



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

**LÍMITE LÍQUIDO EN SUELOS DE GRANO FINO, SEGÚN LOS MÉTODOS DE  
PENETRÓMETRO DE CONO Y COPA DE CASAGRANDE**

**Mario Raúl Pacay García**

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, junio de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**LÍMITE LÍQUIDO EN SUELOS DE GRANO FINO, SEGÚN LOS MÉTODOS DE  
PENETRÓMETRO DE CONO Y COPA DE CASAGRANDE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**MARIO RAÚL PACAY GARCÍA**

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, JUNIO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgén Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **LÍMITE LÍQUIDO EN SUELOS DE GRANO FINO, SEGÚN LOS MÉTODOS DE PENETRÓMETRO DE CONO Y COPA DE CASAGRANDE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 04 de mayo de 2016.

**Mario Raúl Pacay García**

Guatemala, 13 de marzo 2017

Ingeniero  
José Gabriel Ordóñez Morales  
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Ordóñez Morales.

Le saludo cordialmente, el motivo de la presente es para informarle que el trabajo de graduación **"LÍMITE LÍQUIDO EN SUELOS DE GRANO FINO, SEGÚN LOS MÉTODOS DE PENETRÓMETRO DE CONO Y COPA DE CASAGRANDE"**, elaborado por el estudiante Mario Raúl Pacay García con carné 200815572, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular,

Atentamente

*"Id y Enseñad a Todos"*

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

OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ  
INGENIERO CIVIL  
COLEGIADO No. 6842



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

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
19 de mayo de 2017

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 **LÍMITE LÍQUIDO EN SUELOS DE GRANO FINO, SEGÚN LOS MÉTODOS DE PENETROMETRO DE CONO Y COPA DE CASAGRANDE** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Mario Raúl Pacay García quien contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

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



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

/mrrm.



*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*



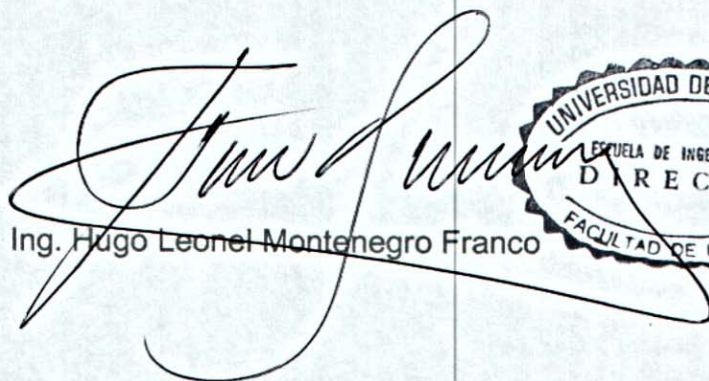
**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Mario Raúl Pacay García **LÍMITE LÍQUIDO EN SUELOS DE GRANO FINO, SEGÚN LOS MÉTODOS DE PENETRÓMETRO DE CONO Y COPA DE CASAGRANDE** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, junio 2017

/mrrm.



*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref.DTG.D.275.2017

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: **LÍMITE LIQUIDO EN SUELOS DE GRANO FINO, SEGÚN LOS MÉTODOS DE PENETRÓMETRO DE CONO Y COPA DE CASAGRANDE**, presentado por el estudiante universitario: **Mario Raúl Pacay García**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, junio de 2017

/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Trinidad Santa**

Dios Padre, Dios Hijo, Dios Espíritu Santo, por iluminarme en el transcurso de mi carrera, por su misericordia y permitirme llegar a tan esperado día, por los dones, talentos y sabiduría otorgados para lograrlo, gracias Padre.

### **Mis padres (abuelitos)**

Mario Cesar Pacay Cú y Carmen Noemí García de Pacay, por brindarme su apoyo y amor incondicional en cada etapa de mi vida, siendo mi ejemplo de vida e inculcándome valores éticos, morales y espirituales para ser una persona de bien, basado en el respeto y temor a Dios. Más que mis abuelos, mis padres.

### **Mi madre**

Lic. Julia Maribel Pacay García, por su amor incondicional, apoyo moral, económico y espiritual, siendo mi mayor ejemplo de superación y valores morales, éticos y espirituales.

### **Mis tíos y primo**

Yasmina Noemí Pacay García, Edwin Isaías Pacay García, Alicia Concepción Camey y Christopher Alexander Pacay Camey, por haber estado conmigo a lo largo de este camino y ser

para mí más que mis tíos, mis hermanos.

**Licenciado Carlos  
Leonel Lemus Siliezar**

Por su apoyo moral y espiritual, sus consejos y motivación académica y deportiva, que me ayudaron a mantenerme por el buen camino, por ser parte de mi familia.

**Familia Cacao Pacay**

Por estar pendiente de mi persona en el transcurso de mi carrera, por sus consejos y apoyo moral.

**Alguien especial**

Kiara Odalis Recinos Gómez, por compartir y haber hecho aún más especial esta última etapa de nuestra carrera, por tu motivación y apoyo, que Dios te bendiga.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por tener el privilegio de ser un egresado más de esta gloriosa y tricentenaria casa de estudios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme los conocimientos y bases necesarias para desenvolverme en mi futura vida profesional.
<b>Mis padres (abuelitos)</b>	Mario Cesar Pacay Cú y Carmen Noemí García de Pacay, por su constante motivación y apoyo moral, económico y espiritual.
<b>Mi madre</b>	Licda. Julia Maribel Pacay García, que al igual que mis abuelitos fue mi motivación y apoyo moral, económico y espiritual.
<b>Mi Asesor</b>	Ingeniero Omar Enrique Medrano Méndez, por compartir su conocimiento incondicional y su completo apoyo en el desarrollo de mi trabajo de graduación, su amistad y consejos.
<b>Mis amigos de la Facultad de ingeniería</b>	Denis Eduardo Castañeda, Ivone Urbina, Ethel Errarte, Pablo Andrés López, Andrés Samayoa, Carlos Alberto Woc, JoseJosé Estuardo Barrios, Fernando Espinoza, Gloria Elizabeth.

Hernández, Jaime García Baldizón, Rita Lucía Estrada, Lourdes Mariela Santos, que compartimos cursos, laboratorios y el apoyo durante los mismos

**Mis amigos, Sección de  
Mecánica de  
Suelos/Asfaltos CII  
USAC**

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez, Ing. Ellios Rodríguez Benítez, Byron Arnaldo García Vielman, Mynor René Castillo Samayoa, Moisés Mejía Lorenzo, Julio Cesar Arrollo Morales, Joseph Evarist Moreno, José Juan Istupe Ibáñez, por el apoyo moral, su amistad y su contribución a mi superación académica y profesional.

**Escuela de Ingeniería  
Civil**

Por la oportunidad que me concedió de poder desarrollar este trabajo de graduación

**Representaciones Beta,  
S.A.**

William Guzmán, por el completo apoyo en la realización del ensayo de Límite Líquido por el método de penetrómetro de Cono.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS .....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Estados de consistencia del suelo Límites de Atterberg .....	1
1.1.1. La Plasticidad de las arcillas .....	1
1.1.2. Los límites de Atterberg .....	5
1.1.3. Límite Líquido por método de penetrómetro de cono (BS 1377:1990) .....	10
1.1.4. Determinación del límite líquido y clasificación de los suelos de grano fino en Guatemala .....	13
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos de grano fino .....	21
2.1.1. Límite Líquido (LL) .....	21
2.1.2. Límite plástico (PL) .....	23
2.1.3. Límite de Contracción (SL) .....	24
2.1.4. Actividad .....	27

2.1.5.	Índice de liquidez.....	28
2.1.6.	Carta de plasticidad.....	29
2.1.7.	Clasificación del suelo .....	31
2.1.8.	Sistema de clasificación AASHTO.....	31
2.1.9.	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .....	36
2.2.	Análisis estadístico de los resultados .....	42
2.2.1.	Varianza y covarianza .....	42
2.2.2.	Promedio.....	43
2.2.3.	Media aritmética .....	45
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	47
3.1.	Variables .....	47
3.1.1.	Variable independiente.....	47
3.1.2.	Variable dependiente.....	47
3.2.	Metodología utilizada en el experimento .....	48
3.2.1.	Límite líquido .....	48
3.2.1.1.	Equipo utilizado .....	48
3.2.1.2.	Procedimiento para realizar la prueba de Límite líquido .....	51
3.2.2.	Límite líquido con ecuación de Lambe.....	54
3.2.3.	Límite líquido con aparato de Casagrande/Penetrómetro de cono .....	57
3.2.3.1.	Procedimiento para límite líquido con Penetrómetro de Cono.....	58
3.2.4.	Límite plástico .....	59
3.2.4.1.	Equipo a utilizar en límite plástico .....	59
3.2.4.2.	Procedimiento límite plástico .....	61
3.3.	Programas a utilizar para el análisis de datos .....	62

3.4.	Recolección de muestras.....	62
3.5.	Datos obtenidos.....	63
3.6.	Resultados obtenidos .....	64
3.6.1.	Tablas .....	64
3.6.2.	Gráficas .....	64
4.	RESULTADOS.....	65
4.1.	Límites de Atterberg .....	65
4.1.1.	Arcilla núm. 1 .....	65
4.1.2.	Arcilla núm. 2 .....	68
4.1.3.	Arcilla núm. 3 .....	71
4.1.4.	Arcilla núm. 4 .....	74
4.1.5.	Arcilla núm. 5 .....	77
4.1.6.	Arcilla núm. 6 .....	80
4.2.	Resultados de gravedad específica de las arcillas.....	83
4.3.	Análisis granulométrico arcilla núm. 1 .....	83
4.4.	Análisis granulométrico arcilla núm. 2.....	84
4.5.	Análisis granulométrico arcilla núm. 3.....	84
4.6.	Análisis granulométrico arcilla núm. 4.....	85
4.7.	Análisis granulométrico arcilla núm. 5.....	85
4.8.	Análisis granulométrico arcilla núm. 6.....	86
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	87
5.1.	Análisis y comparación de resultados .....	87
5.2.	Clasificación de las arcillas por Límites de Atterberg y ensayos complementarios .....	93

CONCLUSIONES .....	95
RECOMENDACIONES .....	97
BIBLIOGRAFÍA .....	99
APÉNDICES .....	101
ANEXOS .....	111



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Esquema de una muestra de suelo .....	2
2.	Estructura laminar de las partículas de arcilla .....	3
3.	Estados de consistencia de los suelos plásticos .....	4
4.	Esquema de los estados de consistencia de los suelos .....	4
5.	Esquema en corte de la copa de Casagrande.....	7
6.	Interpolación de 4 puntos para límite líquido por penetrómetro de cono.....	11
7.	Cono de penetración, en el ensayo de Penetrómetro de cono .....	12
8.	Diagrama del sistema del aparato de Casagrande / penetrómetro de cono .....	12
9.	Límites de Atterberg, Mecánica de Suelos, laboratorio suelos y pavimentos, control de calidad, Héctor Villagrán .....	14
10.	Límites de Atterberg, Laboratorio Ceballos .....	15
11.	Límites de Atteberg, Corporación Suisa S.A./Curva de flujo.....	16
12.	Límites de Atterberg, Corporación Suisa S.A./Ecuación de Lambe .....	17
13.	Límites de Atterberg, Centro de Investigaciones de Ingeniería FIUSAC.....	18
14.	Límites de Atterberg, LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD, Ing. Álvaro C. Guillermo .....	19
15.	Esquema, estados de consistencia suelos de grano fino .....	21
16.	Esquema copa de Casagrande y Ranurador ASTM.....	22
17.	Esquema representativo de capa de suelo y ranura en copa de Casagrande .....	23

18.	Límite plástico.....	24
19.	Definición de límite de Contracción.....	25
20.	Prueba de límite de contracción.....	27
21.	Carta de plasticidad .....	30
22.	Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras, materiales granulares .....	33
23.	Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras, materiales limo-arcilla .....	34
24.	Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos tipo grava.....	37
25.	Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de grupo para suelos arenosos.....	38
26.	Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.....	39
27.	Carta de plasticidad .....	41
28.	Esquema de distribución con medias iguales y dispersiones diferentes.....	42
29.	Copa de Casagrande motorizada para límite líquido ASTM D4318, H-4226.....	49
30.	Ranurador plano ASTM .....	49
31.	Piseta H-3398, H-3399, H-3399XL, para adición de los diferentes porcentajes de humedad para la prueba.....	50
32.	Mortero y pistilo para preparación de muestra de suelo.....	50
33.	Espátula para conformación del suelo en copa de Casagrande y recipiente en prueba de Penetrómetro de Cono .....	51
34.	Aparato de Casagrande/Penetrómetro universal H-1200.....	57
35.	Equipo para determinación de límite plástico H-4253 .....	60
36.	Aparato para límite plástico H-4262 .....	60

37.	mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 1.....	65
38.	núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 1.....	66
39.	mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 2.....	68
40.	núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 2.....	69
41.	mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 3.....	71
42.	núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 3.....	72
43.	mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 4.....	74
44.	núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 4.....	75
45.	Núm. de golpes vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 5.....	77
46.	Núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 5.....	78
47.	mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 6.....	80
48.	Núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 6.....	81

## TABLAS

I.	Normas utilizadas en algunos laboratorios de mecánica de suelos en el departamento de Guatemala, para el ensayo de límites de Atterberg.....	20
II.	Actividad de minerales de arcilla.....	28
III.	Factores para la obtención de límite líquido del contenido de humedad y número de golpes, método B (ecuación de Lambe). .....	56
IV.	Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 1 .....	65
V.	Resultados Arcilla núm. 1, penetrómetro de cono.....	66
VI.	Límite líquido, por copa de Casagrande, arcilla núm. 1 .....	66
VII.	Resultados arcilla núm. 1, copa de Casagrande .....	67
VIII.	Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 1 .....	67
IX.	Resultados arcilla núm. 1, ecuación de Lambe .....	67
X.	Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 2.....	68
XI.	Resultados arcilla núm. 2, penetrómetro de cono .....	69
XII.	Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 2 .....	69
XIII.	Resultados arcilla núm. 2, copa de Casagrande .....	70
XIV.	Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 2 .....	70
XV.	Resultados arcilla núm. 2, ecuación de Lambe .....	70
XVI.	Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 3.....	71
XVII.	Resultados arcilla núm. 3, penetrómetro de cono .....	72
XVIII.	Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 3 .....	72
XIX.	Resultados arcilla núm. 3, copa de Casagrande.....	73
XX.	Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 3. ....	73
XXI.	Resultados arcilla núm. 3, ecuación de Lambe.....	73
XXII.	Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 4.....	74
XXIII.	Resultados arcilla núm. 4, penetrómetro de cono .....	75
XXIV.	Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 4 .....	75

XXV.	Resultados Arcilla núm. 4, copa de Casagrande .....	76
XXVI.	Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 4 .....	76
XXVII.	Resultados arcilla núm. 4, ecuación de Lambe .....	76
XXVIII.	Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 5 .....	77
XXIX.	Resultados arcilla núm. 5, penetrómetro de cono .....	78
XXX.	Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 5 .....	78
XXXI.	Resultados Arcilla núm. 5, copa de Casagrande .....	79
XXXII.	Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 5 .....	79
XXXIII.	Resultados arcilla núm. 5, ecuación de Lambe .....	79
XXXIV.	Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 6 .....	80
XXXV.	Resultados arcilla núm. 6, penetrómetro de cono .....	81
XXXVI.	Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 6 .....	81
XXXVII.	Resultados arcilla núm. 6, copa de Casagrande .....	82
XXXVIII.	Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 6 .....	82
XXXIX.	Resultados arcilla núm. 6, ecuación de Lambe .....	82
XL.	Gravedad específica de las arcillas ASTM D854 .....	83
XLI.	Análisis granulométrico de arcilla núm. 1, ASTM D422 .....	83
XLII.	Análisis granulométrico de arcilla núm. 2, ASTM D422 .....	84
XLIII.	Análisis granulométrico de arcilla núm. 3, ASTM D422 .....	84
XLIV.	Análisis granulométrico de arcilla núm. 4, ASTM D422 .....	85
XLV.	Análisis granulométrico de arcilla núm. 5, ASTM D422 .....	85
XLVI.	Análisis granulométrico de arcilla núm. 6, ASTM D422 .....	86
XLVII.	Análisis estadístico arcilla núm. 1 color café oscuro, Cobán Alta Verapaz.....	87
XLVIII.	Análisis estadístico arcilla núm. 2 color café claro, Talpetate Cobán, Alta Verapaz .....	88
XLIX.	Análisis estadístico arcilla núm. 3 color gris, San Mateo Ixtatán, Huehuetenango.....	89
L.	Análisis estadístico arcilla núm. 4 color gris, Puerto Barrios, Izabal .....	90

LI.	Análisis estadístico arcilla núm. 5 color café oscuro, Estanzuela, Zacapa. ....	91
LII.	Análisis estadístico arcilla núm. 6 color café, San Juan Cotzal, Quiché.....	92
LIII.	Clasificación de las arcillas .....	93

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>C</b>	Arcilla inorgánica
<b>S</b>	Arena
<b>CII</b>	Centro de investigaciones de ingeniería
<b>K</b>	Factor de Lambe
<b>FIUSAC</b>	Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos
<b>G</b>	Grava
<b>GI</b>	Índice de grupo
<b>IP</b>	Índice de Plasticidad
<b>kN</b>	Kilo Newton
<b>SL</b>	Límite de contracción
<b>WL</b>	Límite líquido (LL)
<b>WP</b>	Límite plástico (LP)
<b>O</b>	Limos, arcillas orgánicas
<b>M</b>	Limo inorgánico
<b>%H</b>	Porcentaje de humedad
<b>W</b>	Suelos bien graduados
<b>H</b>	Suelos de alta plasticidad
<b>L</b>	Suelos de baja plasticidad
<b>P</b>	Suelos mal graduados
<b>Pt</b>	Turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos
<b>m<sup>2</sup></b>	Unidad de superficie, metro cuadrado





## GLOSARIO

### **AASHTO**

*American Association of State Highway and Transportation Officials*, es un organismo de establecimiento de normas que publica especificaciones, protocolos de prueba y directrices que se usan en el diseño y construcción de carreteras en los Estados Unidos. A pesar de su nombre, la asociación representa, no solo las carreteras, sino también el aire, ferrocarril, agua y transporte público.

### **Arcilla**

Está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco, cuando es pura. Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C. Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm.

**Arena**

Conjunto de fragmentos sueltos de rocas o minerales de pequeño tamaño. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros (mm). Una partícula individual dentro de este rango se llama grano o clasto de arena. Una roca consolidada y compuesta por estas partículas se denomina arenisca (o psamita) o calcarenitas, si los componentes son calcáreos.

**ASTM**

*American Society for Testing and Materials*, es un organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Las oficinas principales de la organización ASTM international están ubicadas en West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos, al noroeste de la ciudad de Filadelfia

**Atterberg**

Albert Mauritz Atterberg, científico sueco que dedicó parte de su vida al estudio del comportamiento de las arcillas y estados de consistencia de los suelos.

**BS**

La *British Standards Institution*, cuyas siglas corresponden a BSI, es una multinacional cuyo fin se basa en la creación de normas para la estandarización de procesos. BSI es un organismo colaborador de ISO y proveedor de estas normas,

son destacables límite de contracción la ISO 9001, ISO 14001, ISO 13485 e ISO 27001. Entre sus actividades principales se incluyen la certificación, auditoría y formación en las normas.

**Carta de plasticidad**

Gráfico que permite darle clasificación a los suelos de grano fino como lo son limos, arcillas y turbas orgánicas, determinando su comportamiento como de baja o alta plasticidad.

**Casagrande**

Arthur Casagrande fue un ingeniero civil austriaco, en la actualidad, se considera junto con Karl von Terzaghi el padre de la mecánica de suelos moderna, aportando a la misma, la metodología para la determinación de límite líquido en suelos de grano fino.

**Grava**

En geología y en construcción, se denomina grava a las rocas formadas por clastos de tamaño comprendido entre 2 y 64 milímetros. Pueden ser producidas por el ser humano, o resultado de procesos naturales. En este caso, además, suele suceder que el desgaste natural producido por el movimiento en los lechos de ríos genera formas redondeadas, en cuyo caso se conoce como canto rodado.

**Humedad**

El contenido de humedad en los suelos es la cantidad de agua que el suelo contiene en el

momento de ser extraído. Una forma de conocer el contenido de humedad es pesar la muestra cuando se acaba de extraer,  $m_1$ , y después de haberla mantenido durante 24 horas en un horno a una temperatura de 110 °C se vuelve a pesar,  $m_2$ , y se halla el porcentaje de humedad.

**Índice de plasticidad** Diferencia entre el porcentaje de límite líquido y límite plástico, clasificando a los suelos como de baja, moderada y alta plasticidad.

Corresponde a la frontera entre los estados de consistencia, semisólido a sólido, y fue definido por Atterberg como el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando.

**Límite líquido** Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la copa de Casagrande.

**Límite plástico** Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

**Limo** Es un sedimento clástico incoherente transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. Para que se

clasifique como tal, el diámetro de las partículas de limo varía de 0,0039 mm a 0,0625 mm.

### **Plasticidad**

En mecánica de suelos, se define como la capacidad de un suelo a deformarse, el cual está ligado directamente con el contenido de humedad del mismo y sus características físicas.

### ***PRA***

*Public Roads Administration, La American Association of State Highway Officials* adoptó este sistema de clasificación de suelos (AASHTO M 145), tras varias revisiones del sistema adoptado por el Bureau of Public Roads de Estados Unidos, en el que los suelos se agrupan en función de su comportamiento como capa de soporte o asiento del firme. Es el sistema más utilizado en la clasificación de suelos en carreteras.

### **SUCS**

Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos, es un sistema de clasificación usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras. Cada letra es descrita debajo (con la excepción de Pt). Para clasificar el suelo hay que realizar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado u otros. También se le denomina

clasificación modificada de Casagrande. Regido por la *ASTM*.

## **Terzaghi**

Fundador y guía de la Mecánica de Suelos Moderna  
Dr. Karl von Terzaghi, ingeniero reconocido como el padre de la mecánica de suelos y de la ingeniería geotécnica

## RESUMEN

En el presente estudio, se llevó a cabo el desarrollo y comparación del parámetro de límite líquido por los métodos de copa de Casagrande (ASTM D 4318), y Penetrómetro de Cono (BS 1377:1990), para suelos de la región fisiográfica de Guatemala correspondiente a las tierras altas sedimentarias del país, con suelos arcillosos en los departamentos de Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz e Izabal y la subregión Sierra de las Minas para el departamento de Zacapa.

Se realizaron gráficos para cada método. Para copa de Casagrande el porcentaje de humedad en comparación con el número de golpes de la copa en la base del sistema, y penetrómetro de cono, el porcentaje de humedad contra los milímetros de penetración del cono respecto de la arcilla por evaluar. El objetivo fue obtener una tendencia en cada una de las gráficas que describe cada método, que permitió evaluar el parámetro antes descrito, en las condiciones óptimas que cada ensayo requiere según la norma que lo rige (ASTM, BS).

Se determinó el porcentaje de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para cada uno de los suelos, posteriormente, se clasificaron según criterio de carta de plasticidad del sistema unificado de clasificación de los suelos que indicó la característica de suelos de alta plasticidad para todas las muestras ensayadas. El ensayo de granulometría por hidrómetro describió la naturaleza de los suelos de grano fino. El resultado se obtuvo según criterio de ASTM, para las muestras ensayadas como arcillas en su totalidad.

Se concluyó, en la compatibilidad para los resultados de los datos de la comparación de límite líquido según copa de Casagrande y penetrómetro de cono para los suelos correspondientes a las regiones de Huehuetenango, Izabal, Zacapa y Alta Verapaz, específicamente, en la arcilla color café oscuro. Existe diferencia entre los suelos de Quiché y Alta Verapaz para la arcilla color café claro, sin embargo, esta falta de similitud no afecta el sistema de clasificación de estos dos últimos suelos. La clasificación química-mineralógica de las arcillas se clasificó por los métodos mecánicos sin que afectara la implementación del ensayo de penetrómetro de cono dentro del arancel correspondiente a la Sección de Mecánica de Suelos del Centro de investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Implementar y comparar experimentalmente la determinación del límite líquido para suelos de grano fino, por el método de penetrómetro de cono respecto a un mismo suelo en el ensayo con copa de Casagrande ASTM D 4318, para el laboratorio de la Sección de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **Específicos**

1. Obtener el porcentaje de límite líquido para suelos de grano fino con el método de copa de Casagrande utilizando el método de curva de flujo y ecuación de Lambe.
2. Obtener el porcentaje de límite líquido para suelos de grano fino con el método de Penetrómetro de Cono utilizando el método de curva de flujo, para el suelo ensayado con el método de copa de Casagrande.
3. Realizar gráficos de curva de flujo para porcentaje de humedad contra el número de golpes en el ensayo de la copa de Casagrande ASTM D 4318, para determinar el límite líquido formando un gráfico con tendencia lineal en el cual se determine el porcentaje de humedad a 25 golpes.

4. Realizar gráficos aritméticos (curva de flujo) de penetración (mm) vs porcentaje de humedad para el método de penetrómetro de cono (BS 1377:1990) para la determinación de límite líquido, obteniendo un gráfico con una tendencia lineal en el cual se pueda determinar el porcentaje de humedad a 20 mm de penetración.
  
5. Determinar la variación entre la determinación de límite líquido con el método de penetrómetro de cono (BS 1377:1990) vs copa de Casagrande ASTM D 4318.

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo de investigación se evaluaron los métodos para la determinación del límite líquido para suelos de grano fino, se utilizó en el método de Copa de Casagrande (ASTM D 4318), y el método de Penetrómetro de Cono (BS 1377:1990), para 6 diferentes tipos de suelo fino. Se les clasificó con base en los parámetros requeridos en el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos SUCS, y Clasificación AASHTO, Public Roads Administration (PRA), y se determinó la variación entre los resultados obtenidos en cada método de determinación de límite líquido.

La finalidad del ensayo de límite líquido con el método de Penetrómetro de Cono fue su implementación dentro del conjunto de ensayos que el Laboratorio de la Sección de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala ofrece, como extensión a la ayuda a diferentes unidades académicas y otros centros regionales, gobierno e instituciones privadas. En docencia, implementando este ensayo dentro del curso de laboratorio de Mecánica de Suelos de la red de estudios de la carrera de Ingeniería Civil y Servicio, para estudiantes y personas particulares e investigación, como hizo referencia el presente estudio.

El ensayo de Límite Líquido con el Penetrómetro de Cono, se llevó a cabo para comprobar la disminución del factor humano en la determinación del ensayo de Límite líquido. Se contó con suficientes datos de ensayos realizados en el laboratorio, y se tuvo como patrón de comparación el ensayo de Límite líquido con la Copa de Casagrande.



