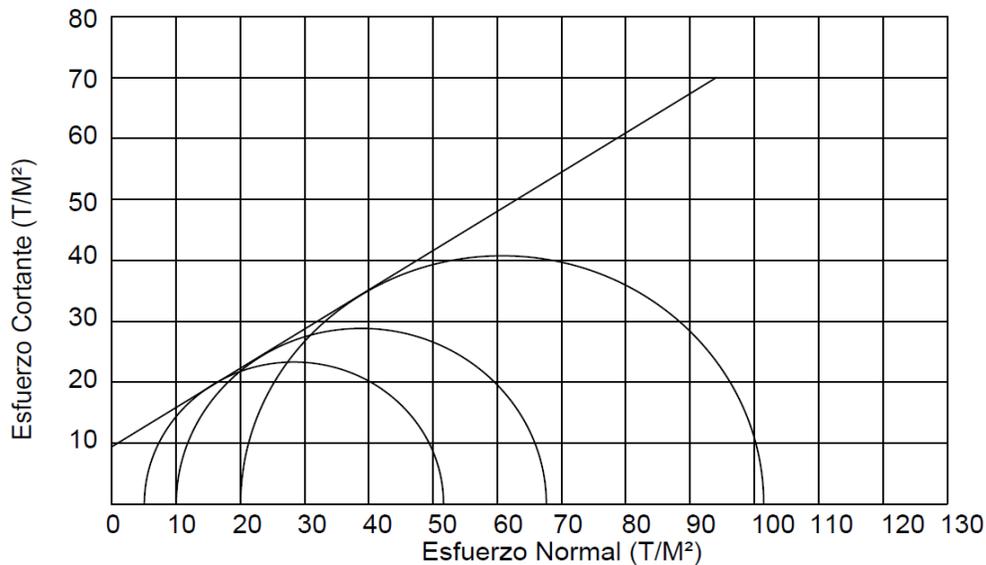
- Ángulo de fricción interna: 32,09°
- Cohesión: 5,00 t/m<sup>2</sup>

La figura 22 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

### 3.1.1.5.3. Triaxial con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color café oscuro, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O.

Figura 23. **Círculos de Mohr para triaxial con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O**



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

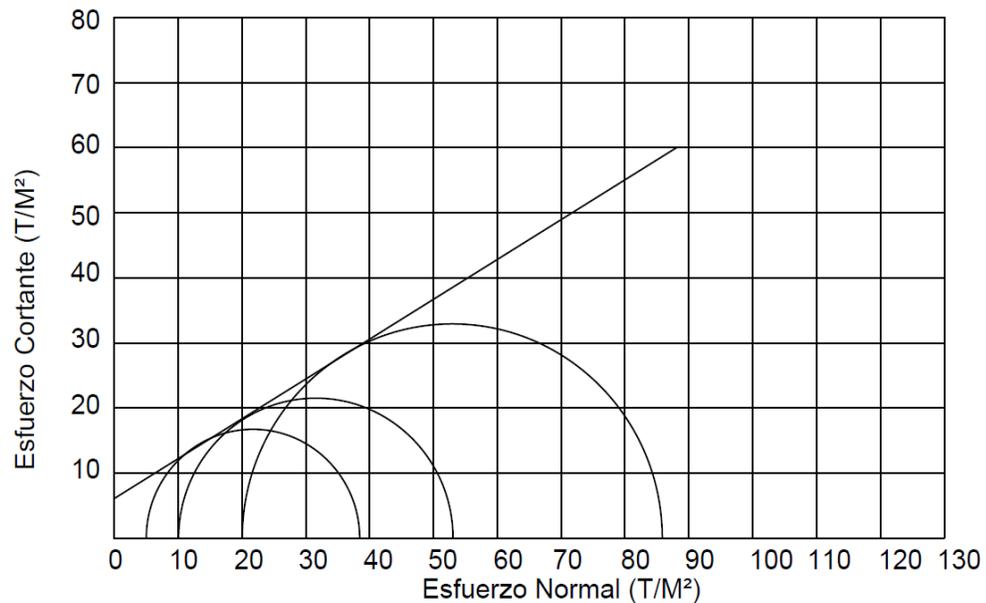
- Ángulo de fricción interna:  $32,75^\circ$
- Cohesión:  $9,50 \text{ t/m}^2$

La figura 23 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

#### 3.1.1.5.4. Triaxial con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color café oscuro, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O.

Figura 24. Círculos de Mohr para triaxial con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O



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

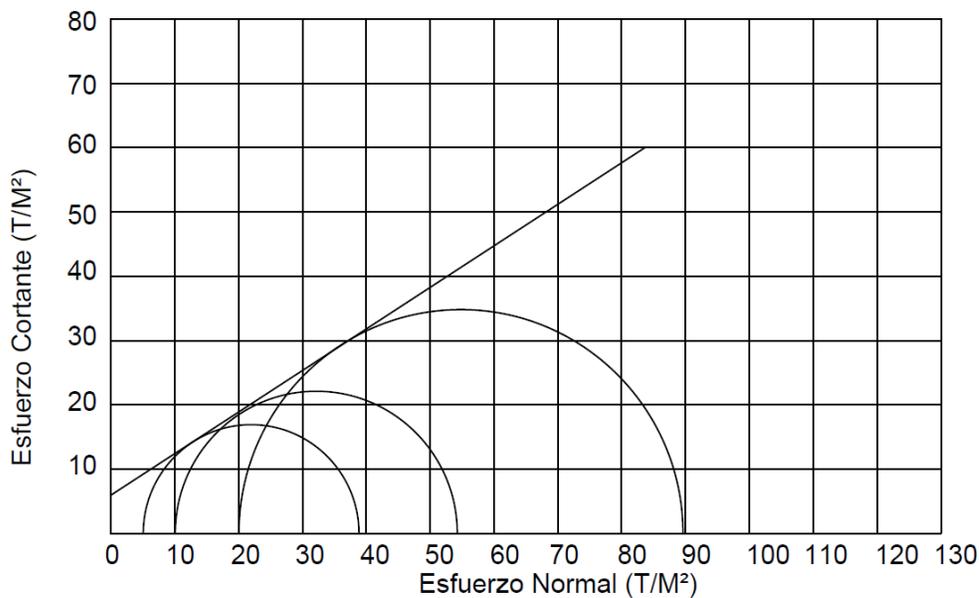
- Ángulo de fricción interna:  $31,46^\circ$
- Cohesión:  $6,10 \text{ t/m}^2$

La figura 24 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

### 3.1.1.5.5. Triaxial con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color café oscuro, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O.

Figura 25. **Círculos de Mohr para triaxial con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O**



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

- Ángulo de fricción interna: 32,83°
- Cohesión: 6,00 t/m<sup>2</sup>

La figura 25 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

Tabla XXVII. **Ángulo de fricción interna y cohesión**

% vinaza	Ángulo de fricción interna	Cohesión
0%	33,81°	6,55
25%	32,09°	5,00
50%	32,75°	9,50
75%	31,46°	6,10
100%	32,83°	6,00

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

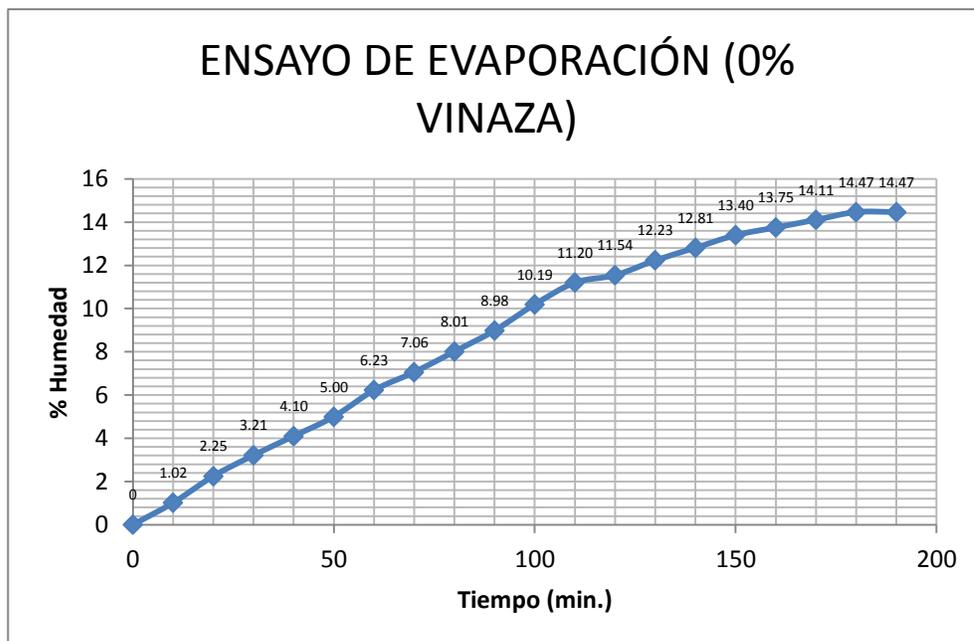
### 3.1.1.6. Pérdida de humedad (evaporación)

Este ensayo no fue realizado bajo norma, por lo que nos apegamos a los parámetros de pérdida de humedad que relaciona el peso del material húmedo con el peso del material seco, para determinar el la cantidad de líquido evaporado.

### 3.1.1.6.1. Evaporación con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color café oscuro, a 190 min., con temperatura constante de 110 °C.

Figura 26. **Evaporación – Tiempo 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color café oscuro)**



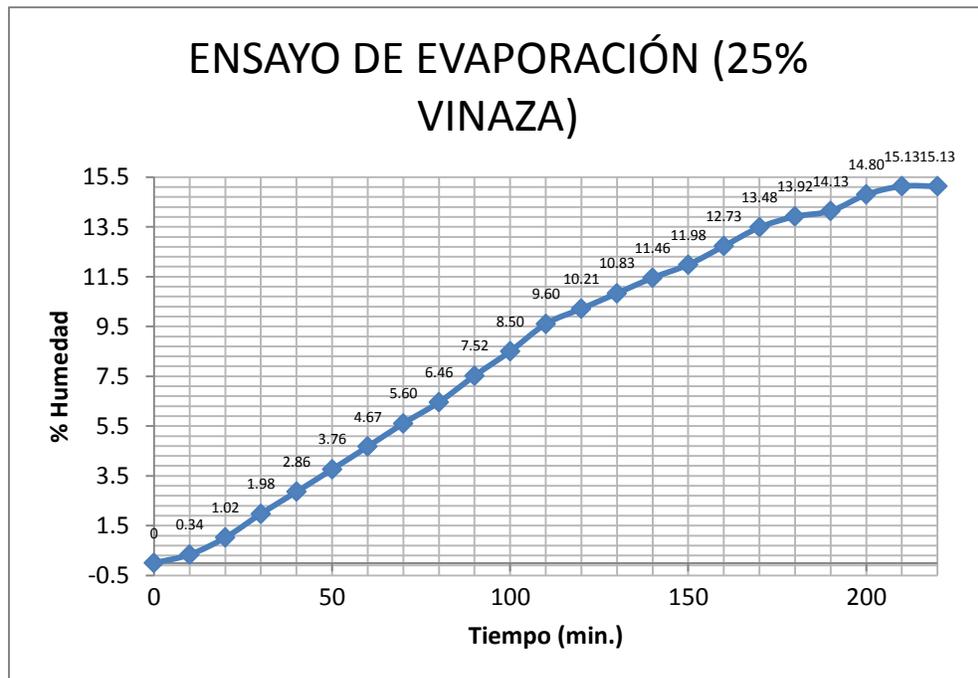
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

La figura 26 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo empleando 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante tres horas. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

### 3.1.1.6.2. Evaporación con 25 % de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color café oscuro, a 220 min., con temperatura constante de 110 °C.

Figura 27. Evaporación – Tiempo 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color café oscuro)



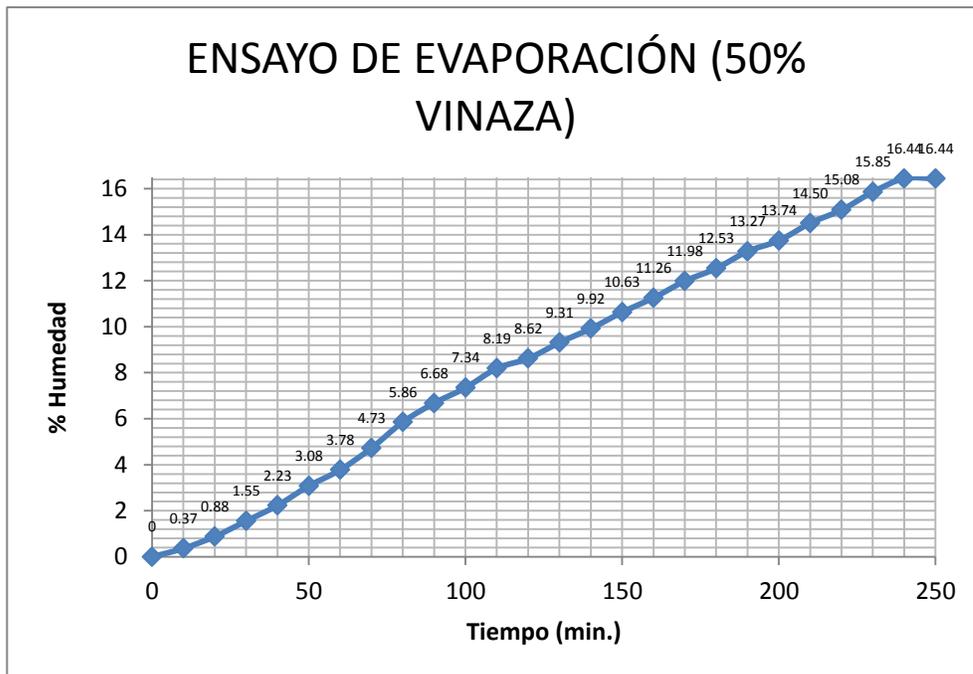
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

La figura 27 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo y empleando 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante tres horas y media. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

### 3.1.1.6.3. Evaporación con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color café oscuro, a 250 min., con temperatura constante de 110 °C.

Figura 28. Evaporación – Tiempo 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color café oscuro)



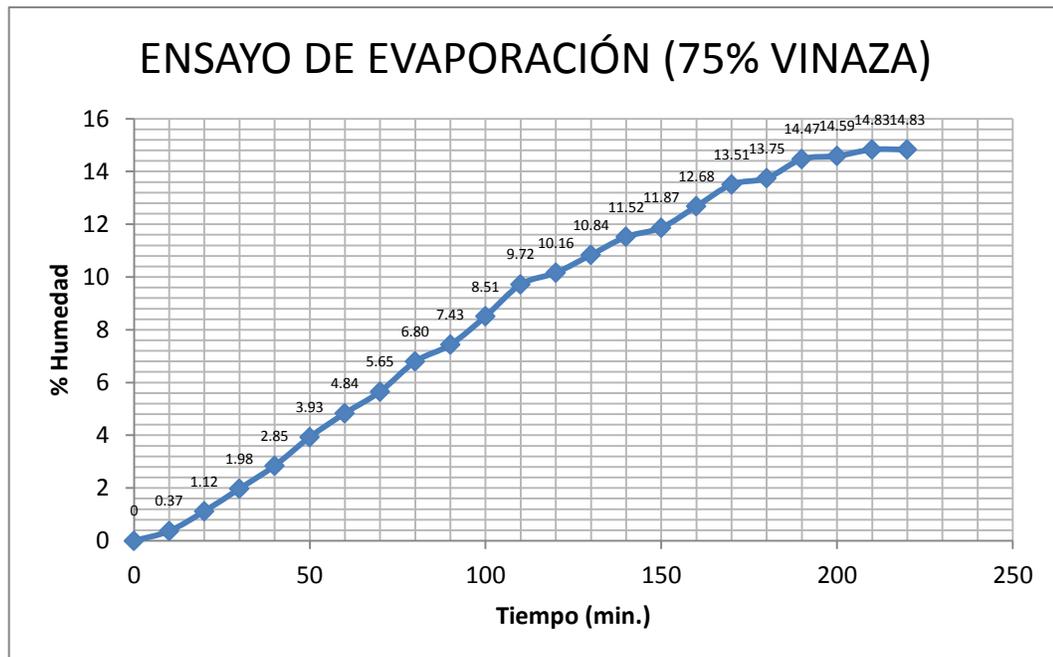
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

La figura 28 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo y empleando 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante cuatro horas. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

### 3.1.1.6.4. Evaporación con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color café oscuro, a 220 min., con temperatura constante de 110 °C.

Figura 29. Evaporación – Tiempo 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color café oscuro)



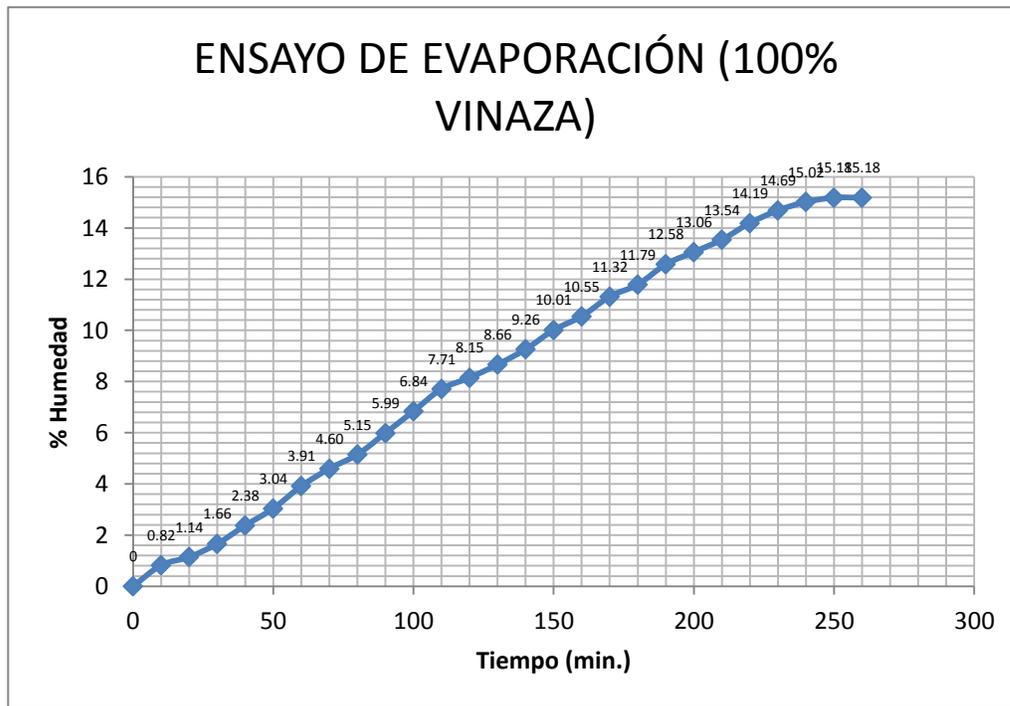
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

La figura 29 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo y empleando 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante tres horas y media. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

### 3.1.1.6.5. Evaporación con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color café oscuro, a 260 min., con temperatura constante de 110 °C.

