



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

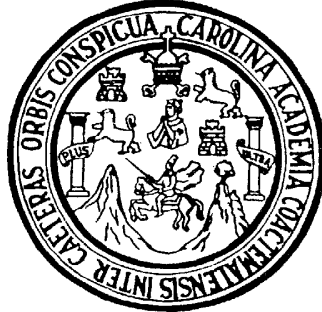
**APLICABILIDAD DEL MÉTODO DEL CONO PARA MEDIR LOS  
LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE SUELOS DE GUATEMALA**

**Samuel Arnoldo García González**

Asesorado por el Dr. Rodolfo Semrau Lago

Guatemala, abril de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICABILIDAD DEL MÉTODO DEL CONO PARA MEDIR LOS  
LÍMITES LÍQUIDOS Y PLÁSTICO DE SUELOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**SAMUEL ARNOLDO GARCÍA GONZÁLEZ**

ASESORADO POR EL DR. RODOLFO SEMRAU LAGO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ABRIL DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Claudio Cesar Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## 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:

### APLICABILIDAD DEL MÉTODO DEL CONO PARA MEDIR LOS LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE SUELOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, en el mes noviembre de 2009.



**Samuel Arnoldo García González**

**Dr. RODOLFO SEMRAU LAGO**

INGENIERO CIVIL  
Ph.D. EN MECANICA DE SUELOS

GEOTECNIA-CIMENTACIONES-PAVIMENTOS-LABORATORIO

11 AVENIDA 18-42 ZONA 11, MIRISCAL

TELS : 2472-7255 y 2472-7429 2473-1739 (fax) email:dr.rodolfosemrau@gmail.com

NUESTRA REFERENCIA  
LS-136-12

FECHA  
Guatemala, 27 de  
septiembre de 2012

Ingeniero  
Guillermo Francisco Melini Salguero  
Coordinador del Área de Materiales  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Su Despacho


Estimado Ingeniero Melini:

Por este medio me es grato hacer de su conocimiento que revisé la tesis del estudiante universitario Samuel Arnoldo García González, **“APLICABILIDAD DEL MÉTODO DEL CONO PARA MEDIR LOS LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE SUELOS DE GUATEMALA”**.

Es mi opinión que la mencionada tesis cumple con creces con los requisitos para su aprobación final, por estar sustentada por tres años de investigación en mi laboratorio, bajo mi supervisión directa.

Agradeciendo su atención a la presente, que desde ya comprometo mi agradecimiento, me es grato presentarle las muestras de mi más alta consideración y estima,

Atentamente,

  
Dr. Rodolfo Semrau Lago  
Ingeniero Civil  
Colegiado No. 1565

RSL\*mlbc  
cc archivo  
correlativo





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,  
17 de octubre de 2012

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 **APLICABILIDAD DEL MÉTODO DEL CONO PARA MEDIR LOS LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE SUELOS DE GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Samuel Arnoldo García González, quien contó con la asesoría del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

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



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
USAC

/bbdeb.



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

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

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



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Dr. Rodolfo Semrau Lago y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Samuel Arnoldo García González, titulado **APLICABILIDAD DEL MÉTODO DEL CONO PARA MEDIR LOS LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE SUELOS DE GUATEMALA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, abril de 2013.

/bbdeb.

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





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **APLICABILIDAD DEL MÉTODO DEL CONO PARA MEDIR LOS LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE SUELOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Samuel Arnoldo García González**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, abril de 2013

/cc



## DEDICATORIA

- A Dios:** Por darme la vida, por permitirme ser parte de su obra y por siempre tenerme tantas maravillas y sorpresas gratas en mi camino.
- A mis padres:** María Delia González de García y Luis Arnoldo García Alonzo por su amor, dedicación y por buscar siempre darme las oportunidades que me han llevado hasta este momento.
- A mis abuelos:** Leonarda Alonzo que me acompaña y María González, Catarino García y Nicolás González que me cuidan desde el cielo, por mostrarme como ser fuerte, por enseñarme el significado de la familia, de la dedicación y por enseñarme a soñar.
- A toda mi familia:** Por enseñarme a ser feliz, a luchar por las cosas que queremos, a no claudicar y por siempre demostrarme que nunca se está solo y que siempre podré contar con ellos.
- A todos los que de una manera u otra han sido mis maestros** por ser inspiración, fuente de conocimiento y por enseñarme la importancia de compartir lo que sabemos.

**A mi novia Viviam Pinto**

Por ser tan amorosa, especial y única en mi vida y por ser mis piernas cuando me faltó impulso para seguir adelante.

**A mis amigos,**

de la infancia y de la madurez, por acompañarme a conocer la vida, siempre dándome su compañía, apoyo, consejo, comprensión y cariño.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**La Universidad San  
Carlos de Guatemala,**

por brindarme una casa de estudios que me permitió desarrollar mis conocimientos y aptitudes,

**Facultad de Ingeniería,**

por brindarme la oportunidad de ampliar mis ideas y orientar mis pensamientos dentro del camino de las ciencias,

**Dr. Rodolfo Semrau,**

por creer en mis capacidades, ser ejemplo de cómo llevar el ejercicio profesional y brindarme el apoyo y guía para este trabajo de graduación,

**Ing. Juan Francisco  
Calderón, Ing. Regina  
Palomo, Ing. Julio Franco,**

por su ayuda en la elaboración de este trabajo de graduación y por ser de importante influencia en mi desarrollo como ingeniero civil,

**Al personal del Laboratorio  
del Dr. Rodolfo Semrau,**

por el apoyo y la ayuda brindada para la realización de este trabajo de graduación,

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS .....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES .....	1
2. GENERALIDADES .....	3
2.1. Factores que afectan los límites de Atterberg .....	4
2.1.1. Contenido de Arcilla .....	5
2.1.2. Naturaleza del mineral arcilloso .....	5
2.1.3. Naturaleza de los cationes intercambiables .....	5
2.1.4. Contenido de materia orgánica .....	6
3. ANÁLISIS DIMENSIONAL .....	7
3.1. Las dimensiones físicas .....	9
3.2. Teorema de Buckingham .....	15
4. ENSAYOS PARA DETERMINAR LÍMITES DE ATTERBERG .....	19
4.1. Descripción del ensayo para el límite líquido según la norma ASTM .....	19
4.1.1. Equipo utilizado .....	20
4.1.2. Procedimiento .....	20
4.1.3. Cálculos y resultados .....	26

4.1.4.	Experiencias en laboratorio .....	27
4.1.5.	Ejemplo de cálculo.....	29
4.1.6.	Descripción del ensayo para el límite plástico Según la norma ASTM D4318-84 .....	31
4.1.7.	Equipo utilizado .....	32
4.1.8.	Procedimiento.....	32
4.1.9.	Cálculos y resultados.....	35
4.1.10.	Procedimientos alternos .....	36
4.1.11.	Experiencias en laboratorio .....	36
4.1.12.	Ejemplo de cálculo.....	37
4.1.13.	El índice plástico.....	37
4.2.	Descripción del ensayo de límite líquido según la Norma BS 1377 .....	37
4.2.1.	Equipo utilizado .....	38
4.2.2.	Procedimiento.....	39
4.2.3.	Cálculos y resultados.....	45
4.2.4.	Procedimientos alternos .....	47
4.2.5.	Experiencias en laboratorio .....	48
4.2.6.	Ejemplo de cálculo.....	48
4.3.	Descripción del ensayo y análisis dimensional Del Método de Wood y Wroth.....	51
4.3.1.	Equipo utilizado .....	57
4.3.2.	Procedimiento.....	58
4.3.3.	Cálculos y resultados.....	58
4.3.4.	Procedimientos alternos .....	60
4.3.5.	Experiencias en laboratorio .....	61
4.3.6.	Ejemplo de cálculo.....	61
4.4.	Descripción del Método de Belviso y Ciampoli .....	62
4.4.1.	Equipo utilizado .....	64
4.4.2.	Procedimiento.....	64

4.4.3.	Cálculos y resultados .....	65
4.4.4.	Procedimientos alternos .....	66
4.4.5.	Experiencias en laboratorio .....	66
4.4.6.	Ejemplo de cálculo .....	66
4.5.	Método propuesto para determinar el límite plástico a partir del ensayo de límite líquido según la norma ASTM 4318 y el índice de fluidez .....	68
4.5.1.	Equipo utilizado.....	72
4.5.2.	Procedimiento .....	73
4.5.3.	Cálculos y resultados .....	73
4.5.4.	Experiencias en laboratorio .....	74
4.5.5.	Ejemplo de cálculo .....	75
5.	SUELOS ENSAYADOS .....	77
6.	MÉTODO DE ENSAYO.....	85
7.	RESULTADOS Y SU COMPARACIÓN .....	87
8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	101
	CONCLUSIONES.....	143
	RECOMENDACIONES.....	147
	BIBLIOGRAFÍA.....	149
	APÉNDICES.....	151