# **1. ANTECEDENTES**

## **1.1. Estados de consistencia del suelo Límites de Atterberg**

### **1.1.1. La Plasticidad de las arcillas**

Los límites de Atterberg (límites de consistencia de suelos de grano fino) fueron desarrollados a comienzos del siglo XX por el sueco Albert Mauritz Atterberg (1846-1916).

Atterberg trabajaba en la industria de la cerámica y había desarrollado pruebas sencillas para describir la plasticidad de una arcilla. Esta propiedad es importante para el modelado y evita la contracción y agrietamiento cuando se hornea. Observó que la plasticidad no era una propiedad permanente en las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua.

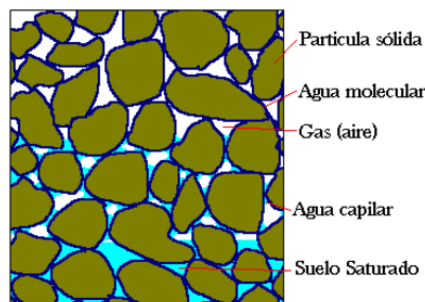
“Cuando mezclamos polvo de arcilla con mucho agua, obtenemos una pasta arcillosa fluida. Con menos agua la pasta fluye pero es más densa. Evaporando el agua, la arcilla pasa gradualmente a una masa pegajosa (se pega a los dedos, madera o metales). Luego desaparece la pegajosidad y la arcilla puede ser fácilmente moldeada sin pegarse a los dedos, este es el denominado estado plástico. Con un desecamiento aún mayor, la masa de suelo puede desmenuzarse, y los pedazos pueden ser unidos nuevamente bajo presión considerable. Finalmente se pierde incluso ésta condición (masa dura y rígida)”. Según Atterberg en el año 1911.

Atterberg encontró que, para expresar adecuadamente la plasticidad, se requieren dos parámetros (los límites superior e inferior de plasticidad) en lugar de uno solo, como hasta su época se había creído; además señaló tales parámetros y un modo tentativo de evaluarlo, que se describe adelante.

Atterberg definió la plasticidad como la capacidad de un suelo de ser deformado, y observó que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, que los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos duros con el secado, y que las arenas son desmenuzables en condiciones sueltas y secas. También observó que existían arcillas altamente plásticas y otras de baja plasticidad.

La plasticidad en los suelos involucra las etapas de formar una masa de material y moldearla hasta adquirir la forma que se desee, manteniéndola después que la fuerza deformante ha cesado, e incluso cuando el agua ha sido removida. Esta característica varía con la naturaleza mineralógica de la arcilla, el tamaño, la forma y orientación de las partículas del suelo, ya que es un fenómeno relacionado con las películas de agua alrededor de éstas.

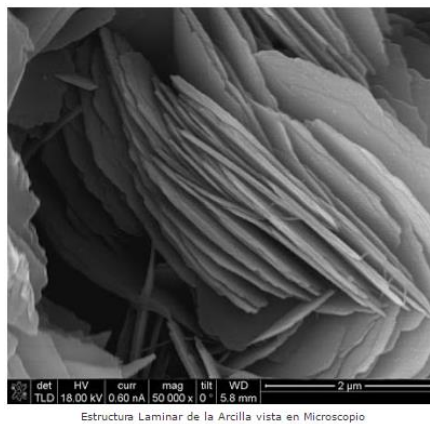
Figura 1. **Esquema de una muestra de suelo**



Fuente: *La plasticidad de las arcillas*. <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>. Consulta: 05 de abril de 2 016.

Las partículas gruesas no exhiben plasticidad, Atterberg fue el primero en reportar que las partículas laminares eran las más plásticas, o sea, que la plasticidad era función de la cantidad de superficie y número de contactos, por superficie disponible.

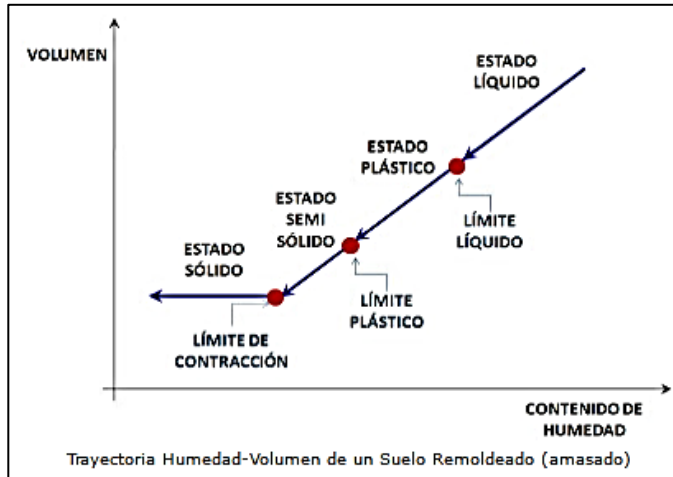
Figura 2. **Estructura laminar de las partículas de arcilla**



Fuente: *La plasticidad de las arcillas*. <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>. Consulta: 05 de abril de 2 016.

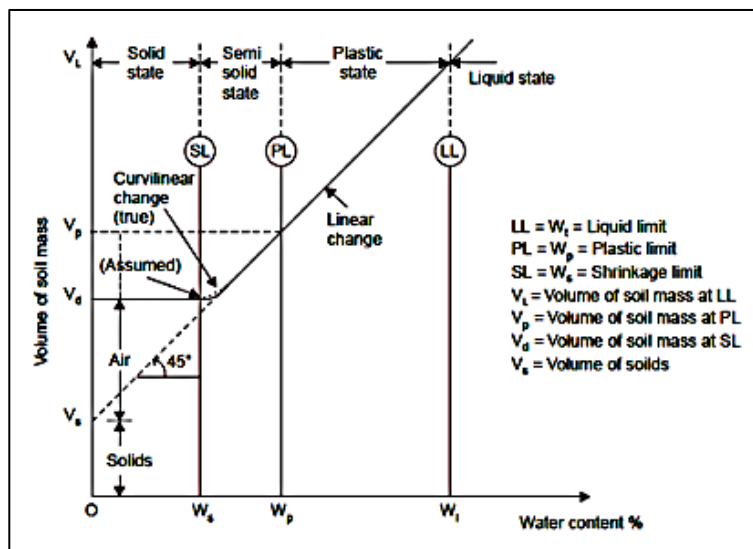
Atterberg observó que las arcillas mezcladas con gran cantidad de agua formaban un fluido apenas viscoso. Con menor cantidad de agua se volvía un fluido con una cierta rigidez que se tornaba pegajoso. Con la evaporación de mayor cantidad de agua la pegajosidad desaparecía y la arcilla podía ser deformada como se quisiera. Existía, entonces, un punto donde, con el incremento de la evaporación, la propiedad de ser deformada se perdía. De aquí estableció distintos estados de consistencia de los suelos plásticos que se muestran en la siguiente figura:

Figura 3. Estados de consistencia de los suelos plásticos



Fuente: *La plasticidad de las arcillas*. <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>. Consulta: 05 de abril de 2 016.

Figura 4. Esquema de los estados de consistencia de los suelos



Fuente: *La plasticidad de las arcillas*. <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>. Consulta: 05 de abril de 2 016.



### 1.1.2. Los límites de Atterberg

Atterberg definió los siguientes estados de consistencia según el contenido de agua en orden decreciente, para un suelo susceptible de ser plástico:

- Estado líquido, con las propiedades y apariencia de suspensión.
- Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- Estado plástico, en el que el suelo se comporta plásticamente, es decir, se puede moldear y deformar sin exhibir propiedades elásticas, cambios de volumen o agrietamiento.
- Estado semisólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido pero disminuye de volumen al ser secado.
- Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

A partir de los diferentes estados, Atterberg definió varios límites de consistencia o comportamiento, que se constituyen en las primeras convenciones para su designación y desarrolló pruebas sencillas de laboratorio para determinarlos:

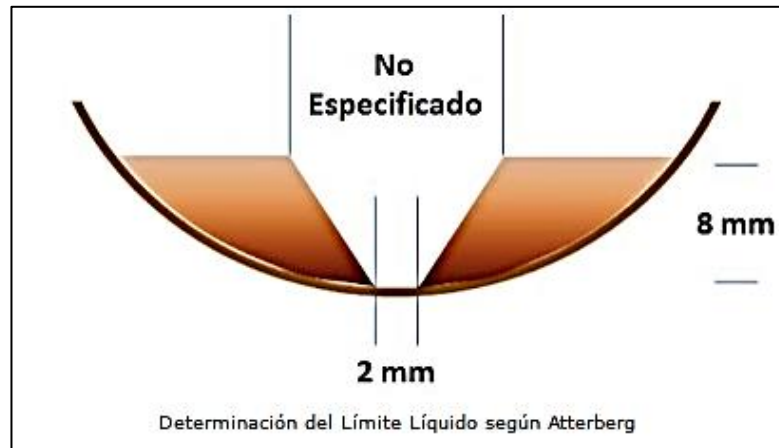
- Límite superior de flujo viscoso.
- Límite líquido - límite inferior de flujo viscoso.
- Límite de endurecimiento - la arcilla pierde su adherencia a una placa metálica.
- Límite de cohesión - los granos dejan de ser coherentes entre sí.
- Límite plástico - límite inferior del estado plástico.
- Límite de contracción - límite inferior de cambio de volumen.

Para diferenciar los estados de consistencia antes descritos, Atterberg estableció límites que establecían la diferenciación, los cuales son:

- El mayor límite de un fluido viscoso, con el que una mezcla de arcilla y agua fluye casi como el agua.
- El menor límite de un fluido viscoso, el “límite líquido”, donde dos secciones de suelo amasado, puestos en un recipiente cóncavo, apenas se tocan bajo el impacto de varios golpes secos.
- El “límite de pegajosidad” en el cual la arcilla pierde las propiedades adhesivas y cesa la pegajosidad con otros objetos, como por ejemplo hojas metálicas, cuchillas de arado, orugas de tractores, etc.
- El “límite de cohesión”, en el cual los granos de suelo cesan de unirse unos con otros.
- El menor límite del estado plástico, o “límite plástico”, donde un suelo se desagrega cuando es enrollado en bastoncitos.
- El menor límite de cambio de volumen o “límite de contracción”, en que la pérdida de humedad no causa pérdida de volumen.

Atterberg llamó a la frontera entre los estados semilíquido y plástico, Límite líquido, que definió en términos de cierta técnica de laboratorio que consistía en colocar el suelo remoldeado en una cápsula formando en él una ranura, según se muestra en la figura a continuación, y en hacer cerrar la ranura golpeando secamente la cápsula contra una superficie dura. El suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, según Atterberg, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocaban, sin mezclarse al cabo de un cierto número de golpes.

Figura 5. **Esquema en corte de la copa de Casagrande**



Fuente: *La límites de Atterberg*. <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>. Consulta: 05 de abril de 2016.

Este procedimiento era suficiente para Atterberg, quien dirigía un laboratorio con personal entrenado por él mismo. Sin embargo, muchos otros detalles no se especificaban y la experiencia demuestra que son muy importantes para el resultado de la prueba.

Atterberg llamó a la frontera convencional entre los estados plástico y semisólido límite plástico y definido también en términos de una manipulación de laboratorio. Este investigador enrollaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro de espesor no especificado; el agrietamiento y desmoronamiento del rollo, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico y el contenido de agua en tal momento era la frontera deseada.

Esta prueba igual que la de límite líquido presentan el mismo inconveniente al realizarlas en otros laboratorios diferentes al de Atterberg. A las fronteras anteriores, que definen el intervalo plástico del suelo se les ha llamado límites de plasticidad.

Atterberg consideraba que la plasticidad del suelo quedaba determinada por el límite líquido y por la cantidad máxima de una cierta arena, que podía ser agregada al suelo, estando éste con el contenido de agua correspondiente al límite líquido, sin que perdiera, por eso, su plasticidad.

Años después, con el propósito de estandarizar la prueba, Terzaghi (1926) estableció el diámetro de la tira en 3,2 mm o 1/8 pulgada. Además, encontró que la diferencia de los valores entre los límites de plasticidad, llamada índice plástico, se relacionaba fácilmente con la cantidad de arena añadida y eran más fáciles de determinar por lo cual sugirió que se usaran en lugar de la arena, como segundo parámetro para definir la plasticidad.

Según Atterberg, el Índice de Plasticidad, corresponde a un rango de contenido de humedad en el cual el suelo es plástico. Fue el primero en sugerir que éste podía ser útil en la clasificación de suelos.

Atterberg consideró que la cantidad de arena que podía ser agregada en el límite líquido sin causar la pérdida completa de la plasticidad en el suelo, era una medida de la plasticidad de un suelo. Encontró que la diferencia entre el límite líquido ( $\omega_l$ ) y el límite plástico ( $\omega_p$ ), denominado índice de plasticidad (IP), representaba una medida satisfactoria del grado de plasticidad de un suelo relacionándolo con la arena incorporada. Luego, sugirió que estos dos límites ( $\omega_l$  y  $\omega_p$ ) servían de base en la clasificación de los suelos plásticos.

De acuerdo con el valor del índice de plasticidad, distinguió los siguientes materiales:

- Suelos friables o desmenuzables (IP < 1)
- Suelos débilmente plásticos (1 < IP < 7)
- Suelos medianamente plásticos (7 < IP < 15)
- Suelos altamente plásticos (IP > 15)

Atterberg definió el Límite de adhesión como el contenido de agua con el que la arcilla pierde sus propiedades de adherencia con una hoja metálica, por ejemplo, una espátula. Esta prueba es muy importante en la agricultura, porque permite determinar el grado de trabajabilidad de la maquinaria sobre el terreno.

El Límite de cohesión fue definido como el contenido de agua con el que los grumos de arcilla ya no se adhieren entre sí.

El Límite de contracción corresponde a la frontera entre los estados de consistencia, semisólido a sólido y fue definido por Atterberg como el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando. Este se manifiesta por un cambio característico de tono oscuro a más claro que el suelo presenta en su proximidad, al secarse gradualmente. Atterberg lo determinaba efectuando mediciones durante el proceso de contracción. Los Límites de Atterberg son adoptados por la Geotecnia.

A comienzos del siglo XX en Estados Unidos y Suecia, se intentó, por primera vez en forma sistemática y organizada, realizar estudios que corrigieran vicios de práctica en el tratamiento de los suelos. En enero de 1919, la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles designó un "Comité Especial para hacer un Código sobre la Práctica Actual en Relación a la Capacidad de Carga

de los Suelos". La Comisión Geométrica de Ferrocarriles del Estado Sueco se instituyó en diciembre de 1913 a causa de los repetidos deslizamientos a lo largo de las líneas del ferrocarril y se pueden considerar como uno de los hitos de la mecánica de suelos moderna.

### **1.1.3. Límite Líquido por método de penetrómetro de cono (BS 1377:1990)**

El límite líquido de un suelo se puede determinar mediante el penetrómetro de cono o el aparato de Casagrande (BS 1377:1990: parte 2, las cláusulas 4.3, 4.5). Uno de los principales cambios introducidos por la British Standard del año 1975 (BS 1377) fue que el método preferido de la prueba límite líquido se convirtió en el penetrómetro de cono. Esta preferencia se refuerza en la British Standard del año 1990 que se refiere al penetrómetro de cono como el "método definitivo". El penetrómetro de cono se considera un método más satisfactorio que el método alternativo (copa de Casagrande), porque es esencialmente una prueba estática que se basa en la resistencia al corte del suelo, mientras que el método de copa Casagrande introduce efectos dinámicos.

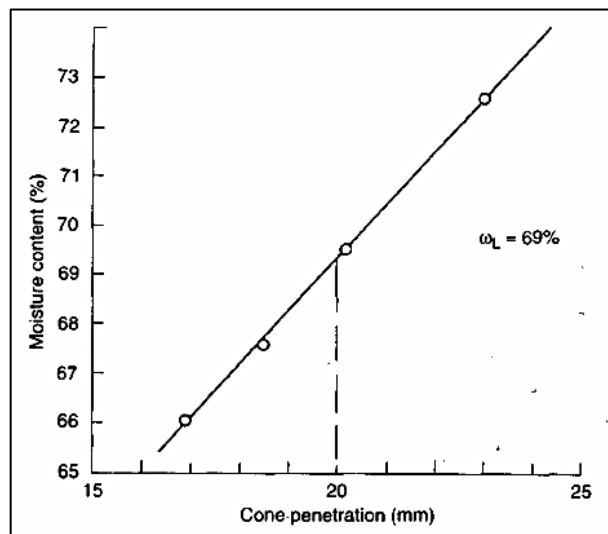
En la prueba de penetrómetro, el límite líquido del suelo es el contenido de humedad a la que un cono de 80 g de peso y 30° internos, se hunde exactamente 20 mm en una taza de suelo remoldeado, en un periodo de 5 segundos. En este contenido de humedad el suelo será muy suave.

Al determinar el límite líquido con la copa de Casagrande, la base de la copa se llena con suelo y se hace, entonces, una ranura a través del suelo hasta la base de la copa.

El aparato está dispuesto para permitir que la copa de metal se levante varias veces 10 mm y se deje caer libremente en su base de goma a una velocidad constante de dos golpes por segundo. El límite líquido es el contenido de humedad de un suelo cuando 25 golpes causan 13 mm de cierre de la ranura en la base de la copa. El límite líquido se determina, generalmente, mediante la mezcla del suelo y un contenido de humedad en el que se obtiene el límite líquido por interpolación entre cuatro puntos (Fig. 6).

La prueba de límite plástico depende en gran medida de la habilidad del operador y, además, sufre de problemas de mantenimiento del aparato. Estas dos pruebas fueron objeto de un programa de pruebas comparativas llevadas a cabo en el Reino Unido y reportado por el autor Sherwood en 1 970.

Figura 6. **Interpolación de 4 puntos para límite líquido por penetrómetro de cono**



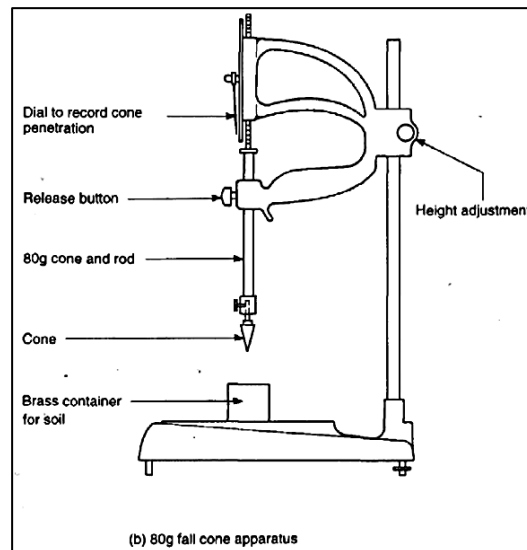
Fuente: CLAYTON C.R.I., MATTHEWS M.C., SIMONS N.E. *Site Investigation*. Capítulo 8, p.8.

Figura 7. **Cono de penetración, en el ensayo de Penetrómetro de cono**



Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012.* p.37.

Figura 8. **Diagrama del sistema del aparato de Casagrande / penetrómetro de cono**



Fuente: CLAYTON C.R.I., MATTHEWS M.C., SIMONS N.E., *Site Investigation.* Capítulo 8, p.7.



La técnica del operador puede afectar esta prueba, sobre todo porque se ha observado que, después de mezclar inicialmente el suelo con agua, el límite líquido, tiende a dar resultados superiores. (BS 1377: Parte 2 1990, cláusula 4.3 Se describe eliminar este efecto mediante un lapso de 24 horas, período de saturación entre la mezcla inicial del suelo con agua, y llevar a cabo la prueba de límite líquido) El requisito es que cada parte de la prueba debe ser repetible dentro de límites fijos; sin embargo, conduce a un resultado mucho mejor. En análisis reportados por los autores Sherwood y Ryley, la variabilidad se reduce mucho por el método de penetrómetro de cono. No se conocen los efectos de la técnica del operador entre las causas de la prueba.

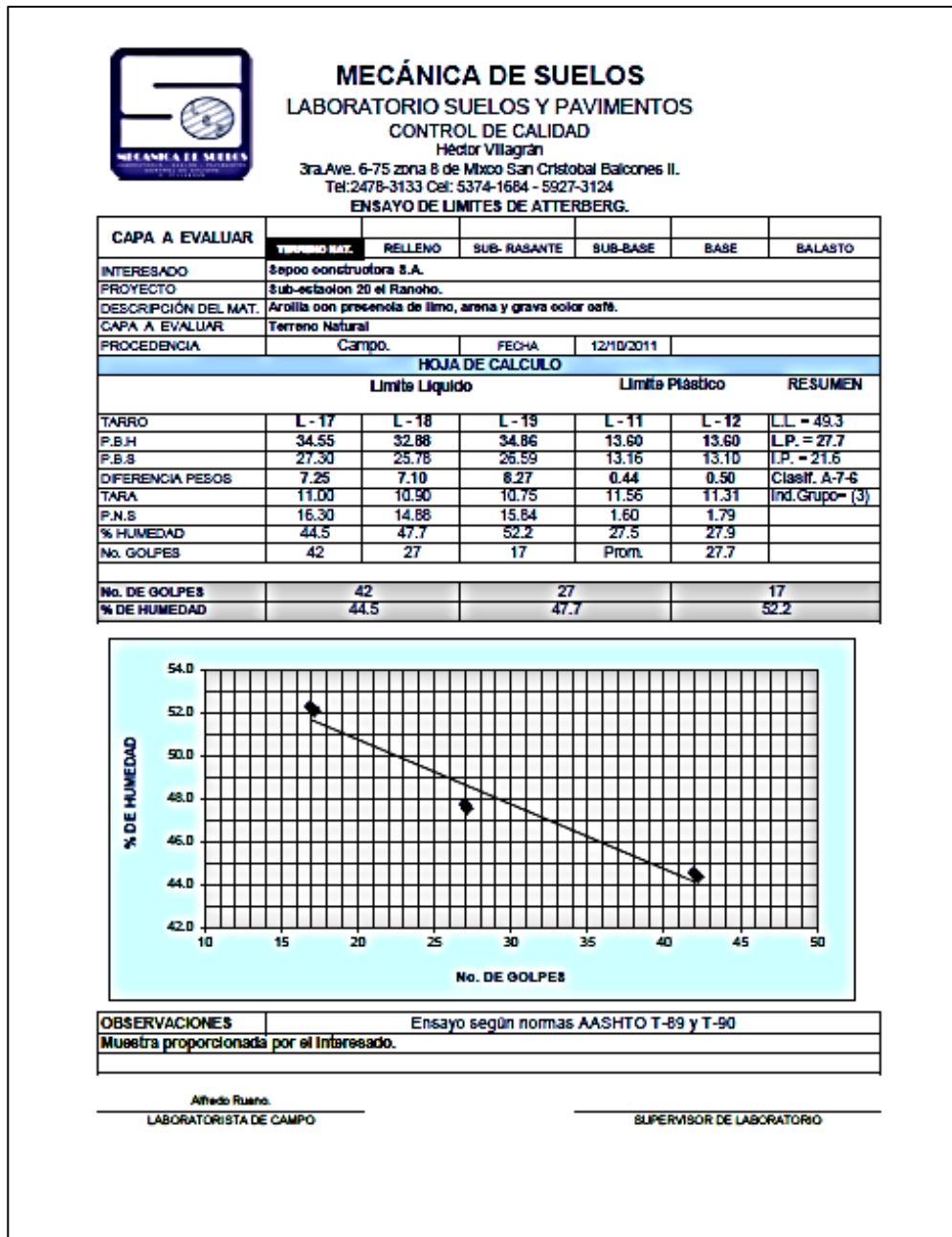
#### **1.1.4. Determinación del límite líquido y clasificación de los suelos de grano fino en Guatemala**

En Guatemala, el parámetro de límite líquido está determinado por el método de la copa de Casagrande por los siguientes métodos:

- Ecuación de lambe
- Método de 4 puntos, curva de flujo

Se llevó a cabo un sondeo en laboratorios del municipio de Guatemala y Amatitlán, que ofrecen servicios de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y se determinó que el método de determinación del parámetro de límite líquido se realiza con el equipo de la copa de Casagrande, para lo que se rigen por las normas AASHTO T-89 y T-90, ASTM D 4318.

Figura 9. Límites de Atterberg, Mecánica de Suelos, laboratorio suelos y pavimentos, control de calidad, Héctor Villagrán



Fuente: Base de datos, Mecánica de Suelos, laboratorio suelos y pavimentos, control de calidad, Héctor Villagrán.

Figura 10. Límites de Atterberg, Laboratorio Ceballos

**CEBALLÓS**

LABORATORIO

11 avenida A 7-11 Zona 2  
laboratorioceballos@gmail.com  
Tel: (502) 5874-8810  
Guatemala, C.A.