Figura 30. Evaporación – Tiempo 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color café oscuro)



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

La figura 30 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo y empleando 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante cuatro horas y media. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

### **3.1.2. Arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez**

La arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez se obtuvo del banco de material ubicado en Guatemala, Escuintla, La Democracia, Finca Bugarvilia, pante No. 128, lote 110303, colindando al este con Río Achiguate, coordenadas UTM 14° 07' 29.93"N 90° 54' 25.94"O, a una altitud de 59m sobre el nivel del mar.

#### **3.1.2.1. Granulometría**

El material utilizado para este mejoramiento del suelo contiene los siguientes datos. Este ensayo fue realizado acorde a las normas AASHTO T-27 y AASHTO T-11 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Grava = 00,00%

Arena = 66,72%

Finos = 33,28%

#### **3.1.2.2. Límites de Atterberg**

El material, por ser granular, no presenta límites de Atterberg en ninguno de los porcentajes de vinaza.

#### **3.1.2.3. Proctor modificado**

Este ensayo fue realizado acorde a las normas AASHTO T180-01 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### 3.1.2.3.1. Proctor modificado con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 0% de vinaza – 100% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla XXVIII. Proctor con 0% de vinaza – 100% H<sub>2</sub>O

Proctor con 0% de vinaza – 100% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	4,8	7,1	10,0	14,7
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	104,11	105,02	105,23	104,37

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

- Resultados obtenidos:
  - Humedad óptima: 9,0%
  - Densidad seca máxima: 105,2 lb/pie<sup>3</sup> ≈ 1682,0 kg/m<sup>3</sup>

### 3.1.2.3.2. Proctor modificado con 25% de vinaza – 75% H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 25% de vinaza – 75% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla XXIX. **Proctor con 25% de vinaza – 75% H<sub>2</sub>O**

Proctor con 25% de vinaza – 75% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	5,1	7,0	9,9	12,7
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	105,76	106,34	105,34	100,97

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

- Resultados obtenidos:
  - Humedad óptima: 7,0%
  - Densidad seca máxima: 106,1 lb/pie<sup>3</sup> ≈ 1700,0 kg/m<sup>3</sup>

### 3.1.2.3.3. **Proctor modificado con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 50% de vinaza – 50% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla XXX. **Proctor con 50% de vinaza – 50% H<sub>2</sub>O**

Proctor con 50% de vinaza – 50% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	3,1	6,1	9,2	12,2
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	104,62	106,01	105,97	105,54

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

- Resultados obtenidos:
  - Humedad óptima: 7,0%
  - Densidad seca máxima: 106,1 lb/pie<sup>3</sup> ≈ 1700,0 kg/m<sup>3</sup>

**3.1.2.3.4. Proctor modificado con 75% de vinaza – 25% H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 75% de vinaza – 25% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla XXXI. **Proctor con 75% de vinaza – 25% H<sub>2</sub>O**

Proctor con 75% de vinaza – 25% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	4,0	7,6	11,5	16,1
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	5,55	7,61	8,00	6,55

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

- Resultados obtenidos:
  - Humedad óptima: 7,0%
  - Densidad seca máxima: 107,2 lb/pie<sup>3</sup> ≈ 1717,0 kg/m<sup>3</sup>

### 3.1.2.3.5. Proctor modificado con 100\$ de vinaza – 0% H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 100% de vinaza – 0% H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo Proctor modificado, se comporta de la siguiente manera.

Tabla XXXII. Proctor con 100% de vinaza – 0% H<sub>2</sub>O

Proctor con 100% de vinaza – 0% H <sub>2</sub> O				
%H. promedio	4,0	8,0	12,0	16,0
P.U.S. (lb/pie <sup>3</sup> )	106,35	107,30	107,60	106,64

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

- Resultados obtenidos:
  - Humedad óptima: 10,3%
  - Densidad seca máxima: 107,6 lb/pie<sup>3</sup> ≈ 1724,0 kg/m<sup>3</sup>

### 3.1.2.4. Valor soporte califonia (CBR)

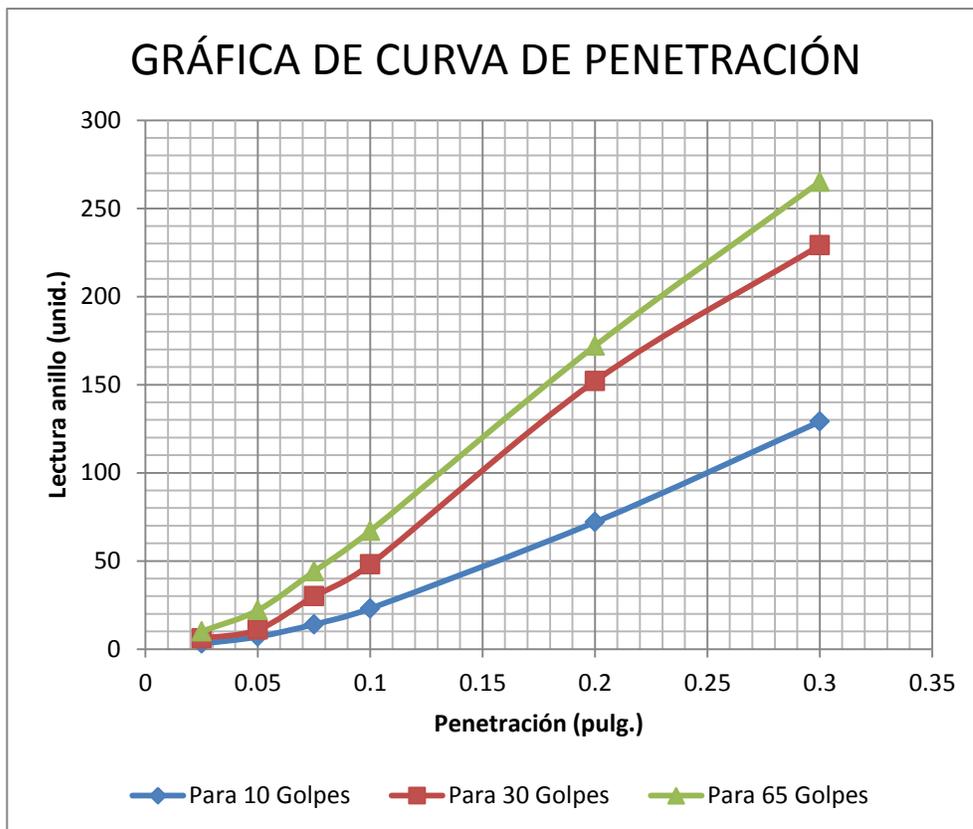
Este ensayo fue realizado acorde a las normas AASHTO T193-99 y ASTM D1883-07 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### 3.1.2.4.1. CBR con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte California, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 9,0%

Figura 31. Penetración – deformación (0% de vinaza – 100% H<sub>2</sub>O)



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

- Resultados obtenidos:

Tabla XXXIII. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	314,30	228,02	114,50
Penetración 0,2 (lb)	791,09	700,28	337,00

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

Tabla XXXIV. **Porcentaje CBR vs. Porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	99,0	93,0	89,0
%CBR	10,5	7,6	3,8

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

### 3.1.2.4.2. **CBR con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte California, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 7,0%
- Resultados obtenidos:

Tabla XXXV. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	609,46	300,68	87,25
Penetración 0,2 (lb)	1463,15	745,68	300,68

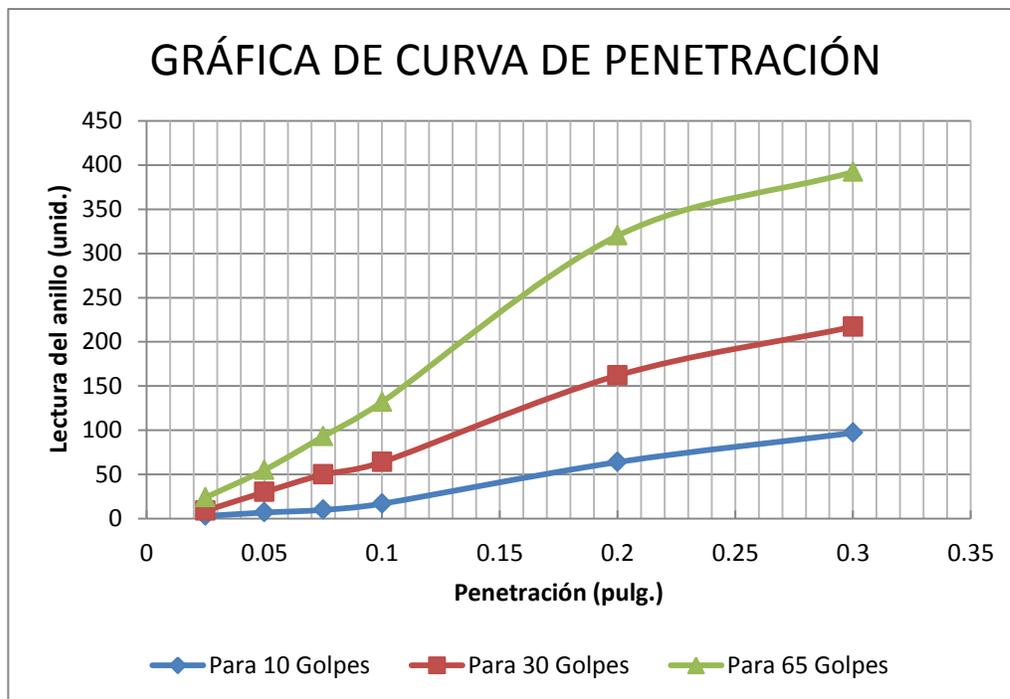
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Tabla XXXVI. **Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	99,02	93,52	91,42
%CBR	20,3	10,0	2,9

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

Figura 32. **Penetración – deformación (25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O)**



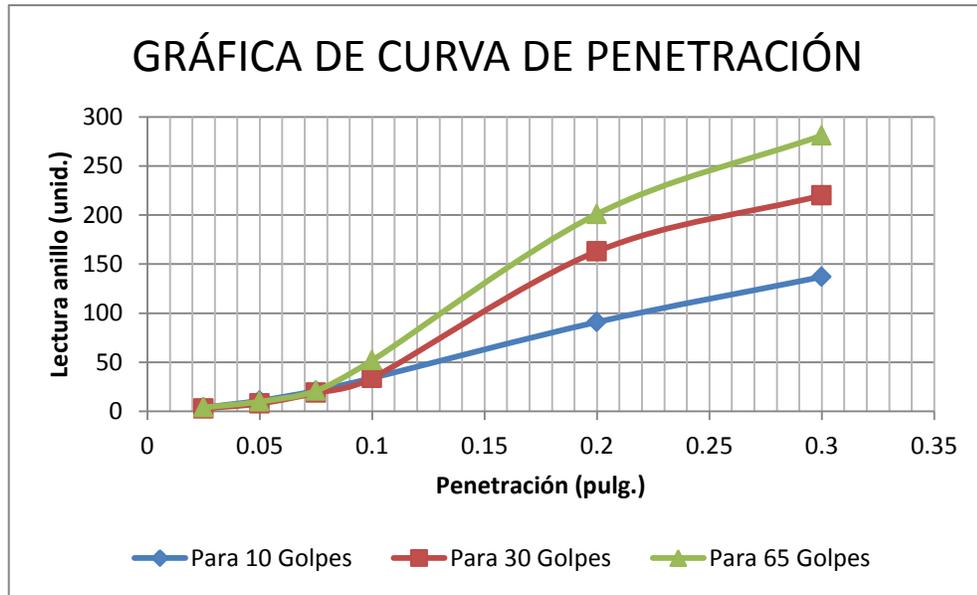
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

### 3.1.2.4.3. CBR con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte California, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 7,0%

Figura 33. **Penetración – deformación (50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O)**



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

- Resultados obtenidos:

Tabla XXXVII. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	246,16	164,45	164,45
Penetración 0,2 (lb)	922,78	750,23	423,28

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

Tabla XXXVIII. **Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	100,00	96,73	94,65
%CBR	20,0	10,9	5,5

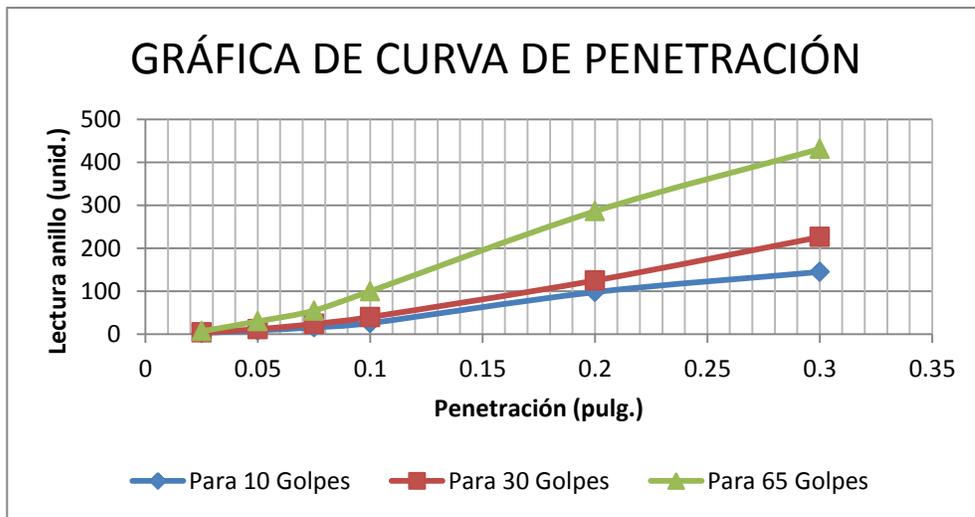
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

### 3.1.2.4.4. CBR con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte California, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 7,0%

Figura 34. Penetración – deformación (75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O)



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

- Resultados obtenidos:

Tabla XXXIX. Resistencia a la penetración

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	464,15	191,69	128,12
Penetración 0,2 (lb)	1308,76	577,67	455,07

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

Tabla XL. **Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	100,00	97,76	96,72
%CBR	27,6	11,7	4,3

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

### 3.1.2.4.5. **CBR con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O**

Una arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O, trabajando bajo los requerimientos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos en el ensayo valor soporte California, se comporta de la siguiente manera.

- Humedad óptima: 10,3%
- Resultados obtenidos:

Tabla XLI. **Resistencia a la penetración**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
Penetración 0,1 (lb)	600,38	168,99	191,69
Penetración 0,2 (lb)	1317,84	654,87	464,15

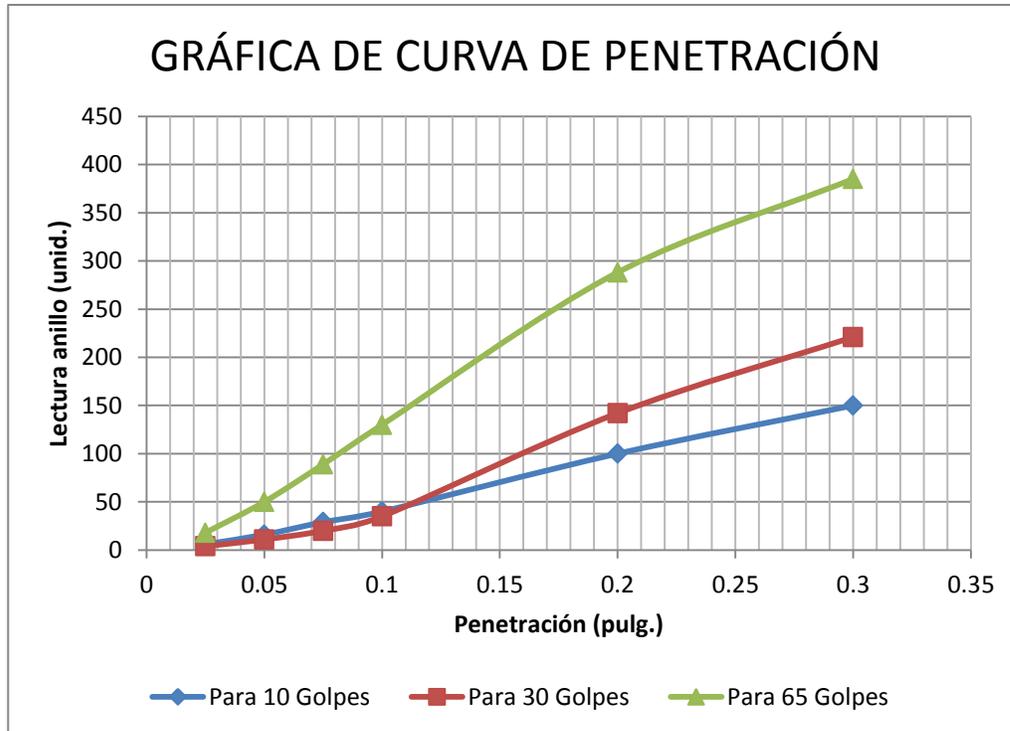
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

Tabla XLII. **Porcentaje CBR vs. porcentaje compactación**

	65 golpes	30 golpes	10 golpes
%Compactación	100,00	97,76	95,18
%CBR	23,0	17,0	6,4

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

Figura 35. **Penetración – deformación (100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O)**



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

Tabla XLIII. **Resistencia al corte a 65 golpes**

Resistencia al corte vs. % de vinaza (65 golpes, arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez)		
% Vinaza	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,1"	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,2"
0%	314,30	791,09
25%	609,46	1463,15
50%	246,16	922,78
75%	464,15	1308,76
100%	600,38	1317,84

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

Tabla XLIV. **Resistencia al corte a 30 golpes**

Resistencia al corte vs. % de vinaza (30 golpes, arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez)		
% Vinaza	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,1"	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,2"
0%	228,02	700,28
25%	300,68	745,68
50%	164,45	750,23
75%	191,69	577,67
100%	168,99	654,87

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

Tabla XLV. **Resistencia al corte a 10 golpes**

Resistencia al corte vs. % de vinaza (10 golpes, arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez)		
% Vinaza	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,1"	Resistencia a corte (lb) Penetración 0,2"
0%	114,50	337,00
25%	87,25	300,68
50%	164,45	423,28
75%	128,12	455,07
100 %	191,69	464,15

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

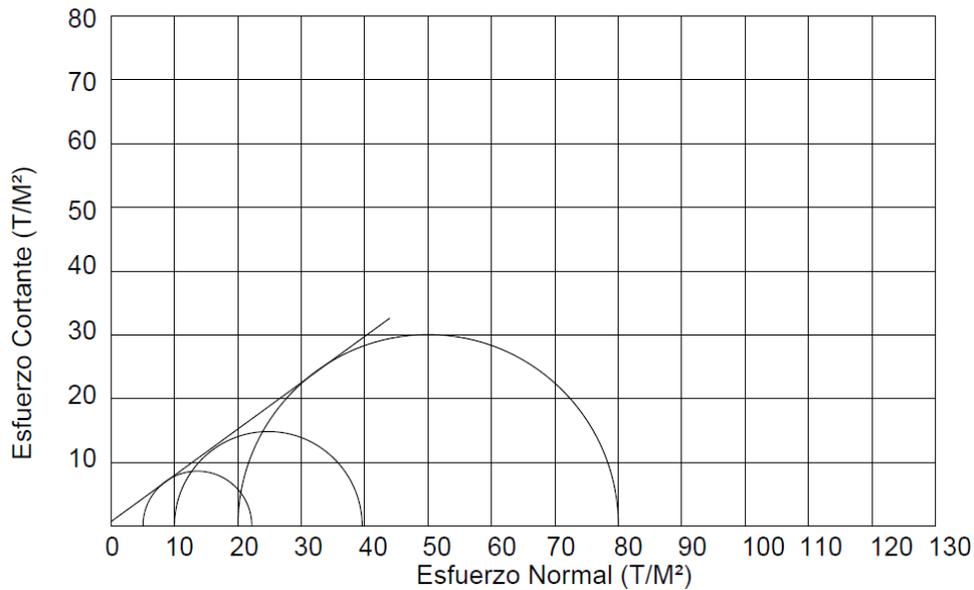
### 3.1.2.5. **Ensayo triaxial**

Este ensayo fue realizado acorde a las normas AASHTO T1296-05 requeridas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### 3.1.2.5.1. Triaxial con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O.