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Gráfica de límites y estados de consistencia.....	4
2.	Aparato de Casagrande .....	22
3.	Detalle de talón del aparato de Casagrande al ser calibrado .....	22
4.	Mezclado de muestra para límite líquido .....	23
5.	Nivelado de muestra en el aparato de Casagrande.....	23
6.	Ranurado para ensayo de límite líquido .....	24
7.	Cierre de 13 milímetros en el ranurado .....	24
8.	Ejemplo de gráfica para límite líquido por norma ASTM D4318-84 ....	29
9.	Moldeado de cilindros con alambre de referencia de 1/8” .....	34
10.	Detalle de Cilindros agrietados al límite plástico.....	34
11.	Muestra para secado .....	35
12.	Aparato penetrómetro .....	40
13.	Cono de 80 gramos.....	41
14.	Muestra rasada en el tarro de ensayo .....	41
15.	Centrado de muestra en el penetrómetro .....	42
16.	Penetrómetro al ras de la muestra .....	42
17.	Detalle del cono marcado ligeramente la superficie .....	43
18.	Ensayo de penetrómetro luego de caída libre de 5 segundos en muestra arcillosa .....	43
19.	Ensayo de penetrómetro luego de caída libre de 5 segundos en muestra limosa.....	44
20.	Gráfica para límite líquido según norma BS 1377 .....	49
21.	Gráfica para límite líquido con penetrómetro y penetración de escala logarítmica .....	50



22.	Cono de 240 gramos .....	59
23.	Gráfica ejemplo para método de Wood y Wroth .....	60
24.	Gráfica ejemplo para método de Belviso y Ciampoli .....	66
25.	Relación entre el índice de fluidez y el esfuerzo de corte (1) .....	69
26.	Relación entre el índice de fluidez y el esfuerzo de corte (2) .....	70
27.	Ejemplo de gráfica para límite líquido y límite plástico con el método del índice de fluidez .....	76
28.	Límite líquido, ASTM D4318-84 vs. BS1377 .....	89
29.	Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Wood y Wroth.....	90
30.	Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Belviso y Ciampoli .....	91
31.	Límite plástico, ASTM D4318-84 vs. Método del índice de fluidez .....	99
32.	Límite líquido, ASTM D4318-84 vs. BS1377, recta más probable .....	102
33.	Límite líquido, ASTM D423 vs. Penetrómetro de cono, resultados obtenidos por Sowers, G.F. (1959) .....	103
34.	Límite líquido, ASTM D4318-84 vs. BS1377, eliminando el ensayo 26, con ecuación de la recta de tendencia.....	104
35.	Límite líquido, ASTM D4318-84 vs. BS1377, aplicando factor de corrección .....	105
36.	Variación de penetración respecto al contenido de humedad para conos con peso de 80 gf y 230 gf con un ángulo de 60°, (a) Kotmale, (b) Kelantisa, (c) Kaolín y (d) Kopay, muestras ensayadas por Wijeyakulasuriya, C.V.....	112
37.	Ensayo extenso, muestra 25 .....	113
38.	Ensayo extenso, muestra 26 .....	113
39.	índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Wood y Wroth, con X = 6.125 .....	117
40.	Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Wood y Wroth, con corrección logarítmica.....	119

41.	Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Belviso y Ciampoli, Para límites líquidos menores a 45 .....	125
42.	Índice plástico, ASTM D4318-84 vs Belvieso y Ciampoli, Para límites líquidos menores a 45, con corrección .....	125
43.	Límite plástico, ASTM D4318 vs. Método del índice de Fluidez, aplicando factor de corrección .....	128
44.	Límites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista A (Carlos Córdova).....	136
45.	Límites de Atterberg, arcilla de baja plasticidad, laboratorista A (Carlos Córdova).....	136
46.	Límites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista B (Carlos Xicón) .....	137
47.	Límites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista B (Carlos Xicón) .....	137
48.	Límites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista C (Samuel Cancinos).....	138
49.	Límites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista C (Samuel Cancinos).....	138
50.	Límites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista D (Víctor Chioc) .....	139
51.	Límites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista D (Víctor Chioc) .....	139
52.	Límites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad por el autor.....	140
53.	Límites de Atterberg, arcilla de baja plasticidad por el autor.....	140

## TABLAS

I.	Simbología para dimensiones físicas .....	10
II.	Dimensiones físicas de unidades de medida.....	12
III.	Matriz de dimensiones físicas de las variables .....	16
IV.	Matriz identidad para método de Buckingham.....	17
V.	Factores para cálculo de límite líquido por un punto por la Norma ASTM 4318-84 .....	28
VI.	Ejemplo de cálculo para límite líquido por norma ASTM D4318-84 .....	29
VII.	Ejemplo de cálculo para límite líquido por un punto según norma ASTM D4318-84 .....	30
VIII.	Factores para determinar por un punto el límite líquido según Norma BS1377 .....	47
IX.	Valores para determinar el límite líquido según Norma BS 1377.....	48
X.	Variables para método del penetrómetro.....	52
XI.	Matriz de variables del penetrómetro en el método de Buckingham.....	52
XII.	Ejemplo para cálculo de Wood y Wroth .....	61
XIII.	Ejemplo de cálculo para método de Belviso y Ciampoli .....	67
XIV.	Ejemplo de cálculo para límite líquido y límite plástico, Con relación del índice de fluidez .....	75
XV.	Resumen de muestras ensayadas con penetrómetro de cono .....	77
XVI.	Resumen de muestras utilizadas para método de índice de fluidez (1).....	78
XVII.	Resumen de muestras utilizadas para método de índice de fluidez (2).....	79

XXVIII.	Resumen de muestras utilizadas para método de índice de fluidez (3) .....	80
XIX.	Resumen de muestras utilizadas para método de índice De fluidez (4) .....	81
XX.	Resumen de muestras utilizadas para método de índice De fluidez (5) .....	82
XXI.	Resumen de muestras utilizadas para método de índice De fluidez (6).....	83
XXII.	Resumen de muestras utilizadas para método de índice De fluidez (7).....	84
XXIII.	Comparación de resultados de ensayos por la norma ASTM 4318-84 y los métodos con penetrómetro .....	88
XXIV.	Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (1).....	92
XXV.	Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (2).....	93
XXVI.	Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (3).....	94
XXVII.	Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (4).....	95
XXVIII.	Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (5).....	96
XXIX.	Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (6).....	97
XXX.	Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (7).....	98
XXXI.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza del Límite líquido por el método del cono .....	106

XXXII.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza del límite líquido por el método del cono para valores Menores a 100 .....	108
XXXIII.	Cálculo de Factores X, método de Wood y Wroth .....	114
XXXIV.	Resultados de Wood y Wroth con $X = 6.125$ ..... IP de Wood y Wroth con corrección logarítmica para	116
XXXV.	Valores mayores a 10 .....	118
XXXVI.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza del Índice plástico por el método de Wood y Wroth para Valores > a 50 .....	120
XXXVII.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza del Índice plástico por el método de Wood y Wroth para Valores menores o iguales a 10 .....	122
XXXVIII.	Cálculo de factor "M", Método de Velviso y Ciampoli.....	124
XXXIX.	Resultados de Belviso y Ciampoli corregido para límites Líquidos menores a 45 .....	124
XL.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza de Límite plástico por el método del índice de fluidez (1) .....	130
XLI.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza de Límite plástico por el método del índice de fluidez (2) .....	131
XLII.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza de Límite plástico por el método del índice de fluidez (3) .....	132
XLIII.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza de Límite plástico por el método del índice de fluidez (4) .....	133
XLIV.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza de Límite plástico por el método del índice de fluidez (5) .....	134
XLV.	Resumen de cálculos para intervalos de confianza de Límite plástico por el método del índice de fluidez (6) .....	135

## LISTADO DE SIMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CH</b>	Arcilla de alta plasticidad
<b>CA</b>	Arcilla de baja plasticidad
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>Cu</b>	Esfuerzo de corte
<b>Cu<sub>LL</sub></b>	Esfuerzo de corte al límite líquido
<b>Cu<sub>LP</sub></b>	Esfuerzo de corte al límite plástico
<b>F</b>	Fuerza, factor del método Buckingham
<b>g</b>	Gravedad
<b><math>\omega</math></b>	Humedad
<b><math>\omega_{LL}</math></b>	Humedad al límite líquido
<b><math>\omega_{LP}</math></b>	Humedad al límite plástico
<b>IP</b>	Índice plástico
<b>LL</b>	Límite líquido
<b>LP</b>	Límite plástico
<b>MH</b>	Limo de alta plasticidad
<b>M</b>	Limo de baja plasticidad
<b>L</b>	Limo orgánico
<b>L</b>	Longitud, factor del método Buckingham
<b>M</b>	Masa, factor del método Buckingham
<b>NP</b>	No plástico
<b>N<sub>G</sub></b>	Número de golpes
<b>Pa</b>	Pascal
<b><i>d</i></b>	Penetración de aparato penetrómetro