### LÍMITES DE CONSISTENCIA

**PROYECTO:**

**LUGAR:**

#### LÍMITE LIQUIDO

Número de Golpes					
Peso de Tarro (gr.)					
Tarro No.					
Peso Tarro + suelo húmedo (gr.)					
Peso Tarro + suelo seco (gr.)					
Diferencia * peso de agua (gr.)					
Peso suelo seco (gr.)					
Contenido de humedad en %					

#### LÍMITE PLÁSTICO

Determinación No		
Peso de Tarro (gr.)		
Tarro No		
Peso Tarro + suelo húmedo (gr.)		
Peso Tarro + suelo seco (gr.)		
Diferencia * peso de agua (gr.)		
Peso suelo seco (gr.)		
Contenido de humedad en %		

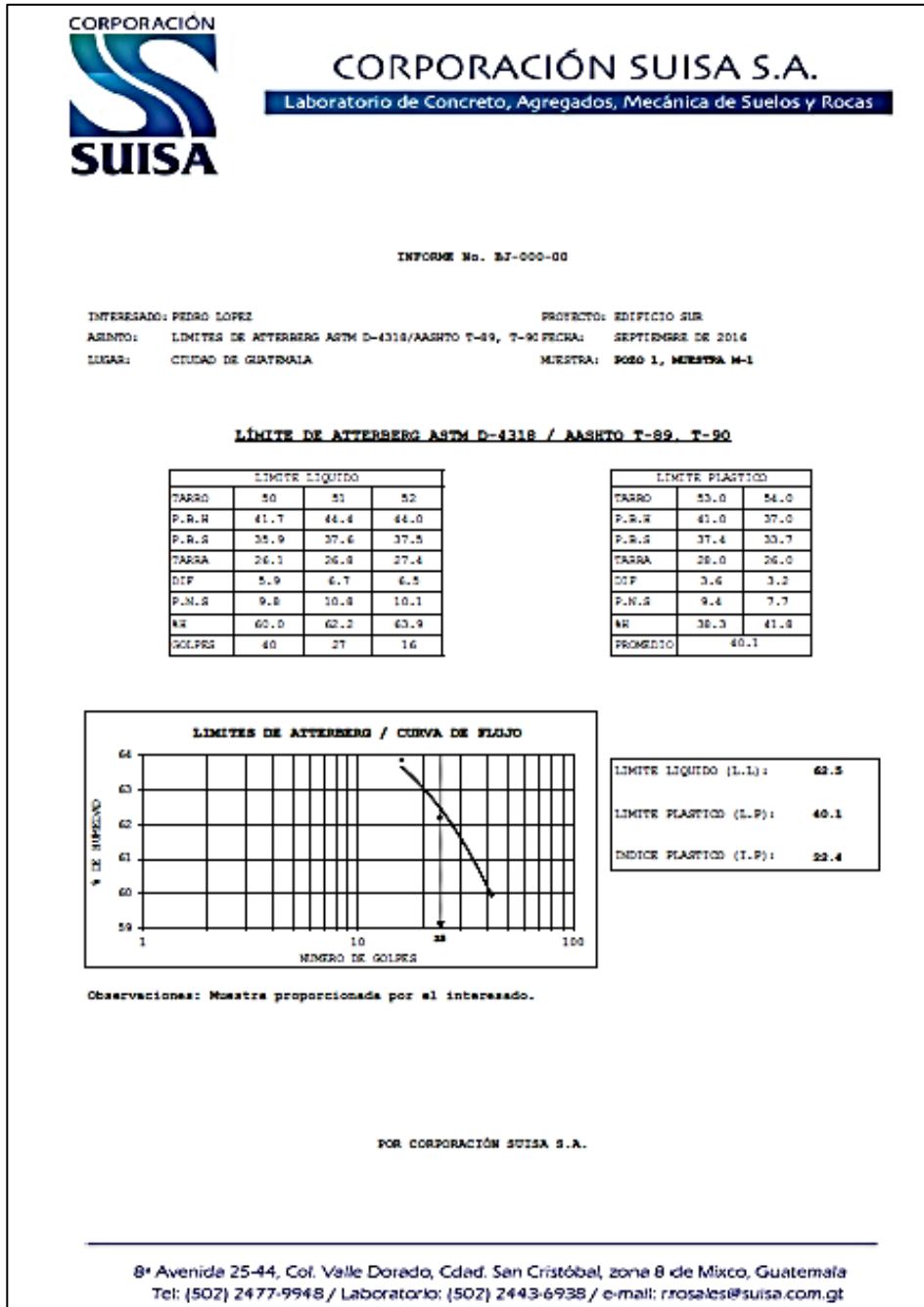
#### LÍMITE LIQUIDO

NORMATIVA UTILIZADA:  
AASHTO T-89, AASHTO T-90, ASTM D4318

LÍMITE LIQUIDO                    %  
LÍMITE PLÁSTICO                %  
ÍNDICE PLÁSTICO                %

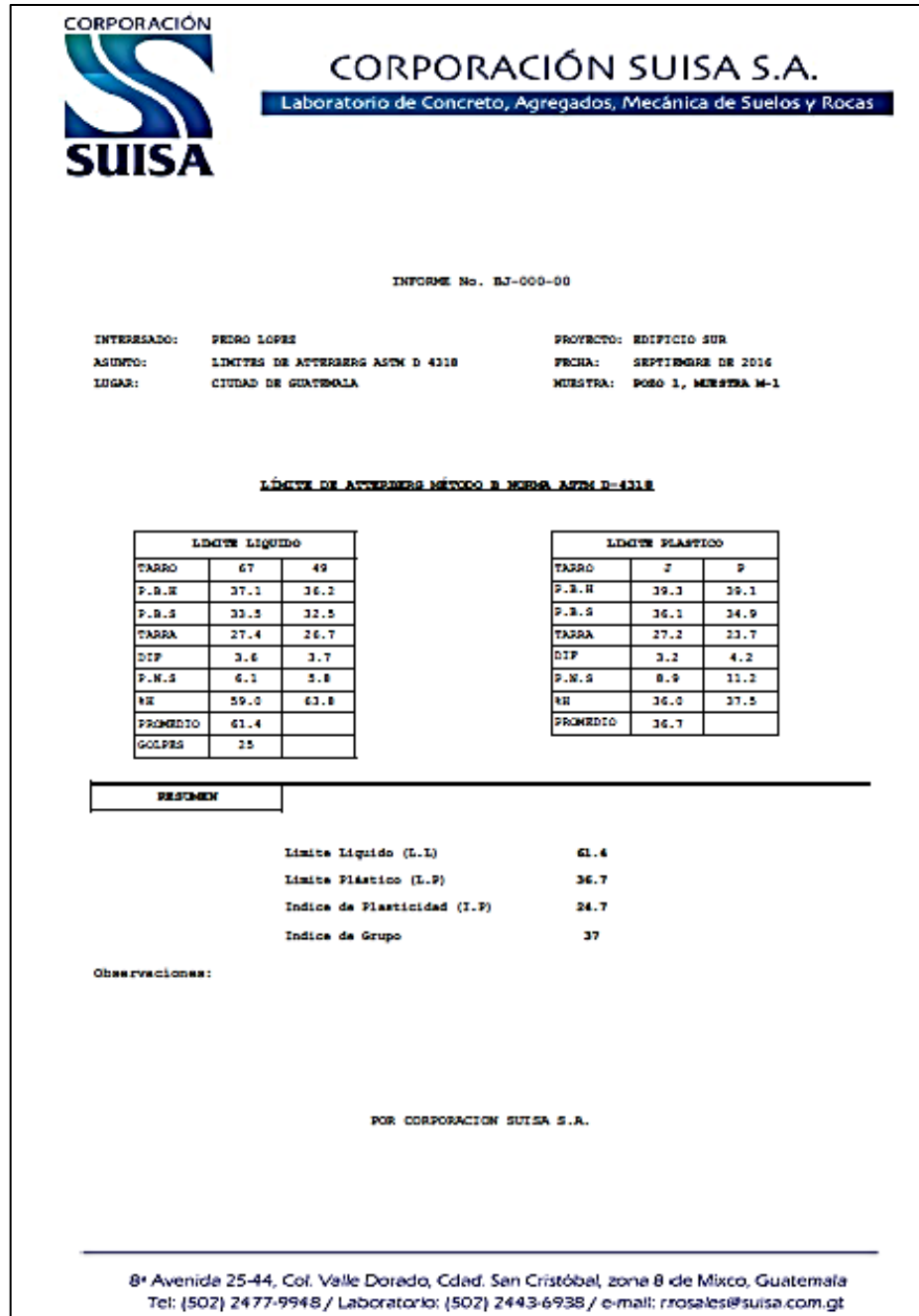
Fuente: Laboratorio Ceballos.

Figura 11. Límites de Atterberg, Corporación Suisa S.A./Curva de flujo



Fuente: Base de datos, Corporación Suisa, S.A.

Figura 12. Límites de Atterberg, Corporación Suisa S.A./Ecuación de Lambe




Fuente: Base de datos, Corporación Suisa, S.A.

Figura 13. Límites de Atterberg, Centro de Investigaciones de Ingeniería FIUSAC



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



---

INFORME No. 489 S.S.

O.T.: 36.747

No. 09815

**Interesado:** Mario Raúl Pacay García - 200815572

**Proyecto:** Trabajo de Graduación "Limite Líquido en Suelos de Grano Fino, Según los Métodos de Penetrómetro de Cono y Copa de Casagrande"

**Asunto:** ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

**Norma:** AASHTO T-89 Y T-90

**Ubicación:** Universidad de San Carlos de Guatemala

**FECHA:** viernes, 25 de noviembre de 2016

**RESULTADOS:**

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO (Según Granulometría)
1	Puerto Barrios	67,6	47,2	20,4	MH	Arcilla Color Gris
2	San Mateo Ixtán, Huehuetenango	100,1	31,4	68,7	MH	Arcilla Color Gris
3	Cobán, Alta Verapaz	91,8	42,0	49,8	MH	Arcilla Color Café Oscuro
4	Estanzuela, Zacapa	53,2	20,1	33,1	CH	Arcilla Arenosa Color Café Oscuro
5	San Juan Cotzal, Quiché	59,4	30,2	29,2	CH	Arcilla Color Café
6	Cobán, Alta Verapaz	66,3	28,1	38,2	CH	Arcilla Color Café Claro

(\*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.



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

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

Atentamente,

Vo.Bo.

*Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CIIUSAC



---

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://cil.usac.edu.gt>

Fuente: Base de datos, Centro de Investigaciones FIUSAC/Sección Mecánica de Suelos.

Figura 14. Límites de Atterberg, LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD, Ing. Álvaro C. Guillermo

<b>Ing. Alvaro C. Guillermo</b> <small>S.C. Lote 4 "A", Col. El Bosque                  Amatlán, Tel. 9126-7466</small>	<b>LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD</b> Límite Líquido y Límite Plástico (Límites de Consistencia) AASHTO T - 89 y T - 90	<b>Asfalto, Pavimentos y                  Control de Calidad de                  Guatemala</b>					
PROYECTO: _____ ENTREGADO: _____ RANCO: _____ ESTACION: _____ FECHA: _____ CLASE DE MATERIAL: _____ CARA: _____							
TARA	PESO TARA	TARA + SUELO HÚMEDO	TARA + SUELO SECO	PESO AGUA	SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA	NUMERO DE GOLPES
No.	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	%	
<b>L I M I T E   L I Q U I D O</b>							
<b>L I M I T E   P L A S T I C O</b>							
<b>H U M E D A D   P R O M E D I O</b>							

RESUMEN	
Clasificación SUCS	
Clasificación AASHTO	
Límite Líquido	
Límite Plástico	
Índice de Plasticidad	

OBSERVACIONES:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad, Ing. Álvaro C. Guillermo.

Tabla I. **Normas utilizadas en algunos laboratorios de Mecánica de Suelos en el departamento de Guatemala, para el ensayo de límites de Atterberg**

<b>LABORATORIO</b>	<b>Norma ASTM</b>	<b>Norma AASHTO</b>	<b>British standard</b>
Mecánica de Suelos, laboratorio suelos y pavimentos, control de calidad, Héctor Villagrán	--	AASHTO T89, T90	--
Laboratorio Ceballos	ASTM D 4318	AASHTO T89, T90	--
Corporación Suisa S.A.	ASTM D 4318	AASHTO T89, T90	--
Centro de Investigaciones de Ingeniería FIUSAC	--	AASHTO T89, T90	--
Laboratorio de Control de Calidad, Ing. Álvaro C. Guillermo	--	AASHTO T89, T90	--

Fuente: elaboración propia.

Con base en la tabla anterior se puede asegurar que en Guatemala, no se utiliza el método del penetrómetro de cono para la determinación del límite líquido, el cual está regido por la British Estándar 1377:1990. Se notó que los laboratorios que se analizaron en este estudio utilizan las normas ASTM D 4318, AASHTO T89 y AASHTO T90, las cuales describen el procedimiento de la determinación de límite líquido con copa de Casagrande para límite plástico.

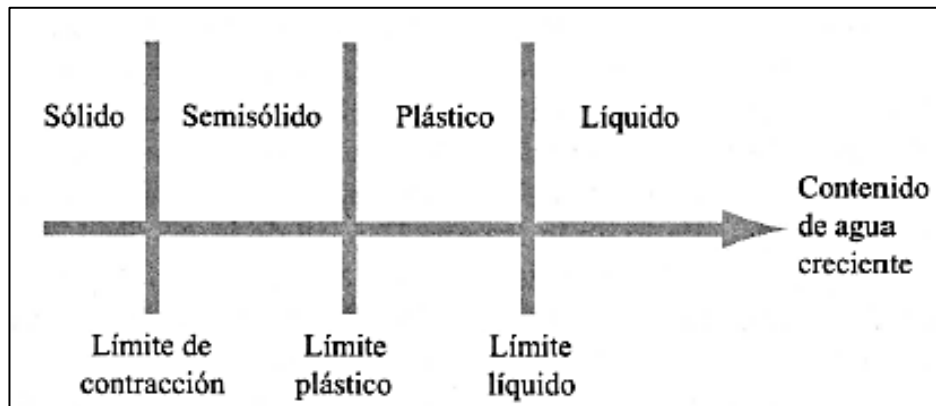


## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos de grano fino

#### 2.1.1. Límite Líquido (LL)

Figura 15. Esquema, estados de consistencia suelos de grano fino



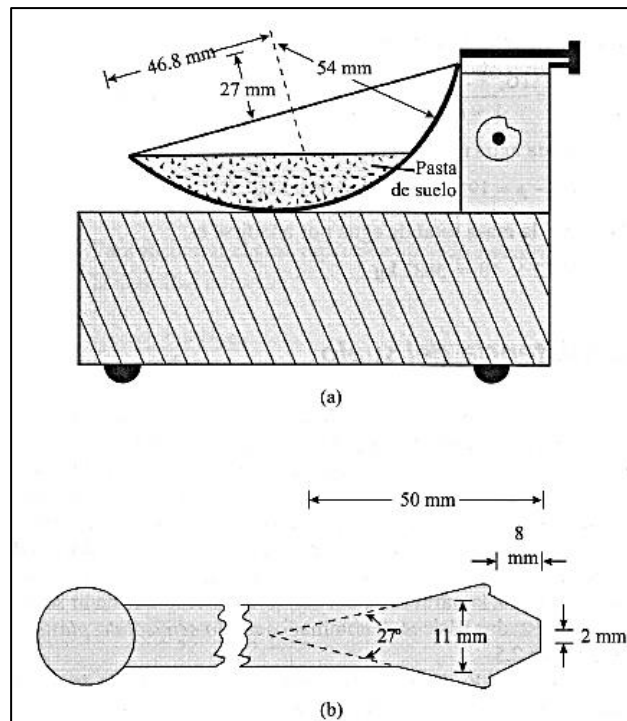
Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.27.

Un diagrama esquemático de un dispositivo para determinar el límite líquido se muestra en la figura 15. Consiste en una copa de bronce y una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una copa de bronce y una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una manivela. Para la prueba del límite líquido se coloca una pasa en la copa. Se corta una ranura en el centro de la pasta de suelo, usando la herramienta de corte estándar (figura 15b). Luego, con la leva operada por la manivela, se levanta la copa y se deja

caer desde una altura de 10mm. El contenido de agua, en porcentaje requerido para cerrar una distancia de 12,7mm a lo largo del fondo de la ranura (véase la figura 17) a los 25 golpes se define como el límite líquido. El procedimiento para la prueba del límite líquido está dado por la Prueba D-4318 de la ASTM.

Casagrande (1932) concluyó que cada golpe de un dispositivo estándar para límite líquido corresponde a una resistencia cortante del suelo de aproximadamente  $1\text{g/cm}^2$  ( $\approx 0,1\text{ kN/m}^2$ ). Por consiguiente, el límite líquido de un suelo de grano fino da con el contenido de agua para el cual la resistencia cortante del suelo es aproximadamente de  $25\text{ g/cm}^2$  ( $\approx 2,5\text{kN/m}^2$ ).

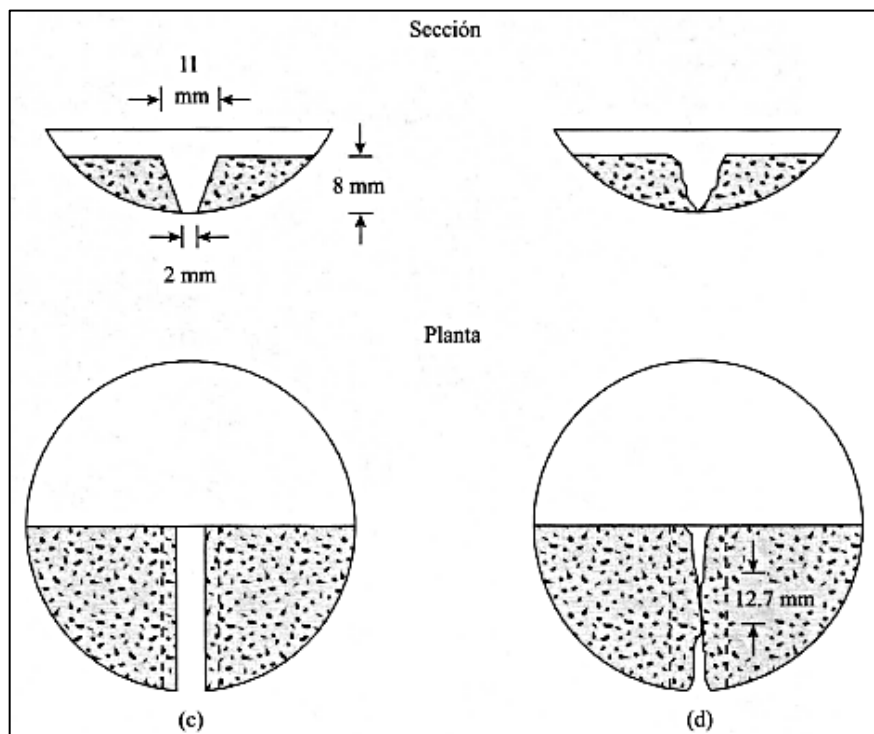
Figura 16. **Esquema copa de Casagrande y Ranurador ASTM**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.28.

Prueba de límite líquido: (a) dispositivo para la prueba; (b) Ranurador; (c) pasta de suelo antes de la prueba; (d) pasta de suelo después de la prueba.

Figura 17. **Esquema representativo de capa de suelo y ranura en copa de Casagrande**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.29.

### 2.1.2. Límite plástico (PL)

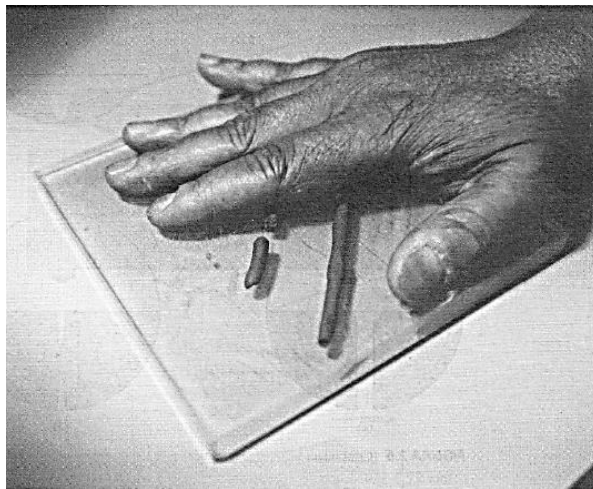
El límite plástico se define como el contenido de agua, el porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3,2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio (figura) una masa de suelo de forma elipsoidal.

El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre límite líquido y el límite plástico de un suelo, o

$$PI = LL - PL$$

El procedimiento para la prueba del límite plástico se da en la prueba D-4318 de la ASTM.

Figura 18. **Límite plástico**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.30.

### 2.1.3. **Límite de Contracción (SL)**

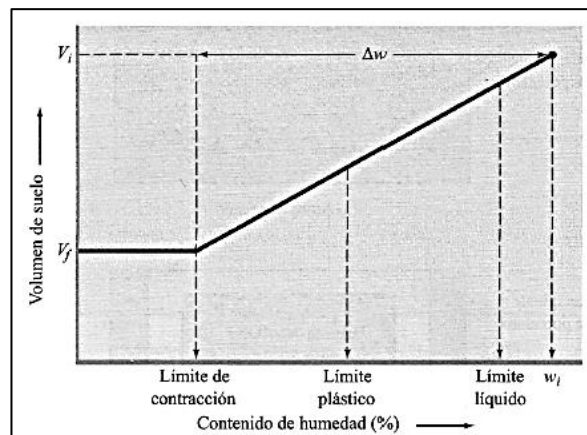
La masa de suelo se contrae conforme se pierde gradualmente el agua del suelo. Con una pérdida continua de agua, se alcanza una etapa de equilibrio en la que más pérdida de agua conducirá a que no haya cambio de volumen (figura 19). El contenido de agua, en porcentaje, bajo el cual el cambio de volumen de la masa del suelo cesa, se define como límite de contracción.

Las pruebas del límite de contracción (Prueba D-427 de la ASTM) se efectúan en el laboratorio con un recipiente de porcelana de, aproximadamente, 44 mm de diámetro y 13 mm de altura. El interior del recipiente está recubierto con aceite de petróleo que luego se llena completamente con suelo húmedo. El exceso de suelo que queda fuera del borde se retira con una regleta. Se registra la masa de suelo húmedo dentro del recipiente. Luego, la masa de suelo en el recipiente se seca en horno. El volumen de la masa de suelo secada en horno se determina por el desplazamiento de mercurio. Como el manejo del mercurio es peligroso, la prueba D-4943 de la ASTM describe un método de inmersión de la masa de suelo seco en una vasija de cera derretida. La masa de suelo revestida de cera es enfriada. Su volumen se determina sumergiéndola en agua.

Con referencia a la figura, determinamos el límite de contracción de la siguiente manera:

$$SL = w_i(\%) - \Delta w (\%)$$

Figura 19. **Definición de límite de Contracción**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. P.31.

Donde:

$w_i$  = Contenido de agua inicial cuando el suelo se coloca en el recipiente del límite de contracción

$\Delta w$  = Cambio en el contenido de agua (es decir, entre el contenido de humedad inicial y el contenido de agua en el límite de contracción)

Sin embargo,

$$w_i (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

Donde

$m_1$  = Masa de suelo húmedo en el recipiente al principio de la prueba (g)

$m_2$  = masa del suelo seco (g)

Además,

$$\Delta w (\%) = \frac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2} \times 100$$

Donde

$V_i$  = volumen inicial del suelo húmedo (es decir, el volumen dentro del recipiente,  $\text{cm}^3$ )

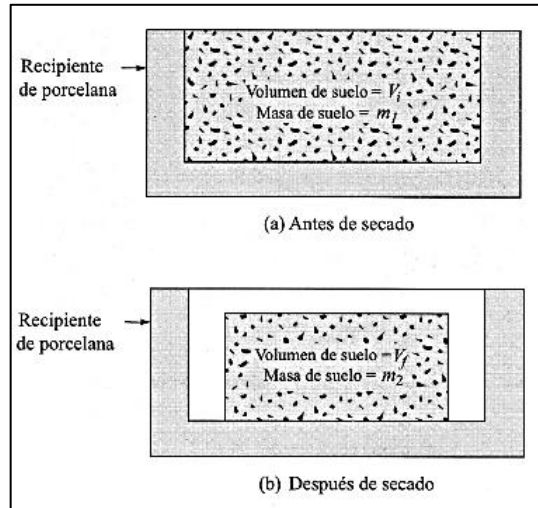
$V_f$  = volumen de la masa de suelo secada en horno ( $\text{cm}^3$ )

$\rho_w$  = densidad del agua ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Ahora cambiando las ecuaciones ( ), ( ) y ( ), tenemos

$$SL = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) (100) - \left[ \frac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2} \right] (100)$$

Figura 20. Prueba de límite de contracción



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.32.

#### 2.1.4. Actividad

Como la propiedad plástica de los suelos resulta del agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla, se puede esperar que el tipo de minerales arcillosos y sus cantidades proporcionales en un suelo afecten los límites líquido y plástico. Skempton en el año de 1953 observó que el índice de plasticidad de un suelo crece linealmente con el porcentaje de la fracción del tamaño arcilloso (porcentaje de granos más finos que  $2\mu$ , en peso) presente en él. Con base en esos resultados, Skempton definió una cantidad llamada actividad, que es la pendiente de la línea que correlaciona el PI con el porcentaje de granos más finos que  $2\mu$ . Esta actividad se expresa como

$$A = \frac{PI}{(\text{porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso, en peso})}$$

Donde A = actividad. La actividad de usa como un índice para identificar el potencial de expansión de los suelos arcillosos. En la tabla II (Mitchell, 1976) se dan valores típicos de actividades para varios minerales arcillosos.

Tabla II. **Actividad de minerales de arcilla**

Mineral	Actividad, A
Esmectitas	1-7
Ilita	0.5-1
Caolinita	0.5
Haloisita (2H <sub>2</sub> O)	0.5
Holoisita (4H <sub>2</sub> O)	0.1
Atapulgita	0.5-1.2
Alófano	0.5-1.2

Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.32.

### 2.1.5. Índice de liquidez

La consistencia relativa de un suelo cohesivo en estado natural se define por una razón llamada índice de Liquidez (LI):

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL}$$

Donde w = contenido de agua en el suelo in situ.

El contenido de agua in situ de una arcilla sensitiva es mayor que el límite líquido. En tal caso LI >1.



Esos suelos, al remoldearlos, se transforman en una forma viscosa que fluye como un líquido.

Los depósitos de suelos que están fuertemente sobreconsolidados tienen un contenido de agua natural menor que el límite plástico. En ese caso,  $LI < 1$ . Los valores del índice de liquidez para algunos de esos suelos son negativos.

### **2.1.6. Carta de plasticidad**

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Estas pruebas son usadas ampliamente por ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo así como para la identificación del mismo. Casagrande (1932) estudió la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Con base en los resultados de pruebas, propuso una carta de plasticidad que muestra la figura 21. La característica importante de esta carta es la línea A empírica dada por la ecuación  $PI = 0,73 (LL - 20)$ . La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Las gráficas de los índices de plasticidad contra límites líquidos para las arcillas inorgánicas se encuentran arriba de la línea A y aquellas para limos inorgánicos se hayan debajo de la línea A. Los limos orgánicos se grafican en la misma región (debajo de la Línea A y con el LL varían entre 30 y 50) que los limos inorgánicos de compresibilidad media.