Figura 36. **Círculos de Mohr para triaxial con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O**



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

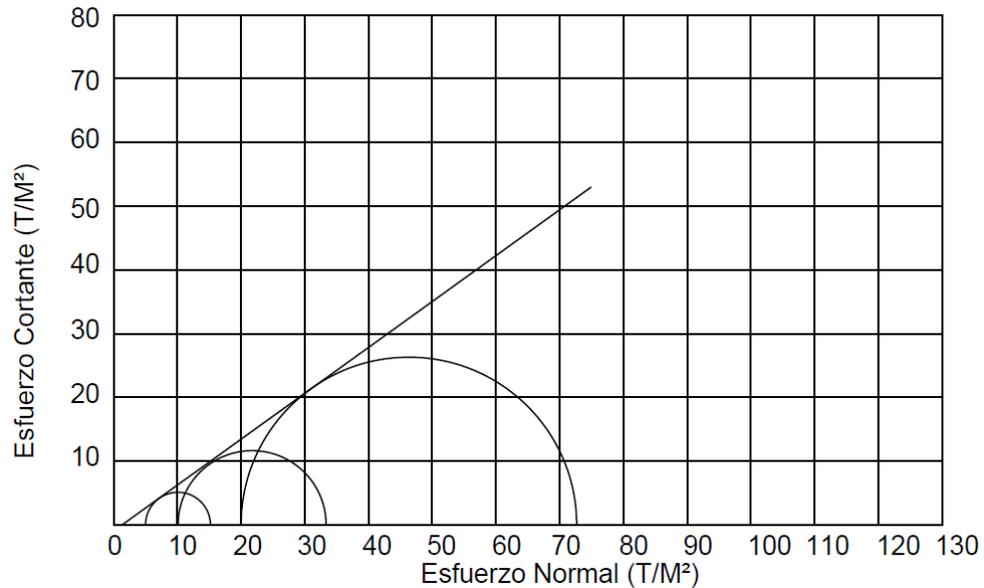
- Ángulo de fricción interna: 35,96°
- Cohesión: 0,72 t/m<sup>2</sup>

La figura 36 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

### 3.1.2.5.2. Triaxial con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O.

Figura 37. Círculos de Mohr para triaxial con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O



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

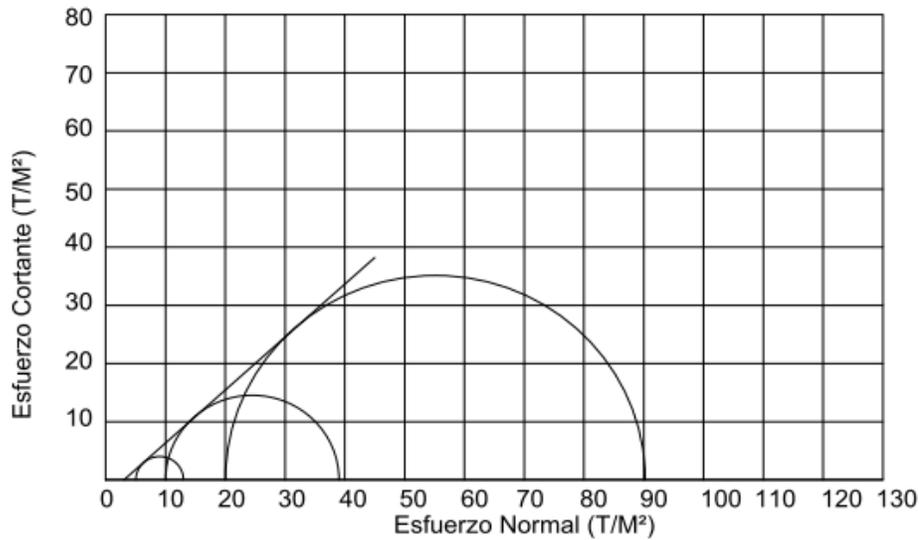
- Ángulo de fricción interna: 35,74°
- Cohesión: 0,00 t/m<sup>2</sup>

La figura 37 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

### 3.1.2.5.3. Triaxial con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O.

Figura 38. **Círculos de Mohr para triaxial con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O**



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

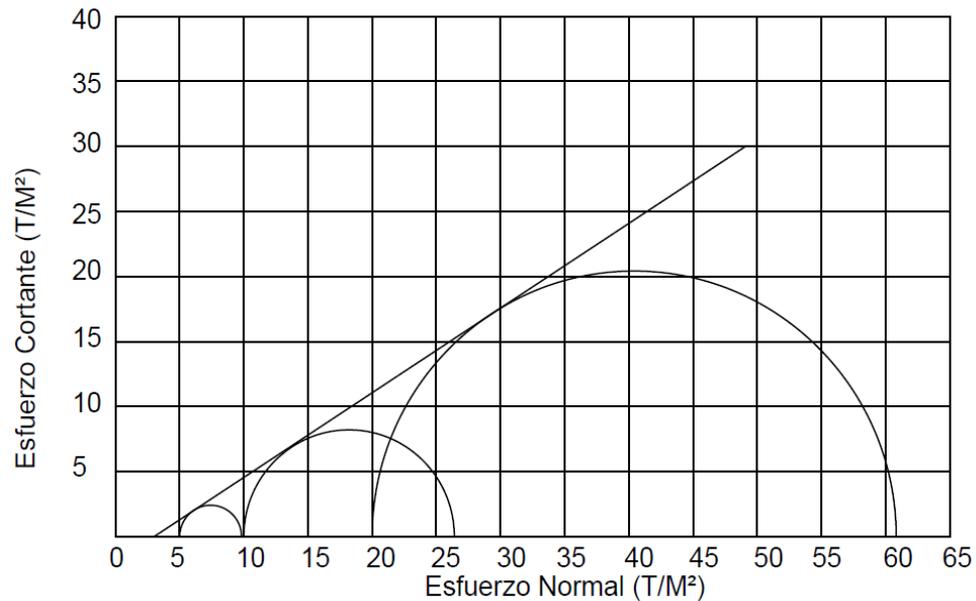
- Ángulo de fricción interna: 42,35°
- Cohesión: 0,00 t/m<sup>2</sup>

La figura 38 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

### 3.1.2.5.4. Triaxial con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O.

Figura 39. **Círculos de Mohr para triaxial con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O**



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

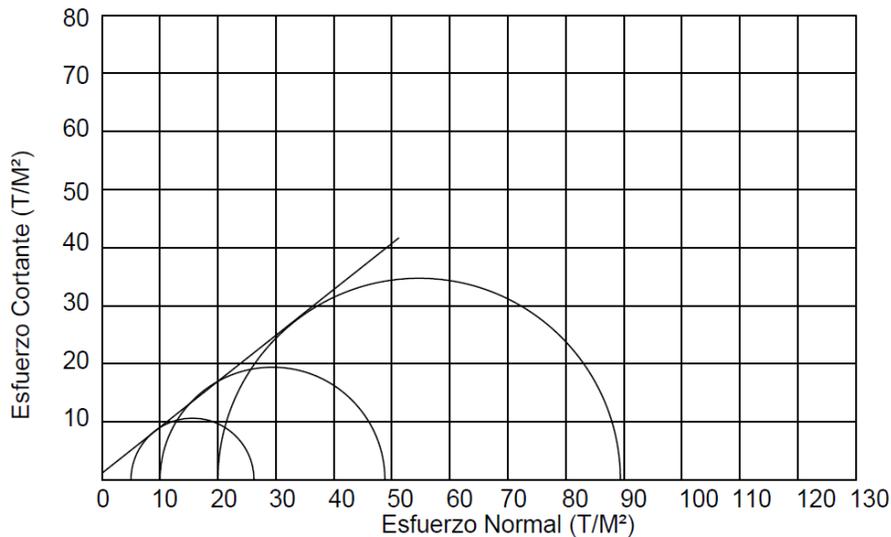
- Ángulo de fricción interna: 33,06°
- Cohesión: 0,00 t/m<sup>2</sup>

La figura 39 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

### 3.1.2.5.5. Triaxial con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O

Ensayo triaxial con probeta remoldeada de arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez, empleando al densidad seca máxima obtenida en proctor con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O.

Figura 40. **Círculos de Mohr para triaxial con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O**



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

- Ángulo de fricción interna: 38,37°
- Cohesión: 1,15 t/m<sup>2</sup>

La figura 40 muestra los círculos de Mohr para las presiones de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas sobre metro cuadrado, obtenidos del ensayo triaxial no consolidado – no drenado.

Tabla XLVI. **Ángulo de fricción interna y cohesión**

% vinaza	Ángulo de fricción interna	Cohesión (t/m <sup>2</sup> )
0%	35,96°	0,72
25%	35,74°	0,00
50%	42,35°	0,00
75%	33,06°	0,00
100%	38,37°	1,15

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

### **3.1.2.6. Pérdida de humedad (evaporación)**

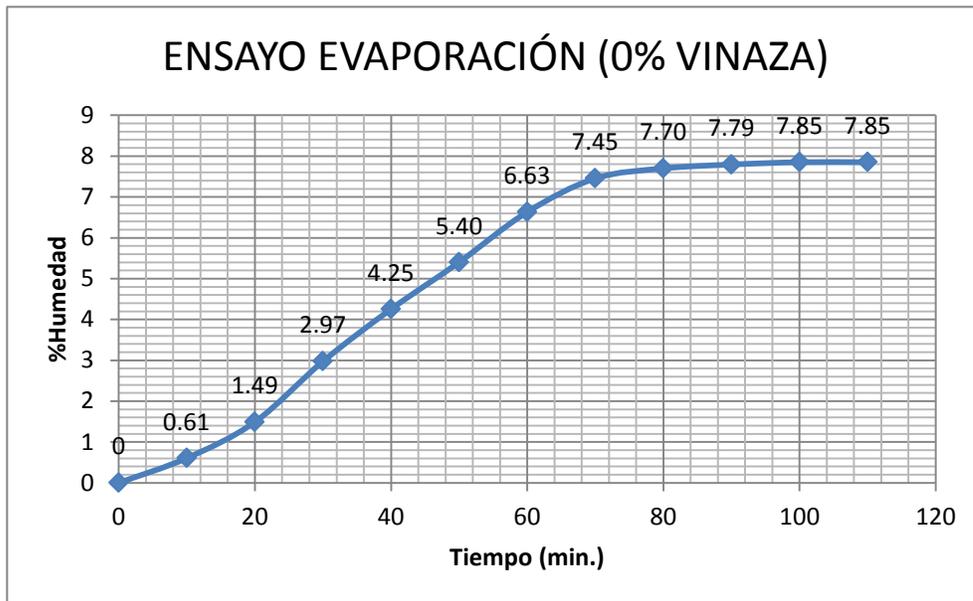
Este ensayo no fue realizado bajo norma, por lo que nos apegamos a los parámetros de pérdida de humedad que relaciona el peso del material húmedo con el peso del material seco, para determinar el la cantidad de líquido evaporado.

#### **3.1.2.6.1. Evaporación con 0% de vinaza – 100% H<sub>2</sub>O**

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez, a 120 min., con temperatura constante de 110 °C.

La figura 41 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo empleando 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante dos horas. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

Figura 41. **Evaporación – Tiempo 0% de vinaza – 100% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez)**



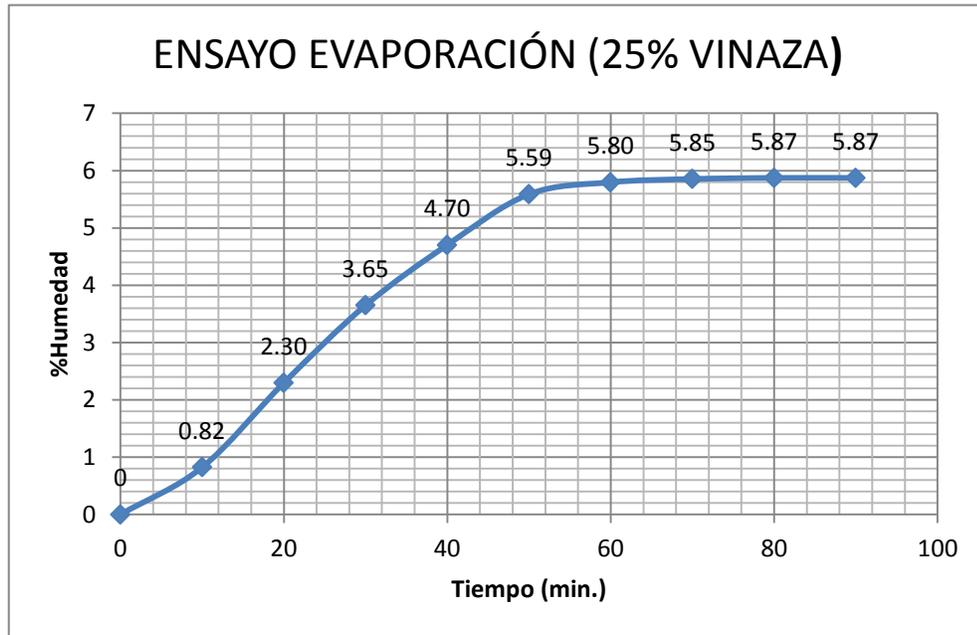
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

### 3.1.2.6.2. **Evaporación con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O**

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez, a 90 min., con temperatura constante de 110 °C.

La figura 42 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo y empleando 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante una hora treinta minutos. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

Figura 42. **Evaporación – Tiempo 25% de vinaza – 75% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez)**



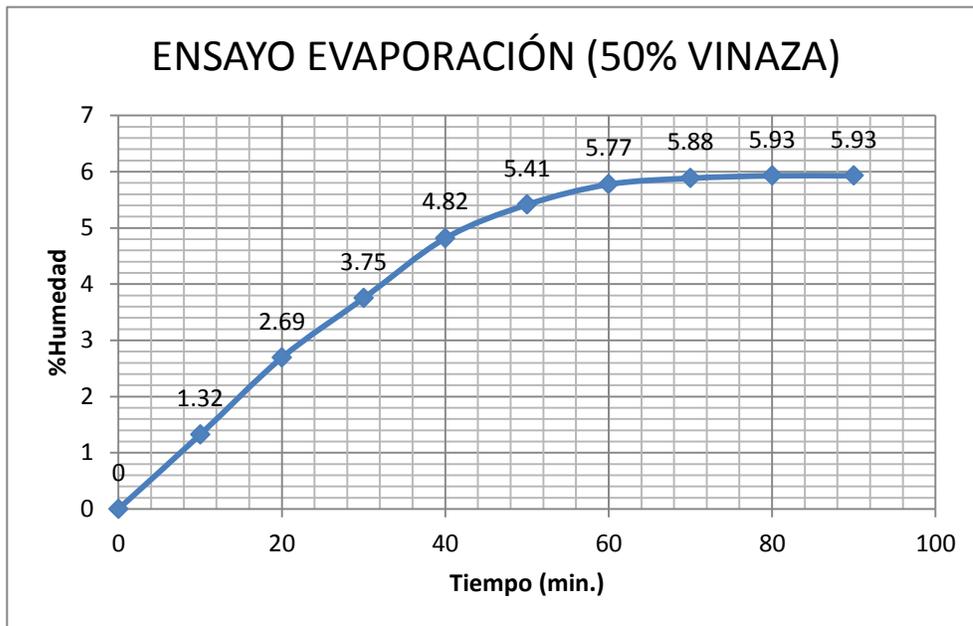
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

### 3.1.2.6.3. **Evaporación con 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O**

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 50% de vinaza - 50% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez, a 90 min., con temperatura constante de 110 °C.