<b>W</b>	Peso
<b><math>\gamma</math></b>	Peso específico
<b>r</b>	Radio
<b>R</b>	Relación entre <b><math>Cu_{LL}</math></b> y <b><math>Cu_{LP}</math></b>
<b>Tc</b>	Tara del contenedor
<b><math>\theta</math></b>	Temperatura, factor del método
<b>T</b>	Tiempo, factor del método Buckingham
<b><math>\tau</math></b>	Torque
<b>Z</b>	Variable arbitraria, método de Buckingham
<b><math>\pi</math></b>	Variable del método de Buckingham
<b>Kn</b>	Variable del método de Buckingham
<b>V</b>	Velocidad
<b><math>\nu</math></b>	Viscosidad cinemática
<b><math>\mu</math></b>	Viscosidad dinámica

## GLOSARIO

<b>Arcilla</b>	Suelo formado de partículas microscópicas y sub-microscópicas derivadas de la descomposición química de los componentes de las rocas, es plástico en un rango variado de contenidos de agua y al estar seco es muy duro, de manera que no se pueden desprender partículas de él al frotarlo con los dedos, al estar húmedo tiene consistencia pegajosa; tiene baja permeabilidad.
<b>Catión</b>	Ion con carga positiva.
<b>Cohesión</b>	Resistencia al corte cuando el esfuerzo normal es cero.
<b>Esfuerzo</b>	Fuerza por unidad de área.
<b>Homogéneo</b>	Dicho de una sustancia o de una mezcla de varias sustancias con composición y estructura uniformes.
<b>Humedad</b>	Porcentaje de agua de que está impregnado un cuerpo.
<b>Iteración</b>	Acción de repetir una serie de pasos de manera sucesiva para aproximarse a una solución.
<b>Laminar</b>	Dicho de la estructura de un cuerpo que tiene sus partículas sobrepuestas y colocadas paralelamente en forma de láminas u hojas.



<b>Limo</b>	Suelo fino con poca o ninguna plasticidad, derivado comúnmente de la fracturación mecánica de rocas, las variedades menos plásticas están formadas por granos de cuarzo y usualmente son llamadas harina de roca, las que son un poco mas plásticas contienen un porcentaje apreciable de partículas con forma de escamas, llamadas limos plásticos. Se diferencia de la arcilla debido a su alta permeabilidad, permitiendo que al estar seco y frotarle con los dedos se logren desprender sus partículas fácilmente.
<b>Matriz</b>	Conjunto de números o símbolos algebraicos colocados en líneas horizontales y verticales, dispuestos en forma de rectángulo.
<b>Percusión</b>	Acción de dar golpes repetidos o golpear.
<b>Presión</b>	Magnitud física que expresa la fuerza ejercida por un cuerpo sobre una unidad de superficie.
<b>Revolución</b>	Vuelta o rotación completa que hace un sistema o mecanismo.
<b>Terraplén</b>	Macizo de que se levanta para hacer una defensa, un camino u otra obra semejante.
<b>Tetraédrico</b>	Posee la forma de un poliedro de cuatro caras.

## RESUMEN

En el presente trabajo se exponen posibles métodos alternos que se podrían usar para determinar el límite líquido e índice plástico de un suelo, así como la necesidad de implementar un método estático para la determinación del límite líquido.

Para estos fines se han utilizado varias teorías, pero las más sólidas se basan en trabajos hechos con el penetrómetro de cono, aparato actualmente usado en la norma inglesa BS 1377, para determinar el límite líquido.

El objetivo del presente trabajo es la comprobación de la aplicabilidad de tres métodos no tradicionales alternos a suelos nacionales, siendo estos:

- El método del penetrómetro de cono según la norma BS 1377 para encontrar el límite líquido.
- La teoría de Wood y Wroth (1978) para encontrar el índice de plasticidad a partir del penetrómetro de cono con dos conos de distinto peso.
- La teoría de Belviso y Ciampoli (1985) para determinar el índice de plasticidad a partir de la pendiente de la recta de flujo del ensayo de penetrómetro.
- Método basado en el índice de fluidez de un suelo, deducido por el autor luego de la investigación de las bases y discusiones de los métodos del penetrómetro de cono planteados anteriormente.

Para esto se recolectaron muestras de suelo de varios puntos de la República de Guatemala, tratando de tener una colección representativa de de estos, para ensayarlos por el método tradicional (Norma ASTM 4318), al igual que por los tres métodos propuestos, para determinar su aplicabilidad a los suelos de la geografía nacional.

Para la comprobación del cuarto método se usaron resultados de ensayos obtenidos en el laboratorio de suelos del Dr. Rodolfo Semrau, de suelos de varios puntos de la República de Guatemala.

Del estudio de estos métodos se concluye que la norma inglesa BS 1377 si se puede usar para determinar el límite líquido de los suelos guatemaltecos, y que los métodos que tenían como objetivo determinar el índice plástico y limite plástico en un mismo ensayo son utilizables únicamente en suelos de baja plasticidad aunque con cierta incertidumbre debido a la gran variabilidad que existe en los tipos de suelos de Guatemala, proponiendo revisar la aplicabilidad de estos métodos en un área que posea menos procesos formadores geológicos, reduciendo de esta manera la variedad de especies de arcillas y probablemente mejorando los resultados.

# OBJETIVOS

## General

Determinar la aplicabilidad de la norma inglesa BS 1377 para encontrar el límite líquido y la comprobación de la aplicabilidad de un método para encontrar en un solo ensayo el límite líquido e índice plástico de suelos de Guatemala. Los resultados de estos métodos se compararán con el método comúnmente usado, regido por la Norma ASTM 4318.

## Específicos

1. Aumentar la certeza y repetitividad de resultados en ensayos para determinar los límites de Atterberg.
2. Reducir el tiempo de ensayo para la determinación del límite líquido y plástico de un suelo.
3. Comparar los resultados obtenidos por el método tradicional con los obtenidos de los métodos propuestos con el penetrómetro de cono.



## INTRODUCCIÓN

La mayoría de estructuras diseñadas por el hombre se apoyan sobre el suelo, por lo que el estudio de éste y sus características es de capital importancia en el diseño, desarrollo y desempeño de una estructura. Una parte importante del estudio del suelo son los ensayos de laboratorio, cuyo objetivo es la determinación de los parámetros geomecánicos del mismo.

En el presente trabajo se presentan propuestas para medir por un método alternativo los límites de consistencia o límites de Atterberg, propiedades básicas de los suelos que sirven para tipificar su comportamiento.

Los límites de Atterberg, son básicos para la clasificación de los suelos finos, los cuales, dependiendo de su contenido de humedad pueden tener diferentes consistencias que van desde sólida, semi-sólida, plástica hasta líquida. Entre cada una de estas consistencias pueden definirse límites en base a los cambios en su comportamiento.

Estos límites fueron definidos inicialmente por el químico sueco Albert Atterberg (1911) y posteriormente redefinidos por Arthur Casagrande (1932), quien desarrolló el método de percusión que se utiliza actualmente para medir el límite líquido.

Existe otro método para medir el límite líquido, midiendo la penetración dentro de una muestra de suelo a humedad controlada de un cono normado, de masa conocida. No obstante el uso universal del método de Casagrande (1932), se considera que el método del cono da resultados más consistentes porque elimina la posibilidad de errores humanos al hacer el ensayo. Mientras

que el método de Casagrande es de percusión, con sus correspondientes efectos dinámicos, el del cono es estático.

El límite plástico por su parte se obtiene encontrando la humedad a la que un cilindro de 3 milímetros de diámetro se desquebraja, dando resultados que normalmente dependerán de la experiencia y juicio del operador.

Existen también propiedades derivadas de los límites anteriores, como el Índice Plástico (IP) que se define como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP).

$$\mathbf{IP = LL - LP}$$

Usándose ésta como una medida de la plasticidad de un suelo. Así, para mismo valor del límite líquido los suelos con IP altos son arcillas o tienen un alto contenido de arcilla, mientras que los suelos con IP bajo son limos o son suelos con un alto contenido de limo.

Los límites de consistencia son útiles porque permiten clasificar los suelos y además sus valores nos dan una idea de sus propiedades mecánicas tales como compresibilidad, permeabilidad y resistencia.

Para obtener los límites de Atterberg es necesario hacer dos ensayos distintos uno para determinar el límite líquido y otro para obtener el límite plástico. Varios investigadores, entre ellos Littleton y Farmilo (1977) usando dos conos de diferente peso y Belviso et al. (1985) con base en los resultados de los ensayos de límite líquido con el penetrómetro de cono y de las características de la recta de flujo sugieren que se puede obtener el límite líquido y el Índice de plástico en un solo ensayo.

Esta forma de obtener los límites de Atterberg es atractiva porque: primero, reduce el tiempo de ejecución de los ensayos y segundo, porque siendo el cono un ensayo estático en el que el operador tiene menor influencia, los resultados son más repetibles.