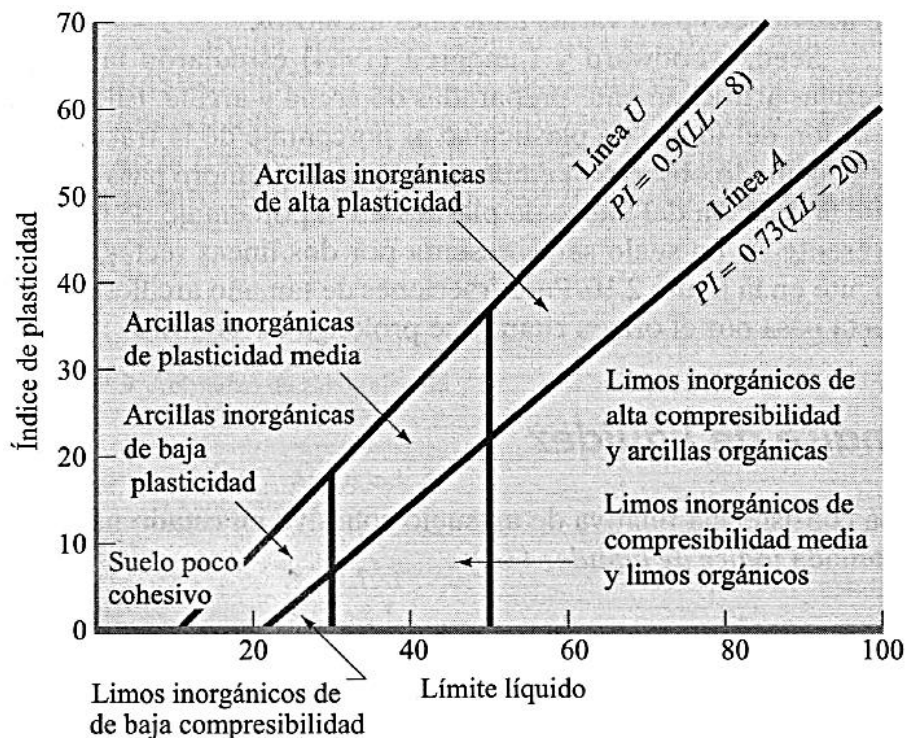
Las arcillas orgánicas se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (debajo de la línea A y LL mayor que 50). La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la

base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Nótese que una línea llamada línea U se encuentra arriba de la línea A. La línea U es aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad respecto al imite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora. La ecuación para la línea U se da como

$$PI = 0.9(LL - 8)$$

Figura 21. Carta de plasticidad



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.34.

### **2.1.7. Clasificación del suelo**

Los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en su comportamiento ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar, en forma concisa, las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada. Actualmente, dos sistemas de clasificación que usan la distribución por tamaño de grano y plasticidad de los suelos son usados comúnmente por los ingenieros de suelos. Estos son el Sistema de Clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de suelos. El Sistema AASHTO lo usan principalmente los departamentos de caminos estatales y de condados, mientras que los ingenieros geotécnicos usualmente prefieren el Sistema Unificado.

### **2.1.8. Sistema de clasificación AASHTO**

Este sistema de clasificación se desarrolló en 1929 como el *Public Road Administration Classification System* (Sistema de Clasificación de la Oficina de Caminos Públicos). Ha sufrido varias revisiones, con la versión actual propuesta por el *Committee on Classification of Materials for Subgrades and Granular Type Roads of the Highway Research Board* (Comité para la Clasificación de Materiales para Subrasantes y Caminos Tipo Granulares del Consejo de Investigaciones Carreteras) en 1945 (Prueba D-3282 de la ASTM; método AASHTO M145).

El Sistema de Clasificación AASHTO, actualmente en uso, se muestra en la tabla 22. De acuerdo con este, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35 % o menos de las partículas pasan por la criba núm. 200.

Los suelos de los que más del 25 % pasan por la criba núm. 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 Y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

- Tamaño del grano
  - Grava: fracción que pasa la mala de 75 mm y es retenida en la malla núm. 10 (2 mm) de Estados Unidos.
  - Arena: fracción que pasa la malla núm. 10 (2 mm) U.S. y es retenida núm. 200 (0,075 mm) U.S.
  - Limo y arcilla: fracción que pasa la malla núm. 200 U.S.
- Plasticidad: el término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un índice de 11 o mayor.
- Si cantos rodados y boleos (tamaños mayores que 75 mm) están presentes, estos se excluyen de la muestra de suelo que se está clasificando. Sin embargo, el porcentaje de tal material se registra.

Figura 22. Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras, materiales granulares

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla No. 200)						
	A-1			A-2			
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por cribado (porcentaje que pasa las mallas)							
No. 10	50 máx.						
No. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
No. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción que pasa la malla No. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos							
	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Tasa general de los subrasantes			De excelente a bueno				

Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.36.

Figura 23. **Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras, materiales limo-arcilla**

Clasificación general	Materiales limo-arcilla (más del 35% de la muestra que pasa la malla No. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Clasificación de grupo				
Análisis por cribado (porcentaje que pasa por las mallas)				
No. 10				
No. 40				
No. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa por la malla No. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Tasa general de los sobrantes	De mediano a pobre			
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$				
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$				

Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.36.

Para clasificar un suelo de acuerdo con la tabla XX, los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por un proceso de eliminación, el primer grupo de izquierda en el que los datos de prueba se ajusten, es la clasificación correcta.

Para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasante de carreteras, se incorpora también un número llamada Índice de Grupo (GI) junto con los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe

en paréntesis después de la designación de grupo o de subgrupo. El índice de grupo está dado por la ecuación

$$GI = (F - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F - 15)(PI - 10)$$

Donde

F = por ciento que pasa la malla núm. 200

LL = Límite líquido

P = Índice de plasticidad

El primer término de la ecuación índice de grupo (GI), es decir,  $(F - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)]$ , es el índice de grupo parcial determinado a partir del límite líquido. El segundo término, es decir  $0,01(F - 15)(PI - 10)$ , es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad. A continuación, se presentan algunas reglas para determinar el índice de grupo:

- Si la ecuación índice de grupo da un valor negativo para GI, éste se toma igual a 0.
- El índice de grupo calculado con la ecuación se redondea al número entero más cercano.
- No hay un límite superior para el índice de grupo
- El índice de grupo de suelos que pertenecen a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, y A-3 siempre es 0
- Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, use el índice de grupo parcial para PI, o

$$GI = 0,01(F - 15)(PI - 10)$$

En general, la calidad del comportamiento de un suelo como material para subrasantes es inversamente proporcional al índice de grupo.

### **2.1.9. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos**

La forma original de este sistema fue propuesto por Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial. En cooperación con la Oficina de Restauración de Estados Unidos, el sistema fue revisado en 1952. En la actualidad, es ampliamente usado por los ingenieros (Prueba D-2487 de la ASTM). El Sistema Unificado de Clasificación se presenta en las tablas 22, 23 y 24; clasifica los suelos en dos amplias categorías:

- Suelo de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50 % pasando por la malla núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.
- Los suelos de grano fino con 50 % o más, pasando por la malla núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos son también usados para la clasificación:

W: bien graduado

P: mal graduado

L: baja plasticidad (límite líquido menos que 50)

H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50)



Figura 24. **Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos tipo grava**

Símbolo de grupo	Criterios
GW	Menos de 5% pasa la malla No. 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual que 4; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
GP	Menos de 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para GW
GM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12) o el índice de plasticidad menor que 4
GC	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12); índice de plasticidad mayor que 7
GC-GM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura 2.12
GW-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GM
GW-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GC
GP-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GM
GP-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GC

Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.39.

Figura 25. **Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de grupo para suelos arenosos**

<b>Símbolo de grupo</b>	<b>Criterios</b>
SW	Menos de 5% pasa la malla No. 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual a 6; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
SP	Menos de 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para SW
SM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12); o índice de plasticidad menor que 4
SC	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican arriba de la línea A (figura 2.12); índice de plasticidad mayor que 7
SC-SM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura 2.12
SW-SM	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SM
SW-SC	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SC
SP-SM	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SM
SP-SC	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SC

Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.40.

Figura 26. **Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos**

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI > 7$ ; se grafica sobre o arriba de la línea <i>A</i> (véase zona CL en la figura 2.12)
ML	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI < 4$ ; o se grafica debajo de la línea <i>A</i> (véase la zona ML en la figura 2.12)
OL	Orgánico; $LL - \text{seco en horno} / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$ ; $LL < 50$ (véase zona OL en la figura 2.12)
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$ ; $PI$ se grafica sobre o arriba de la línea <i>A</i> (véase la zona CH en la figura 2.12)
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$ ; $PI$ se grafica debajo de la línea <i>A</i> (véase la zona MH en la figura 2.12)
OH	Orgánico; $LL - \text{seco en horno} / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$ ; $LL \geq 50$ (véase zona OH en la figura 2.12)
CL-ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada en la figura 2.12
Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos

Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.40.

Para una clasificación apropiada con este sistema, debe conocerse algo o todo de la información siguiente:

- Porcentaje de grava, es decir, la fracción que pasa la malla de 76,2 mm y es retenida en la malla núm. 4 (abertura de 4,75 mm)
- Porcentaje de arena, es decir, la fracción que pasa la malla núm. 4 (abertura de 4,75 mm) y es retenida en la malla núm. 200 (abertura de 0,075 mm)
- Porcentaje de limo y arcilla, es decir, la fracción de finos que pasan la mala núm. 200 (abertura de 0,075 mm)

- Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y coeficiente de curvatura ( $C_z$ )
- Límite líquido e índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla núm. 40

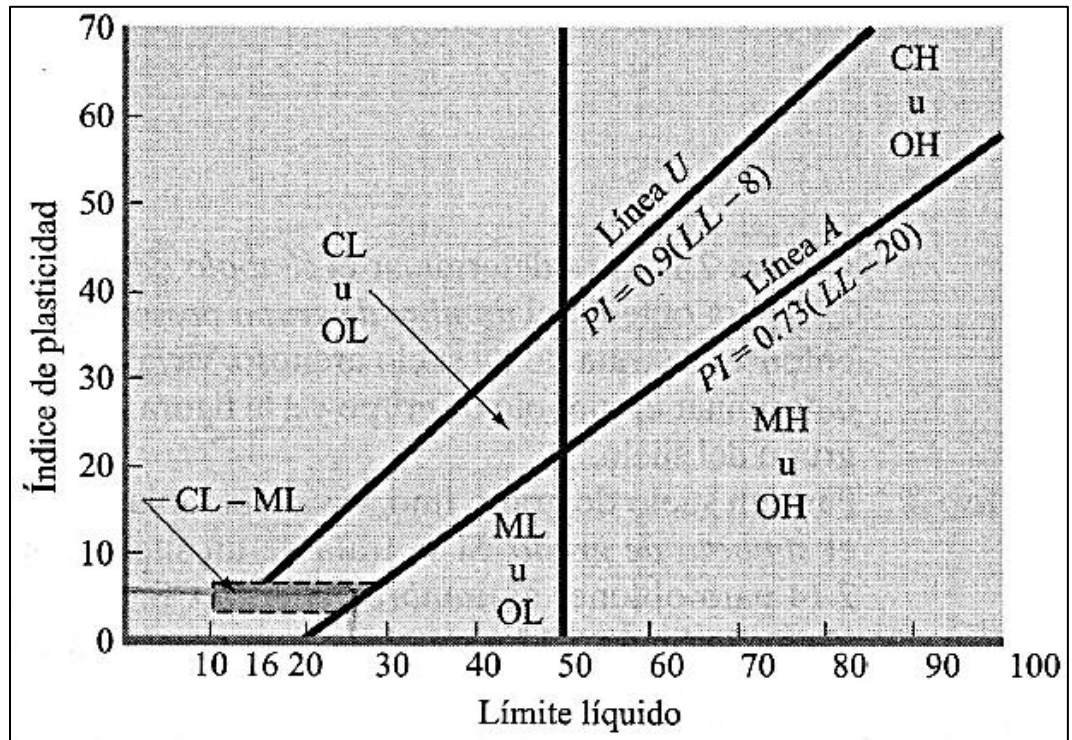
Los símbolos de grupo para suelos tipo grava de grano grueso son GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM y GP-GC. Similarmente, los símbolos de grupo para suelos de grano fino son CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML, y Pt. A continuación, se muestra un procedimiento paso a paso para la clasificación de suelos:

Paso 1. Se determina el porcentaje de suelo que pasa la malla núm. 200 (F). Si  $F < 50 \%$ , se trata de un suelo de grano grueso, es decir, se tiene un suelo tipo grava o arenoso (donde  $F =$  porcentaje de granos más finos que la malla núm. 200). Vaya al paso 2. Si  $F$  mayor o igual a  $50 \%$ , se trata de un suelo de grano fino. Vaya al paso 3.

Paso 2. Para un suelo de grano grueso ( $100 - F$ ) es la fracción gruesa en porcentaje. Se determina el porcentaje de suelo que pasa la malla núm. 4 y es retenido en la malla núm. 200,  $F_1$ . Si  $F_1 < (100 - f)/2$ , entonces el suelo tiene más grava que arena, por lo que es un suelo tipo grava, vaya a la figura 24, y figura 27, para determinar el símbolo de grupo, y luego vaya al anexo 9, para obtener el nombre de grupo del suelo.

Paso 3. Para un suelo de grano fino, vaya a la figura 26 y figura 27 para obtener el símbolo de grupo. Si se trata de un suelo inorgánico, vaya al anexo 10, para obtener el nombre del grupo. Si se trata de un suelo orgánico vaya al anexo 11, para obtener el nombre del grupo.

Figura 27. Carta de plasticidad



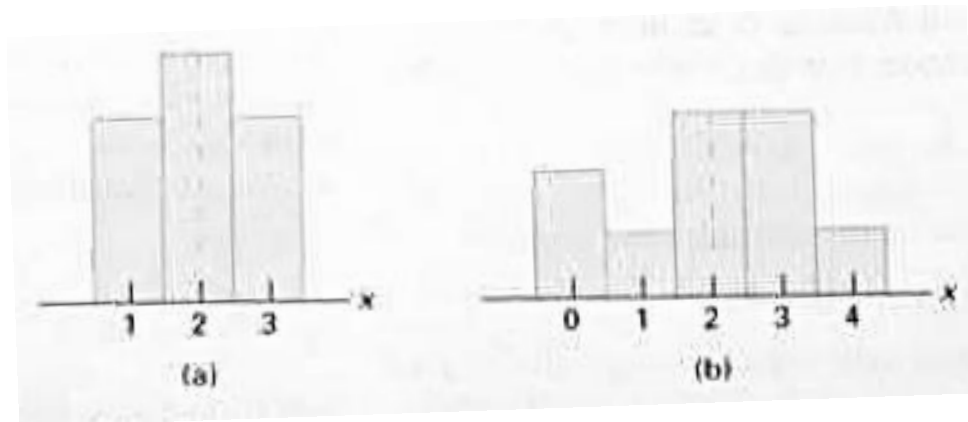
Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.41.

## 2.2. Análisis estadístico de los resultados

### 2.2.1. Varianza y covarianza

La media o valor esperado de una variable aleatoria  $X$  es de especial importancia en estadística, pues describe el lugar donde se centra la distribución de probabilidad. Por sí misma, sin embargo, la media no da una descripción adecuada de la forma de la distribución. Es necesario caracterizar la variabilidad en la distribución. En la figura 26 están los histogramas de dos distribuciones discretas de probabilidad con la misma media  $\mu = 2$  que difieren de forma considerable en la variabilidad o dispersión de sus observaciones alrededor de la media

Figura 28. **Esquema de distribución con medias iguales y dispersiones diferentes**



Fuente: WALPOLE, Ronald E. MYERS, Raymond H. MYERS, Sharon L. *Probabilidad y Estadística para ingenieros*. p.92.

La medida de variabilidad más importante de una variable aleatoria  $X$  se obtiene al hacer  $g(X) = (X - \mu)^2$  en el teorema 4.1 del libro de probabilidad y estadística para ingenieros 6ta edición. Debido a su importancia en estadística, se le denomina varianza de la variable aleatoria  $X$  o varianza de la distribución de probabilidad de  $X$  y se denota por  $\text{Var}(X)$  o con el símbolo  $\sigma^2_x$ , o simplemente  $\sigma^2$  cuando queda claro a qué variable aleatoria se refiere.

Sea  $X$  una variable aleatoria con distribución de probabilidad  $f(x)$  y media  $\mu$ . La varianza de  $X$  es

$$\sigma^2 = E[(X - \mu)^2] = \sum_x (x - \mu)^2 f(x)$$

Si  $X$  es discreta, y

$$\sigma^2 = E[(X - \mu)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

Si  $X$  es continua. La raíz cuadrada positiva de la varianza,  $\sigma$ , se llama desviación estándar de  $X$ . La cantidad de  $x - \mu$  en la definición anterior se llama desviación de una observación respecto a su media. Como estas desviaciones se elevan al cuadrado y después se promedian,  $\sigma^2$  será mucho menos para un conjunto de valores  $x$  que sean cercanos a  $\mu$  que para un conjunto de valores que varíe de forma considerable de  $\mu$ .

### 2.2.2. Promedio

Si se lanzan 16 veces dos monedas y  $X$  es el número de caras que ocurre por lanzamiento, entonces los valores de  $X$  pueden ser 0, 1 y 2. Suponga que en el experimento salen cero caras, una cara y dos caras un total de cuatro,

siete y cinco veces, respectivamente. El número promedio de caras por lanzamiento de las dos monedas es entonces

$$\frac{(0)(4) + (1)(7) + (2)(5)}{16} = 1,06$$

Este es un valor promedio y nos es, necesariamente, un posible resultado del experimento. Por ejemplo, el ingreso mensual promedio de un vendedor, probablemente, no es igual a alguno de sus cheques de pago mensual.

Se reestructura el cálculo del número promedio de caras de modo que se obtenga la siguiente forma equivalente:

$$(0) \left( \frac{4}{16} \right) + (1) \left( \frac{7}{16} \right) + (2) \left( \frac{5}{16} \right) = 1,06$$

Los números  $4/16$ ,  $7/16$ , y  $5/16$  son las fracciones de los lanzamientos totales que tienen como resultado cero, una y dos caras, respectivamente. Estas fracciones también son las frecuencias relativas de los diferentes valores de  $X$  en nuestro experimento. En efecto, entonces se puede calcular la media o el promedio de un conjunto de datos mediante el conocimiento de los distintos valores que ocurren y sus frecuencias relativas, sin un conocimiento del número total de observaciones en el conjunto de datos. Por tanto, si  $4/16$  o  $1/4$  de los lanzamientos tienen como resultado cero caras,  $7/16$  de los lanzamientos tienen como resultado una cara y  $5/16$  de estos tienen dos caras, el número medio de caras por lanzamiento será  $1,06$  sin importar si el número total de lanzamientos fue  $16$ ,  $1\ 000$  o incluso  $10\ 000$ .



### 2.2.3. Media aritmética

Se utilizará este método de frecuencias para calcular el número promedio de caras por lanzamiento que se podría esperar en el largo plazo. A este valor promedio se le denomina la **media de una variable aleatoria X** o la **media de la distribución de probabilidad de X** y la denotación por  $\mu$ , o simplemente como  $\mu$  cuando esté claro a que variable aleatoria se hace alusión. También es común entre los estadísticos referirse a esta media como la esperanza matemática o el valor esperado de la variable aleatoria X y denotarla como  $E(X)$ .

Se supone que se lanzan monedas legales, se encuentra que el espacio muestral para el experimento es

$$S = [HH, HT, TH, TT]$$

Como los 4 puntos muestrales son igualmente probables, se sigue que

$$P(X = 0) = P(TT) = \frac{1}{4}, \quad P(X = 1) = P(TH) + P(HT) = \frac{1}{2}$$

y 
$$P(X = 2) = P(HH) = \frac{1}{4},$$

Donde un elemento típico, por ejemplo TH, indica que el primer lanzamiento tuvo como resultado una cruz seguida de una cara en el segundo lanzamiento. Ahora bien, estas probabilidades son justo las frecuencias relativas para los eventos dados en el largo plazo. Por tanto,

$$\mu = E(X) = (0) \left(\frac{1}{4}\right) + (1) \left(\frac{1}{2}\right) + (2) \left(\frac{1}{4}\right) = 1$$

Este resultado significa que una persona que lance dos monedas una y otra vez, en promedio, obtendrá una cara por lanzamiento.

El método descrito antes para calcular el número esperado de caras en el lanzamiento de dos monedas sugiere que la media o valor esperado de cualquier variable aleatoria discreta se puede obtener al multiplicar cada uno de los valores  $x_1, x_2, \dots, x_n$  y sumar los productos. Esto es cierto, sin embargo, solo si la variable aleatoria es discreta. En el caso de variables aleatorias continuas, la definición de un valor esperado es esencialmente la misma pero con integrales que reemplazan las sumatorias.

Sea  $X$  una variable aleatoria con distribución de probabilidad  $f(x)$ . La media o valor esperado de  $X$  es

$$\mu = E(X) = \sum_x xf(x)$$

Si  $X$  es discreta, y

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$$

### **3. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

#### **3.1. Variables**

##### **3.1.1. Variable independiente**

En el desarrollo del presente estudio se contó como variable independiente el porcentaje de humedad en la determinación de los límites de Atterberg, siendo ésta controlada por el laboratorista que ejecutó dicho ensayo.

##### **3.1.2. Variable dependiente**

Se contó como variable dependiente en el ensayo de límite líquido por penetrómetro de cono, los milímetros de penetración en la muestra de arcilla ensayada y en la determinación de límite líquido por copa de Casagrande con la cantidad de golpes en los que se cierra la ranura que recrea las condiciones ideales para la determinación del límite líquido, siendo estas dependientes del porcentaje de humedad en el esfuerzo cortante para suelos de grano fino.

## **3.2. Metodología utilizada en el experimento**

### **3.2.1. Límite líquido**

#### **3.2.1.1. Equipo utilizado**

- Copa de Casagrande (*ASTM D4318*), copa esférica con un radio interior de 54 mm, espesor de 2 mm y peso de 200,20 g incluyendo el tacón, los cuales giran en torno a un eje fijo unido a la base.
- Ranurador plano ASTM.
- Tamiz núm. 40 (0,425 mm.)
- Cazuela de porcelana y apisonador.
- Recipientes para muestra de contenido de humedad.
- Balanza con precisión de 0,01 g.
- Espátula con hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Probeta con una capacidad de 25 cm<sup>3</sup>.
- Horno capaz de mantener temperatura constante de 110°C (*ASTM D 2216*).

Figura 29. **Copa de Casagrande motorizada para límite líquido ASTM D4318, H-4226**



Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012.* p.36.

Figura 30. **Ranurador plano ASTM**



Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012.* p.36.

Figura 31. **Piseta H-3398, H-3399, H-3399XL, para adición de los diferentes porcentajes de humedad para la prueba**



Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012.* p.253.

Figura 32. **Mortero y pistilo para preparación de muestra de suelo**



Fuente: ELE International. *Testing Equipment for Construction Materials. Catalog 2012.* p.149.

Figura 33. **Espátula para conformación del suelo en copa de Casagrande y recipiente en prueba de Penetrómetro de Cono**



Fuente: ELE International. *Testing Equipment for Construction Materials. Catalog 2012. p.32.*

### **3.2.1.2. Procedimiento para realizar la prueba de Límite líquido**

- Colocar la máquina de la copa de Casagrande sobre una base firme y horizontal, para verificar la calibración de la copa. Ajustar la altura de la caída de la copa haciendo girar la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de un centímetro, se verifica que la distancia entre el punto de percusión y la base sea de un centímetro exactamente. De ser necesario, se aflojan los tornillos de fijación y se mueve el ajuste hasta obtener la altura de caída requerida. Si el ajuste es correcto se escuchará un ligero campanilleo producido por la leva al golpear el tope de la copa. Si la copa se levanta por sobre el calibre o no se escucha ningún sonido debe realizarse un nuevo ajuste.
- La muestra de ensayo debe ser igual o mayor que 100 g y pasar completamente por el tamiz núm.40 (malla de 0,425 mm); obtenido de acuerdo con la norma AASHTO T87. Si la muestra contiene partículas de mayor tamaño, se deben eliminar.

- Extraer por cuarteo, una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensaye de 160 g de material. Se procede a agregar agua cuando sea necesario, revolver la muestra hasta obtener una pasta semilíquida homogénea.
- Dejar un tiempo de curado para que la fase líquida y sólida se mezcle homogéneamente, la cual depende del grado de plasticidad del suelo, existiendo la siguiente clasificación: suelos de alta plasticidad  $\geq 24$  h, suelos de plasticidad media  $\geq 12$  h, suelos de baja plasticidad  $\geq 1$  h.
- El límite líquido se determina considerando que el suelo remoldeado a la humedad de límite líquido ( $H_{LL}$ ), tiene una pequeña resistencia al corte de aproximadamente  $0,025 \text{ kg/cm}^2$ , de tal modo que la muestra remoldeada necesita 25 golpes para cerrar dos secciones de una pasta de suelo de dimensiones especiadas por norma.
- Luego, se coloca aproximadamente entre 50 y 70 g de muestra, en la copa y se extiende para evitar la incorporación de burbujas de aire con la espátula de hoja flexible. Encerrar y nivelar a una altura de un centímetro en el punto de mayor profundidad de la copa.

Nota: el nivelado a un centímetro implica un volumen de material aproximado de  $16 \text{ cm}^3$ , y una longitud de surco medida sobre la superficie nivelada de 63 mm.

- Reincorporar el material sobrante a la cazuela de porcelana y usando el Ranurador, separar la mezcla depositada en la copa de la maquina en dos mitades, según el eje de simetría de la copa; queda una ranura de un centímetro a lo largo de 13 mm aproximadamente. Para una arcilla, el surco se puede hacer de



una sola vez, los limos pueden exigir dos o tres pasadas suaves antes de completarlo.

- Girar la manivela levantando y dejando caer la copa desde una altura de un centímetro a razón de dos golpes por segundo hasta que las paredes del surco sufran un cierre de un centímetro después de 25 golpes. Si el cierre del surco es irregular, descártelo.
- Retirar a aproximadamente 10 g de material que se junta en el fondo del surco, en un recipiente ya pesado con anterioridad depositar el material extraído y determinar su humedad (%H). Transferir el material sobrante desde la copa hasta la cazuela, donde se tiene el total de la mezcla homogénea. Limpiar y secar la copa de la máquina y el Ranurador.
- Repetir todo el ensayo con el mismo material, por lo menos dos pruebas adicionales para obtener suficiente información y formar el gráfico con una abscisa semilogarítmica, en la cual se ubicara el número de golpes, y en la ordenada una escala aritmética donde se ubica el porcentaje de humedad (%H).
- Los puntos obtenidos tienden a alinearse sobre una recta, lo que permite la determinación de la ordenada para la abscisa  $N = 25$  golpes. Y este porcentaje de humedad se denomina como límite líquido.
- Como alternativa para determinar el contenido de humedad correspondiente al límite líquido se pueden utilizar los datos de la tabla III, donde se requiere el número de golpes  $N$  para determinar el valor  $K$ ; el cual debe ser multiplicado por la humedad correspondiente determinada en el laboratorio.

### 3.2.2. Límite líquido con ecuación de Lambe

En general, la prueba consiste en determinar el número de golpes necesarios para cerrar la ranura hecha en una muestra de suelo, con tres o más contenidos diferentes de agua. Se ha encontrado empíricamente que si se hace un gráfico en el cual se represente el contenido de humedad en una escala aritmética contra la variación del número de golpes necesario para cerrar la ranura en una escala semilogarítmica, el lugar geométrico de los puntos resultantes insinúa una variación de comportamiento lineal.