La figura 43 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo y empleando 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante una hora treinta minutos. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

Figura 43. **Evaporación – Tiempo 50% de vinaza – 50% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez)**



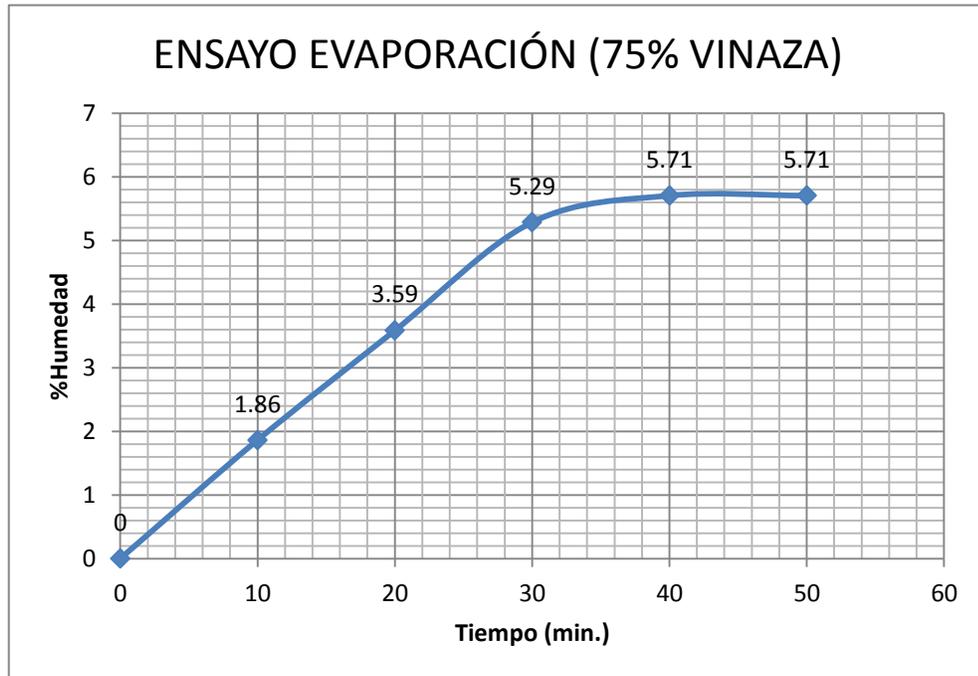
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

#### 3.1.2.6.4. **Evaporación con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O**

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez, a 60 min., con temperatura constante de 110 °C.

La figura 44 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo y empleando 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante una hora. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

Figura 44. **Evaporación – Tiempo 75% de vinaza – 25% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez)**



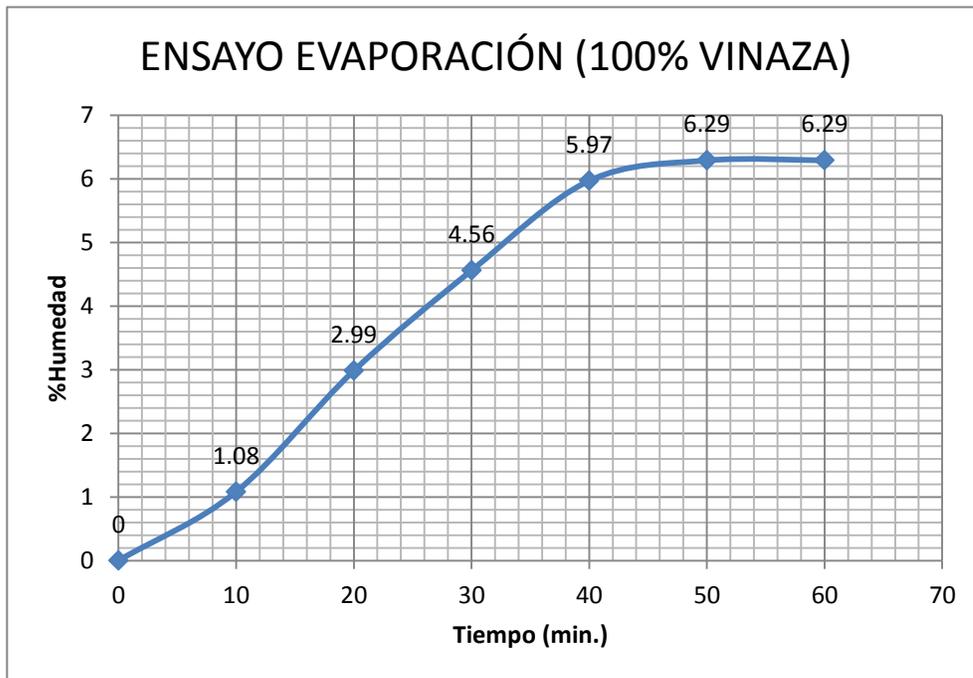
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC

### 3.1.2.6.5. **Evaporación con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O**

Pérdida de humedad en ensayo de evaporación con 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O para el material arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez, a 60 min., con temperatura constante de 110 °C.

La figura 45 muestra los resultados obtenidos de pérdida de la humedad en el suelo, al transcurrir el tiempo y empleando 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O. La muestra de suelo estuvo en el horno a una temperatura constante durante una hora. Se tomaron lecturas de pérdida de humedad a cada 10 minutos.

Figura 45. **Evaporación – Tiempo 100% de vinaza – 0% de H<sub>2</sub>O (arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez)**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC

### 3.2. Interpretación de resultados

A diferencia de los resultados de laboratorio, la interpretación de los mismos es cuestionable y está sujeta al criterio de cada lector, por lo que no se deben tomar como verdades absolutas.

#### 3.2.1. Arena limosa color café oscuro

La arena limosa color café oscuro se obtuvo del banco de material ubicado en Guatemala, Escuintla, La Democracia, Finca Santa Rita, pante 1<sup>a</sup>, lote 120143, colindando al norte con Finca San Patricio, coordenadas UTM 14° 06' 59.92"N 90° 57' 53.82"O, a una altitud de 57m sobre el nivel del mar.

### 3.2.1.1. Proctor modificado

La tabla XLVII muestra la variación en la humedad óptima y la densidad seca máxima con diferentes porcentajes de vinaza. La variación máxima de humedad óptima del suelo adicionado con vinaza está entre el 75% y 100% respecto del que no se le adicionó vinaza. La variación máxima de la densidad seca máxima del suelo adicionado con vinaza está en el 50% del que no se le adicionó vinaza.

Tabla XLVII. **Densidad seca máxima y humedad óptima con adición de vinaza**

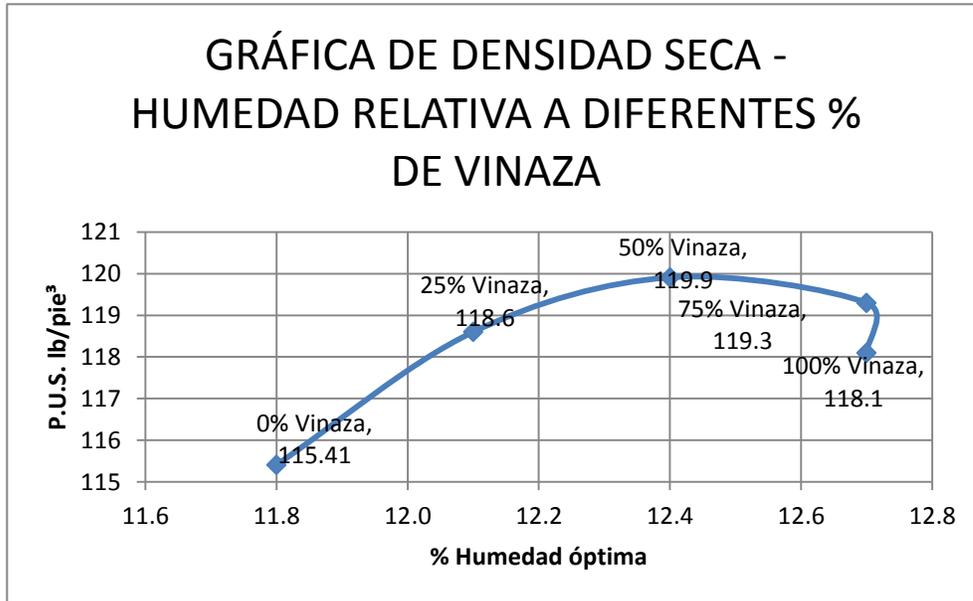
Vinaza (%)	Humedad óptima (%)	Variación de la humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (lb/pie <sup>3</sup> )	Variación de la densidad seca máxima (%)
0%	11,8	0,00	115,4	0,00
25%	12,1	2,50	118,6	2,70
50%	12,4	4,84	119,9	3,75
75%	12,7	7,09	119,3	3,27
100%	12,7	7,09	118,1	2,29

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC

En la figura 46 se muestra la curva de peso volumétrico máximo y humedad óptima obtenida con diferentes porcentajes de vinaza para el material arena limosa color café oscuro.

Al aumentar el porcentaje de vinaza aumenta la Densidad Seca Máxima y se reduce la Humedad Óptima de compactación, solamente cuando se llega al 50% después de este punto decrece abruptamente.

Figura 46. **Comparación en porcentaje de vinaza para Proctor**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC

La tabla XLVIII muestra un resumen de la variación de la densidad seca máxima que tiene el suelo compactado con el aumento de vinaza.

Tabla XLVIII. **Densidad seca máxima - porcentaje de vinaza**

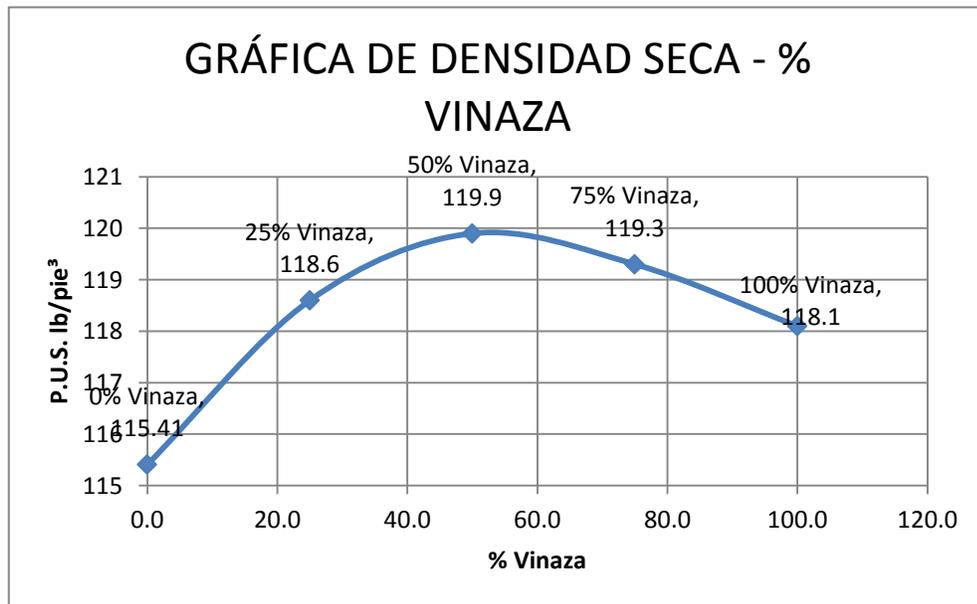
Vinaza (%)	Densidad seca máxima lb/pie³
0.0	115,4
25,0	118,6
50,0	119,9
75,0	119,3
100,0	118,1

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

La gráfica 47 muestra que al aumentar el porcentaje de vinaza en el suelo, se aumenta la densidad seca máxima en el ensayo Proctor modificado,

parabólicamente; teniendo su punto máximo aproximadamente en el 50% vinaza.

Figura 47. **Comparación de densidad seca máxima - porcentaje de vinaza**



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

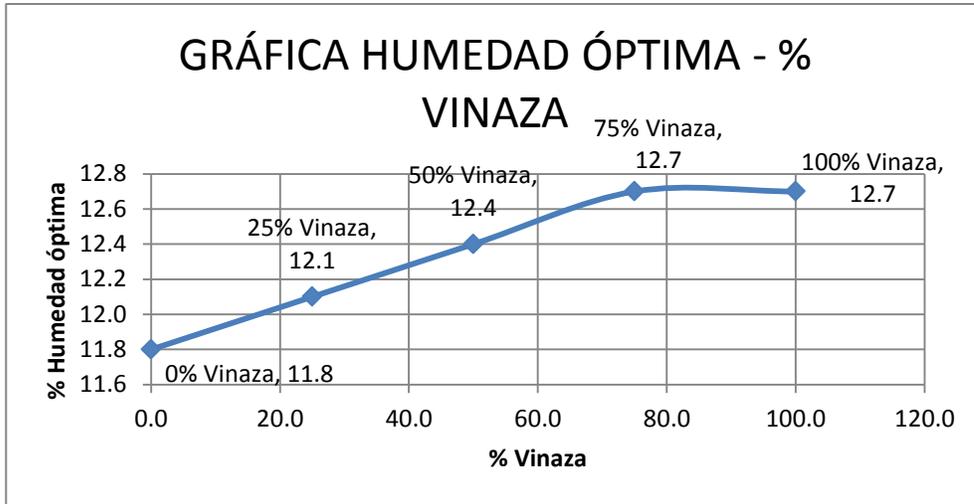
Tabla XLIX. **Humedad óptima - porcentaje de vinaza**

Vinaza (%)	Humedad óptima (%)
0,0	11,8
25,0	12,1
50,0	12,4
75,0	12,7
100,0	12,7

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

La tabla XLIX hace un comparativo de entre la variación del porcentaje de la humedad óptima respecto del porcentaje de vinaza aplicada al suelo compactado.

Figura 48. **Comportamiento de humedad óptima - porcentaje de vinaza**



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

La figura 48 muestra que al variar el porcentaje de vinaza aplicada a la muestra de suelo, la humedad óptima necesaria para obtener una densidad seca máxima en el ensayo Proctor, se incrementa prácticamente de forma lineal hasta llegar a un 75% donde se estabiliza la tendencia.

### 3.2.1.2. Valor soporte califonia (CBR)

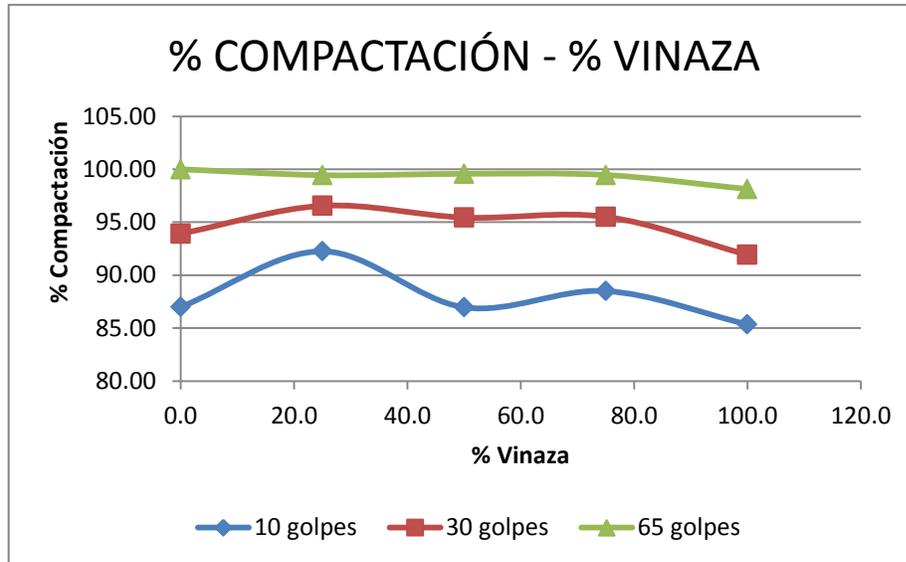
La tabla L muestra un comparativo de la variación de la compactación del suelo en el ensayo de CBR con respecto al aumento del porcentaje de vinaza.

Tabla L. **Porcentaje de compactación - porcentaje de vinaza**

Vinaza (%)	10 golpes	30 golpes	65 golpes
0,0	87,00	93,92	100,00
25,0	92,25	96,55	99,44
50,0	86,96	95,44	99,57
75,0	88,50	95,51	99,46
100,0	85,35	91,92	98,13

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

Figura 49. Incidencia de la vinaza en la compactación



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

La figura 49 muestra que la tendencia general de la gráfica es que al aumentar el porcentaje de vinaza en el suelo éste decremanta su compactación; sin embargo no es un cambio significativo; pero en el intervalo del 0% al 25% aumenta su porcentaje de compactación.

El ensayo compactado con 10 golpes presenta una mayor variación y muestra su punto más alto al 25% de vinaza aplicada y su punto más bajo en 100% de vinaza aplicada, mostrando una gráfica en forma de serpenteo. El ensayo compactado con 30 golpes mantiene la misma tendencia del serpenteo; sin embargo, en este caso se atenúa significativamente y muestra su punto más alto al 25% de vinaza aplicada y su punto más bajo en 100% de vinaza aplicada. El ensayo compactado con 65 golpes se puede decir que prácticamente no varía dando como resultado una línea casi recta, sin embargo su punto más bajo lo alcanza en un 100% de vinaza aplicada.

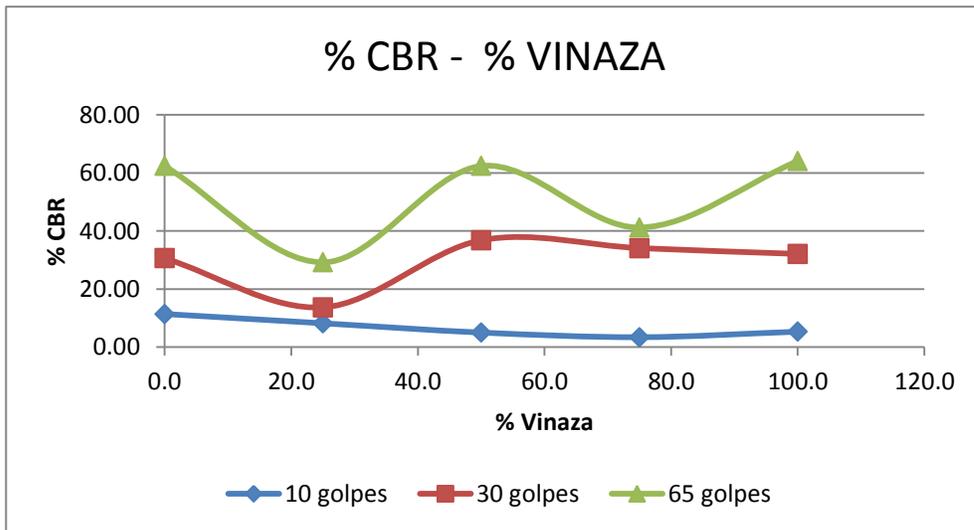
Tabla LI. **Porcentaje CBR – porcentaje de vinaza**

Vinaza (%)	10 golpes	30 golpes	65 golpes
0,0	11,40	30,60	62,40
25,0	8,20	13,70	29,20
50,0	5,00	36,80	62,40
75,0	3,40	34,10	41,20
100,0	5,30	32,10	64,10

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC

La tabla LI muestra un comparativo de la variación en el Porcentaje CBR con respecto al aumento del porcentaje de vinaza.