## 1. ANTECEDENTES

El límite líquido fue definido inicialmente por el químico sueco Albert Atterberg (1911) como el contenido de humedad al que un suelo pasa del estado plástico al líquido. Atterberg definió el límite líquido como el contenido de humedad al que una ranura hecha en una muestra de suelo, colocada en una cápsula de porcelana de 10 a 12 cm de diámetro, se cerraba al golpear la cápsula 25 veces contra la palma de la mano. Casagrande (1932), dándose cuenta que por la forma en que fue definido el límite líquido tendría resultados variables según el operador, estandarizó el método, diseñando un artefacto en el que la muestra de suelo se coloca en una cápsula de bronce que golpea cayendo desde una altura de 10 mm sobre una base de hule duro.

A la muestra de suelo se le hace un surco con un ranurador normado y el límite líquido se define como el contenido de humedad al que la ranura se cierra en una longitud de 13 mm al ser golpeada la cápsula 25 veces. Este método se rige por la norma ASTM D4318. Pero aún usando el aparato de Casagrande, el ensayo es afectado por el operador y factores como el ritmo con que se golpea la cápsula de bronce sobre la base; la forma de colocar el suelo dentro de la cápsula; la cantidad de muestra dentro de la cápsula; la rigidez o dureza de la superficie sobre la que se apoya el aparato de Casagrande y la dureza de la base misma del aparato sobre la que se golpea la cápsula.

El límite plástico se definió como el contenido de humedad en el cual el suelo empieza a exhibir comportamiento plástico. Terzaghi (1926), basándose en los estudios de Atterberg (1911), redefinió el ensayo como el contenido de humedad al que un cilindro de suelo de 3 mm de diámetro comienza a

romperse al hacerlo rodar con la palma de la mano sobre una superficie no absorbente, lisa, usualmente de vidrio esmerilado. Este ensayo se rige por la norma ASTM D4318 y sus resultados también son influenciados por el juicio y experiencia del operador.

Varios investigadores, han utilizado el método del penetrómetro de cono entre ellos: Sowers (1959) quien lo utilizó para estudiar el límite líquido, Littleton y Farmilo (1977) que usaron dos conos de diferente peso para definir el índice plástico y Belviso et. al. (1985) que con base en los resultados de los ensayos de límite líquido y de las características de la recta de flujo, obtuvieron el Índice Plástico.

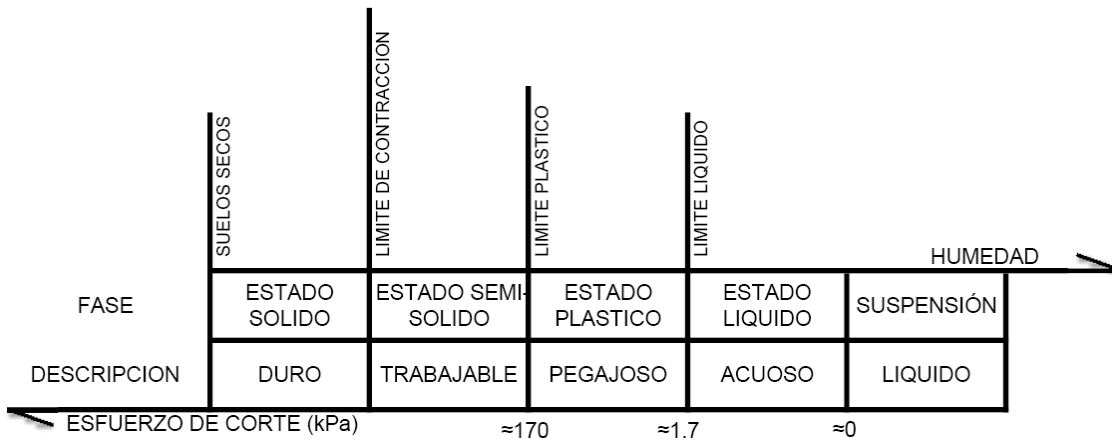
## 2. GENERALIDADES

Los límites de Atterberg surgen de la necesidad de establecer los puntos en los que la consistencia del suelo cambia de un estado a otro, la consistencia se refiere a la facilidad con que un suelo puede ser deformado; los suelos pueden tener diferentes consistencias dependiendo de la humedad que posean, esta cohesión está determinada por el tamaño de las partículas y su peso, ya que en suelos de partículas grandes el parámetro principal es la gravedad, pero en suelos como las arcillas las fuerzas electromagnéticas generadas por su composición mineralógica cobran significancia.

Estas consistencias o estados en los que se puede encontrar los suelos se definen como: sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. Los límites encontrados entre ellos son: el límite de contracción, que marca la frontera entre el estado sólido y el semisólido, el límite plástico, que marca la frontera entre el estado semisólido y plástico, y el límite líquido, que marca la frontera entre el estado plástico y líquido, como se muestra en la figura 1.

La humedad necesaria para alcanzar estos límites depende de la mineralogía de cada suelo.

Figura 1. **Gráfica de límites y estados de consistencia**



Fuente: elaboración propia.

Estos límites son utilizados como índices de gran importancia en la clasificación de suelos (AASHTO y SUCS), y con frecuencia son considerados en la construcción de carreteras, cimentaciones y terraplenes.

## 2.1. Factores que afectan los límites de Atterberg

Existen varios factores que afectan directamente los resultados de los límites de Atterberg, pero principalmente están los definidos por Baver (1984) que se exponen a continuación.

### 2.1.1. Contenido de arcilla

La plasticidad es una propiedad de los suelos finos, Atterberg (1911-1912) mostró que incrementar el porcentaje de arcilla en una muestra de suelo incrementa también el límite líquido y el índice plástico. En el caso

contrario, al minimizar la cantidad de arcilla se disminuye el límite líquido y el índice plástico del suelo. Skempton (Citado por Baver en 1984) determinó que el índice plástico está relacionado con la cantidad de partículas de un suelo que tiene un tamaño menor a dos micrómetros.

### **2.1.2. Naturaleza del mineral arcilloso**

Originalmente Atterberg (1911, 1912) definió que solamente los minerales con estructuras laminares, mostraban plasticidad, y que minerales como los cuarzos que muestran una estructura tetraédrica no son plásticos. Por lo que materiales como la caolinita, la montmorillonita y la biotita cuyos cristales están formados por hojas, también muestran propiedades plásticas, demostrando que el tipo de arcilla contenida en el suelo es un parámetro importante de la cantidad de agua que puede absorber.

### **2.1.3. Naturaleza de los cationes intercambiables**

Baver (1984) definió que los cationes intercambiables tienen una considerable influencia sobre la plasticidad del suelo, influyendo entonces si el suelo se encuentra saturado con algún mineral, como se muestra a continuación:

- Suelos saturados con potasio (K, electronegatividad 0,8, estado de oxidación +1), muestran límite líquido e índice de plasticidad bajos.

- Suelos saturados con sodio (Na, electronegatividad 0,9, estado de oxidación +1), muestran límites plásticos bajos e índices plásticos altos.
- Suelos saturados de calcio (Ca, electronegatividad 1,0, estado de oxidación +2), Muestran límites líquidos y plásticos generalmente más altos que los sistemas de sodio (Na) y potasio (K).
- Suelos saturados de magnesio (Mg, electronegatividad 1,2, estado de oxidación +2), muestran límites líquidos y plásticos generalmente más altos que los sistemas de potasio (K) y sodio (Na) y tienen una plasticidad ligeramente más alta que los saturados con calcio (Ca).
- Suelos saturados de hidrógeno (H, electronegatividad 2,1, estado de oxidación +1), muestran fluctuaciones bastante considerables.

#### **2.1.4. Contenido de materia orgánica**

La presencia de materia orgánica en un suelo incrementa el límite plástico y líquido sin tener un efecto directo sobre el índice plástico. La reducción de la materia orgánica a partir de peróxido de hidrógeno incrementa también estos parámetros.

### 3. ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional se basa en las formas generales de las ecuaciones que describen un fenómeno natural, este método es aplicable para muchos casos de ingeniería debido a que su objetivo es la simplificación del fenómeno a partir de una serie de variables que definen una ecuación o relación existente entre los fenómenos presentes en el problema.

El teorema de Buckingham cumple con las generalidades del análisis dimensional, se basa en que existen ciertas variables que son inherentes al problema y que las restantes son variables dependientes de las anteriores y por lo tanto irrelevantes.

La ventaja que presenta un análisis de este tipo se da por ejemplo en casos en que se tiene una función con dependencia en dos variables A y B, si establecemos un valor para A y se grafica para varios valores de B encontraremos una serie de puntos, que podrán tener alguna tendencia lineal, definiendo así una gráfica. Si luego se realiza el mismo proceso para otros valores de A, se encuentra una familia o tabla de gráficas, si además existiera una variable C, el resultado sería un conjunto de familias de gráficas y así sucesivamente, esto pone en manifiesto que la reducción de variables para estudios experimentales mejora el entendimiento de los resultados obtenidos.