Con este fenómeno establecido, se vuelve relativamente sencillo establecer el contenido de humedad en el límite líquido de una forma indirecta. Como el gráfico semilogarítmico de contenido de humedad contra logaritmo del número de golpes es una línea recta, la ecuación de esta línea se puede representar en la forma general:

$$W = -F_i \log(N) \pm C$$

Desarrollar la ecuación conlleva tiempo y un gran número de ensayos de límite líquido, la Estación Experimental de Hidrovías (*Waterways Experimental Station, Vicksburg Miss*), en 1994 concluyó sobre el análisis de 767 ensayos, que el límite líquido puede establecerse a partir de un solo ensayo utilizando la siguiente ecuación:

$$W_L = W_N \left( \frac{N}{25} \right)^{\tan \beta}$$

Donde:

$W_N$  = Contenido de humedad al número de golpes N obtenidos en el ensayo.

$\beta$  = pendiente de la recta en el gráfico semilogarítmico  $W$  versus  $\text{Log}(N)$ .

Para estos valores de límite líquido se encontró que  $\tan\beta = 0,121$  resulto ser una buena aproximación, de donde se puede expresar la ecuación como:

$$W_L = W_N \left( \frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

El valor de 0,121 no es para todos los suelos, sin embargo se puede generalmente, obtener buenos resultados a partir de la expresión anterior, si el contenido de humedad  $W_N$  utilizado en la fórmula se determina para un número  $N$  de golpes entre 20 y 30. En la práctica resulta complicado realizar el cálculo para obtener el valor del límite líquido con la ecuación anterior; por lo que se ha denotado a la constante  $K$  como:

$$K = \left( \frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

Tabla III. Factores para la obtención de límite líquido del contenido de humedad y número de golpes, método B (ecuación de Lambe)

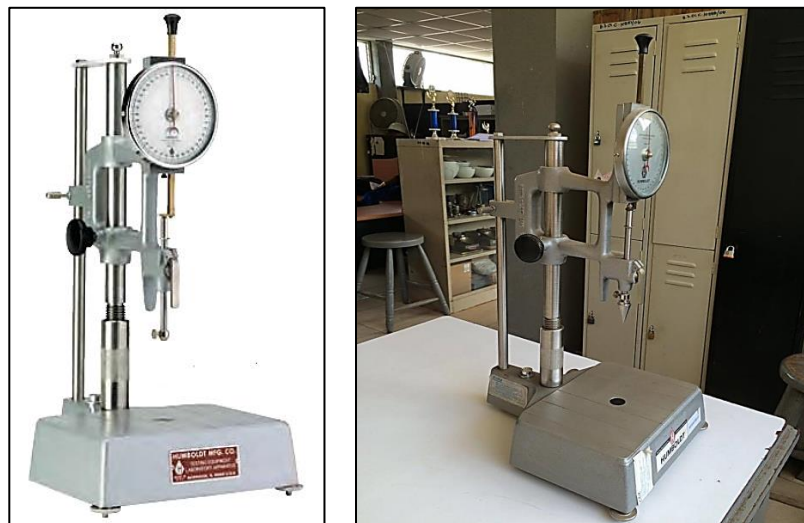
Número de golpes (N)	K
20	0,9734
21	0,9791
22	0,9847
23	0,99
24	0,9951
25	1
26	1,0048
27	1,0094
28	1,0138
29	1,0181
30	1,0223

Fuente: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *Annual book of astm standards 2006, section four, construction*. p. 543

### 3.2.3. Límite líquido con aparato de Casagrande/Penetrómetro de cono

- Aparato de Casagrande/Penetrómetro universal.
- Tamiz núm. 40 (0,425 mm).
- Cazuela de porcelana y apisonador.
- Recipientes para muestra de contenido de humedad.
- Balanza con precisión de 0,01 g.
- Espátula con hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Probeta con una capacidad de 25 cm<sup>3</sup>.
- Horno capaz de mantener temperatura constante de 110°C (ASTM D 2216).

Figura 34. **Aparato de Casagrande/Penetrómetro universal H-1200**



Fuente: HUMBOLDT, *Testing Equipment for Construction Materials*, Catalog 9 2012. p.168.

### **3.2.3.1. Procedimiento para límite líquido con Penetrómetro de Cono**

- Se arma el sistema del penetrómetro universal y cono, de 80 g de peso y 30°, y se calibra el reloj indicador de la penetración del cono en la mezcla de arcilla preparada para el ensayo.
- Se ajusta el brazo del sistema del penetrómetro ya calibrado a cero milímetros a una altura rasante del recipiente con dimensiones normadas.
- Se tamiza una muestra no menor a 160 g de suelo, para ello se utilizará el tamiz núm. 40.
- Al igual que en el ensayo con la copa de Casagrande, las muestras de arcilla deberán dejarse curando (saturando) por un periodo no menor a 24 horas con agua desmineralizada con el objeto de tener una muestra homogenizada con su contenido de humedad.
- Se procede a llenar el tarro normado, con el suelo ya homogenizado con el contenido de humedad y se llena hasta la superficie.
- Se centra la punta del cono con el centro del rostro de la arcilla, controlando que esta misma quede al ras de la superficie de la arcilla para lo cual se hará uso del tornillo del ajuste de la altura del sistema.
- Se deja caer libremente el cono de 80 g dentro del recipiente con la muestra de arcilla durante 5 segundos, seguido de esto se fija nuevamente el cono y se mide la profundidad que el mismo provocó en la muestra de arcilla homogenizada con su contenido de humedad.
- Se realizan tres pruebas más, procurando que el volumen de agua añadido a la muestra entregue resultados entre el rango de veinte

mm de penetración, el cual se podrá determinar por medio de una gráfica o curva de flujo (milímetros de penetración vs porcentaje de humedad).

- Realizada cada prueba se toma una muestra por cada ensayo depositándola en tarros. Se introducen las muestras en el horno durante 24 horas, se tomarán los datos y se calculan sus porcentajes de humedad por diferencial de pesos.

### **3.2.4. Límite plástico**

#### **3.2.4.1. Equipo a utilizar en límite plástico**

- Plato de evaporación de porcelana, con un diámetro de aproximadamente 120 mm.
- Espátula con una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Placa de vidrio esmerilado de 20\*20 cm, aproximadamente.
- Cazuela para secado.
- Recipientes para muestra de contenido de humedad.
- Balanza con precisión de 0,01 g.
- Probeta con una capacidad de 25 cm<sup>3</sup>.
- Horno capaz de mantener temperatura constante de 110°C (ASTM D 2216).
- Patrón de comparación, alambre o plástico de 3 mm.
- Tamiz núm. 40 (0,425 mm).

Figura 35. **Equipo para determinación de límite plástico H-4253**



Fuente: HUMBOLDT, *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012*. p.35.

Figura 36. **Aparato para límite plástico H-4262**



Fuente: HUMBOLDT, *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012*. p.35.



#### 3.2.4.2. Procedimiento límite plástico

- La muestra necesaria para realizar este ensayo debe tener un peso aproximado de 20 g y pasar completamente por el tamiz núm. 40 *ASTM* (0,425 mm).
- Tomar la muestra de ensayo del material completamente homogenizado que pasa por el tamiz número 40. Colocar en el plato de evaporación y mezclar completamente con agua destilada, mediante la espátula hasta que la pasta se vuelva suficientemente plástica para moldearla como una esfera.
- Curar la muestra durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente.

Nota: en suelos de alta plasticidad este plazo no debe ser menor que 24 h. En suelos de baja plasticidad este plazo puede ser mucho menor y en ciertos casos puede eliminarse.

- Tomar una porción de la muestra de ensayo acondicionada, de aproximadamente un centímetro cúbico.
- Amasar la muestra entre las manos y luego hacerla rodar con la palma de la mano sobre la placa de virio hasta conformar un cilindro de tres milímetros de diámetro, aproximadamente, conformar dicho cilindro solo con el peso de la mano.
- Cuando el cilindro alcance un diámetro de aproximadamente tres milímetros, doblar, amasar nuevamente y volver a conformar el cilindro.
- Repetir la operación hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de aproximadamente tres milímetros, en trozos de orden

de 0,5 a un centímetro de largo y no pueda ser reamasado ni reconstruido.

- Repetir las etapas anteriores con dos porciones más de la muestra de ensayo, hasta obtener un número considerable de cilindros (de 15 a 20).
- Reunir las fracciones del cilindro disgregado y colocarlas en un recipiente (tarro), para determinar y registrar su humedad la cual será el porcentaje de humedad que corresponde al límite plástico.
- La falta o agrietamiento del cilindro se puede definir por separación en pequeños pedazos, por desprendimiento de escamas de forma tubular desde dentro hacia fuera del cilindro del suelo, o por pedacitos en forma de barril de seis a ocho centímetros de largo.

### **3.3. Programas a utilizar para el análisis de datos**

Para el análisis del presente estudio se utilizaron los siguientes programas del paquete *office*:

- Microsoft Excel, con el cual se llevó a cabo la creación de tablas y gráficos que modelaron los diferentes métodos de ensayos a comparar.
- Microsoft Word, con el cual se llevó a cabo el presente trabajo.

### **3.4. Recolección de muestras**

Según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación en su Mapa Fisiográfico-Geomorfológico del año 2001, se utilizaron muestras de suelo de grano fino, procedentes de la región fisiográfica de las tierras altas

sedimentarias del país con suelos arcillosos en los departamentos Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz, la región fisiográfica depresión de Izabal y la subregión Sierra de las Minas para el departamento de Zacapa.

### **3.5. Datos obtenidos**

Se obtuvieron los siguientes resultados:

- Límites de Atterberg AASHTO T89, T90, ASTM D 4318:
  - Límite líquido
  - Límite plástico
  - Índice de plasticidad
  
- Análisis granulométrico ASTM D422:
  - Granulometría por cribado
    - % de grava
    - % de arena
    - % finos
  - Granulometría por Hidrómetro
    - % de Limo
    - % de Arcilla
  
- Gravedad específica de los suelos finos ASTM D854-05:
  - Dato utilizado en el cálculo de la granulometría por hidrómetro.

## **3.6. Resultados obtenidos**

### **3.6.1. Tablas**

Se generaron tablas para tabular los datos de los porcentajes de humedad para los ensayos de los límites de Atterberg por los métodos que se compararán.

En la sección de apéndices se muestran las tablas utilizadas para el cálculo de las gravedades específicas ensayadas a los diferentes suelos utilizados en el presente estudio. Este dato se utilizó en el cálculo de la granulometría por hidrómetro para la posterior clasificación de los suelos ensayados.

### **3.6.2. Gráficas**

En la sección de resultados se muestra las diferentes gráficas generadas a partir de los diferentes porcentajes de humedad que correspondieron a los métodos de determinación de límite líquido que, para el presente estudio, fueron el método de copa de Casagrande y Penetrómetro de Cono.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Límites de Atterberg

#### 4.1.1. Arcilla núm. 1

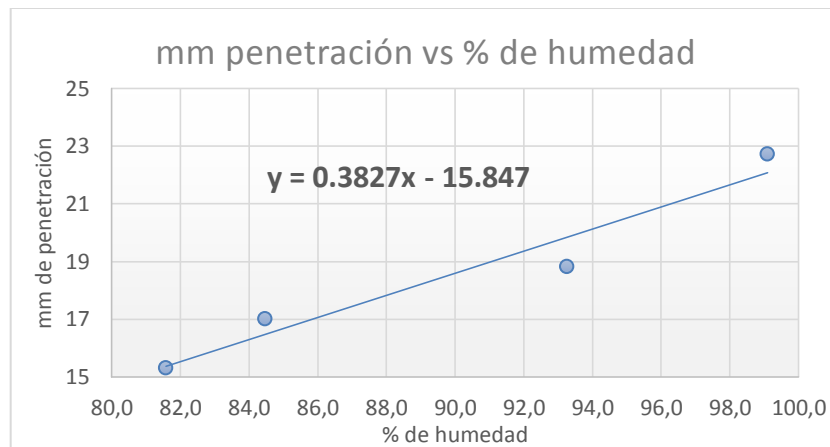
Descripción. Arcilla color café. Procedencia: Cobán Alta Verapaz.

Tabla IV. Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 1

<b>% Humedad</b>	81,6	84,5	93,3	99,1
<b>mm penetración</b>	15,3	17	18,8	22,7

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 37. mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 1



Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Resultados Arcilla núm. 1, penetrómetro de cono**

Límite líquido	93,7
Límite plástico	42
Índice de plasticidad	51,7

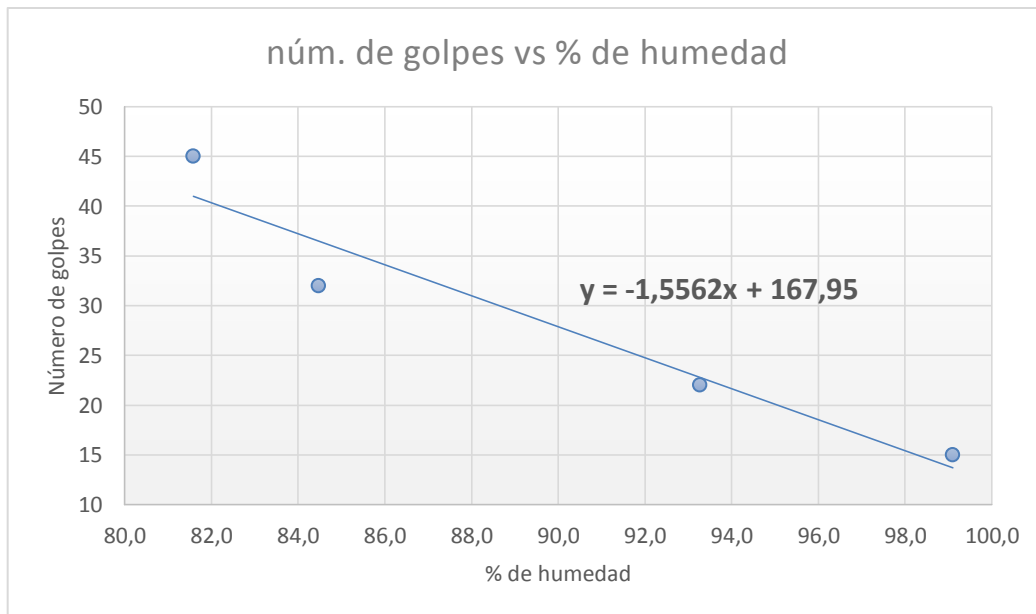
Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Límite líquido, por copa de Casagrande, arcilla núm. 1**

<b>% Humedad</b>	81,6	84,5	93,3	99,1
<b>No. Golpes</b>	45	32	22	15

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 38. **núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 1**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados arcilla núm. 1, copa de Casagrande**

Límite líquido	91,85
Límite plástico	42
Índice de plasticidad	49,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 1**

<b>% Humedad</b>	81,6	84,5	93,3	99,1
<b>núm. Golpes</b>	45	32	22	15
<b>LI. Ec Lambe</b>	no aplica	87,03	91,84	93,17

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Tabla IX. **Resultados arcilla núm. 1, ecuación de Lambe**

Límite líquido	91,84
Límite plástico	42
Índice de plasticidad	49,84

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.2. Arcilla núm. 2

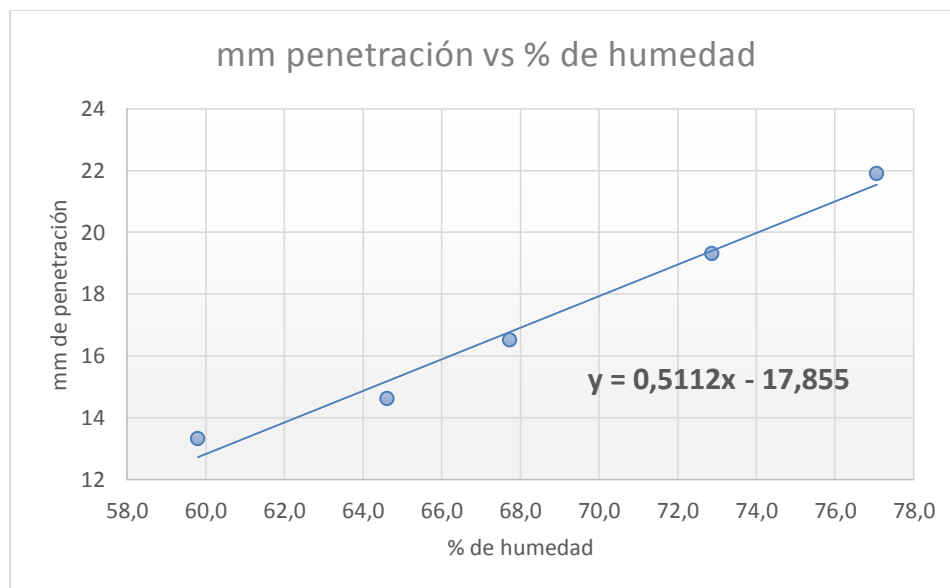
Descripción. Arcilla color café claro. Procedencia: Talpetate Cobán, Alta Verapaz.

Tabla X. Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 2

<b>% Humedad</b>	59,8	64,6	67,7	72,9	77,1
<b>mm penetración</b>	13,3	14,6	16,5	19,3	21,9

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 39. mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 2



Fuente: elaboración propia.



Tabla XI. **Resultados arcilla núm. 2, penetrómetro de cono**

Límite líquido	74,05
Límite plástico	28,1
Índice de plasticidad	49,95

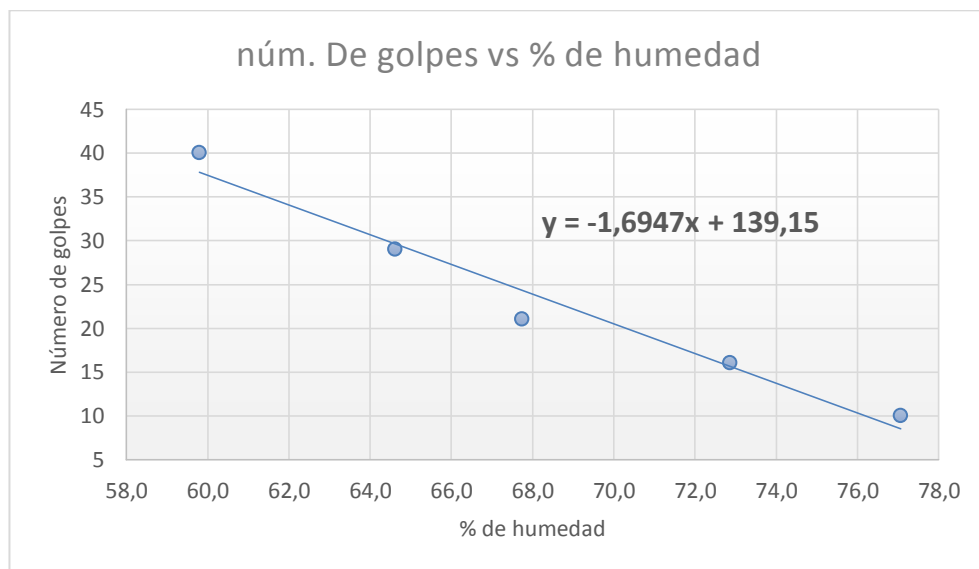
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 2**

<b>% Humedad</b>	59,8	64,6	67,7	72,9	77,1
<b>núm. de golpes</b>	40	29	21	16	10

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 40. **núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 2**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados arcilla núm. 2, copa de Casagrande**

Límite líquido	67,38
Límite plástico	28,1
Índice de plasticidad	39,28

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 2**

<b>% Humedad</b>	59,8	64,6	67,7	72,9
<b>núm. golpes</b>	40	29	21	16
<b>LI. Ec Lambe</b>	no aplica	65,78	66,32	69,04

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Tabla XV. **Resultados arcilla núm. 2, ecuación de Lambe**

Límite líquido	66,32
Límite plástico	28,1
Índice de plasticidad	38,22

Fuente: elaboración propia.

### 4.1.3. Arcilla núm. 3

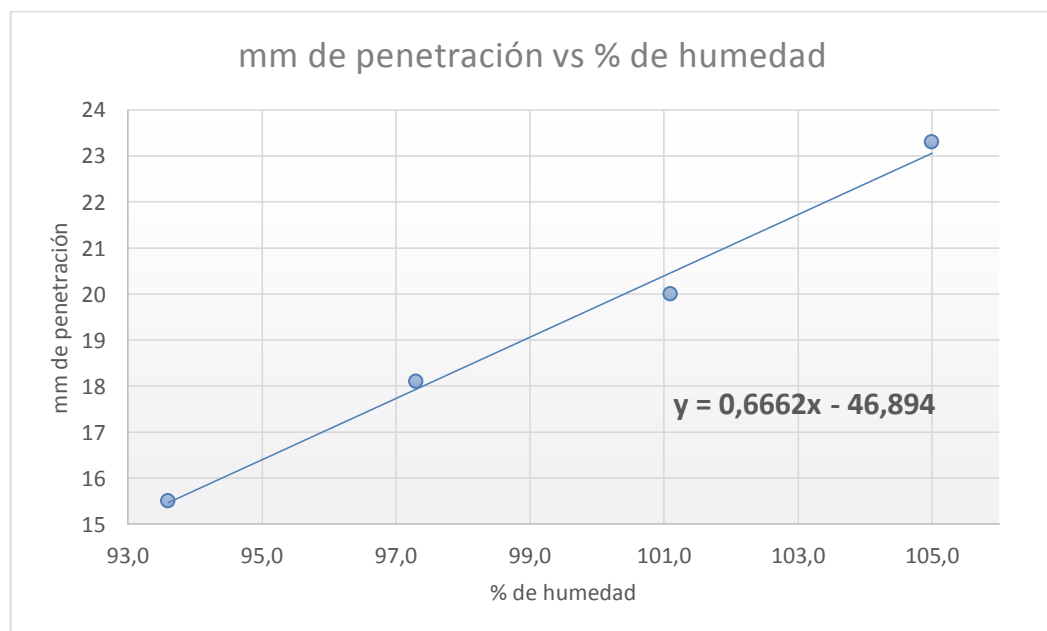
Descripción. Arcilla color gris. Procedencia: San Mateo Ixtatán, Huehuetenango.

Tabla XVI. Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 3

<b>% Humedad</b>	93,6	97,3	101,1	105,0
<b>mm penetración</b>	15,5	18,1	20	23,3

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 41. mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 3



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resultados arcilla núm. 3, penetrómetro de cono**

Límite líquido	100,41
Límite plástico	31,4
Índice de plasticidad	69,01

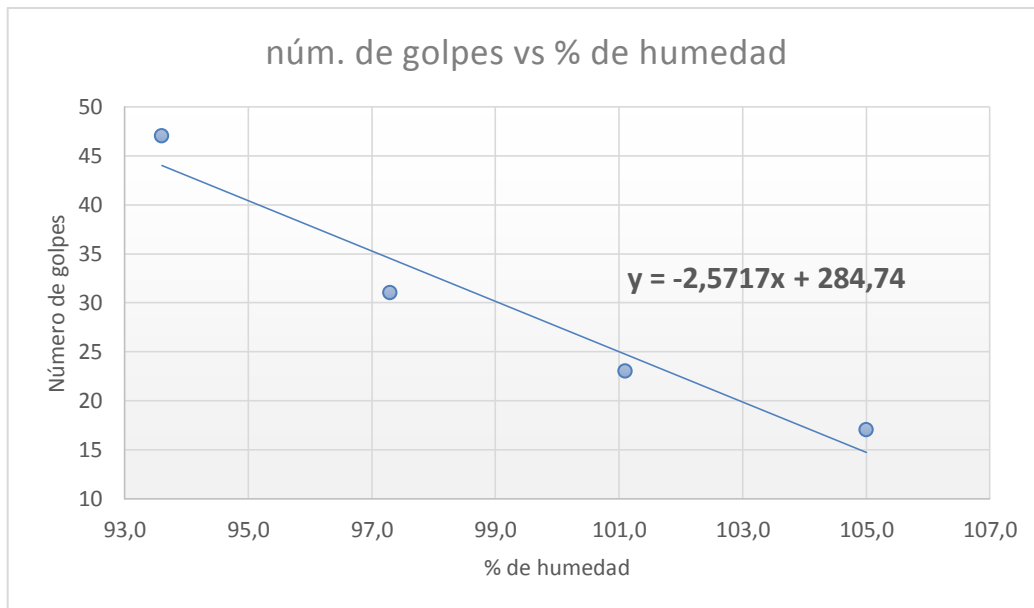
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 3**

<b>% Humedad</b>	93,6	97,3	101,1	105,0
<b>núm. golpes</b>	47	31	23	17

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 42. **núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 3**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resultados arcilla núm. 3, copa de Casagrande**

Límite líquido	100,99
Límite plástico	31,4
Índice de plasticidad	69,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 3.**

<b>% Humedad</b>	93,6	97,3	101,1	105,0
<b>núm. golpes</b>	47	31	23	17
<b>LI. Ec Lambe</b>	no aplica	99,87	100,09	100,21

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Tabla XXI. **Resultados arcilla núm. 3, ecuación de Lambe**

Límite líquido	100,99
Límite plástico	31,4
Índice de plasticidad	69,5

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.4. Arcilla núm. 4

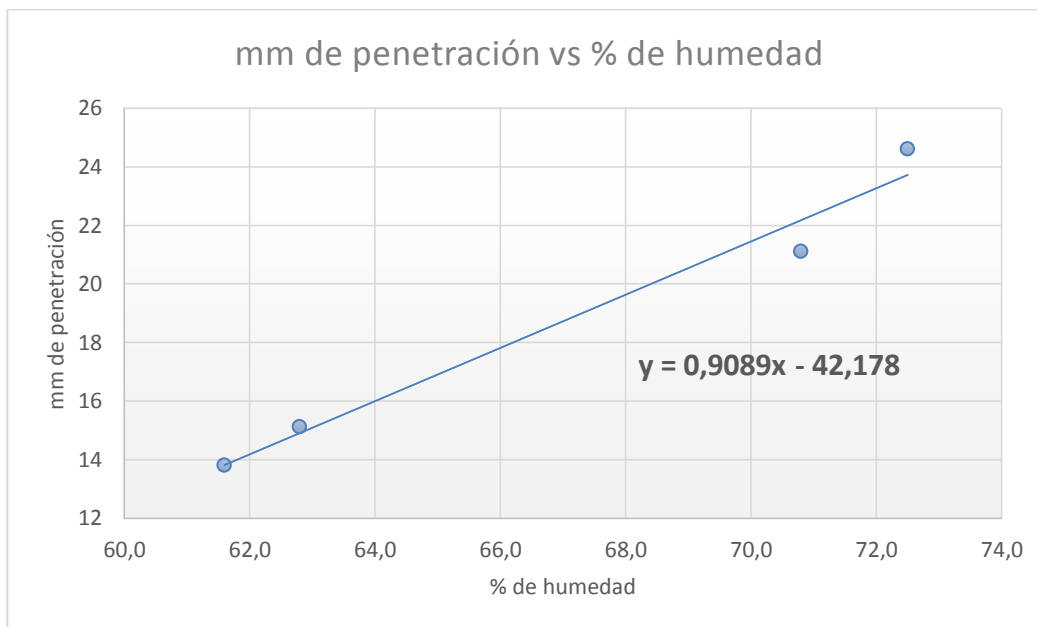
Descripción. Arcilla color gris. Procedencia: Puerto Barrios, Izabal.