Figura 50. **Incidencia de la vinaza en el Porcentaje CBR**



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

La figura 50 muestra que, en términos generales, la gráfica indica que el porcentaje de vinaza incide significativamente en el aumento y en la

disminución del CBR en la muestra de suelo, dando como resultados altibajos bruscos al variar la vinaza aplicada de 0% a 100%. Dichos altibajos son más marcados a medida que el número de golpes para realizar la compactación aumentan.

En el ensayo compactado a 10 golpes la muestra de suelo prácticamente se mantiene estable presentando un leve decremento. En el ensayo compactado a 30 golpes el porcentaje de compactación muestra una tendencia a disminuir en el intervalo de 0 a 25%, sin embargo a partir del 25% aumenta y el resultado final es ligeramente superior al del 0% de vinaza aplicada. En el ensayo compactado a 65 golpes la gráfica muestra un serpenteo muy marcado tendiendo sus puntos valle en 25% y 75% de vinaza aplicada; y sus puntos pico en el 0%, 50% y 100% de aplicación de la vinaza. Los puntos pico tienden a ser muy semejantes mientras que los puntos valle no lo son tanto.

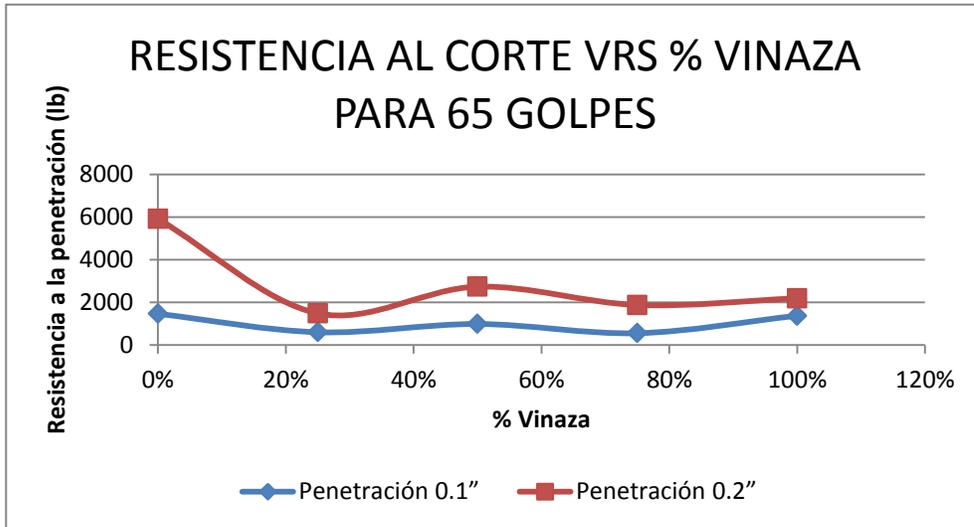
Tabla LII. **Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (65 golpes)**

% vinaza	Resistencia (lb) Penetración 0,1"	Resistencia (lb) Penetración 0,2"
0%	1463,15	5916,22
25%	600,38	1485,85
50%	986,35	2734,6
75%	554,97	1876,37
100%	1372,33	2189,69

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

La tabla LII muestra la variación en la resistencia al corte en lb con el aumento en el porcentaje de vinaza en el ensayo de CBR a 65.

Figura 51. **Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (65 golpes)**



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

La resistencia al corte en el ensayo de penetración a 0,1" y 0,2" en una probeta compactada a 65 golpes no es uniforme, sin embargo la tendencia general es a disminuir. Después de adicionar cualquier porcentaje de vinaza, el suelo se comporta similarmente en relación a la resistencia a la penetración.

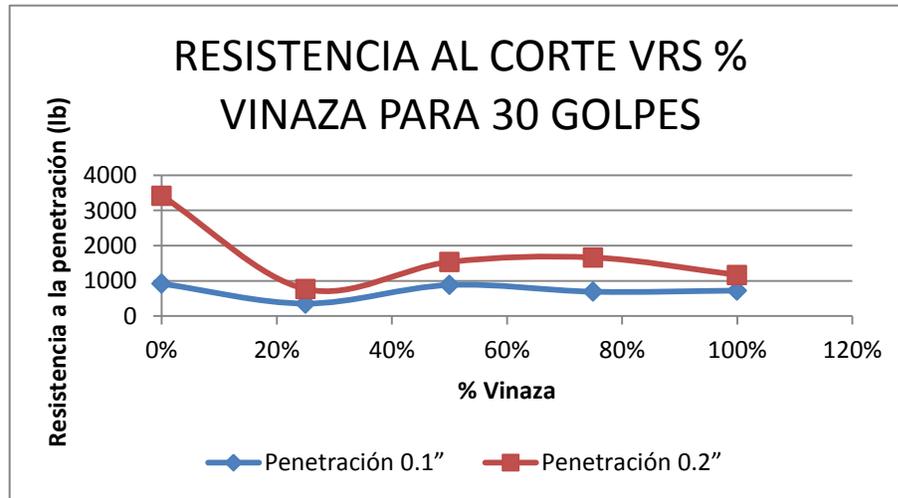
Tabla LIII. **Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (30 golpes)**

% vinaza	Resistencia (lb) Penetración 0,1"	Resistencia (lb) Penetración 0,2"
0%	918,24	3418,72
25%	355,17	768,39
50%	881,91	1535,8
75%	691,19	1662,95
100%	722,98	1167,99

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

La tabla LIII muestra la variación en la resistencia al corte en lb con el aumento en el porcentaje de vinaza en el ensayo de CBR a 30.

Figura 52. **Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (30 golpes)**



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

La resistencia al corte en el ensayo de penetración a 0,1" y 0,2" en una probeta compactada a 30 golpes no es uniforme, sin embargo la tendencia general es a disminuir.

Se puede decir que después de adicionar cualquier porcentaje de vinaza, el suelo se comporta prácticamente igual en relación a la resistencia a la penetración; sin embargo se ve una ligera recuperación del suelo a partir de la adición del 25% de vinaza.

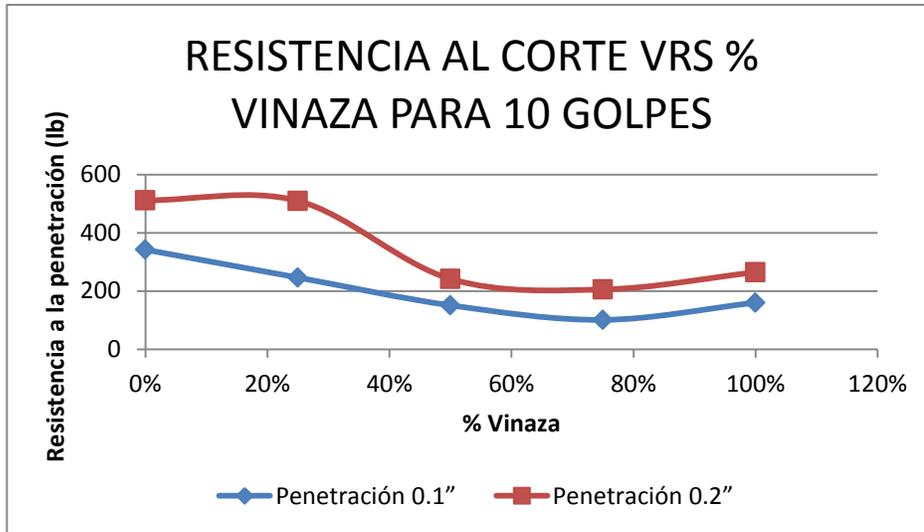
Tabla LIV. **Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (10 golpes)**

% vinaza	Resistencia (lb) Penetración 0,1"	Resistencia (lb) Penetración 0,2"
0%	341,81	511,64
25%	246,19	509,56
50%	150,83	241,64
75%	100,88	205,32
100%	159,91	264,35

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

La tabla LIV muestra la variación en la resistencia al corte en lb con el aumento en el porcentaje de vinaza en el ensayo de CBR a 10.

Figura 53. **Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (10 golpes)**



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

La resistencia al corte en el ensayo de penetración a 0,1" y 0,2" en una probeta compactada a 10 golpes no es uniforme, sin embargo la tendencia general es a disminuir.

Se puede decir que después de adicionar cualquier porcentaje de vinaza, el suelo se comporta prácticamente igual en relación a la resistencia a la penetración; sin embargo se ve una ligera recuperación del suelo a partir de la adición del 75% de vinaza.

### 3.2.1.3. Triaxial

La tabla LV muestra la variación en el ángulo de fricción interna con el aumento en el porcentaje de vinaza.

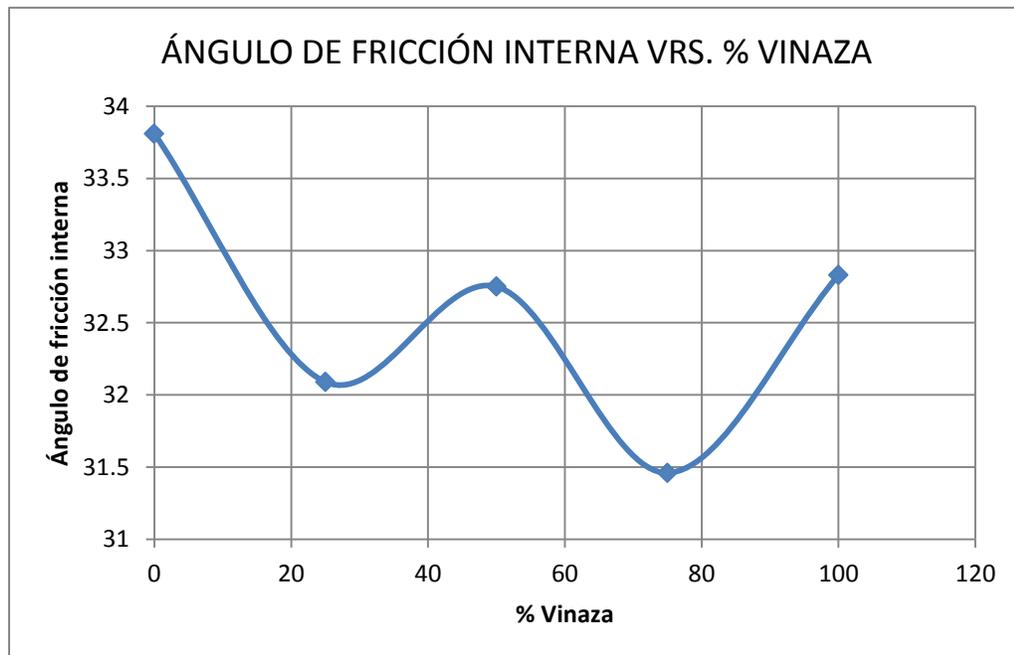
Tabla LV. **Porcentaje de vinaza - ángulo de fricción interna**

% vinaza	Ángulo de fricción interna
0%	33,81°
25%	32,09°
50%	32,75°
75%	31,46°
100%	32,83°

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

La figura 54 muestra que aplicando 0%, 50% y 100% de vinaza se obtienen los mejores aumentos del ángulo de fricción interna (ángulo de fricción entre partículas), mientras que aplicándolo al 25% y el 75% de vinaza el ángulo de fricción interna se reduce considerablemente.

Figura 54. **Incidencia de la vinaza en el ángulo de fricción interna**



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

La tabla LVI muestra la variación de la cohesión con el aumento en el porcentaje de vinaza.

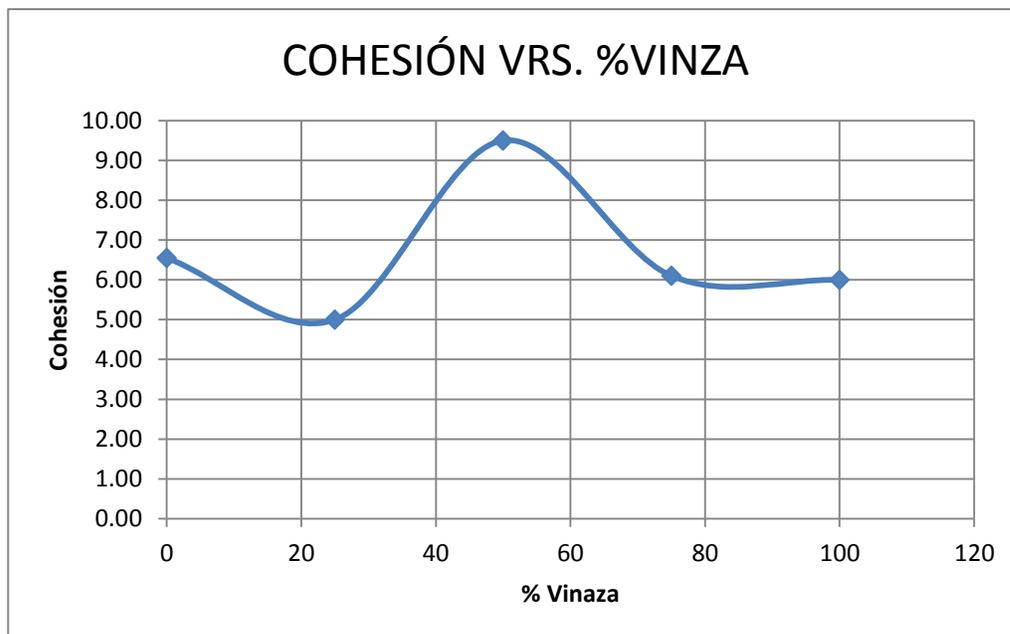
Tabla LVI. **Porcentaje de vinaza – cohesión**

% vinaza	Cohesión (t/m <sup>2</sup> )
0%	6,55
25%	5,00
50%	9,50
75%	6,10
100%	6,00

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

La figura 55 muestra que la vinaza hace decrecer la cohesión en el suelo cuando varía de 0% a 25%, y de 50% a 100% de aplicación de vinaza, sin embargo su punto pico es al adicionar 50% de vinaza a la muestra de suelo.

Figura 55. **Incidencia de la vinaza en la cohesión**



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

### 3.2.1.4. Pérdida de humedad (evaporación)

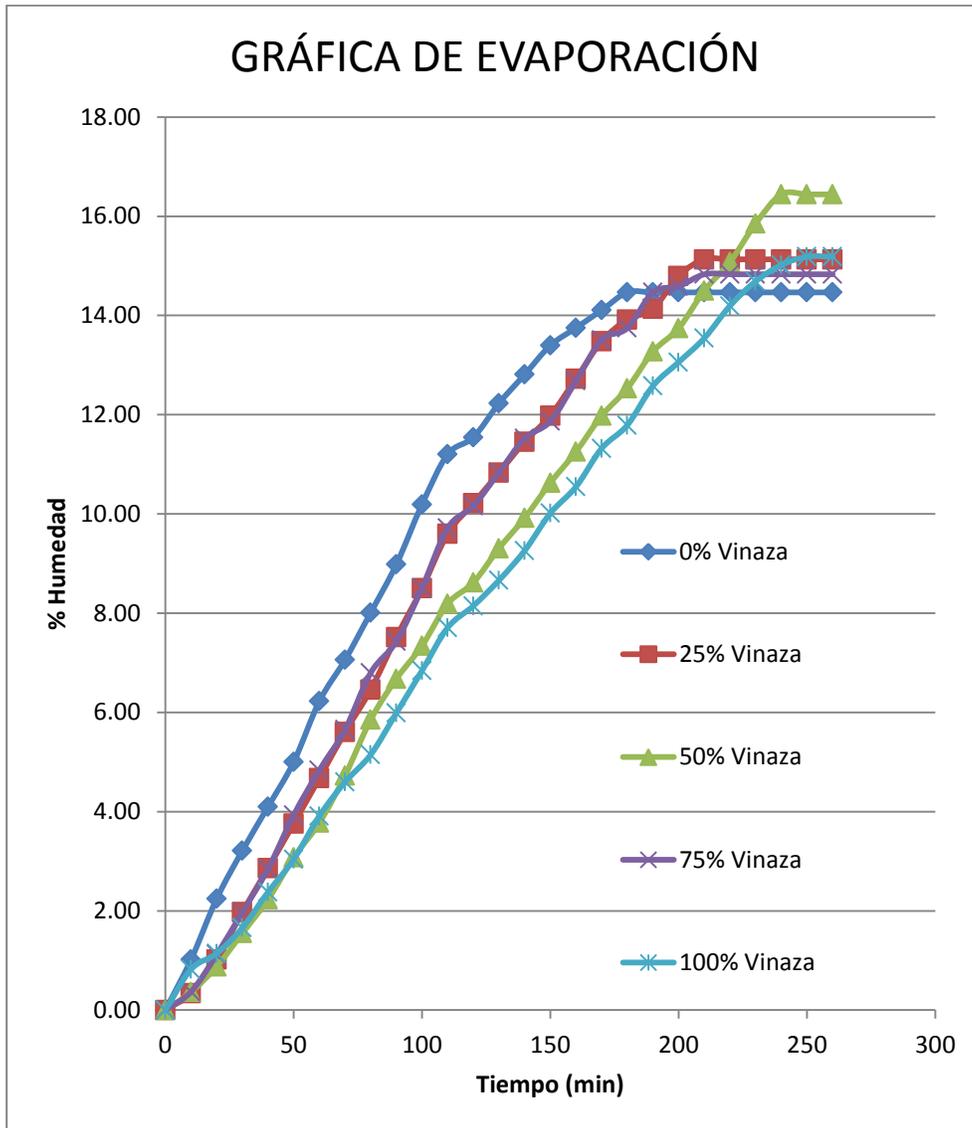
La tabla LVII muestra la variación en la pérdida de humedad que tiene el material a intervalos de tiempo de 10 minutos, con diferentes porcentajes de vinaza.