Un ejemplo de cómo se aplican los principios del análisis dimensional se puede hacer con la segunda ley de Newton, donde  $F = m \cdot a$ , cuando se aplica a un cuerpo con caída libre, se puede sustituir la aceleración (a) con la gravedad (g) y la fuerza (F) con el peso (W) y si para este análisis se usa una

masa  $m = 1$ , se tendrá que  $W/(1) = g$ ; encontrando que por consistencia de unidades, el peso por unidad de masa es exactamente  $g$  unidades de fuerza.

Se puede dar otro ejemplo a partir de la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{Constante}$$

Donde  $\gamma = \rho * g$ , en este fenómeno la gravedad no afecta de manera representativa el flujo del fluido y a pesar de eso el peso específico y la gravedad aparece en la ecuación; si se multiplica esta por el peso específico se obtiene:

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante}$$

Al estar escrita de esta forma representa mejor el fenómeno, ya que la densidad no depende de la gravedad. Los términos de esta ecuación pueden ser interpretados de distintas formas, si se observa en unidades de medida se tiene:

$$P = \frac{1}{2}\rho V^2 = \frac{kg * m^2}{m^3 * s^2}$$

Un Joule posee dimensiones  $\frac{m^2 * kg}{s^2}$  por lo que resulta que:

$$P = \frac{1}{2}\rho V^2 = \frac{\text{Joule}}{m^3}$$



Obteniendo una nueva interpretación de Bernoulli, energía por unidad de volumen de fluido. Y al dividir la ecuación original de Bernoulli entre la densidad se obtiene:

$$\left( \frac{P}{\rho} = \frac{1}{2} \rho V^2 \right) \rightarrow \left( \frac{kg * m^2}{kg * s^2} = \frac{Joule}{kg} \right)$$

Revelando de esta forma una relación de energía por unidad de masa, este tipo de operaciones permite representar un suceso de muchas formas, dependiendo del criterio y objetivo del investigador.

### 3.1. Las dimensiones físicas

El razonamiento científico se basa en varios conceptos de medidas o parámetros de referencia, establecidos para la comparación de fuerzas, masas, longitudes, tiempos, aceleraciones, velocidades, temperaturas y otras más, cada una de ellas con unidades de medida específicas, algunas con unidades independientes, como la masa, la longitud, el tiempo, la temperatura y la carga eléctrica estableciendo en consecuencia unidades con estándares internacionales, y a partir de la combinación de éstas se derivan los parámetros de medida restantes.

En 1871 J. Clerk Maxwell un físico y filósofo escocés definió los siguientes símbolos para denotar dimensiones.

Tabla I. **Simbología para dimensiones físicas**

F	Fuerza
M	Masa
L	Longitud
T	Tiempo
θ	Temperatura

Fuente: elaboración propia.

Esto permite usar analogías y facilitar la representación de unidades en varias ramas de la física.

Todas las dimensiones se rigen por leyes o definiciones físicas, como la velocidad es la derivada de la distancia respecto al tiempo, o la razón de cambio a la que se incrementa la distancia respecto del tiempo, por lo que la dimensión de la velocidad sería:

$$\frac{m}{s} = \frac{L}{T} = L * T^{-1}$$

La ventaja del uso de analogías está en que una unidad de velocidad puede representarse en diferentes sistemas como: pies por segundo, centímetros por segundo, kilómetros por hora, etc.

En algunos casos existe una constante o variable arbitraria con dimensiones desconocidas en una ecuación, a estas constantes al momento de formar la ecuación analógica se les asigna el símbolo “Z” y si esta carece de valor dimensional se toma  $Z = 1$ .

Si en algún caso no se conociera la dimensión de una constante se puede determinar, por ejemplo si se tuviera una ecuación con la forma:

$$\tau = K\rho V^2 R^{1/3} \rightarrow \left(\frac{lb}{ft^2}\right) = K \left(\frac{slug}{ft^3}\right) \left(\frac{ft}{s}\right)^2 (ft)^{-1/3}$$

Siendo K una constante de dimensiones desconocidas, podemos sustituir para encontrar lo siguiente:

$$\left(\frac{F}{L^2}\right) = K \left(\frac{F * T^2}{L * L^3}\right) \left(\frac{L}{T}\right)^2 (L)^{-1/3} \rightarrow \left(\frac{F}{L^2}\right) = K \left(\frac{F}{L^2}\right) (L)^{-1/3} \rightarrow K = (L)^{1/3}$$

Por tanto las dimensionales de K serán  $ft^{1/3}$ , pero cuando en un caso como este la constante final resulta adimensional, se puede concluir que la ecuación posee homogeneidad dimensional, ya que sin importar el sistema de unidades utilizado siempre se conseguirá resultados válidos, notando también que al momento de encontrar una inconsistencia de unidades debe haber un error en el cálculo.

Véase también que en casos en los que se realice un cambio de sistemas en una ecuación, de fuerza (sistema internacional) a masa (sistema inglés) o viceversa, si hay una constante que cambie su valor para sostener la consistencia de unidades, y no posee relación directa con fuerza o masa no debería tener ningún impacto en el resultado final.

En la tabla II se muestra las dimensiones físicas de algunas unidades de medida.

Tabla II. Dimensiones físicas de unidades de medida

	SISTEMA DE MASA	SISTEMA DE FUERZA
Longitud	L	L
Tiempo	T	T
Temperatura	$\theta$	$\theta$
Fuerza	$MLT^{-2}$	F
Masa	M	$FL^{-1}T^2$
Peso específico	$ML^{-2}T^{-2}$	$FL^{-3}$
Densidad de masa	$ML^{-3}$	$FL^{-4}T^2$
Angulo	1	1
Presión y esfuerzo	$ML^{-1}T^{-2}$	$FL^{-2}$
Velocidad	$LT^{-1}$	$LT^{-1}$
Aceleración	$LT^{-2}$	$LT^{-2}$
Velocidad angular	$T^{-1}$	$T^{-1}$
Aceleración angular	$T^{-2}$	$T^{-2}$
Energía y trabajo	$ML^2T^{-2}$	FL
Momento	$MLT^{-1}$	FT
Potencia	$ML^2T^{-3}$	$FLT^{-1}$
Torque	$ML^2T^{-2}$	FL
Coef. Dinámico de viscosidad	$ML^{-1}T^{-1}$	$FL^{-2}T$
Coef. Cinemático de viscosidad	$L^2T^{-1}$	$L^2T^{-1}$
Momento de inercia en área	$L^4$	$L^4$
Momento de inercia en masa	$ML^2$	$FLT^2$
Tensión superficial	$MT^{-2}$	$FL^{-1}$
Modulo de elasticidad	$ML^{-1}T^{-2}$	$FL^{-2}$
Deformación unitaria	1	1
Relación de poisson	1	1

Fuente: elaboración propia.

Al realizar un análisis de este tipo se encuentran relaciones directas entre algunas leyes, así como la ley de gravitación de Newton y la ley de Coulomb entre cargas eléctricas, las cuales poseen la misma estructura.

La aplicación del análisis dimensional se basa en la hipótesis de que la solución de un problema es expresable con ecuaciones dimensionalmente homogéneas y que las relaciones deducibles entre estas ecuaciones son consecuentemente homogéneas, aunque la mayoría de ecuaciones físicas tienen esta propiedad es conveniente verificarlo, pues en algunos casos como en la relación que existe en un problema de arrastre de un cuerpo esférico en una corriente de aire la forma está definida como  $F = f(V, D)$ , siendo  $V$  la velocidad y  $D$  el diámetro del cuerpo; quedando una ecuación dimensionalmente no homogénea ya que ni la velocidad, ni el diámetro tienen dimensiones de fuerza o masa.

El primer paso para realizar un análisis es definir las variables principales que se estima que afecten al fenómeno, ya que si se usa variables de poco impacto para el resultado final se tendrá términos innecesarios en la ecuación final, aunque también se debe tener precaución en no eliminar algunos parámetros como la gravedad, que aunque pareciera constante y por tanto descartable, es muy útil para mantener la homogeneidad dimensional.

El primer paso es tratar de formar una teoría de la mecánica del fenómeno, inclusive una teoría muy cruda puede revelar las variables más importantes. Al conocerse las ecuaciones diferenciales que definen el fenómeno éstas darán directamente las variables significativas.

Ya con las variables posibles establecidas el objetivo es formar dos expresiones que sean productos adimensionales, esto quiere decir que al colocarlas en una igualdad y simplificarlas deben de tener productos adimensionales.

Luego se hacen relaciones que acerquen a una entidad conocida o determinable por ensayos experimentales, dejándonos así con la posibilidad de realizar una gráfica adimensional, cuyos puntos luego pueden ser encontrados por experimentación, definiendo una serie de gráficas que no dependan de un sistema de unidades.