Tabla XXII. Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 4

<b>% Humedad</b>	61,6	62,8	70,8	72,5
<b>mm penetración</b>	13,8	15,1	21,1	24,6

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 43. mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 4



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados arcilla núm. 4, penetrómetro de cono**

Límite líquido	68,41
Límite plástico	47,2
Índice de plasticidad	21,21

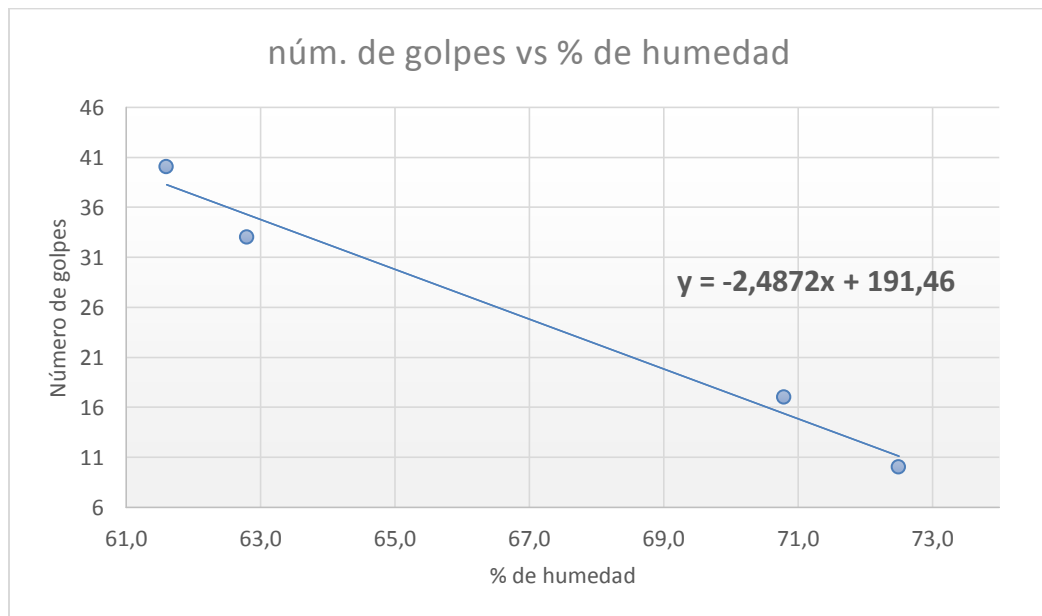
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 4**

<b>% Humedad</b>	61,6	62,8	70,8	72,5
<b>núm. golpes</b>	40	33	17	10

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 44. **núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 4**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Resultados Arcilla núm. 4, copa de Casagrande**

Límite líquido	68,94
Límite plástico	47,2
Índice de plasticidad	21,73

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 4**

<b>% Humedad</b>	61,6	62,8	70,8	72,5
<b>núm. Golpes</b>	40	33	17	10
<b>LI. Ec Lambe</b>	no aplica	64,95	67,57	no aplica

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Tabla XXVII. **Resultados arcilla núm. 4, ecuación de Lambe**

Límite líquido	67,57
Límite plástico	47,4
Índice de plasticidad	20,37

Fuente: elaboración propia.



#### 4.1.5. Arcilla núm. 5

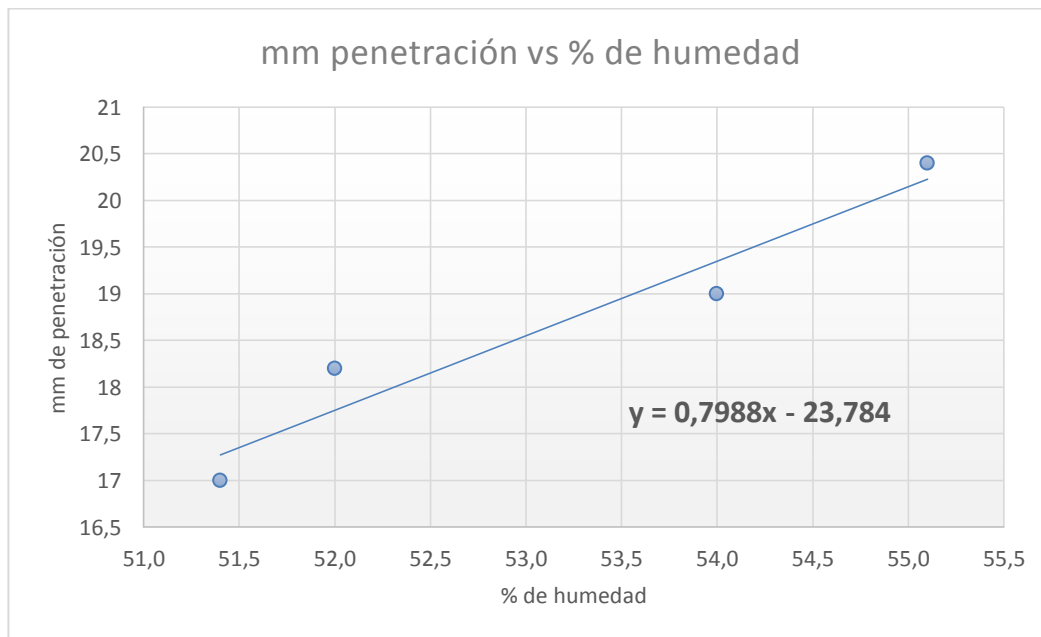
Descripción. Arcilla color café oscuro. Procedencia: Estanzuela, Zacapa.

Tabla XXVIII. Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 5

<b>% Humedad</b>	51,4	52,0	54,0	55,1
<b>mm penetración</b>	17	18,2	19	20,4

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 45. Núm. de golpes vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 5



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Resultados arcilla núm. 5, penetrómetro de cono**

Límite líquido	54,81
Límite plástico	20,1
Índice de plasticidad	34,71

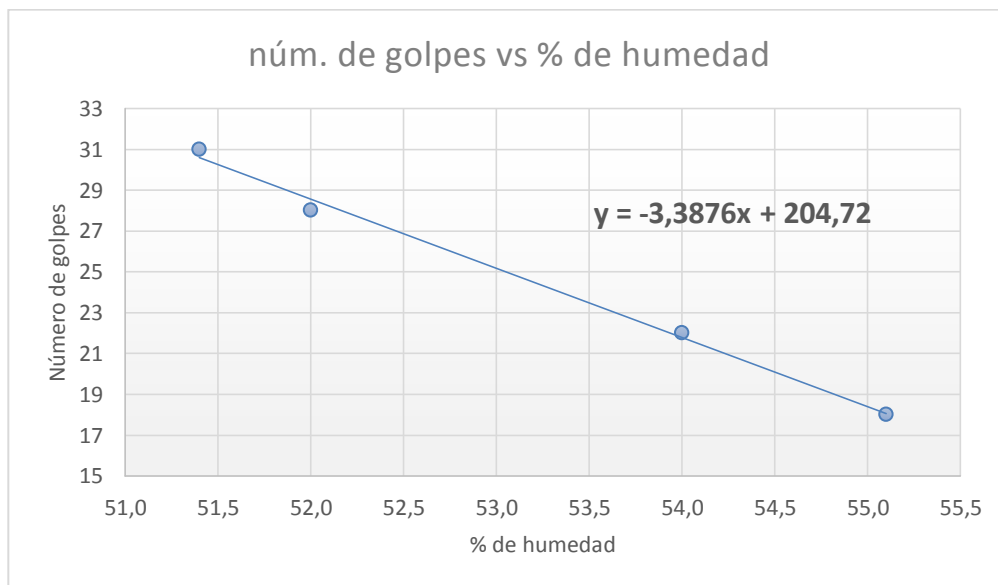
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 5**

<b>% Humedad</b>	51,4	52,0	54,0	55,1
<b>núm. Golpes</b>	31	28	22	18

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 46. **Núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 5**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Resultados arcilla núm. 5, copa de Casagrande**

Límite líquido	53,05
Límite plástico	20,1
Índice de plasticidad	32,95

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 5**

<b>% Humedad</b>	51,4	52,0	54,0	55,1
<b>núm. Golpes</b>	31	28	22	18
<b>LI. Ec Lambe</b>	52,757	52,72	53,17	52,95

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Tabla XXXIII. **Resultados arcilla núm. 5, ecuación de Lambe**

Límite líquido	53,17
Límite plástico	20,1
Índice de plasticidad	33,07

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.6. Arcilla núm. 6

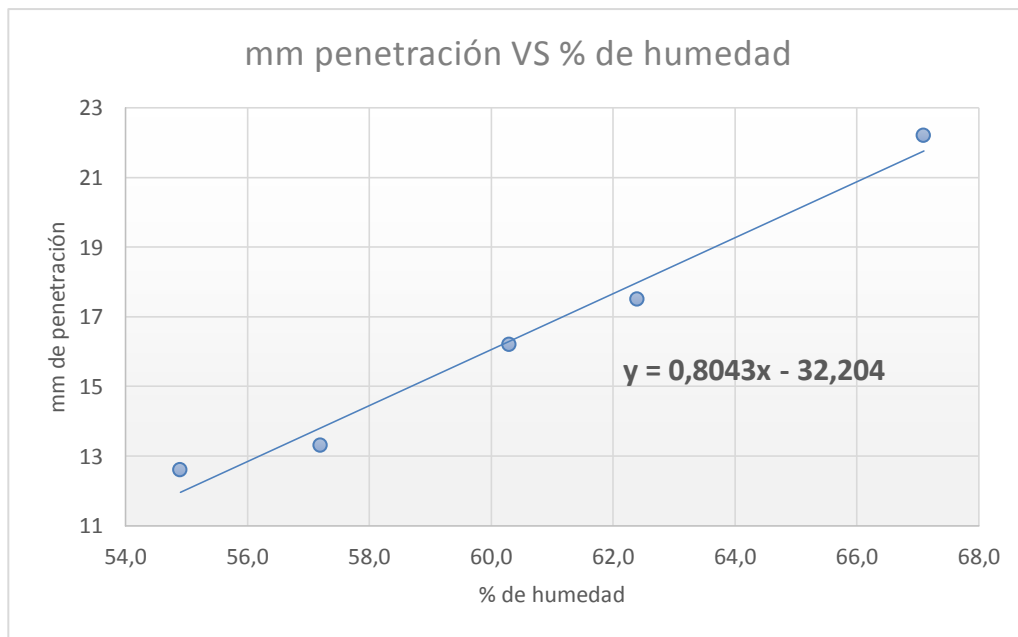
Descripción. Arcilla color café. Procedencia: San Juan Cotzal, Quiché.

Tabla XXXIV. Límite líquido por penetrómetro de cono, arcilla núm. 6

<b>% Humedad</b>	54,9	57,2	60,3	62,4	67,1
<b>mm penetración</b>	12,6	13,3	16,2	17,5	22,2

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 47. mm penetración vs % de humedad, cono de penetración, arcilla núm. 6



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Resultados arcilla núm. 6, penetrómetro de cono**

Límite líquido	64,91
Límite plástico	30,2
Índice de plasticidad	34,71

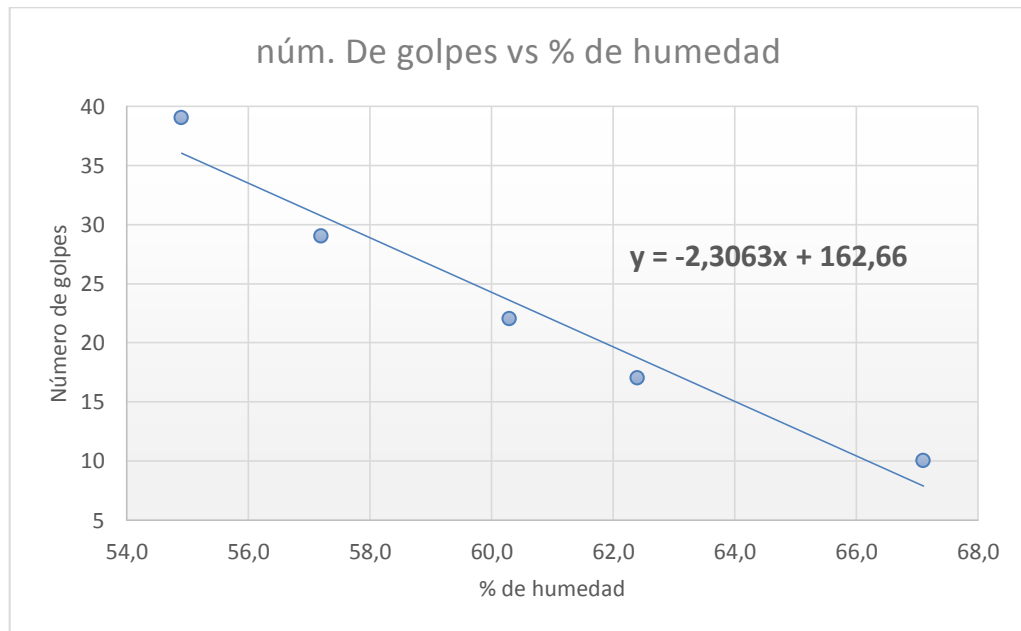
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Límite líquido por copa de Casagrande, arcilla núm. 6**

<b>% Humedad</b>	54,9	57,2	60,3	62,4	67,1
<b>No. De golpes</b>	39	29	22	17	10

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Figura 48. **Núm. de golpes vs % de humedad, copa de Casagrande, arcilla núm. 6**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Resultados arcilla núm. 6, copa de Casagrande**

Límite líquido	59,69
Límite plástico	30,2
Índice de plasticidad	20,49

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Límite líquido, por ecuación de Lambe, arcilla núm. 6**

<b>% Humedad</b>	54,9	57,2	60,3	62,4
<b>núm. Golpes</b>	39	29	22	17
<b>LL. ec Lambe</b>	no aplica	58,24	59,38	59,55

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Tabla XXXIX. **Resultados arcilla núm. 6, ecuación de Lambe**

Límite líquido	59,39
Límite plástico	30,2
Índice de plasticidad	29,18

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Resultados de gravedad específica de las arcillas

Tabla XL. Gravedad específica de las arcillas ASTM D854

Ensayo	Muestra	Gravedad Específica (20°C)	Descripción
1	Puerto Barrios, Izabal	2,76	Arcilla color gris
2	San Mateo Ixtatán, Huehuetenango	2,69	Arcilla color gris
3	Cobán, Alta Verapaz	2,70	Arcilla color café oscuro
4	Estanzuela, Zacapa	2,69	Arcilla arenosa color café oscuro
5	San Juan Cotzal, Quiché	2,71	Arcilla color café
6	Cobán, Alta Verapaz	2,65	Arcilla color café claro

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

#### 4.3. Análisis granulométrico arcilla núm. 1

Descripción. Arcilla color café oscuro. Procedencia: Cobán Alta Verapaz.

Tabla XLI. Análisis granulométrico de arcilla núm. 1, ASTM D422

Análisis por mallas (%)	
Grava	0
Arena	0,7
Finos	99,3
Análisis por sedimentación, según <b>ASTM D422</b>	
Limo	11,42
Arcilla	87,88

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

#### 4.4. Análisis granulométrico arcilla núm. 2

Descripción. Arcilla color café claro. Procedencia: Cobán, Alta Verapaz.

Tabla XLII. Análisis granulométrico de arcilla núm. 2, ASTM D422

Análisis por mallas (%)	
Grava	0
Arena	1,94
Finos	98,06
Análisis por sedimentación, según <b>ASTM D422</b>	
Limo	20,79
Arcilla	77,27

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

#### 4.5. Análisis granulométrico arcilla núm. 3

Descripción. Arcilla color gris. Procedencia: San Mateo Ixtatán, Huehuetenango.

Tabla XLIII. Análisis granulométrico de arcilla núm. 3, ASTM D422

Análisis por mallas (%)	
Grava	0
Arena	0,1
Finos	99,90
Análisis por sedimentación, según <b>ASTM D422</b>	
Limo	12,87
Arcilla	87,03

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.



#### 4.6. Análisis granulométrico arcilla núm. 4

Descripción. Arcilla color gris. Procedencia: Puerto Barrios, Izabal.

Tabla XLIV. Análisis granulométrico de arcilla núm. 4, ASTM D422

Análisis por mallas (%)	
Grava	0
Arena	4
Finos	96
Análisis por sedimentación, según <b>ASTM D422</b>	
Limo	25,67
Arcilla	70,33

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

#### 4.7. Análisis granulométrico arcilla núm. 5

Descripción. Arcilla color café oscuro. Procedencia: Estanzuela, Zacapa.

Tabla XLV. Análisis granulométrico de arcilla núm. 5, ASTM D422

Análisis por mallas (%)	
Grava	0,59
Arena	33,94
Finos	65,47
Análisis por sedimentación, según <b>ASTM D422</b>	
Limo	17,09
Arcilla	48,35

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

#### 4.8. Análisis granulométrico arcilla núm. 6

Descripción. Arcilla color café. Procedencia: San Juan Cotzal, Quiché.

Tabla XLVI. Análisis granulométrico de arcilla núm. 6, ASTM D422

Análisis por mallas (%)	
Grava	0
Arena	17,78
Finos	82,22
Análisis por sedimentación, según <b>ASTM D422</b>	
Limo	18,08
Arcilla	64,14

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Análisis y comparación de resultados

Tabla XLVII. Análisis estadístico arcilla núm. 1 color café oscuro, Cobán, Alta Verapaz

Parámetro	Penetrómetro de cono	Copa de Casagrande	Ecuación de Lambe	Media	Varianza de una muestra	Desviación estándar de la Muestra
Límite Líquido	93,7	91,85	91,84	92,46	1,15	1,07
Límite plástico	42	42	42	42	0,00	0,00
Índice de Plasticidad	51,7	49,85	49,84	50,46	1,15	1,07

Fuente: elaboración propia, datos sección de resultados.

Según tabla XLVII, con base en los ensayos de límites de Atterberg, se observó que este suelo posee un límite líquido  $> 50$ , siendo el LL = 92,46. Según el gráfico de carta de plasticidad corresponde a un suelo de alta plasticidad, tomando en cuenta su índice de plasticidad, como referencia la media de IP = 50,46 en que Atterberg dedujo que para suelos con un IP  $> 17$ , corresponde a un suelo de alta plasticidad. Con base en el análisis estadístico, no se mostró una considerable diferencia de la desviación estándar respecto a la media de los datos obtenidos por los tres métodos utilizados para determinar el límite líquido para la arcilla núm. 1, por lo que se consideró aceptable el resultado obtenido por cada método.

**Tabla XLVIII. Análisis estadístico arcilla núm. 2 color café claro, Talpetate  
Cobán, Alta Verapaz**

<b>Parámetro</b>	<b>Penetrómetro de cono</b>	<b>Copa de Casagrande</b>	<b>Ecuación de Lambe</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza de una muestra</b>	<b>Desviación estándar de la muestra</b>
Límite Líquido	74,05	67,38	66,32	69,17	17,56	4,19
Límite plástico	28,1	28,1	28,1	28,10	0,00	0,00
Índice de Plasticidad	45,95	39,28	38,22	41,01	17,56	4,19

Fuente: elaboración propia, datos sección de resultados.

La tabla XLVIII, presentó nuevamente un suelo con característica de alta plasticidad, con base en los resultados de LL = 69,17 e IP = 41,01, y carta de plasticidad, se observó una considerable diferencia en la desviación estándar y los resultados de límite líquido para los métodos de penetrómetro de cono y de copa de Casagrande, en la sección de resultados para la arcilla núm. 2 se observó que fue necesario evaluar un quinto punto de humedad para el método de penetrómetro de cono. Se deduce que esta diferencia tiene su incidencia en el contenido mineralógico de la arcilla ensayada, debido a que, por copa de Casagrande, el comportamiento esperado es el del cierre de la ranura creada en la capa de suelo aplicada en la misma, este método dinámico se lleva a cabo por el proceso de caída libre de 1 cm de la copa hacia la base de la misma. Respecto al método de penetrómetro de cono, se presume que el contenido mineralógico tiene incidencia al adherirse el suelo en la superficie del cono de 80 g que penetra el suelo provocando que necesite un contenido más alto de humedad para llegar a su límite líquido, según norma que rige este ensayo.

Tabla XLIX. **Análisis estadístico arcilla núm. 3 color gris, San Mateo Ixtatán, Huehuetenango**

<b>Parámetro</b>	<b>Penetrómetro de Cono</b>	<b>Copa de Casagrande</b>	<b>Ecuación de Lambe</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza de una muestra</b>	<b>Desviación estándar de la Muestra</b>
Límite Líquido	100,41	100,99	100,09	100,50	0,21	0,46
Límite plástico	31,4	31,4	31,4	31,4	4E-15	2E-29
Índice de Plasticidad	69,01	69,59	68,69	69,10	0,21	0,46

Fuente: elaboración propia, datos sección de resultados.

Según los datos mostrados en la tabla XLIX de LL = 100,50 e IP = 69,10, se observó la característica de este suelo es que presenta una alta plasticidad, según criterios antes mencionados. Al observar el dato de la desviación estándar respecto a la media de los datos de la muestra ensayada, no representa una diferencia significativa, tomando como aceptables los resultados del ensayo de límite líquido para los tres métodos utilizados en su determinación en arcilla núm. 3.

Tabla L. **Análisis estadístico arcilla núm. 4 color gris, Puerto Barrios, Izabal**

<b>Parámetro</b>	<b>Penetrómetro de cono</b>	<b>Copa de Casagrande</b>	<b>Ecuación de Lambe</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza de una muestra</b>	<b>Desviación estándar de la muestra</b>
Límite Líquido	68,41	68,94	67,57	68,30	0,48	0,69
Límite plástico	47,2	47,2	47,2	47,20	0,00	0,00
Índice de Plasticidad	21,21	21,73	20,37	21,10	0,48	0,69

Fuente: elaboración propia, datos sección de resultados.

Según los datos mostrados en la tabla L de LL = 68,30 e IP = 21,10, la característica de este suelo es su alta plasticidad, según criterios mencionados. Al observar el dato de la desviación estándar respecto a la media de los datos de la muestra ensayada, no representa una diferencia significativa, tomando como aceptables los resultados del ensayo de límite líquido para los tres métodos utilizados en su determinación en arcilla núm. 4.

Tabla LI. **Análisis estadístico arcilla núm. 5 color café oscuro, Estanzuela, Zacapa**

<b>Parámetro</b>	<b>Penetrómetro de cono</b>	<b>Copa de Casagrande</b>	<b>Ecuación de Lambe</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza de una muestra</b>	<b>Desviación estándar de la muestra</b>
Límite Líquido	54,81	53,03	53,17	53,66	0,98	0,99
Límite plástico	20,1	20,1	20,1	20,10	0,00	0,00
Índice de Plasticidad	34,71	32,95	33,07	33,57	0,98	0,99

Fuente: elaboración propia, datos sección de resultados.

Según los datos mostrados en la tabla LI de LL = 53,66 e IP = 33,57, este suelo posee una alta plasticidad, según criterios antes mencionados. Al observar el dato de la desviación estándar respecto a la media de los datos de la muestra ensayada, no representa una diferencia significativa, tomando como aceptables los resultados del ensayo de límite líquido para los tres métodos utilizados en su determinación en arcilla núm. 5.

Tabla LII. **Análisis estadístico arcilla núm. 6 color café, San Juan Cotzal, Quiché**

<b>Parámetro</b>	<b>Penetrómetro de cono</b>	<b>Copa de Casagrande</b>	<b>Ecuación de Lambe</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza de una muestra</b>	<b>Desviación estándar de la muestra</b>
Límite Líquido	64,91	59,69	59,38	61,28	9,65	3,11
Límite plástico	30,2	30,2	30,2	30,20	0,00	0,00
Índice de Plasticidad	34,71	29,49	29,18	31,03	9,65	3,11

Fuente: elaboración propia, datos sección de resultados.

La tabla LII, presentó nuevamente un suelo con característica de alta plasticidad, con base en los resultados de LL = 61,28 e IP = 31,03, y carta de plasticidad. Se observó una diferencia en la desviación estándar y los resultados de límite líquido para los métodos de penetrómetro de cono y de copa de Casagrande, en la sección de resultados para la arcilla núm. 6 se observó que fue necesario evaluar un quinto punto de humedad para el método de penetrómetro de cono. Esta diferencia tiene incidencia en el contenido mineralógico de la arcilla ensayada, debido a que por copa de Casagrande, el comportamiento esperado es el del cierre de la ranura creada en la capa de suelo aplicada en la misma. Este método dinámico se lleva a cabo por el proceso de caída libre de 1 cm de la copa hacia la base de la misma. Respecto al método de penetrómetro de cono, se presume que su contenido mineralógico tiene incidencia al adherirse el suelo en la superficie del cono de 80 g. que penetra el suelo provocando para este, que necesita un contenido más alto de humedad para llegar a su límite líquido, según la norma que rige este ensayo.



**5.2. Clasificación de las arcillas por Límites de Atterberg y ensayos complementarios**

Tabla LIII. **Clasificación de las arcillas**

núm.	Muestra núm.	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	índice de plasticidad	Clasificación por Carta de Plasticidad	Descripción del suelo según Granulometría ASTM D422
1	Cobán, Alta Verapaz	91,8	42,0	49,8	MH	Arcilla color café oscuro
2	Cobán, Alta Verapaz	66,3	28,1	38,2	CH	Arcilla color café claro
3	San Mateo Ixtatán, Huehuetenango	100,1	31,4	68,7	CH	Arcilla color gris
4	Puerto Barrios	67,6	47,2	20,4	MH	Arcilla color gris
5	Estanzuela, Zacapa	53,2	20,1	33,1	CH	Arcilla arenosa color café oscuro
6	San Juan Cotazal, Quiché	59,4	30,2	29,2	CH	Arcilla color café

Fuente: elaboración propia, datos sección de resultados.