Tabla LVII. Evaporación – Tiempo

Tiempo (min)	0% Vinaza	25% Vinaza	50% Vinaza	75% Vinaza	100% Vinaza
	H%	H%	H%	H%	H%
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,02	0,34	0,37	0,37	0,82
20	2,25	1,02	0,88	1,12	1,14
30	3,21	1,98	1,55	1,98	1,66
40	4,10	2,86	2,23	2,85	2,38
50	5,00	3,76	3,08	3,93	3,04
60	6,23	4,67	3,78	4,84	3,91
70	7,06	5,60	4,73	5,65	4,60
80	8,01	6,46	5,86	6,80	5,15
90	8,98	7,52	6,68	7,43	5,99
100	10,19	8,50	7,34	8,51	6,84
110	11,20	9,60	8,19	9,72	7,71
120	11,54	10,21	8,62	10,16	8,15
130	12,23	10,83	9,31	10,84	8,66
140	12,81	11,46	9,92	11,52	9,26
150	13,40	11,98	10,63	11,87	10,01
160	13,75	12,73	11,26	12,68	10,55
170	14,11	13,48	11,98	13,51	11,32
180	14,47	13,92	12,53	13,75	11,79
190	14,47	14,13	13,27	14,47	12,58
200	14,47	14,80	13,74	14,59	13,06
210	14,47	15,13	14,50	14,83	13,54
220	14,47	15,13	15,08	14,83	14,19
230	14,47	15,13	15,85	14,83	14,69
240	14,47	15,13	16,44	14,83	15,02
250	14,47	15,13	16,44	14,83	15,18
260	14,47	15,13	16,44	14,83	15,18

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

Figura 56. Evaporación – Tiempo



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

La figura 55 muestra que la vinaza no afecta de forma lineal la tasa de evaporación de la humedad en la muestra de suelo.

Entre los 150 y 250 minutos la vinaza forma una especie de capa protectora, aglomerando las partículas de limo, la cual evita que la humedad se pierda con facilidad, es por ello que a partir de los 150 minutos la tasa de evaporación en los suelos que tiene vinaza disminuye considerablemente respecto de la que solamente se le adicionó agua.

Es importante recordar que en campo lo que se busca es reducir la tasa de evaporación de la humedad óptima, ya que con esta se logra la mayor densificación de los suelos y con esto se evita el descascaramiento en la superficie de la subrasante.

### **3.2.2. Arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez**

La arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez se obtuvo del banco de material ubicado en Guatemala, Escuintla, La Democracia, Finca Baganvilia, pante No. 128, lote 110303, colindando al este con Río Achiguate, coordenadas UTM 14° 07' 29.93"N 90° 54' 25.94"O, a una altitud de 59m sobre el nivel del mar.

#### **3.2.2.1. Proctor modificado**

La tabla LVIII muestra la variación en la humedad óptima y la densidad seca máxima con diferentes porcentajes de vinaza. La variación máxima de humedad óptima del suelo adicionado con vinaza está entre el 25% y 75% respecto del que no se le adicionó vinaza. La variación máxima de la densidad seca máxima del suelo adicionado con vinaza está en el 100% del que no se le adicionó vinaza.

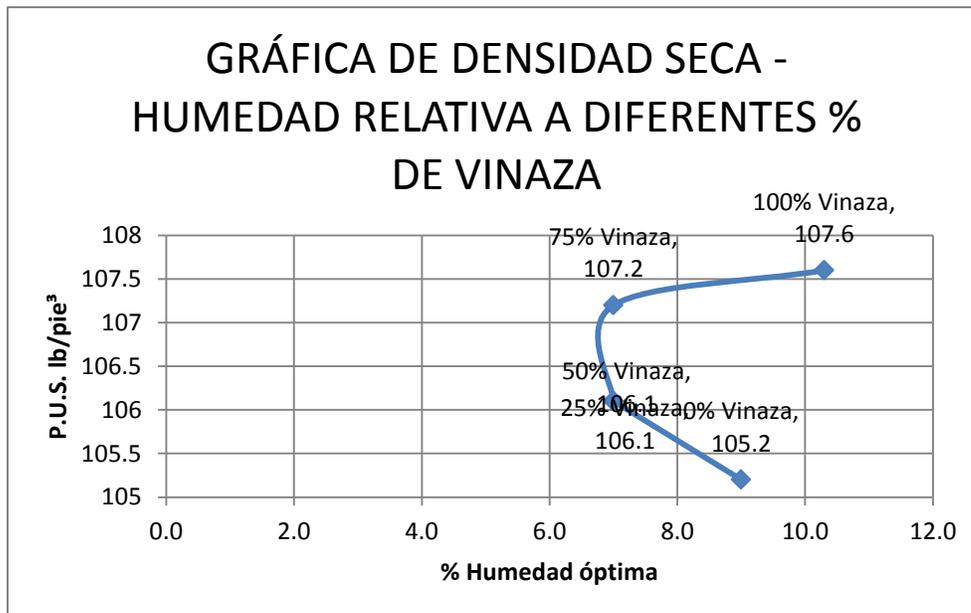
Tabla LVIII. **Densidad seca máxima y humedad óptima con adición de vinaza**

Vinaza (%)	Humedad óptima (%)	Variación de la humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (lb/pie <sup>3</sup> )	Variación de la densidad seca máxima (%)
0%	9,0	0,00	105,2	0,00
25%	7,0	-28,57	106,1	0,85
50%	7,0	-28,57	106,1	0,85
75%	7,0	-28,57	107,2	1,87
100%	10,3	12,62	107,6	2,23

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

En la figura 57 se muestra la curva de peso volumétrico máximo y humedad óptima obtenida con diferentes porcentajes de vinaza para el material arena limosa color gris con partículas de grava tipo pómez.

Figura 57. **Comparación en porcentaje de vinaza para Proctor**



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

Al aumentar el porcentaje de vinaza, el comportamiento del material varía. Cuando se aumenta el contenido de vinaza en la muestra de suelo, aumenta la densidad seca máxima; sin embargo la humedad óptima de compactación varía formando una parábola abierta hacia al eje positivo de las abscisas, localizándose la humedad óptima más baja entre el 25% y el 75% vinaza.

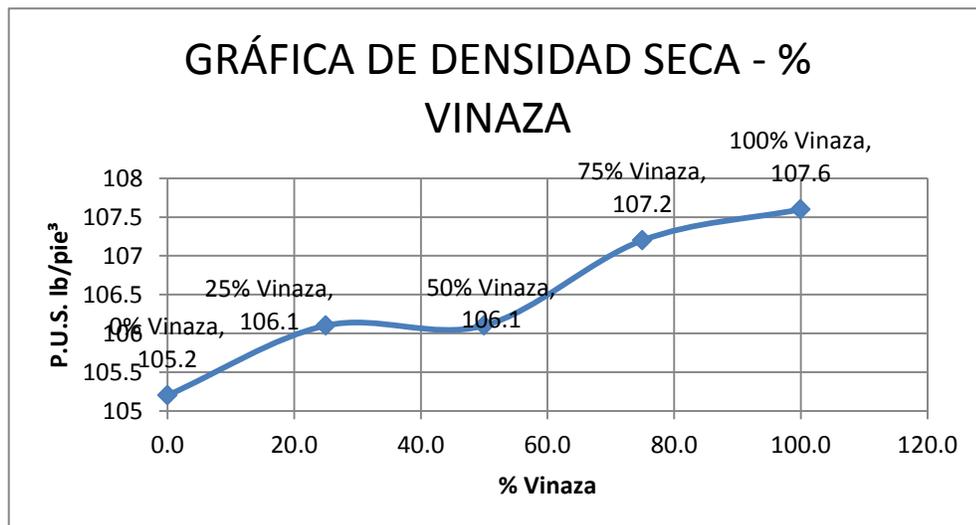
Tabla LIX. **Densidad seca máxima - porcentaje de vinaza**

Vinaza (%)	Densidad seca máxima lb/pie <sup>3</sup>
0,0	105,2
25,0	106,1
50,0	106,1
75,0	107,2
100,0	107,6

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

La tabla LIX muestra un resumen de la variación de la densidad seca máxima que tiene el suelo compactado con el aumento de vinaza.

Figura 58. **Comparación de densidad seca máxima - porcentaje de vinaza**



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

La figura 58 muestra que la tendencia general de la gráfica es que al aumentar el porcentaje de vinaza en el suelo, se aumenta la densidad seca máxima en el ensayo Proctor modificado, sin embargo entre el intervalo del 25% al 50% de vinaza el suelo no varía su peso unitario seco.

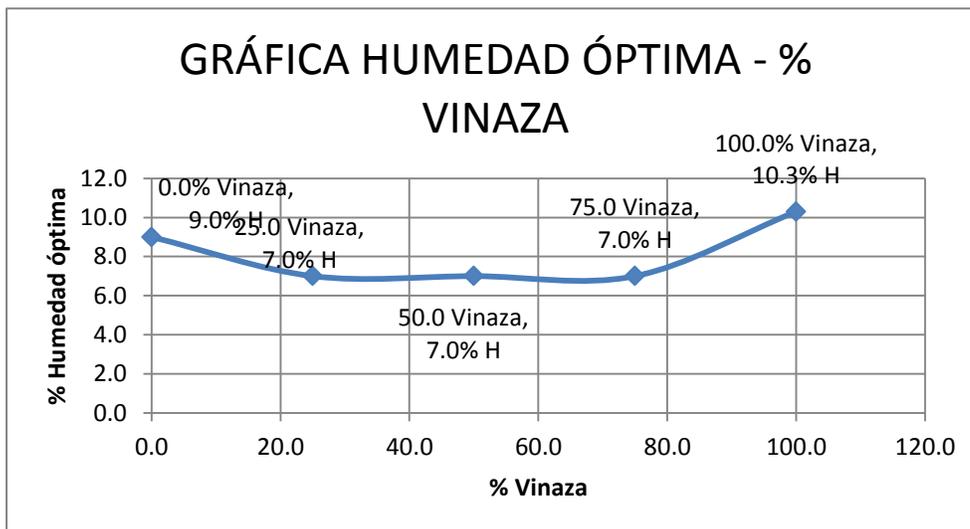
Tabla LX. **Humedad óptima - porcentaje de vinaza**

Vinaza (%)	Humedad óptima (%)
0,0	9,0
25,0	7,0
50,0	7,0
75,0	7,0
100,0	10,3

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

La tabla LX compara la variación del porcentaje de la humedad óptima respecto del porcentaje de vinaza aplicada al suelo compactado.

Figura 59. **Comportamiento de humedad óptima - porcentaje de vinaza**



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

La 59 gráfica muestra que al variar el porcentaje de vinaza aplicada a la muestra de suelo, la humedad óptima varía en forma de parábola abierta sobre el eje positivo de las ordenadas. Sin embargo entre el 25% y el 75% la humedad óptima se mantiene prácticamente constante, con lo cual se puede decir que ésta solamente varía en los extremos.

### 3.2.2.2. Valor soporte california (CBR)

La tabla LXI muestra un comparativo de la variación de la compactación del suelo en el ensayo de CBR con respecto al aumento del porcentaje de vinaza.

Tabla LXI. **Porcentaje de compactación - porcentaje de vinaza**

Vinaza (%)	10 golpes	30 golpes	65 golpes
0,0	89,00	93,00	99,00
25,0	91,42	93,52	99,02
50,0	94,65	96,73	100,00
75,0	96,72	97,76	100,00
100,0	95,18	97,76	100,00

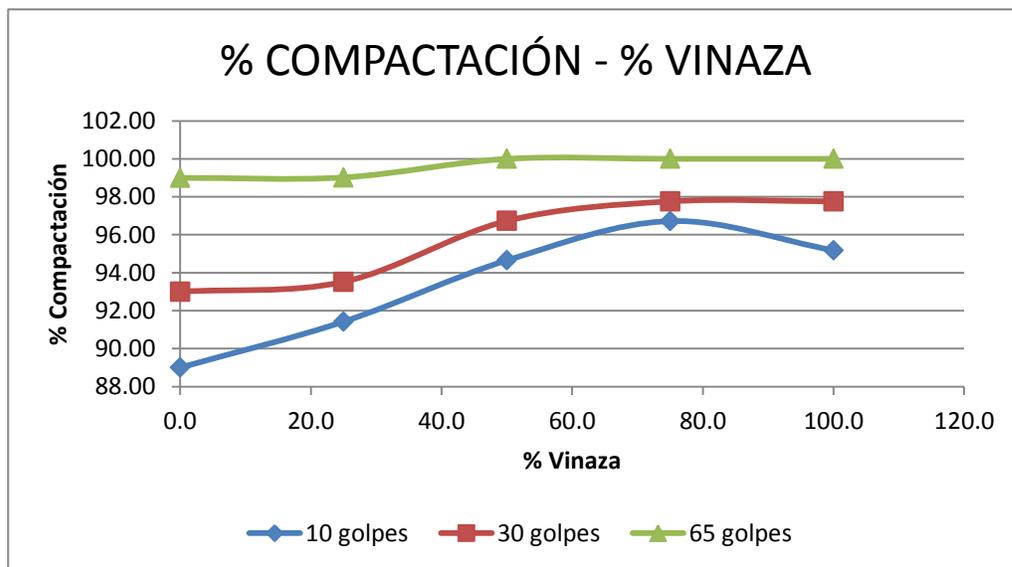
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

La gráfica 60 muestra que al aumentar el porcentaje de vinaza en la muestra de suelo éste aumenta su compactación, pero entre el intervalo de 25% a 75% de vinaza éste presenta la relación más pronunciada.

El ensayo compactado con 10 golpes presenta una mayor variación y muestra que después del 75% de vinaza aplicada al suelo decrece el porcentaje de compactación. El ensayo compactado con 30 golpes mantiene la misma tendencia general solamente que en ningún momento llega a decrecer sino que

se mantiene estable a partir del 75%. El ensayo compactado con 65 golpes muestra un incremento muy bajo en el porcentaje de compactación manteniéndose prácticamente estable a partir del 50% de vinaza aplicada al suelo.

Figura 60. **Incidencia de la vinaza en la compactación**



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

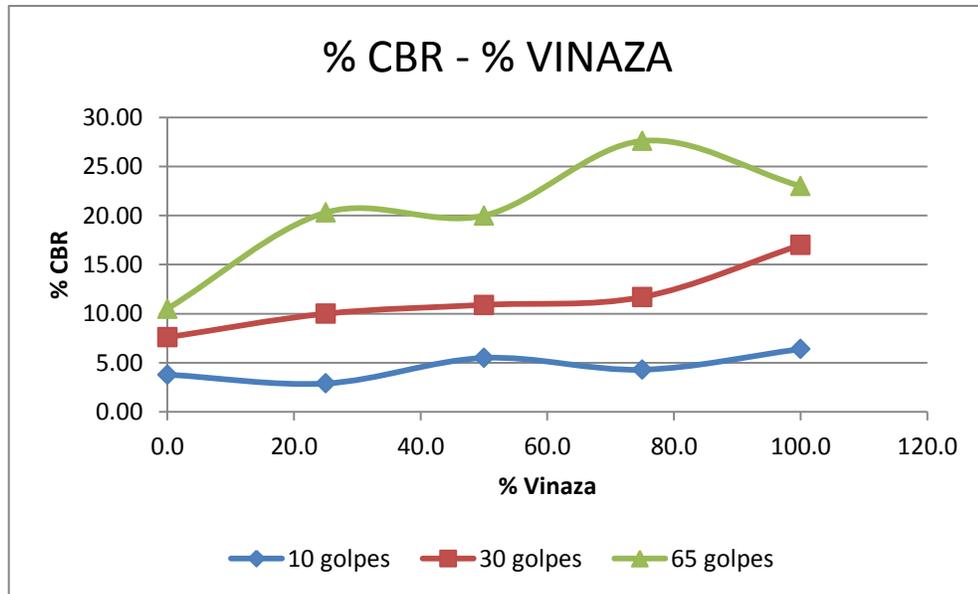
Tabla LXII. **Porcentaje CBR – porcentaje de vinaza**

Vinaza (%)	10 golpes	30 golpes	65 golpes
0,0	3,80	7,60	10,50
25,0	2,90	10,00	20,30
50,0	5,50	10,90	20,00
75,0	4,30	11,70	27,60
100,0	6,40	17,00	23,00

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

La tabla LXII muestra un comparativo de la variación en el Porcentaje CBR con respecto al aumento del porcentaje de vinaza.

Figura 61. **Incidencia de la vinaza en el Porcentaje CBR**



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

En términos generales la figura 61 indica que el porcentaje de vinaza incide positivamente en el aumento del CBR en la muestra de suelo, dándose los mayores aumentos desde el 0% hasta el 75%.

En el ensayo compactado a 10 golpes la muestra de suelo prácticamente se mantiene estable presentando una leve mejora. En el ensayo compactado a 30 golpes el porcentaje de compactación muestra una tendencia prácticamente lineal con respecto al porcentaje de vinaza aplicada. En el ensayo compactado a 65 golpes la gráfica en general tiende a mejorar; sin embargo en el intervalo de 25% al 50% se mantiene estable el % de CBR y en el intercalo del 75% al 100% el Porcentaje CBR desciende.

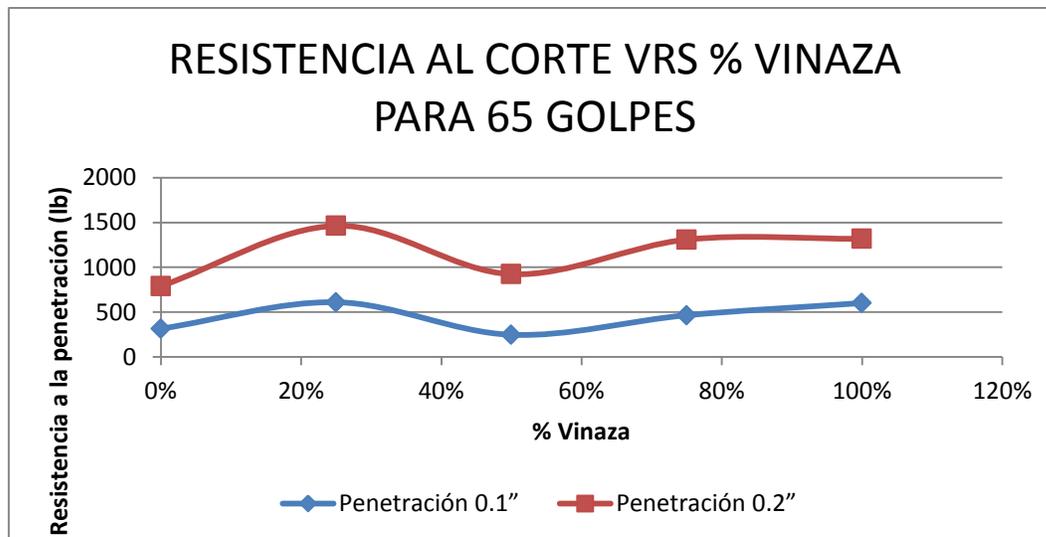
Tabla LXIII. **Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (65 golpes)**

% vinaza	Resistencia (lb) Penetración 0,1"	Resistencia (lb) Penetración 0,2"
0%	314,3	791,09
25%	609,46	1463,15
50%	246,16	922,78
75%	464,15	1308,76
100%	600,38	1317,84

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

La tabla LXIII muestra la variación en la resistencia al corte en lb con el aumento en el porcentaje de vinaza en el ensayo de CBR a 65.