Utilizando este método se pueden encontrar los siguientes cocientes adimensionales:

- Número de Reynolds  $R = \frac{VL\rho}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$
- Coeficiente de Presión  $P = \frac{F}{\rho V^2 L^2} = \frac{P}{\rho V^2}$
- Número de Froude  $F = \frac{V^2}{Lg}$
- Número de Mach  $M = \frac{V}{c}$
- Número de Weber  $W = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$

Dando una definición general, un conjunto de cocientes adimensionales de variables dadas está completo cuando cada cociente adimensional en el conjunto es independiente a los demás y cualquier otro distinto sería el resultado de fuerzas adimensionales extras en el conjunto.

### 3.2. Teorema de Buckingham

Buckingham (1914) concluyó que si una ecuación es dimensionalmente homogénea, puede ser reducida a una relación entre un conjunto de cocientes adimensionales, estableciendo luego como regla que el número de productos adimensionales para un fenómeno, es igual al número de variables menos el número de dimensiones fundamentales en el problema, pero no fue un acierto completo, según lo encontrado por Bridgman (1922) y luego por Van Driest (1946) quien estableció una nueva regla que ha sido utilizada desde entonces, el número de productos adimensionales para un fenómeno es igual al número total de variables menos el número máximo de esas variables que no formarán un producto adimensional.

Para poder usar la aproximación algebraica en el análisis dimensional es útil tabular las dimensiones físicas (como se muestra en la tabla III) con las variables, por ejemplo, si se tuviera en consideración la velocidad  $V$ , distancia  $L$ , fuerza  $F$ , densidad  $\rho$ , viscosidad dinámica  $\mu$  y gravedad  $g$ , se realiza una tabla a partir de los exponentes en la estructura dimensional de cada variable correspondiente, por ejemplo, las dimensiones de la gravedad serían  $g = M^0 L T^{-2} (m/s^2)$ .

Además se debe verificar que cada fila no sea múltiplo de alguna otra, reduciendo así la matriz para poder encontrar el rango de la misma.

Tabla III. **Matriz de dimensiones físicas de las variables**

	<b>V</b>	<b>L</b>	<b>F</b>	$\rho$	$\mu$	<b>G</b>
<b>M</b>	0	0	1	1	1	0
<b>L</b>	1	1	1	-3	-1	1
<b>T</b>	-1	0	-2	0	-1	-2

Fuente: elaboración propia.

Luego se puede decir que cualquier cociente adimensional debería tener como forma general  $\pi_n = V^{K1}L^{K2}F^{K3}\rho^{K4}\mu^{K5}g^{K6}$  y que sin importar los resultados finales de cada exponente K, la dimensión correspondiente a  $\pi_n$  debería ser:

$$\pi_n = (LT^{-1})^{K1}(L)^{K2}(MLT^{-2})^{K3}(ML^{-3})^{K4}(ML^{-1}T^{-1})^{K5}(LT^{-2})^{K6}$$

Que también podría expresarse como:

$$\pi_n = (M)^{(K3+K4+K5)}(L)^{(K1+K2+K3-3*K4-K5+K6)}(T)^{(-K1-2*K3-K5-2*K6)}$$

Como se requiere que  $\pi$  sea adimensional los exponentes M, L, y T deben ser cero, por tanto:

$$0 = (K3 + K4 + K5)$$

$$0 = (K1 + K2 + K3 - 3 * K4 - K5 + K6)$$

$$0 = (-K1 - 2 * K3 - K5 - 2 * K6)$$



Y cualquier solución a estas ecuaciones es un conjunto de exponentes para un cociente adimensional ( $\pi$ ).

El rango de la matriz será el último orden en que los determinantes de la matriz evaluada den un valor distinto a 0, además se espera que si las columnas están dispuestas correctamente, este determinante se pueda revisar en el extremo superior derecho de la matriz únicamente. La cantidad de productos adimensionales  $\pi$  será la diferencia entre el número de variables consideradas y el rango de la matriz.

Se deben de asignar valores fijos a un número de variables de forma que permita resolver con un mismo número de variables desconocidas y de ecuaciones, si la cantidad de cocientes adimensionales ( $\pi$ ) fuera mayor a uno el objetivo será formar una matriz identidad en el extremo izquierdo, como se muestra en la tabla IV.

Tabla IV. **Matriz identidad para método de Buckingham**

	<b>V1</b>	<b>V1</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>
<b>M</b>	1	0	X	Y
<b>L</b>	0	1	W	Z

Fuente: elaboración propia.

Esto con el objetivo de encontrar soluciones más directas para cada cociente adimensional ( $\pi_n$ )

$$\pi_1 = V_1 V_3^x V_4^y$$

$$\pi_2 = V_2 V_3^w V_4^z$$

Al existir solamente un cociente adimensional ( $\pi$ ) se utilizarán los exponentes resultantes de la valuación directa y si se tuviera algún exponente cero, esto nos puede indicar que es una variable que no tiene una gran influencia en el fenómeno.

En caso de tener un exponente fraccionario se puede eliminar elevando toda la ecuación al exponente necesario para eliminar las fracciones, ya que al ser una ecuación adimensional no afecta el resultado.

## **4. ENSAYOS PARA DETERMINAR LÍMITES DE ATTERBERG**

Para determinar los límites de Atterberg se han utilizado varios métodos desde su definición, los que se usan actualmente están respaldados por normas, la más usada en Guatemala es la norma ASTM, aunque para límites líquidos también se encuentran otros métodos con penetrómetros de cono, los cuales se muestran a continuación.

### **4.1. Descripción del ensayo para el límite líquido según la norma ASTM**

Este ensayo, es conocido como Método Mecánico o Copa de Casagrande consiste en una copa semi-esférica de bronce (aunque actualmente se fabrican también de acero inoxidable) con radio interior de 54 milímetros, espesor de 2 milímetros y peso de 200,2 gramos incluyendo el soporte, el cual gira respecto a un eje fijo que a su vez está unido a una base de hule duro tal como lo define la norma ASTM D 4318-84 6.1.2; Casagrande, A. (1932) determinó que el límite líquido estaba definido como la resistencia al corte en un determinado contenido de humedad, estimando esta resistencia entre 1,7 a 2,3 kPa (Skempton y Northey (1953); Casagrande (1958); Norman (1958); Youssef (1965); Wroth y Wood (1978); Wood (1985)).

El esfuerzo cortante inducido por la Copa de Casagrande por golpe es aproximadamente de  $1 \text{ g/cm}^2$  y el objetivo del ensayo es encontrar la humedad a la que un surco de 2 milímetros de ancho hecho en la muestra se cierra a lo largo de 13 milímetros, con 25 golpes a una velocidad aproximada de 120 revoluciones por minuto.

#### **4.1.1. Equipo utilizado**

El equipo usado para realizar este ensayo se enumera a continuación:

- Copa de Casagrande (ASTM D 4318-84 6.1)
- Ranurador (ASTM D 4318-84 6.2)
- Tamiz No. 40
- Cápsula de porcelana
- Espátula
- Recipientes para contenido de humedad
- Balanza con precisión de 0,01 gramos
- Probeta con agua destilada
- Horno con capacidad de mantener  $110 \pm 5$  °C

#### **4.1.2. Procedimiento**

Se puede preparar la muestra de suelo por dos métodos, el primero, secándolo al sol para luego molerlo y pasarlo por el tamiz No. 40 hasta conseguir de 150 a 200 gramos de suelo, mezclarlo con agua destilada o desmineralizada para llevarlo a la humedad necesaria con la que cerraría el surco en la copa de Casagrande con unos 25 a 35 golpes y dejar reposar esta mezcla durante al menos 24 horas para homogenizar la humedad en la muestra.

El segundo, o método de lavado se suele utilizar cuando las partículas del suelo son demasiado gruesas, no se debería de lavar más de 1 libra de material por vez, se procede lavando la muestra con la menor cantidad de agua posible mientras se pasa a través del tamiz No. 40 y se recupera el líquido para luego secarlo hasta la humedad expuesta en el primer método, ya sea dejándolo al

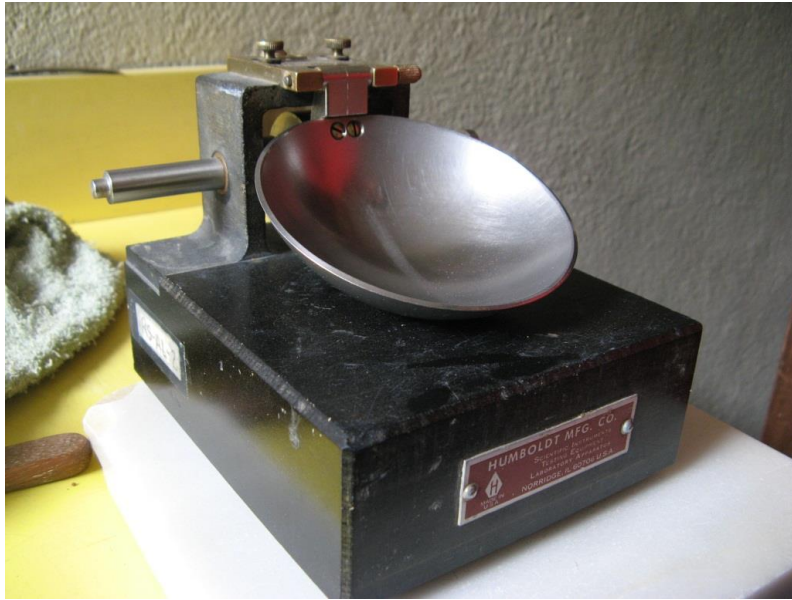
aire y a temperatura ambiente o al aire caliente como con un secador de pelo, decantando y retirando el agua limpia de la superficie de la suspensión, luego de lograr la humedad esperada se mezclará la muestra y se dejará reposar al menos 24 horas.