## CONCLUSIONES

1. Se comparó el parámetro de límite líquido con ambos métodos, copa de Casagrande y penetrómetro de cono, con lo que se establece una nueva metodología de determinación de dicho parámetro para el laboratorio de la Sección de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de la facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Se determinó que los métodos más compatibles para la determinación de límite líquido, fueron los de copa de Casagrande, método gráfico (curva de flujo) y método de un punto (ecuación de Lambe), una vez se tome para el método de un punto la muestra con el contenido de humedad por debajo de los 25 golpes, procurando estar lo más cercano al mismo para obtener un dato más compatible.
3. Experimentalmente, se comprobó que existe una variación en los resultados que se obtuvieron al llevar a cabo por el método de la copa de Casagrande con el Ranurador curvo AASHTO, respecto al Ranurador plano ASTM, tomando en cuenta que, para fines del presente estudio, los datos que resultaron compatibles con los resultados del método de penetrómetro de cono, fueron los obtenidos utilizando el Ranurador plano ASTM, tratándose de suelos de grano fino de alta plasticidad.
4. Se obtuvo compatibilidad entre los resultados de límite líquido para los suelos provenientes de: Izabal, Puerto Barrios, arcilla color gris de alta plasticidad. Huehuetenango, San Mateo Ixtatán, descripción: arcilla color gris de alta plasticidad. Zacapa, Estanzuela, descripción: arcilla café

oscuro de alta plasticidad. Alta Verapaz, Cobán, descripción: arcilla café oscuro de alta plasticidad.

5. No se obtuvo compatibilidad en los resultados para los siguientes suelos: Quiché, San Juan Cotzal, descripción: arcilla café claro de alta plasticidad y Alta Verapaz, Cobán, descripción: arcilla café claro de alta plasticidad.
  
6. Se tuvo limitante para los métodos mecánicos establecer la naturaleza química y mineralógica de estos suelos. El único factor en común para los mismos es la propiedad física del color y la poca compatibilidad de resultados en comparación con los demás suelos descritos, tomando en consideración la naturaleza de los ensayos de copa de Casagrande (ensayo dinámico), respecto al de penetrómetro de cono (estático).

## RECOMENDACIONES

1. Con base en los ensayos realizados en el laboratorio, se recomienda el uso del Ranurador ASTM, para el ensayo de límite líquido para suelos de grano fino de alta plasticidad con la copa de Casagrande, el cual favoreció a resultados compatibles con el método de penetrómetro de cono, a diferencia del Ranurador AASHTO, con el cual existió una diferencia notable al comparar los dos métodos.
2. En la determinación del límite líquido con un punto de humedad (ecuación de Lambe) se recomienda tomar puntos muy cercanos que queden por debajo de los 25 golpes de caída libre de la copa de Casagrande, ya que estos ofrecen resultados aproximados al límite líquido utilizando la curva de flujo (gráfica de 4 puntos).
3. Cumplir con la metodología descrita en la norma que se utilizará para la realización del ensayo de límite líquido desde el tamizado de la muestra que se ensayará, y el tiempo de saturación con agua desmineralizada para los suelos de grano fino, de esta manera, se pueden realizar los ensayos con muestras de suelo con un contenido de humedad homogéneo.
4. Llevar control de la calibración y uso adecuado del equipo para la determinación de límite líquido, copa de Casagrande, caída libre 1 cm, velocidad constante de 120 revoluciones por minuto; penetrómetro de cono, altura adecuada de caída libre del cono vs suelo de grano fino,

tiempo de penetración de cono de 5 segundos, para reducir el porcentaje de error humano en cada prueba.

5. Llevar a cabo una clasificación química-mineralógica de las arcillas, y tomarla como punto de partida para el análisis y clasificación de los suelos con base en los métodos de límite líquido por copa de Casagrande y penetrómetro de cono, explicando de manera más detallada el comportamiento de la variación y coincidencia entre los resultados de cada diferente tipo de suelo de grano fino y método ensayado.
  
6. Se recomienda la implementación y uso del método de penetrómetro de cono para la determinación de límite líquido para la sección de Mecánica de Suelos del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, como un ensayo alternativo para la determinación del parámetro antes descrito, o definitivo según el criterio de las autoridades de este Centro de Investigaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils T-89*, California, U.S.A.: 2003. 11 p.
2. \_\_\_\_\_ . *Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils T-90*, California, U.S.A.: 2003. 05 p.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Annual book of astm standards 2006, section four, construction*, Baltimore, MD, U.S.A.: Editorial Staff, 2006. 1441 p.
4. BRITISH STANDARD. *Methods of test for Soils for civil engineering purposes part 2 1337*. Chiswick High Rd, London. British Standard Institution 1998.
5. CLAYTON. C.R.I. / MATTHEWS. M.C. / SIMONS. N.E. *Site Investigation*. 2ª. ed. California, USA: Halssted Press. 1982. 424 p.
6. DAS. Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. 7ª. ed. California, USA: Thomson Learning. 2001. 594 p.
7. \_\_\_\_\_ . *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 5ª. ed. California, USA: Thomson Learning. 2006. 742 p.

8. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de ingeniería. 2008. 466 p.
9. HUMBOLDT. *Construction Materials Testing Equipment*. Catalog 9. Montréal, Canadá. 2012. 295 p.
10. JUÁREZ BADILLO, Eulalio. *Mecánica de Suelos, Tomo I, Fundamentos de la mecánica de suelos*. 1ª ed. México: Limusa. 2005. 642 p.
11. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, *Mapa Fisiográfico-Geomorfológico de la República de Guatemala, a escala 1:250,000 –Memoria Técnica-*. Guatemala: MAGA, 2001. 109 p.
12. OSORIO. Santiago. La plasticidad de las arcillas. [en línea]. <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>. [Consulta: 05 de abril de 2016].
13. SMITH. Michael Jhon. *Soil Mechanics*, 4ª. ed. England: Longman Scientific & Technical. 1988. 167 p.
14. WALPOLE. Ronald E. / MYERS. Raymond H. / MYERS. Sharon L. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6ª. ed. México: 1999. 752 p.



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Arcilla núm.1, color café, Cobán Alta Verapaz

PARÁMETRO	LÍMITE LÍQUIDO										
	LÍMITE PLÁSTICO			LÍMITE LÍQUIDO							
PENETRACIÓN (mm)	15,3			17			18,8			22,7	
No. GOLPES	45			32			22			15	
TARRO	A-33	A-39	A-16	A-60	A-31	C-26	C-6	M-2	A-18	A-81	
PBH	30,49	30,09	28,01	32,98	32,94	31,06	30,31	35,61	32,47	37,36	
PBS	28,01	27,61	24,57	29,23	29,13	28,01	27,15	30,25	28,92	33,52	
TARA	25	24,54	20,48	24,81	24,76	24,94	24,03	24,72	20,36	24,47	
DIF	2,48	2,48	3,44	3,75	3,81	3,05	3,16	5,36	3,55	3,84	
PNS	3,01	3,07	4,09	4,42	4,37	3,07	3,12	5,53	8,56	9,05	
HUMEDAD	82,4	80,8	84,1	84,8	87,2	99,3	101,3	96,9	41,5	42,4	
PROMEDIO	81,6		84,5		93,3		99,1		42,0		

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

### Apéndice 2. Gravedad específica de arcilla núm. 1

IDENTIFICACIÓN DE MATRAZ	5	6
CAPACIDAD DEL MATRAZ (c.c.)	500	500
PESO MATRAZ LIMPIO Y SECO (gr.)	175,98	178,41
PESO MATRAZ + SUELO SECO (gr.)	266,33	268,79
PESO SUELO SECO (gr.)	90	90
PESO MATRAZ + SUELO + AGUA (gr.)	731,48	733,77
PESO MATRAZ + AGUA	674,83	677,03
TEMPERATURA DEL AGUA	21,7	21,7
GRAVEDAD ESPECIFICA	2,69	2,70
PROMEDIO (gr. /c.c.)	2,70	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 3. **Arcilla núm. 2, color café claro, Talpetate Cobán, Alta Verapaz**

PARÁMETRO	LÍMITE LÍQUIDO										LÍMITE PLÁSTICO	
	13,3		14,6		16,5		19,3		21,9			
Penetración (mm)	40		29		21		16		10			
No. Golpes	M-2	A-31	C-26	C-6	A-16	A-33	A-39	A-60	S-11	S-4	A-3	A-60
TARRO												
PBH	31,48	30,62	31,4	34,71	27,54	31,4	32,8	34,92	30,58	31,46	35,43	41,21
PBS	28,94	28,43	28,71	30,5	24,68	28,82	29,31	30,66	26,64	27,24	32,33	37,63
TARA	24,69	24,77	24,49	24,07	20,47	25	24,54	24,79	21,55	21,74	21,42	24,74
DIF	2,54	2,19	2,69	4,21	2,86	2,58	3,49	4,26	3,94	4,22	3,1	3,58
PNS	4,25	3,66	4,22	6,43	4,21	3,82	4,77	5,87	5,09	5,5	10,91	12,89
HUMEDAD	59,8	59,8	63,7	65,5	67,9	67,5	73,2	72,6	77,4	76,7	28,4	27,8
PROMEDIO	59,8		64,6		67,7		72,9		77,1		28,1	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 4. **Gravedad específica de arcilla núm. 2**

IDENTIFICACIÓN DE MATRAZ	7	8
CAPACIDAD DEL MATRAZ (c.c.)	500	500
PESO MATRAZ LIMPIO Y SECO (gr.)	221,64	198,18
PESO MATRAZ + SUELO SECO (gr.)	311,74	288,28
PESO SUELO SECO (gr.)	90	90
PESO MATRAZ + SUELO + AGUA (gr.)	776,56	753,33
PESO MATRAZ + AGUA	720,45	697,11
TEMPERATURA DEL AGUA	21,7	21,7
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2,65	2,66
PROMEDIO (gr. /c.c.)	2,65	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 5. **Arcilla núm. 3, color gris, San Mateo Ixtatán, Huehuetenango**

PARÁMETRO	LÍMITE LÍQUIDO								LÍMITE PLÁSTICO	
	15,5		18,1		20		23,3			
PENETRACIÓN (mm)	47		31		23		17			
No. GOLPES	C-12	A-54	S-11	S-4	A-10	A-18	C-38	C-28	A-60	A-3
TARRO										
PBH	34,65	31,56	25,72	26,98	25,08	24,53	31,47	31,04	40,52	35,57
PBS	29,95	28,25	23,66	24,4	22,69	22,41	27,93	27,64	36,76	32,17
TARA	24,86	24,76	21,55	21,74	20,34	20,3	24,56	24,4	24,73	21,39
DIF	4,7	3,31	2,06	2,58	2,39	2,12	3,54	3,4	3,76	3,4
PNS	5,09	3,49	2,11	2,66	2,35	2,11	3,37	3,24	12,03	10,78
HUMEDAD	92,3	94,8	97,6	97,0	101,7	100,5	105,0	104,9	31,3	31,5
PROMEDIO	93,6		97,3		101,1		105,0		31,4	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 6. **Gravedad específica de arcilla núm. 3**

IDENTIFICACIÓN DE MATRAZ	3	4
CAPACIDAD DEL MATRAZ (c.c.)	500	500
PESO MATRAZ LIMPIO Y SECO (gr.)	178,05	165,2
PESO MATRAZ + SUELO SECO (gr.)	268,33	255,57
PESO SUELO SECO (gr.)	90	90
PESO MATRAZ + SUELO + AGUA (gr.)	733,41	720,52
PESO MATRAZ + AGUA	676,76	664,01
TEMPERATURA DEL AGUA	21,7	21,7
GRAVEDAD ESPECIFICA	2,69	2,68
PROMEDIO (gr. /c.c.)	2,69	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 7.

**Arcilla núm.4, color gris, Puerto Barrios, Izabal**

PARÁMETRO	LÍMITE LÍQUIDO								LÍMITE PLÁSTICO	
	PENETRACIÓN (mm)		13,8		15,1		21,1			
No. GOLPES	40		33		17		10			
TARRO	C-34	C-35	C-39	C-36	A-28	A-32	A-11	C-21	A-3	A-60
PBH	30	31,12	29,45	29,52	29,71	30,38	27,25	30,71	32,97	37,5
PBS	27,9	28,72	27,6	27,55	27,57	28,04	24,44	28,18	29,25	33,41
TARA	24,5	24,81	24,68	24,39	24,57	24,71	20,55	24,7	21,38	24,74
DIF	2,1	2,4	1,85	1,97	2,14	2,34	2,81	2,53	3,72	4,09
PNS	3,4	3,91	2,92	3,16	3	3,33	3,89	3,48	7,87	8,67
HUMEDAD	61,8	61,4	63,4	62,3	71,3	70,3	72,2	72,7	47,3	47,2
PROMEDIO	61,6		62,8		70,8		72,5		47,2	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 8.

**Gravedad específica de arcilla núm. 4**

IDENTIFICACIÓN DE MATRAZ	1	2
CAPACIDAD DEL MATRAZ (c.c.)	500	500
PESO MATRAZ LIMPIO Y SECO (gr.)	177,55	164,81
PESO MATRAZ + SUELO SECO (gr.)	267,9	255,29
PESO SUELO SECO (gr.)	90	90
PESO MATRAZ + SUELO + AGUA (gr.)	733,6	720,92
PESO MATRAZ + AGUA	676,16	663,51
TEMPERATURA DEL AGUA	21,7	21,7
GRAVEDAD ESPECIFICA	2,76	2,76
PROMEDIO (gr. /c.c.)	2,76	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 9. **Arcilla núm.5, color café oscuro, Estanzuela, Zacapa.**

PARÁMETRO	LÍMITE LÍQUIDO								LÍMITE PLÁSTICO	
	PENETRACIÓN (mm)		No. GOLPES		TARRO		PBH			
	17	18,2	19	20,4	31	28	22	18	C-28	C-38
	A-45	C-2	A-32	A-10	A-56	A-81	C-34	C-3		
PENETRACIÓN (mm)										
No. GOLPES										
TARRO	A-45	C-2	A-32	A-10	A-56	A-81	C-34	C-3	C-28	C-38
PBH	30,59	29,7	30,95	28,02	30,18	30,4	31,39	31,18	33,78	32,88
PBS	28,56	27,89	28,81	25,39	28,18	28,32	28,94	28,86	32,25	31,45
TARA	24,62	24,36	24,68	20,35	24,46	24,48	24,51	24,63	24,39	24,57
DIF	2,03	1,81	2,14	2,63	2	2,08	2,45	2,32	1,53	1,43
PNS	3,94	3,53	4,13	5,04	3,72	3,84	4,43	4,23	7,86	6,88
HUMEDAD	51,5	51,3	51,8	52,2	53,8	54,2	55,3	54,8	19,5	20,8
PROMEDIO	51,4		52,0		54,0		55,1		20,1	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 10. **Gravedad específica de arcilla núm. 5**

IDENTIFICACIÓN DE MATRAZ	9	10
CAPACIDAD DEL MATRAZ (c.c.)	500	500
PESO MATRAZ LIMPIO Y SECO (gr.)	186,59	186,31
PESO MATRAZ + SUELO SECO (gr.)	276,9	276,62
PESO SUELO SECO (gr.)	90	90
PESO MATRAZ + SUELO + AGUA (gr.)	741,6	741,26
PESO MATRAZ + AGUA	684,82	684,86
TEMPERATURA DEL AGUA	21,7	21,7
GRAVEDAD ESPECIFICA	2,70	2,67
PROMEDIO (gr./c.c.)	2,69	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 11. **Arcilla núm.6, color café, San Juan Cotzal, Quiché**

PÁRAMETRO	LÍMITE LÍQUIDO											
	12,6		13,3		16,2		17,5		22,2		LÍMITE PLÁSTICO	
No. GOLPES	39		29		22		17		10			
TARRO	C-1	C-35	S-11	A-23	A-11	S-32	A-51	A-1	A-3	E-1	A-54	C-4
PBH	31,48	31,57	28,19	29,6	29,84	29,97	26,43	24,44	31,79	31,41	36,9	36,69
PBS	29,1	29,17	25,76	26,62	26,76	26,83	23,9	22,32	27,7	27,45	34,1	33,9
TARA	24,73	24,84	21,51	21,42	21,65	21,62	19,86	18,91	21,62	21,53	24,76	24,75
DIF	2,38	2,4	2,43	2,98	3,08	3,14	2,53	2,12	4,09	3,96	2,8	2,79
PNS	4,37	4,33	4,25	5,2	5,11	5,21	4,04	3,41	6,08	5,92	9,34	9,15
HUMEDAD	54,5	55,4	57,2	57,3	60,3	60,3	62,6	62,2	67,3	66,9	30,0	30,5
PROMEDIO	54,9		57,2		60,3		62,4		67,1		30,2	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

Apéndice 12. **Gravedad específica de arcilla núm. 6**

IDENTIFICACIÓN DE MATRAZ	11	12
CAPACIDAD DEL MATRAZ (c.c.)	500	500
PESO MATRAZ LIMPIO Y SECO (gr.)	179,95	247,34
PESO MATRAZ + SUELO SECO (gr.)	269,96	337,38
PESO SUELO SECO (gr.)	90	90
PESO MATRAZ + SUELO + AGUA (gr.)	736,11	802,96
PESO MATRAZ + AGUA	679,32	746,14
TEMPERATURA DEL AGUA	21,7	21,7
GRAVEDAD ESPECIFICA	2,70	2,71
PROMEDIO (gr. /c.c.)	2,71	

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos por el autor.

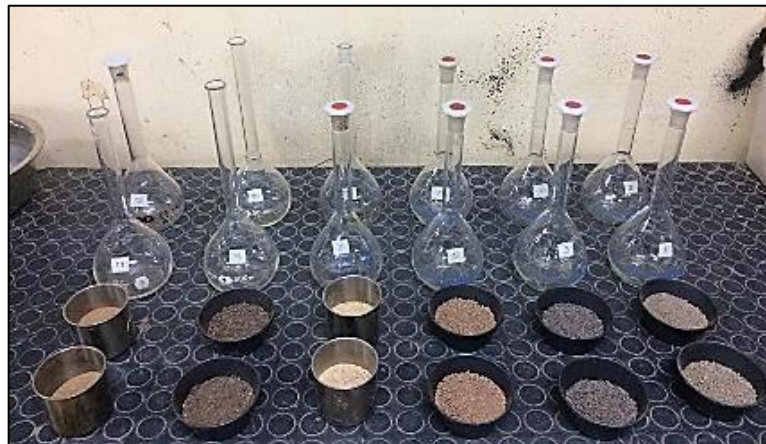
Apéndice 13. **Tarros para determinación de humedades**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 15 de octubre de 2016, a las 17:58 horas.

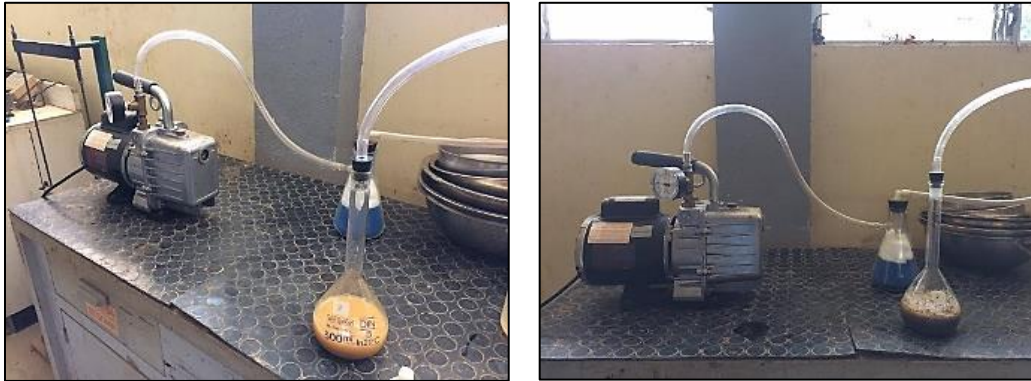
- Gravedad específica

Apéndice 14. **Matraz aforado, capacidad 500cc**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 15 de octubre de 2016, a las 17:58 horas.

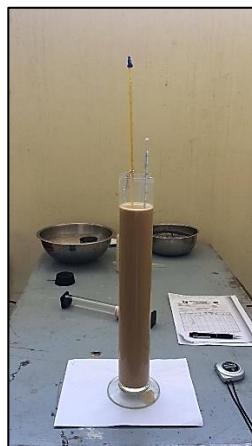
Apéndice 15. **Bomba de vacío, H-1763a**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 16 de octubre de 2016, a las 12:54 horas.

- Granulometría por hidrómetro

Apéndice 16. **Sistema hidrómetro, mezcla de solución con suelo fino y termómetro**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 23 de noviembre de 2016, a las 13:50 horas.



Apéndice 17. **Ensayo de límite líquido por penetrómetro de cono para arcillas de Puerto Barrios y Huehuetenango**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor, octubre de 2016.

Apéndice 18. **Ensayo de límite líquido por penetrómetro de cono para arcilla de Cobán, Alta Verapaz**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor, octubre de 2016.







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



---

INFORME No. 490 S.S.      O.T.: 36.747

No. 09808

**INTERESADO:** Mario Raúl Pacay García - 200815572

**PROYECTO:** Tesis "Límite Líquido en Suelos de Grano Fino, según los Métodos de Penetrómetro de Cono y Copa de Casagrande"

**ASUNTO:** ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS DEL SUELO

**NORMA:** ASTM D854-05

**UBICACION:** Universidad de San Carlos de Guatemala

**FECHA:** viernes, 25 de noviembre de 2016

**RESULTADOS:**

ENSAYO	MUESTRA	GRAVEDAD ESPECÍFICA (20 °C)	DESCRIPCIÓN
1	Puerto Barrios, Izabal	2,76	Arcilla Color Gris
2	San Mateo Ixtatán, Huehuetenango	2,69	Arcilla Color Gris
3	Cobán, Alta Verapaz	2,70	Arcilla Color Café Oscuro
4	Estanzuela, Zacapa	2,69	Arcilla Arenosa Color Café Oscuro
5	San Juan Cotzal, Quiché	2,71	Arcilla Color Café
6	Cobán, Alta Verapaz	2,65	Arcilla Color Café Claro

**OBSERVACIONES:**  
Muestras proporcionadas por el interesado.

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



Atentamente,

Vo. Bo.

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

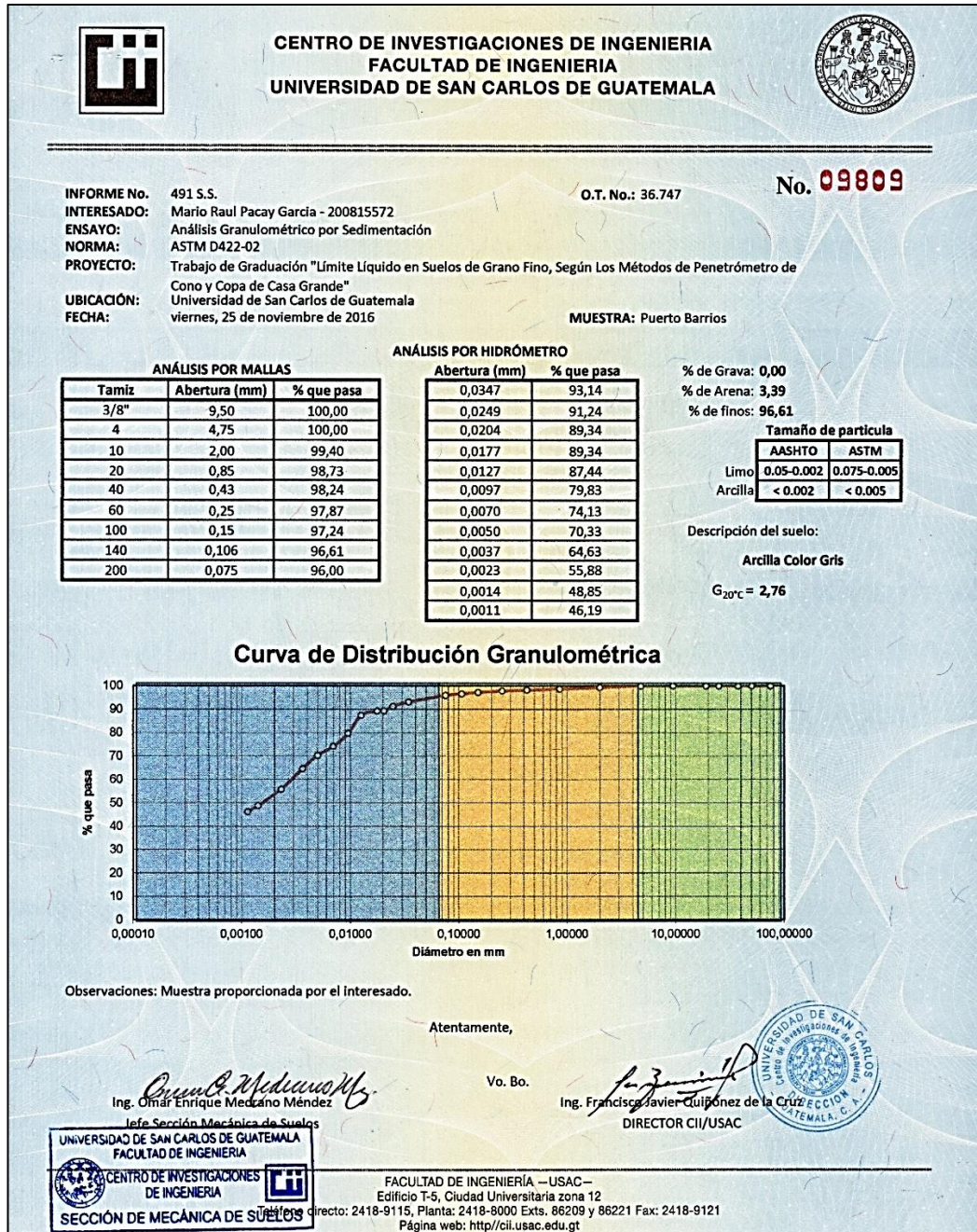
*Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC



---


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

Anexo 3. **Resultados análisis granulométrico de muestra Puerto Barrios. CII FIUSAC**




Fuente: Sección Mecánica de Suelos, CII FIUSAC.