Figura 62. **Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (65 golpes)**



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

La resistencia al corte en el ensayo de penetración a 0,1" y 0,2" en una probeta compactada a 65 golpes no es uniforme, donde la resistencia a la

penetración disminuye es en el intervalo de 25% al 50% de vinaza y la resistencia al corte más alta se obtiene al agregarle 25% de vinaza.

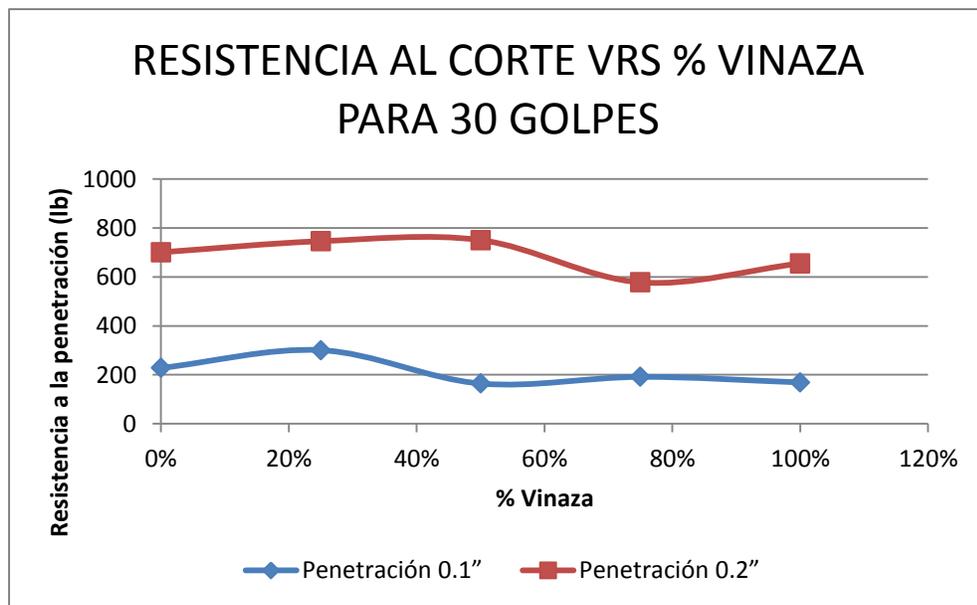
Tabla LXIV. **Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (30 golpes)**

% vinaza	Resistencia Penetración 0.1" (lb)	Resistencia Penetración 0.2" (lb)
0%	228,02	700,28
25%	300,68	745,68
50%	164,45	750,23
75%	191,69	577,67
100%	168,99	654,87

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

La tabla LXIV muestra la variación en la resistencia al corte en lb con el aumento en el porcentaje de vinaza en el ensayo de CBR a 30.

Figura 63. **Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (30 golpes)**



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

La resistencia al corte en el ensayo de penetración a 0,1” y 0,2” en una probeta compactada a 30 golpes no es uniforme, sin embargo la tendencia general es a disminuir.

La resistencia al corte en la penetración con 0,1”, su punto más alto es en 25% de aplicación de vinaza mientras que el más bajo es en 50% de aplicación de vinaza. La resistencia al corte en la penetración con 0,2”, su punto más alto es en 50% de aplicación de vinaza mientras que el más bajo es en 75% de aplicación de vinaza.

**Tabla LXV. Resistencia al corte (lb) - porcentaje de vinaza (10 golpes)**

% vinaza	Resistencia (lb) Penetración 0,1”	Resistencia (lb) Penetración 0,2”
0%	114,5	337
25%	87,25	300,68
50%	164,45	423,28
75%	128,12	455,07
100%	191,69	464,15

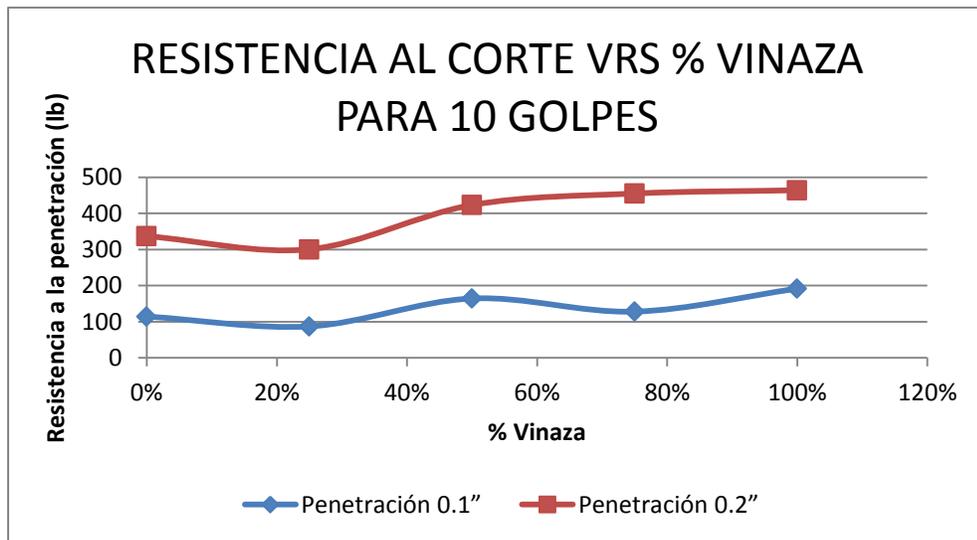
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII-USAC.

La tabla LXV muestra la variación en la resistencia al corte en lb con el aumento en el porcentaje de vinaza en el ensayo de CBR a 10.

La resistencia al corte en el ensayo de penetración a 0,1” y 0,2” en una probeta compactada a 10 golpes es uniforme desde el 0% al 50% de aplicación de vinaza, y del 50% al 100% de aplicación de la vinaza no es uniforme, sin embargo la tendencia general es a aumentar la resistencia al corte.

La resistencia al corte en la penetración con 0,1” y 0,2”, su punto más alto es en 100% de aplicación de vinaza; mientras que el más bajo es en 25% de aplicación de vinaza.

Figura 64. **Incidencia de la vinaza en la resistencia al corte (10 golpes)**



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

### 3.2.2.3. Triaxial

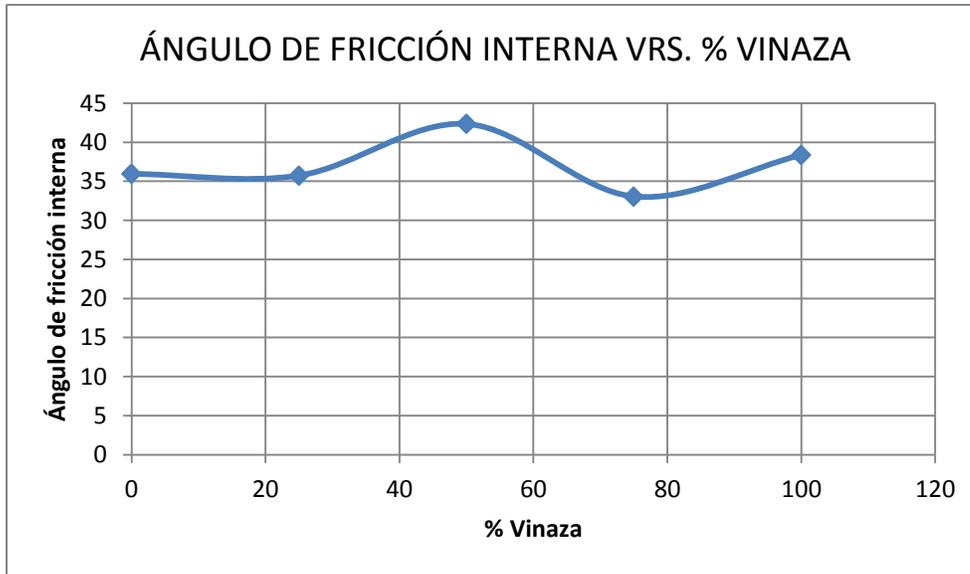
La tabla LXVI muestra la variación en el ángulo de fricción interna con el aumento en el porcentaje de vinaza.

Tabla LXVI. **Porcentaje de vinaza - Ángulo de fricción interna**

% vinaza	Ángulo de fricción interna
0%	35,96°
25%	35,74°
50%	42,35°
75%	33,06°
100%	38,37°

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

Figura 65. **Incidencia de la vinaza en el ángulo de fricción interna**



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

La figura 65 muestra que al 50% de aplicación de la vinaza al suelo éste aumenta su ángulo de fricción interna (ángulo de fricción entre partículas), mientras que aplicándolo al 75% de vinaza el ángulo de fricción interna se reduce considerablemente.

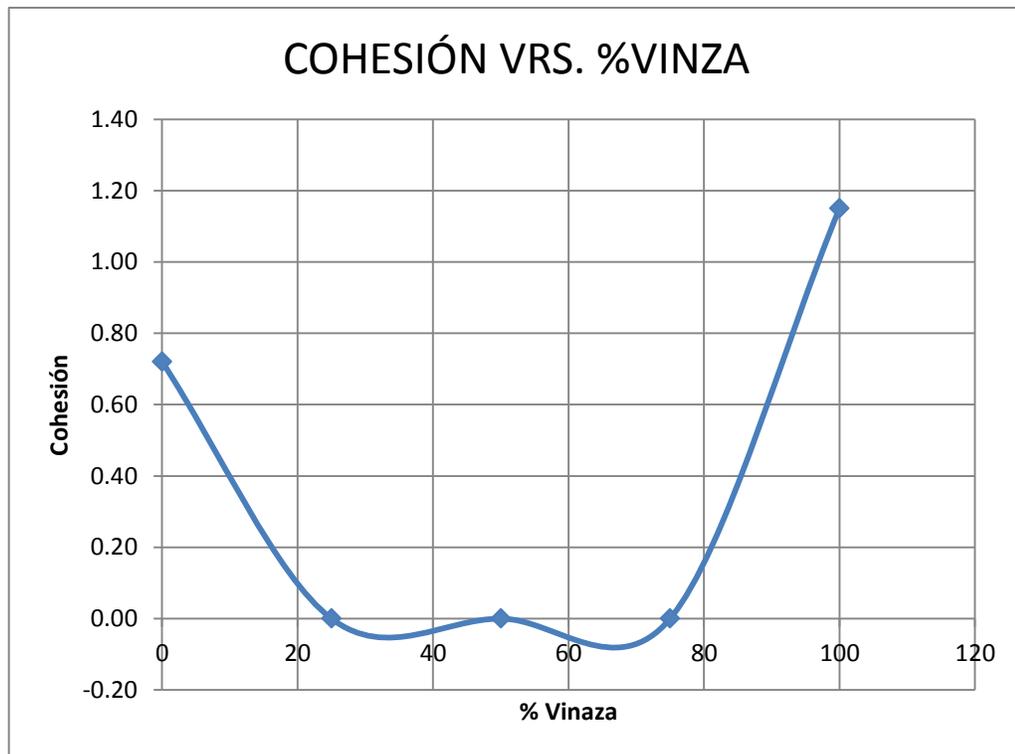
La tabla LXVII muestra la variación de la cohesión con el aumento en el porcentaje de vinaza.

Tabla LXVII. **Porcentaje de vinaza – cohesión**

% vinaza	Cohesión (t/m <sup>2</sup> )
0%	0,72
25%	0,00
50%	0,00
75%	0,00
100%	1,15

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

Figura 66. **Incidencia de la vinaza en la cohesión**



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

La figura 66 muestra que la vinaza hace decrecer la cohesión en el suelo cuando varía de 0% a 75% de aplicación, a partir del 75% la vinaza recupera la cohesión inicial del suelo y a partir del 95% aproximadamente mejora la cohesión.

#### **3.2.2.4. Pérdida de humedad (evaporación)**

La tabla LXVIII muestra la variación en la pérdida de humedad que tiene el material a intervalos de tiempo de 10 minutos, con diferentes porcentajes de vinaza.

Tabla LXVIII. **Evaporación – Tiempo**

Tiempo (min)	0% Vinaza	25% Vinaza	50% Vinaza	75% Vinaza	100% Vinaza
	H%	H%	H%	H%	H%
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,61	0,82	1,32	1,86	1,08
20	1,49	2,30	2,69	3,59	2,99
30	2,97	3,65	3,75	5,29	4,56
40	4,25	4,70	4,82	5,71	5,97
50	5,40	5,59	5,41	5,71	6,29
60	6,63	5,80	5,77	5,71	6,29
70	7,45	5,85	5,88	5,71	6,29
80	7,70	5,87	5,93	5,71	6,29
90	7,79	5,87	5,93	5,71	6,29
100	7,85	5,87	5,93	5,71	6,29
110	7,85	5,87	5,93	5,71	6,29

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

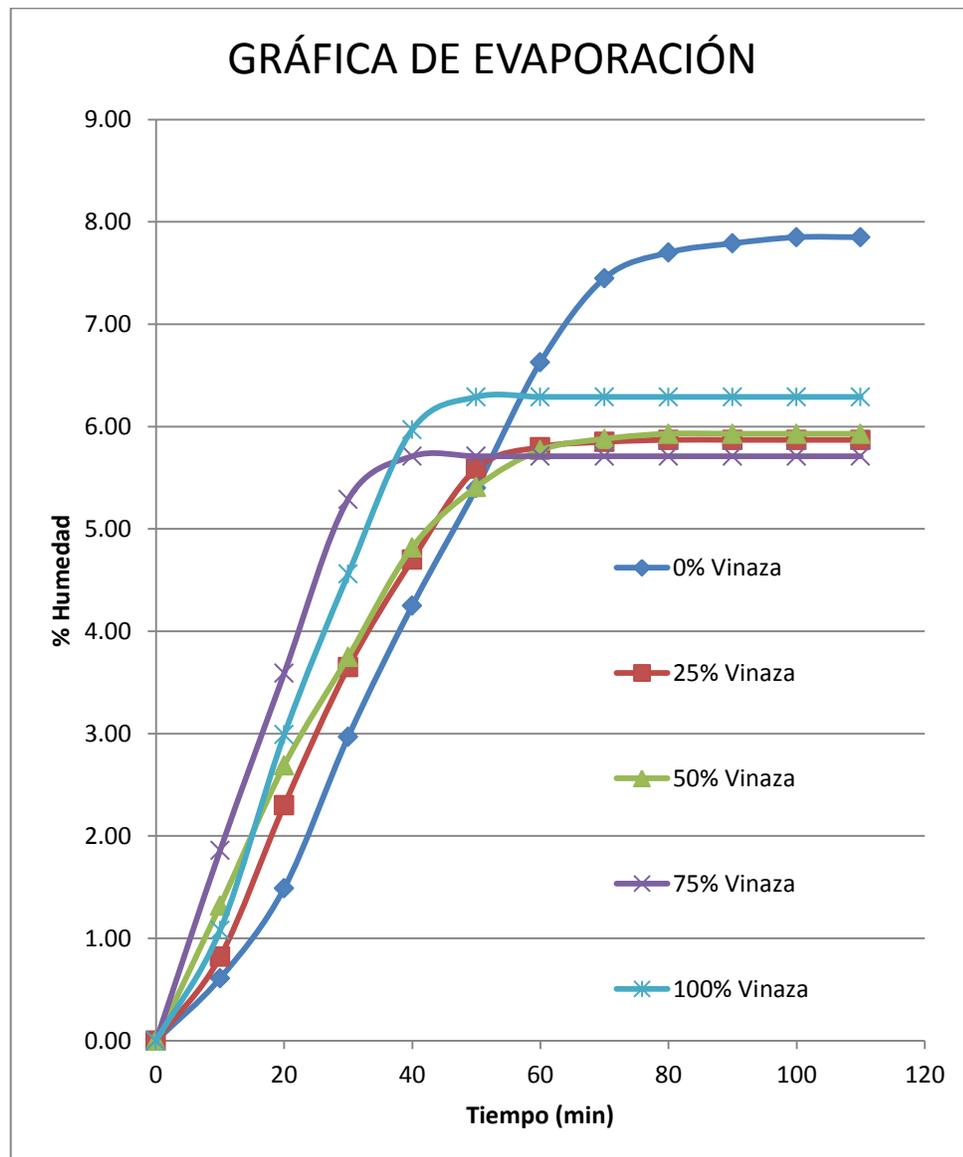
La figura 67 muestra que la vinaza no afecta de forma lineal la tasa de evaporación de la humedad en la muestra de suelo, sin embargo todos los porcentajes de aplicación de vinaza se evaporan con mayor facilidad que la del agua en los primeros 110 minutos.

En el caso de la arena limosa color gris, la vinaza no logra formar ninguna capa protectora, ni aglomerar las partículas de limo debido a la escasa presencia de las mismas en dicho suelo, por lo cual no se logra evitar la pérdida de humedad como lo ocurrido con la arena limosa color café oscuro.

Se debe hacer notar que si bien la humedad se pierde con mayor rapidez con la adición de vinaza en comparación con solamente la adición de agua; el porcentaje de humedad que se pierde es mucho menor que el porcentaje que

se pierde con el agua, lo cual indica que se puede alcanzar una densificación mayor, lo cual compensa en cierta medida la evaporación temprana.

Figura 67. **Evaporación – Tiempo**



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

Es importante recordar que en campo lo que se busca es reducir la tasa de evaporación de la humedad óptima, ya que con esta se logra la mayor densificación de los suelos y con esto se evita el descascaramiento en la superficie de la subrasante.

## CONCLUSIONES

1. La vinaza se puede aprovechar en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos fricciantes utilizados en subrasantes en carreteras, mediante una dosificación vinaza – agua que depende del tipo de suelo a mejorar. La mayor densificación obtenida de las dos muestras de suelo tomadas para la realización del presente trabajo de graduación, se alcanzó con la arena limosa color café oscuro al agregarle la relación de 50% vinaza – 50% agua.
2. La relación vinaza – agua varía dependiendo de la cantidad de finos que el suelo fricciantente posea. Dicha relación se establece relacionando el porcentaje de vinaza vrs. el PUS (Peso Unitario Seco) más alto.
3. La adición de la relación vinaza – agua es un método para aumentar el tiempo de evaporación en los suelos con mayor presencia de finos, ya que la vinaza crea una capa en la parte superior de las partículas, lo cual impide que la humedad se evapore con facilidad y ayuda a obtener un mejoramiento en la densificación del suelo.
4. La adición de la relación vinaza – agua es un método para disminuir el tiempo de evaporación en los suelos con menor presencia de finos, debido a que la vinaza no crea ninguna capa en la parte superior de las partículas, lo cual propicia que la humedad se evapore con facilidad; sin embargo el porcentaje de humedad pérdida es menor que con la

adición de sólo agua por lo que se puede alcanzar una mayor densificación que la estándar.