Ya preparada la muestra se debe colocar la Copa de Casagrande en una superficie firme y horizontal, verificando que la altura de la caída del aparato sea la correcta, para esto se coloca un calibrador de un centímetro entre la copa del aparato y su base como se muestra en la figura 3, para que al girar la perilla en el sentido opuesto, se escuche un ligero campanilleo, pero sin levantar la copa.

Una vez calibrado del aparato se puede proceder al ensayo del material, para esto se coloca la muestra previamente humedecida en un contenedor que facilite su mezclado y homogenizado, comúnmente se utiliza una cápsula y una espátula. El mezclado se realiza con cada nuevo contenido de humedad hasta que la muestra logre un color uniforme.

Teniendo la mezcla homogenizada se coloca en la Copa de Casagrande extendiéndola con una espátula flexible y evitando que se formen burbujas de aire dentro de la muestra o en el contacto con la copa, luego se nivela de manera que la superficie quede horizontal respecto al punto más bajo de la corona de la Copa de Casagrande, esto son aproximadamente  $16 \text{ cm}^3$  de material; Se separa entonces la mezcla con el ranurador, tratando de que sea por el eje simétrico de la copa y se verifica la cantidad de golpes necesarios para que el surco creado se cierre en una longitud de 13 milímetros; el cierre de este surco debe de ser muy parejo y simétrico, de lo contrario podría ser un indicador de una homogenización mal realizada.

Figura 2. **Aparato de Casagrande**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 3. **Detalle de talón del aparato de Casagrande al ser calibrado**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 4. **Mezclado de muestra para límite líquido**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 5. **Nivelado de muestra en el aparato de Casagrande**



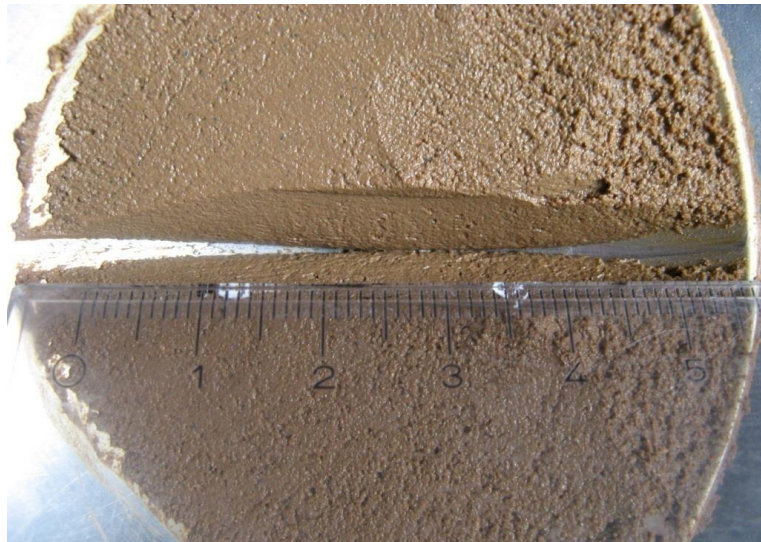
Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 6. **Ranurado para ensayo de límite líquido**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 7. **Cierre de 13 milímetros en el ranurado**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.



El resultado se puede encontrar de dos formas, la primera, realizando al menos tres pruebas que queden de preferencia distribuidas de manera equitativa entre los 10 y 50 golpes, y la segunda una prueba de un solo punto que quede lo más cercano posible a los 25 golpes, lo que podría ser entre 20 y 30 golpes, este método tiene la diferencia en que se debe de verificar que la humedad del material se encuentre uniforme, al realizar con la misma humedad dos veces el ensayo.

Si el surco se cierra con una diferencia no mayor a dos golpes, se puede utilizar la primera humedad, si no se debe de mezclar de nuevo el material y reintentar. El limitar la utilización de este método al rango entre 20 y 30 golpes se debe a que la actividad de las arcillas afecta la pendiente de la recta de flujo como se verá a continuación en los próximos métodos, dando así un margen alto de variabilidad en el resultado real del límite ensayado.

Luego de cada ensayo se anotan los golpes que fueron necesarios para cerrar el surco a lo largo de 13 milímetros y se toma una muestra para medir la humedad, estas muestras se deben pesar de inmediato para lograr mejores resultados, y se secan al horno hasta obtener un peso constante, unas 24 horas para arcillas altamente plásticas, y menos para arcillas poco plásticas y limos.

Según la norma ASTM D 2216 - 80 el tiempo requerido para obtener un peso constante depende del tipo de material, el tamaño de la muestra, el tipo de horno y su capacidad, entre otros factores, pero en la mayoría de los casos secar la muestra durante la noche (unas 16 horas) es suficiente. En casos especiales en los que se tenga duda del buen secado de la muestra se debe continuar el secado hasta que se tengan dos pesos con una diferencia menor al 1% del peso de la muestra, separados por un lapso de tiempo mayor a media hora.

### 4.1.3. Cálculos y resultados

El cálculo de la humedad se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{W_{BH} - W_{BS}}{W_{BS} - Tc}$$

Dónde:

$\omega$  = Contenido de humedad

$W_{BH}$  = Peso bruto húmedo (tara + material húmedo)

$W_{BS}$  = Peso bruto seco (tara + material seco)

$Tc$  = Tara del contenedor

Para realizar los cálculos se utilizan básicamente dos métodos, pudiendo depender de la cantidad de muestra que se tiene disponible para el ensayo; si se realizaron de 3 a 5 pruebas con distintas humedades, el caso más común, se deben de dibujar los resultados en una gráfica de humedad contra golpes, estando los golpes en el eje de las abscisas con una escala logarítmica de base 10 y la humedad en el eje de las ordenadas con escala aritmética.

Luego de graficar los puntos se traza una línea, que sea la representación lineal más aproximada de la secuencia de puntos, encontrando luego gráficamente la humedad correspondiente a 25 golpes para reportarla como el límite líquido.

En el caso de hacer el ensayo por el método de un solo punto o prueba con la humedad óptima se debe de calcular la humedad de los 25 golpes a partir de las fórmulas descritas en la norma ASTM D 4318-84:

$$LL = \omega * \left(\frac{N_G}{25}\right)^{0.121}$$

$$LL = K * (W_N)$$

Siendo:

$N_G$  = El número de golpes necesario para cerrar el surco de la Copa de Casagrande a lo largo de 13 mm.

$W_N$  = El contenido de humedad.

$K$  = El valor dado por la Tabla V.

Al utilizar el método de un punto si se tuviese suficiente muestra se recomienda tomar de dos a tres verificaciones de la humedad y el resultado será el promedio de las pruebas realizadas.

#### **4.1.4. Experiencias en laboratorio**

En la realización de este ensayo se puede notar que uno de los puntos más críticos del mismo es el mezclado, para que la humedad sea homogénea, por lo que se recomienda que en caso de notar que el cierre del surco no es uniforme, se verifique el punto, mezclando de nuevo el material y realizando el

ensayo una vez más, esperando obtener una diferencia no mayor a dos golpes con lo visto en el último punto hecho, lo que daría confiabilidad al punto encontrado y siempre tomando como válido el segundo punto realizado.

Tabla V. **Factores para cálculo de límite liquido por un punto por la Norma ASTM 4318-84**

<b>N<sub>G</sub></b> (Número de golpes)	<b>K</b> (Factor de límite liquido)
20	0,974
21	0,979
22	0,985
23	0,990
24	0,995
25	1,000
26	1,005
27	1,009
28	1,014
29	1,018
30	1,022

Fuente: elaboración propia.

Además se debe tomar en cuenta que para facilitar llegar a los contenidos de humedad deseados es bueno no utilizar todo el material disponible para la mezcla a ensayar, ya que en caso de que se llegue a un punto muy húmedo y sea necesario secarlo, es más práctico añadirle material menos húmedo.