Anexo 4. **Resultados análisis granulométrico de muestra San Mateo Ixtatán, Huehuetenango. CII FIUSAC**



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



---

**INFORME No.:** 492 S.S.  
**INTERESADO:** Mario Raul Pacay García - 200815572  
**ENSAYO:** Análisis Granulométrico por Sedimentación  
**NORMA:** ASTM D422-02  
**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Límite Líquido en Suelos de Grano Fino, Según Los Métodos de Penetrómetro de Cono y Copa de Casagrande"  
**UBICACIÓN:** Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FECHA:** viernes, 25 de noviembre de 2016

**O.T. No.:** 36.747  
**No. 09810**

**ANÁLISIS POR MALLAS**

Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
3/8"	9,50	100,00
4	4,75	100,00
10	2,00	100,00
20	0,85	99,97
40	0,43	99,94
60	0,25	99,92
100	0,15	99,91
140	0,106	99,91
200	0,075	99,90

**ANÁLISIS POR HIDROMETRO**

Abertura (mm)	% que pasa
0,0341	99,89
0,0241	99,89
0,0200	98,90
0,0174	96,92
0,0123	94,94
0,0092	93,56
0,0066	89,60
0,0048	87,03
0,0035	81,10
0,0022	72,00
0,0014	62,31
0,0011	59,34

% de Grava: 0,00  
 % de Arena: 0,09  
 % de finos: **99,91**

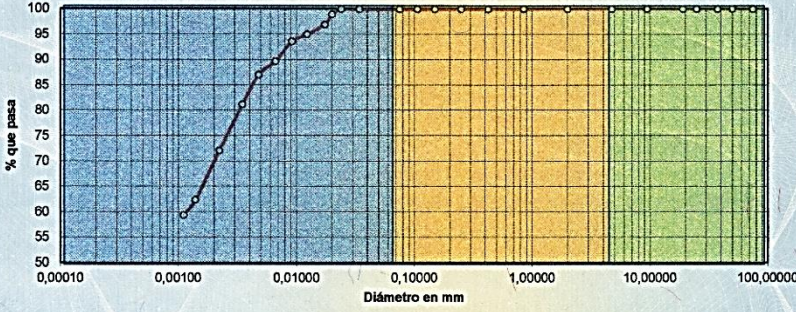
**Tamaño de partícula**

	AASHTO	ASTM
Limo	0.05-0.002	0.075-0.005
Arcilla	< 0.002	< 0.005

Descripción del suelo:  
**Arcilla Color Gris**


$G_{20^{\circ}C} = 2,69$

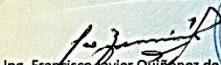
**Curva de Distribución Granulométrica**

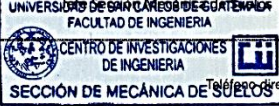


Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

  
 Ing. Omar Enrique Mediano Méndez

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




**SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS**


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

Fuente: Sección Mecánica de Suelos, CII FIUSAC.

Anexo 5. **Resultados análisis granulométrico de muestra Cobán, Alta Verapaz. CII FIUSAC**



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



---

**INFORME No.** 493 S.S.  
**INTERESADO:** Mario Raul Pacay Garcia - 200815572  
**ENSAYO:** Análisis Granulométrico por Sedimentación  
**NORMA:** ASTM D422-02  
**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Limite Líquido en Suelos de Grano Fino, Según Los Métodos de Penetrómetro de Cono y Copa de Casagrande"  
**UBICACIÓN:** CII/USAC  
**FECHA:** viernes, 25 de noviembre de 2016

**O.T. No.:** 36.747  
**No. 09811**

**ANÁLISIS POR MALLAS**

Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
3/8"	9,50	100,00
4	4,75	100,00
10	2,00	100,00
20	0,85	100,00
40	0,43	99,98
60	0,25	99,95
100	0,15	99,75
140	0,106	99,44
200	0,075	99,30

**ANÁLISIS POR HIDROMETRO**

Abertura (mm)	% que pasa
0,0351	97,71
0,0250	95,75
0,0204	95,75
0,0177	95,75
0,0127	93,78
0,0094	91,82
0,0067	89,85
0,0048	87,88
0,0034	85,92
0,0021	84,34
0,0013	77,66
0,0010	76,09

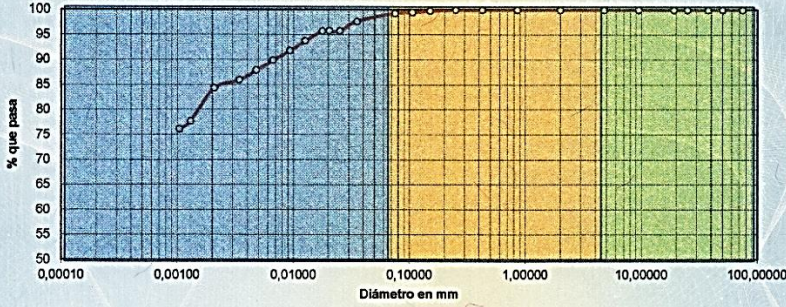
% de Grava: 0,00  
 % de Arena: 0,56  
 % de finos: 99,44

**Tamaño de partícula**

	AASHTO	ASTM
Limo	0.05-0.002	0.075-0.005
Arcilla	< 0.002	< 0.005

Descripción del suelo:  
**Arcilla Color Café Oscuro**  
 G<sub>20°C</sub> = 2,70

**Curva de Distribución Granulométrica**



Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

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

Vo. Bo.


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

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
**SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS**


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

Fuente: Sección Mecánica de Suelos, CII FIUSAC.

Anexo 6. **Resultados análisis granulométrico de muestra Estanzuela, Zacapa. CII FIUSAC**



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



---

**INFORME No.** 494 S.S.  
**INTERESADO:** Mario Raul Pacay Garcia - 200815572  
**ENSAYO:** Análisis Granulométrico por Sedimentación  
**NORMA:** ASTM D422-02  
**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Límite Líquido en Suelos de Grano Fino, Según Los Métodos de Penetrómetro de Cono y Copa de Casagrande"  
**UBICACIÓN:** CII/USAC  
**FECHA:** viernes, 25 de noviembre de 2016

**O.T. No.:** 36.747  
**No. 09812**

**ANÁLISIS POR MALLAS**

Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
3/8"	9,50	100,00
4	4,75	99,41
10	2,00	97,12
20	0,85	93,16
40	0,43	87,16
60	0,25	80,70
100	0,15	72,73
140	0,106	67,92
200	0,075	65,47

**ANÁLISIS POR HIDROMETRO**

Abertura (mm)	% que pasa
0,0371	57,03
0,0265	55,74
0,0219	54,44
0,0190	54,44
0,0137	51,85
0,0100	50,55
0,0071	49,65
0,0051	48,35
0,0036	45,76
0,0023	41,09
0,0014	38,89
0,0011	39,28

% de Grava: 0,00  
 % de Arena: 32,08  
 % de finos: 67,92

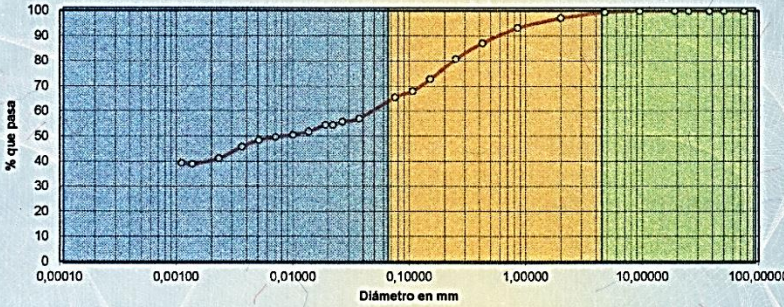
**Tamaño de partícula**

AASHTO	ASTM
Limo 0.05-0.002	0.075-0.005
Arcilla < 0.002	< 0.005

Descripción del suelo:  
**Arcilla Arenosa Color Café Oscuro**

$G_{20^{\circ}C} = 2,69$

**Curva de Distribución Granulométrica**



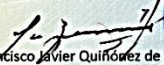
Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,


Vo. Bo.

Ing. Omar Enrique Mediano Méndez

Jefe Sección Mecánica de Suelos  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA




Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC



**SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS**


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




Fuente: Sección Mecánica de Suelos, CII FIUSAC



Anexo 7. **Resultados análisis granulométrico de muestra San Juan Cotzál, Quiché. CII FIUSAC**



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



---

**INFORME No.** 495 S.S.  
**INTERESADO:** Mario Raul Pacay Garcia - 200815572  
**ENSAYO:** Análisis Granulométrico por Sedimentación  
**NORMA:** ASTM D422-02  
**PROYECTO:** Trabajo de Graduación "Límite Líquido en Suelos de Grano Fino, Según Los Métodos de Penetrómetro de Cono y Copa de Casagrande"  
**UBICACIÓN:** CII/USAC  
**FECHA:** viernes, 25 de noviembre de 2016

**O.T. No.:** 36.747  
**No.** **09813**  
**MUESTRA:** San Juan Cotzal, Quiché

**ANÁLISIS POR MALLAS**

Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
3/8"	9,50	100,00
4	4,75	100,00
10	2,00	99,30
20	0,85	97,41
40	0,43	94,18
60	0,25	90,68
100	0,15	86,73
140	0,106	83,98
200	0,075	82,22

**ANÁLISIS POR HIDROMETRO**

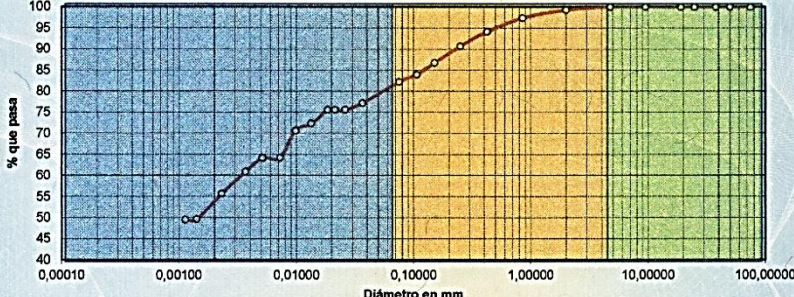
Abertura (mm)	% que pasa
0,0366	77,16
0,0260	75,54
0,0213	75,54
0,0184	75,54
0,0133	72,28
0,0098	70,65
0,0072	64,14
0,0051	64,14
0,0037	60,89
0,0023	55,68
0,0014	49,65
0,0011	49,49

**% de Grava: 0,00**  
**% de Arena: 16,02**  
**% de finos: 83,98**

Tamaño de partícula	
AASHTO	ASTM
Limo 0.05-0.002	0.075-0.005
Arcilla < 0.002	< 0.005

**Descripción del suelo:**  
**Arcilla Color Café**  
**G<sub>20°C</sub> = 2,71**

**Curva de Distribución Granulométrica**




**Observaciones:** Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

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

Vo. Bo.

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

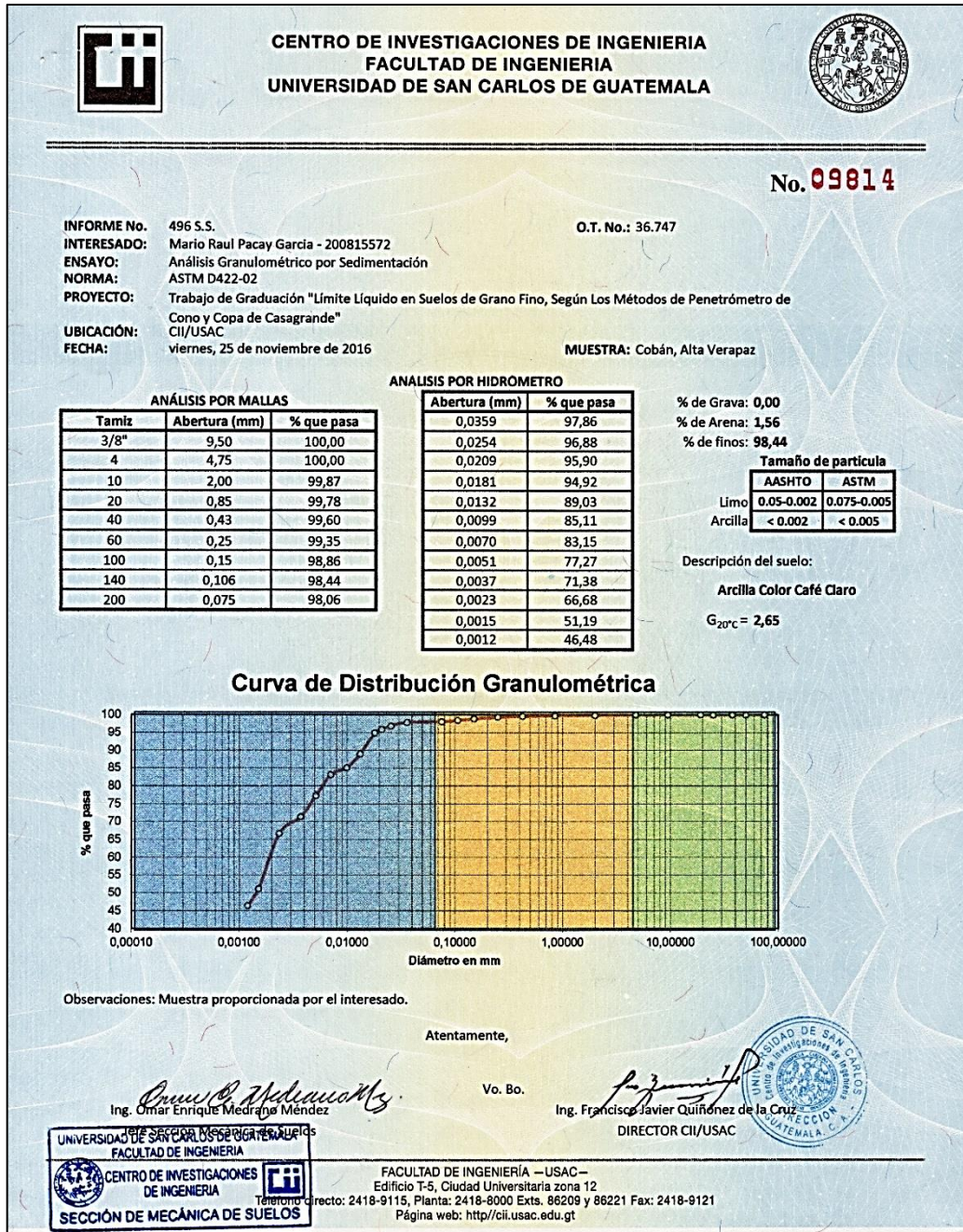


**SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS**

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

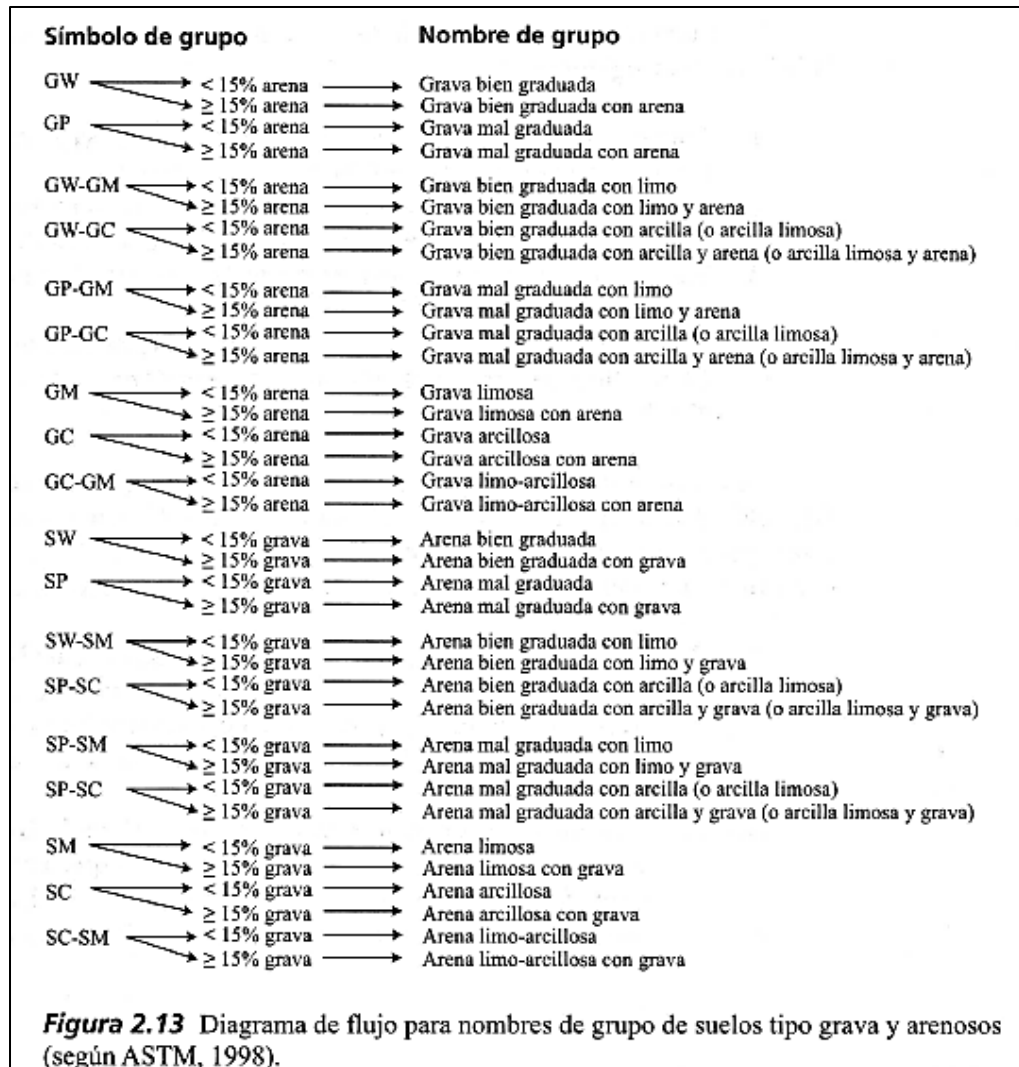
. Fuente: Sección Mecánica de Suelos, CII FIUSAC

Anexo 8. **Resultados análisis granulométrico de Cobán, Alta Verapaz. CII FIUSAC**



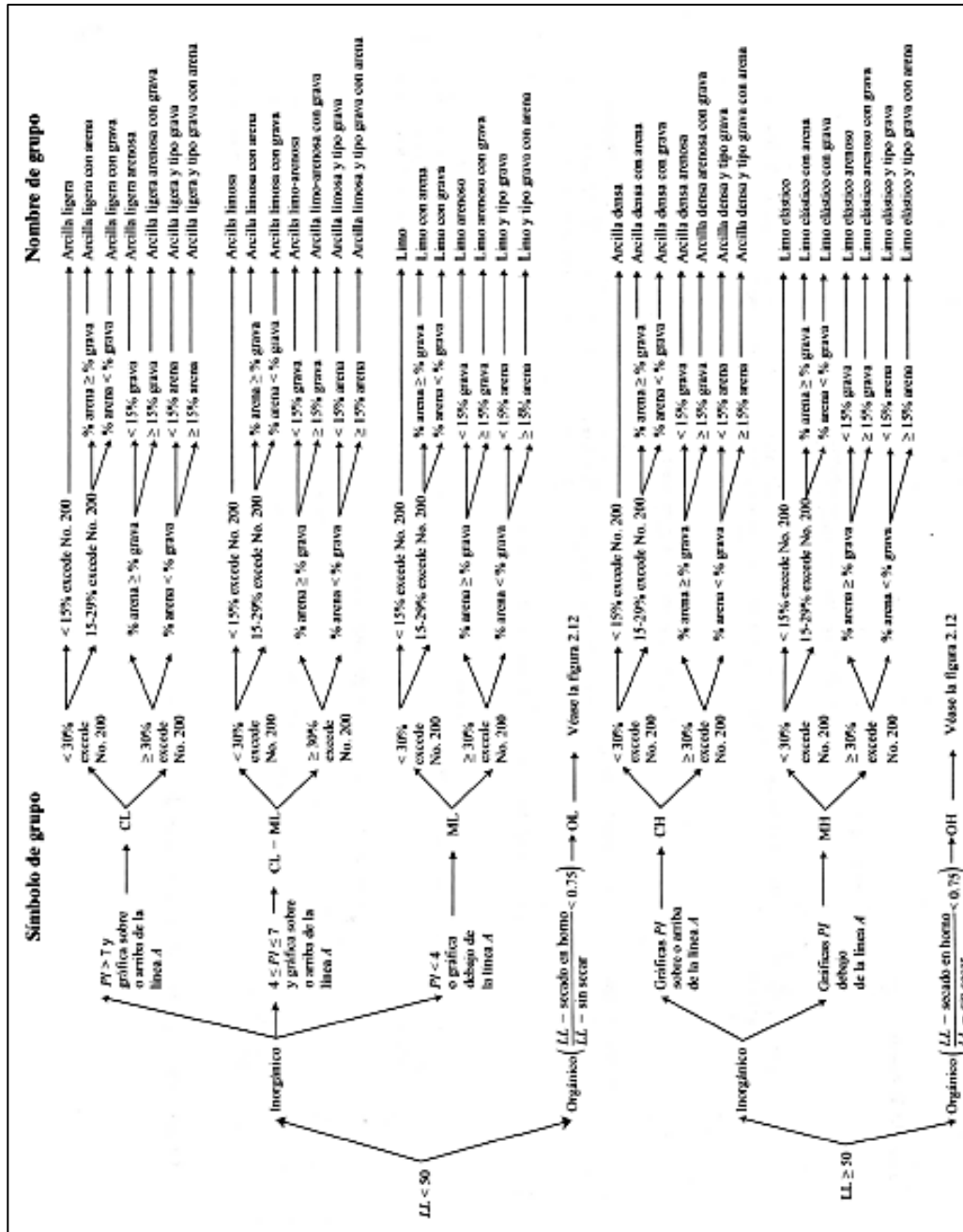
Fuente: Sección Mecánica de Suelos, CII FIUSAC

Anexo 9. Diagrama de flujo para nombre de grupo de suelos tipo grava y arenosos (según ASTM, 1998).



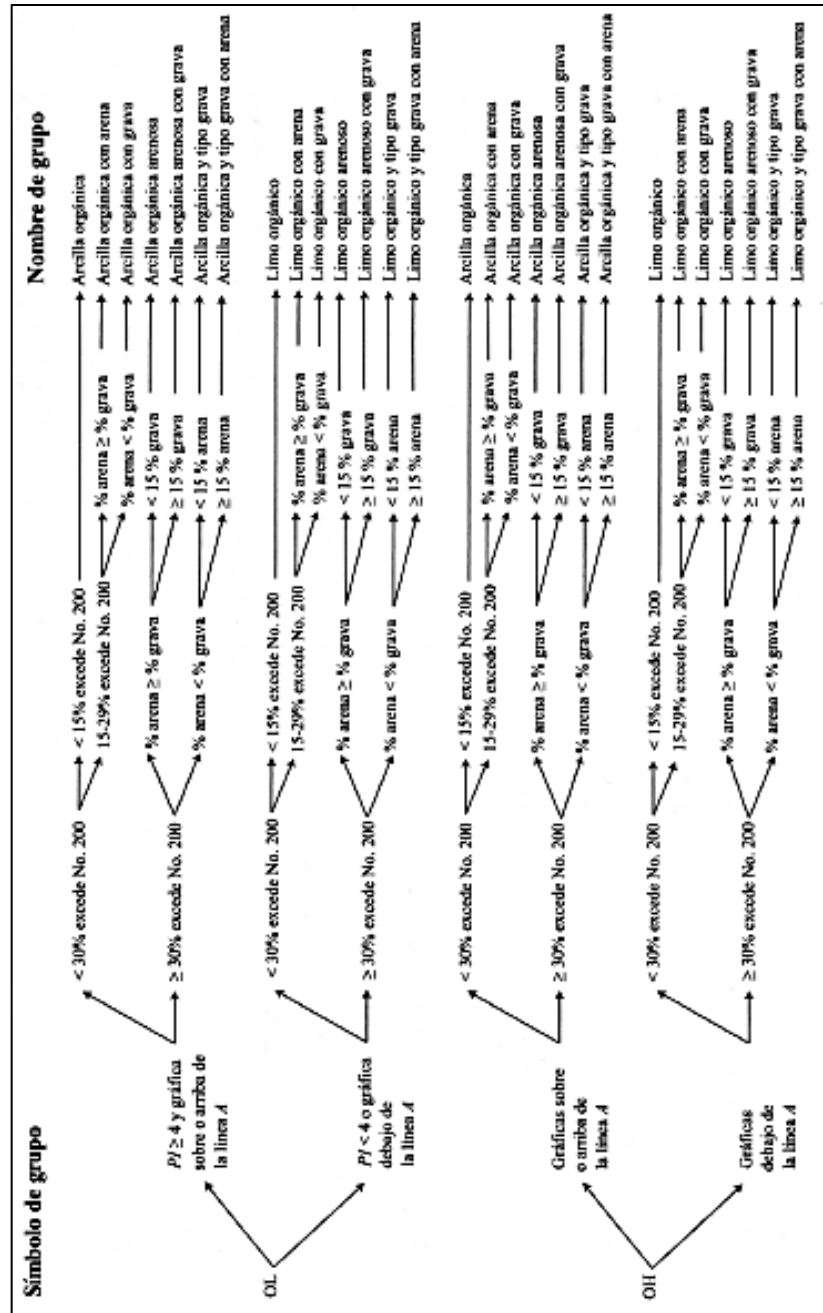
Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.42.

Anexo 10. Diagrama de flujo para nombres de grupo de suelos limosos, inorgánicos y arcillosos (según ASTM, 1998).



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.43.

Anexo 11. Diagrama de flujo para nombres de grupo de suelos limosos orgánicos y arcillosos (según ASTM, 1998)



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería Geotécnica*. p.44.

- Contenido de Humedad, diferentes medidas de peso:

Anexo 12. **Balanza digital**



Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012. p.232.*

Anexo 13. **Horno, temperatura máxima 225 °C H-30128**



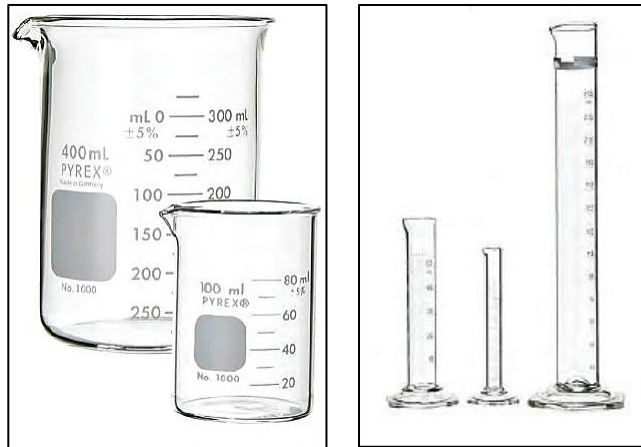
Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012. p.246.*

Anexo 14. **Mezclador de dispersión del suelo H-4260A**



Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012.* p.39.

Anexo 15. **Beacker y probeta graduados**



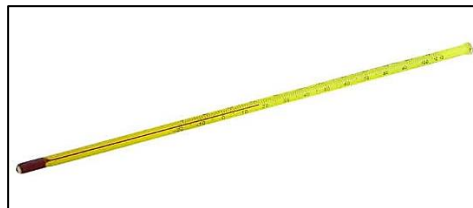
Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012.* p.252.

Anexo 16. **Hidrómetro de suelos ASTM 152H, H-4242, probeta con capacidad de 1 litro**



Fuente: HUMBOLDT. *Testing Equipment for Construction Materials, Catalog 9 2012*. p.39.

Anexo 17. **Termómetro**



Fuente: *TP-Laboratorio Químico*. <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/termometro.html>. Consulta: 23 de marzo de 2016.