5. En los suelos friccionantes con presencia de finos se observa que la densidad seca máxima aumenta al igual que la humedad óptima de compactación con cada incremento de la solución vinaza – agua a partir del 50% vinaza – 50% agua. Los incrementos en la densidad seca máxima y la humedad óptima se deben a la lubricación que se logra con la adición de vinaza reduciendo la fricción intergranular que presentan los suelos.
6. El porcentaje de compactación para las arenas limosas tiene un aumento con la adición de vinaza en todos los porcentajes, mientras que el Porcentaje CBR tiende a aumentar en términos generales pero presenta mayor consistencia en el ensayo realizado a 30 golpes mientras que si se aumenta la energía se desacomodan las partículas.
7. Al agregar vinaza a probetas de 2,5” de ancho y 5” de altura para los ensayos triaxiales, compactadas con la densidad máxima obtenida en el ensayo de proctor con la relación vinaza – agua, se observa que el ángulo de fricción interna y la cohesión no guardan ninguna relación.
8. La adición de vinaza, en cualquier porcentaje, disminuye el ángulo de fricción interna para cualquiera de los suelos analizados, lo cual significa que reduce la capacidad de carga del suelo; sin embargo en ninguno de los casos lo hace siguiendo un claro patrón.
9. En la arena limosa color café oscuro la cohesión se ve afectada positivamente entre el 25% vinaza – 75% agua y el 75% vinaza – 25%

agua; mientras que en la arena limosa color gris con presencia de grava tipo pómez la cohesión se afectada negativamente en todos los casos excepto en la adición de la relación 100% vinaza – 0% agua, lo cual indica que la relación vinaza – agua puede garantizar cierto grado de aglutinamiento entre partículas al momento de que la carretera se encuentre en servicio.

10. La relación vinaza – agua ideal varía dependiendo del tipo de suelo friccionante a utilizar; sin embargo en términos muy generales se puede esperar un mejoramiento entre el 25% vinaza – 75% agua y el 75% vinaza – 25% agua.
11. La forma adecuada de adicionar la relación vinaza – agua a los suelos es de forma líquida lo cual ayuda a su homogenización y permite que se llenen los espacios entre partículas de suelo rellenándose con sedimentos de la vinaza al evaporarse la humedad.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar ensayos en suelos friccionantes con relación entre 25% vinaza – 75% agua a 75% vinaza – 25% agua, debido a que en este intervalo es donde se obtuvieron las mejorías más notables.
2. Ahondar en las investigaciones con suelos friccionantes con abundante presencia de finos, debido a que por inspección visual se obtiene una mejora considerable en las propiedades físicas y mecánicas en los suelos de este tipo.
3. Investigar el comportamiento en el ensayo triaxial de probetas con adición de vinaza – agua y con 24 horas de secado en horno a una temperatura recomendable de 110°C, para establecer las mejoras en el ángulo de fricción interna y la cohesión al producirse la cementación de la vinaza con la muestra de suelo.
4. En caso de no tener una cuadrilla disponible para la remoción de rocas salientes en la superficie de rodadura, se propone la colocación de una fina capa de material selecto adicionado con vinaza.
5. Realizar pruebas para desarrollar formas alternas de aplicación de la vinaza ya que aplicado de forma líquida debido a que con este método no se evita la corrosión en la maquinaria.

6. Evitar la adición de vinaza en terrenos de capilaridad alta, donde exista una fuente de agua a poca profundidad (nivel freático) o en un lugar con infiltración lateral; a menos que se tomen las precauciones necesarias para interceptar y drenar el flujo de agua.
7. El tratamiento de las subrasantes con vinaza está enfocado en las carreteras tipo “D” (para un tráfico promedio diario anual de hasta 500 vehículos), se propone realizar ensayos de abrasión al suelo tratado con vinaza – agua.
8. El mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos a través de la adición de vinaza no es recomendable para cimentaciones, debió a que los agentes corrosivos de la vinaza pueden afectar negativamente las características del concreto armado. Si se emplea este tipo de mejoramiento en suelos para cimentaciones se deben realizar ensayos químicos de la vinaza como del impacto de este en el concreto armado.
9. Es muy importante que las autoridades encargadas de velar por el mantenimiento vial mantengan un estricto programa preventivo y correctivo en los caminos tratados con vinaza, debido al alto costo de la readecuación vial.
10. Un trabajo de investigación debe ser lo más completo posible y detallar todos los resultado que se obtuvieron para poder inferir las conclusiones, por lo que es necesario que las autoridades responsables del Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala aprueben todos los ensayos solicitados por el estudiante y le permitan adjuntar dicha información a su trabajo de graduación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BERRY, Peter L.; REID, David. *Mecánica de suelos*. Colombia: McGraw-Hill, 1993. p. 415.
2. BLÁZQUEZ BAÑÓN, Luis; BEVIÁ GARCÍA, José. *Manual de carreteras*, tomo 2, construcción y mantenimiento. Chile: 2004. p. 328. vol. 1.
3. BOWLES, Joseph E. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. México: McGraw-Hill 1981. p. 213.
4. CENGICAÑA. *Carta trimestral*. No. 3. Colombia: Cali 2000. p. 40.
5. \_\_\_\_\_. *Presentación de resultados de investigación. Zafra 2007 – 2008*. Memoria. Guatemala 2008. p. 289.
6. CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 6a. ed. México: Limusa, 2008. p. 644.
7. DAS, Braja M. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 5a. ed. México: International Thompson Editores, 2001. p. 852.
8. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Ingenieros Consultores de Centro América, 2001. p. 724.

9. 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. p. 510.
  
10. ROLDÁN DE PAZ, Jairo. *Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y subbases*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. p. 199.

# **ANEXOS**



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



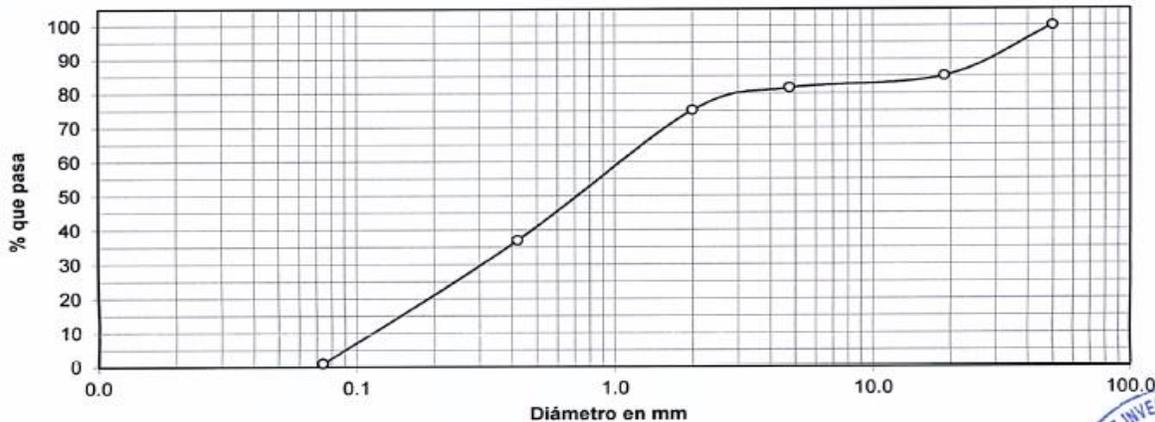
INFORME No.: 544 S.S.

O.T.: 31,825

Interesado: Antonio José Toledo Cáceres  
 Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices.  
 Norma: A.A.S.H.T.O. T-27  
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Propuesta para el aprovechamiento de la vinaza en el mejoramiento de las Propiedades físicas y mecánicas de suelos friccionantes utilizados en Sub-Rasantes en carreteras"  
 Ubicación: 23 Av. 34-45 Zona 12, Colonia Santa Elisa, Ciudad de Guatemala  
 Fecha: miércoles, 14 de agosto de 2013

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.0	100.00
3/4"	19.0	85.07
4	4.76	81.59
10	2.00	75.13
40	0.42	37.04
200	0.074	1.04

% de Grava: 18.41  
 % de Arena: 80.55  
 % de Finos: 1.04



Descripción del suelo: Arena con Partículas de Grava Color Negra  
 Clasificación: S.C.U.: S.P. P.R.A.: A-1-b  
 Observaciones: Muestra tomada por el interesado.



Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales  
 DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez  
 Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



INFORME No. 543 S. S.

O.T.: 31,825

Interesado: Antonio José Toledo Cáceres

Proyecto: Trabajo de Graduación "Propuesta para el aprovechamiento de la vinaza en el mejoramiento de las Propiedades Físicas y Mecánicas de Suelos Friccionantes utilizados en Sub-rasantes en carreteras"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: 23 Av. 34-45 Zona 12, Colonia Santa Elisa, Ciudad de Guatemala

FECHA: miércoles, 14 de agosto de 2013

**RESULTADOS:**

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACIÓN *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	N.P.	N.P.	M.L.	Arena con Partículas de Grava Color Negra

(\*) = CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

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

Atentamente,



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

Vo. Bo.

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





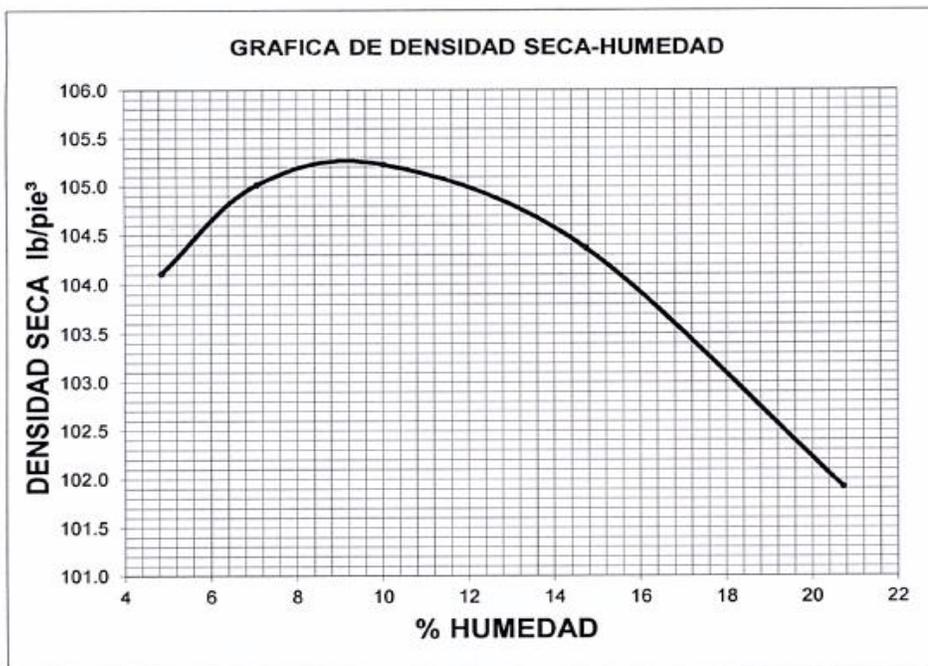
**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 545 S.S.

O.T. No.: 31,825

Interesado: Antonio José Toledo Cáceres      Proctor Estándar: ( ) Norma:  
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN.      Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180  
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Propuesta para el aprovechamiento de la vinaza en el mejoramiento de las Propiedades físicas y mecánicas de suelos fricciónantes utilizados en Sub-rasantes en carreteras"  
 Ubicación: 23 Av. 34-45 Zona 12, Colonia Santa Elisa, Ciudad de Guatemala  
 Fecha: miércoles, 14 de agosto de 2013



Descripción del suelo: Arena con Partículas de Grava Color Negra  
 Densidad seca máxima  $\gamma_d$ : 1,685.30 Kg/m<sup>3</sup>      105.20 lb/ft<sup>3</sup>  
 Humedad óptima Hop.: 9.00 %  
 Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,



Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales  
 DIRECTORA CII/USAC

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

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>



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



INFORME No.: 546 S.S.

O.T. No.: 31,825

Interesado: Antonio José Toledo Cáceres

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

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

Proyecto:

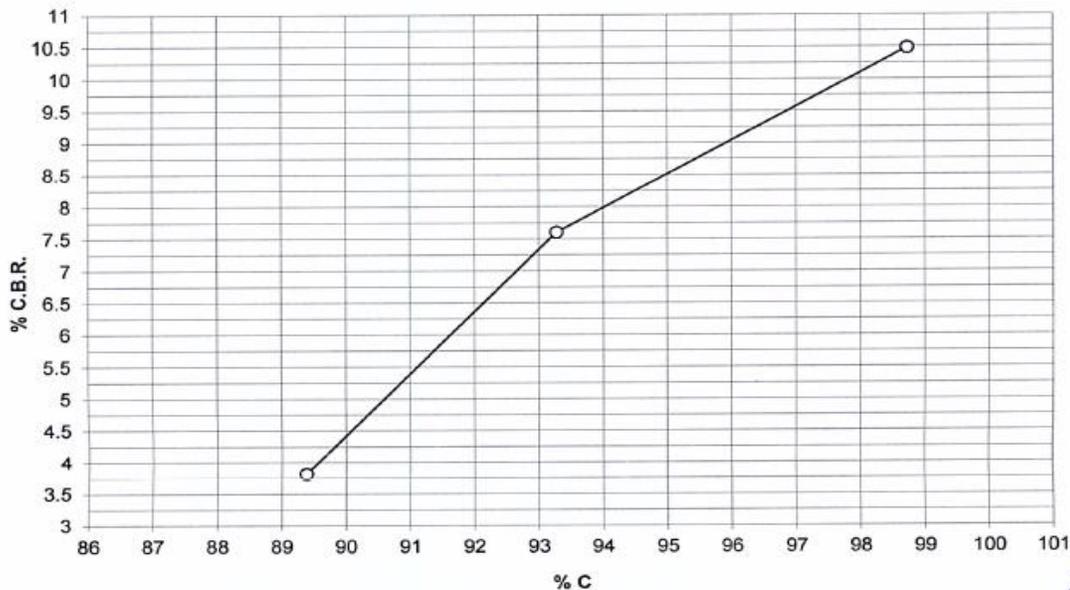
Trabajo de Graduación "Propuesta para el aprovechamiento de la vinaza en el mejoramiento de las Propiedades Físicas y Mecánicas de Suelos Fricciónantes utilizados en Sub-rasantes en carreteras"

Ubicación: 23 Av. 34-45 Zona 12, Colonia Santa Elisa, Ciudad de Guatemala

Fecha: miércoles, 14 de agosto de 2013

Descripción del suelo: Arena con Partículas de Grava Color Negra

PROBETA No.	GOLPES No.	A LA COMPACTACION		C (%)	EXPANSION (%)	C.B.R. (%)
		H (%)	Yd (Lb/pie <sup>3</sup> )			
1	10	7.74	93.85	89.38	-0.04	3.82
2	30	7.74	97.94	93.28	-0.07	7.60
3	65	7.74	103.67	98.73	-0.02	10.48



Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales  
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez  
Jefe Sección Mecánica de Suelos

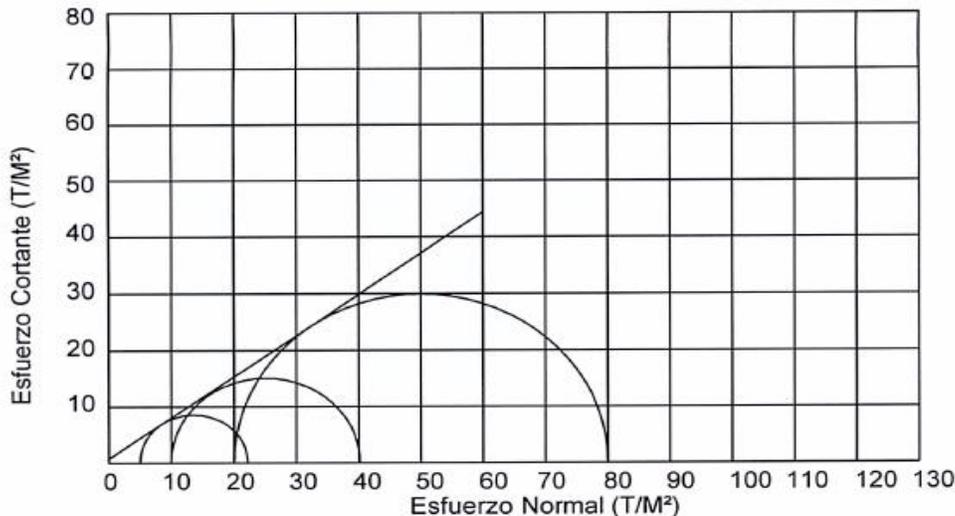




**ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR**

INFORME No.: 547 S.S. O.T.: 31,825

INTERESADO: Antonio José Toledo Cáceres  
 PROYECTO: Trabajo de Graduación "Propuesta para el aprovechamiento de la vinaza en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de suelos friccionantes utilizados en sub-rasantes en carreteras"  
 Ubicación: 23 Av. 34-45 Zona 12, Colonia Santa Elisa, Ciudad de Guatemala  
 Fecha: miércoles, 14 de agosto de 2013  
 pozo: 1 Profundidad: X m Muestra: 1



**PARAMETROS DE CORTE:**

<b>ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : <math>\phi = 35.96^\circ</math></b>	<b>COHESIÓN: <math>C_u = 0.72 \text{ ton/m}^2</math></b>
---	--

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.  
 DESCRIPCION DEL SUELO: Arena con Partículas de Grava Color Negra  
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"  
 OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado, con la humedad de proctor.

PROBETA No.	1	2	3
PRESION LATERAL ( $T/m^2$ )	5	10	20
DESVIADOR EN ROTURA $q$ ( $T/m^2$ )	13.60	24.80	50.20
PRESION INTERSTICIAL $u$ ( $T/m^2$ )	x	x	x
DEFORMACION EN ROTURA $\epsilon_r$ (%)	3.0	4.0	6.0
DENSIDAD SECA ( $T/m^3$ )	1.63	1.63	1.63
DENSIDAD HUMEDA ( $T/m^3$ )	1.79	1.79	1.79
HUMEDAD (%H)	10.0	10.0	10.0

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



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