#### 4.1.5. Ejemplo de cálculo

Se ha obtenido para un ensayo de tres puntos los siguientes resultados:

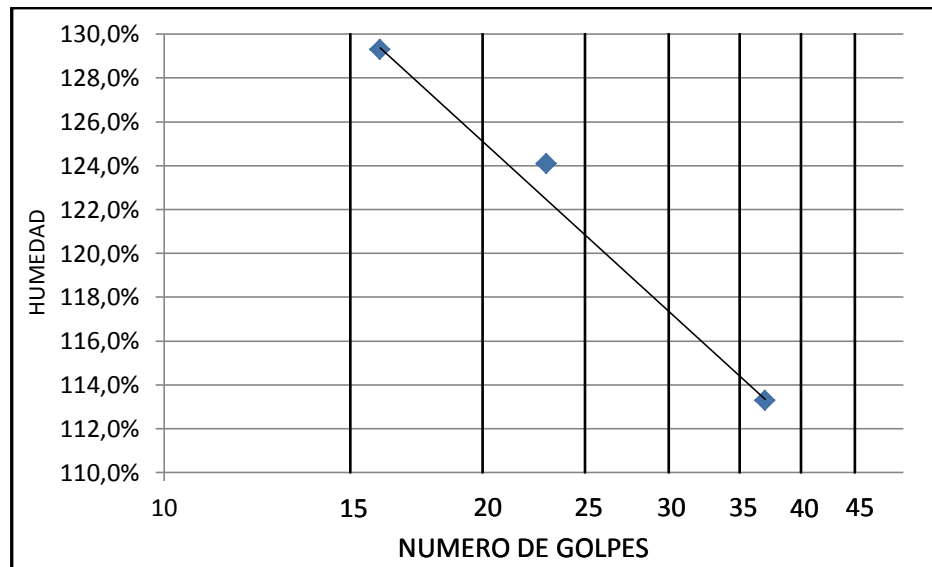
Tabla VI. **Ejemplo de cálculo para límite líquido por norma ASTM D4318-84**

Golpes	37	23	16
Humedad	113,3%	124,1%	129,3%

Fuente: elaboración propia.

Al graficar se obtiene lo mostrado en la figura 8:

Figura 8. **Ejemplo de gráfica para límite líquido por norma ASTM D4318-84**



Fuente: elaboración propia.

Teniendo los puntos se traza la mejor línea recta de tendencia para encontrar gráficamente la humedad a 25 golpes.

Encontrando en este ejemplo un resultado para el límite líquido, de 121% de humedad.

Para un límite de un solo punto se pueden presentar los datos como se muestra en la tabla VII.

Tabla VII. **Ejemplo de cálculo para límite líquido por un punto según Norma ASTM D4318-84**

Golpes	26	24
Humedad	37,7%	37,9%

Fuente: elaboración propia

Para mostrar los dos métodos posibles se calculará el primer dato por medio de la fórmula y el segundo por medio de la tabla, para luego promediar.

Para el primer dato:

$$N = 26, \quad \omega = 37,7$$

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

$$LL = 37,7 * \left(\frac{26}{25}\right)^{0,121}$$

$$LL = 37,9\%$$

Y para el segundo,

$$N = 24, \omega = 39,2$$

$$K=0,995$$

$$LL = K * (\omega)$$

$$LL = 0.995 * (37,9)$$

$$LL = 37,7\%$$

Por promedio el límite líquido a reportar sería:

$$LL = \frac{37,9 + 37,7}{2} = 37,8 \approx 38\%$$

#### **4.1.6. Descripción del ensayo para el límite plástico según la Norma ASTM D4318-84**

El límite plástico es una medida de la cohesión del suelo, y marca la humedad en la que las partículas del suelo pierden su maleabilidad, esta cohesión debe de ser lo suficientemente baja como para permitir el movimiento entre partículas y lo suficientemente alta como para permitir que mantengan su nueva forma, por lo tanto el límite plástico es una medida de contenido de humedad del suelo en el que debiera tener cierta resistencia al corte y una cantidad de agua suficiente para mojar todas las superficies de las partículas del suelo y los pequeños poros.

El límite plástico está definido como la humedad necesaria para que un cilindro de muestra de suelo se rompa o se agriete cuando se enrolla a un diámetro de 1/8 de pulgada o 3,2 milímetros, esto sobre una superficie lisa y con la palma de la mano, se nota entonces que es un ensayo altamente afectado por el laboratorista dado que es por criterio del mismo.

#### **4.1.7. Equipo utilizado**

El equipo necesario para realizar este ensayo se enumera a continuación:

- Placa de vidrio esmerilado o de material liso no absorbente, de al menos 20 x 20 cm.
- Horno con capacidad de mantener  $110 \pm 5$  °C
- Probeta con agua destilada
- Balanza con precisión de 0,01 g
- Recipientes para contenido de humedad con tapadera

#### **4.1.8. Procedimiento**

Tomando una parte del material preparado para el ensayo del límite líquido, se debe de llevar a un contenido de humedad en el que se pueda rodar sin que se quede adherido o untado en los dedos o la superficie lisa, no absorbente, utilizada para el ensayo.

También se puede preparar esta muestra al preparar la muestra usada en el ensayo del límite líquido, como una porción menos húmeda.

El proceso de secado puede acelerarse exponiendo el suelo a la corriente de aire de un ventilador eléctrico o secándolo con papel, mientras este no le



añada ninguna fibra al suelo, ya que esto podría afectar el punto de ruptura de la muestra.

Al alcanzar la muestra a la humedad adecuada se conforma con la palma de la mano sobre la superficie lisa que se utilizara como base, hasta formar un cilindro, esto debe hacerse con la fuerza justa para que disminuya el diámetro del cilindro de manera constante y uniforme, se continua así hasta llegar a un diámetro de 1/8 de pulgada, para esto se puede utilizar una referencia, como un alambre o pequeño tubo de 1/8 de pulgada de diámetro. Esta reducción de diámetro no debería tomar más de 2 minutos dándole al suelo unos 80 o 90 ciclos en ese tiempo, donde un ciclo completo es un movimiento de mano hacia adelante y hacia atrás a la posición inicial, claro que esto puede disminuirse en suelos poco plásticos.

Si el cilindro de suelo no ha mostrado ninguna grieta o desmoronamiento al llevarlo a 1/8 de pulgada, se debe tomar el cilindro y amasarlo de nuevamente y continuar así hasta que se desmorone o agriete antes de llegar a 1/8 de pulgada, el operador no debería de buscar lograr esta falla justamente en el 1/8 de pulgada, ni reduciendo la presión sobre el cilindro, ni disminuyendo la velocidad de los ciclos; se debe tomar como ensayo satisfactorio al momento de que se rompa o raje el cilindro, siempre y cuando se haya llegado antes a 1/8 de pulgada.

La falla mostrada por el suelo depende mucho del tipo de suelo que se esté ensayando, algunos suelos se parten en numerosas partes pequeñas, otros forman una capa exterior que comienza a partirse por los extremos avanzando así hacia el centro para luego separarse en muchas partes pequeñas y planas, y algunos otros, comúnmente las arcillas más plásticas, se suelen partir en una serie de pequeños cilindros.

Figura 9. **Moldeado de cilindros con alambre de referencia de 1/8"**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 10. **Detalle de cilindros agrietados al límite plástico**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 11. **Muestra para secado**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Las porciones de suelo obtenidas luego de alcanzar el límite plástico se guardan en un contenedor tapado, para que no pierdan su contenido de humedad en el tiempo que tome juntar suficiente material para un mínimo de dos comprobaciones de humedad, se recomienda que el tarro utilizado para mantener la muestra húmeda no se use para las verificaciones de humedades.

#### **4.1.9. Cálculos y resultados**

El cálculo de la humedad se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{W_{BH} - W_{BS}}{W_{BS} - Tc}$$

Dónde:

$\omega$  = Contenido de humedad

$W_{BH}$  = Peso bruto húmedo (tara + material húmedo)

$W_{BS}$  = Peso bruto seco (tara + material seco)

$T_c$  = Tara del contenedor

Y el resultado del límite plástico ha de ser determinado como el promedio de las humedades obtenidas luego del ensayo.

#### **4.1.10. Procedimientos alternos**

En caso de no tener a mano tarros con tapadera para mantener la humedad de la muestra se puede usar un tarro normal cubierto con un paño poco húmedo que no llegue a gotear o aumentar la humedad de la muestra.

Se ha notado que el ciclo con el que se realizan los cilindros de 1/8 de pulgada puede ser variable dependiendo del tipo de suelo, y mientras no se le permita al suelo tener un secado superficial (dejando el centro del cilindro húmedo) por realizarlo muy lentamente se obtienen resultados satisfactorios.

#### **4.1.11. Experiencias en laboratorio**

Para la preparación de la muestra de ambos ensayos, ha resultado mucho mejor la preparación de dos muestras a distintas humedades, una para el límite líquido y otra para el límite plástico, siempre dejándoles un tiempo mínimo de 24

horas para su homogenización, aunque se ha mencionado que es bueno dejarles más tiempo a las arcillas más plásticas; se ha mostrado también que algunos suelos de baja plasticidad muestran límites más altos luego de 72 horas de mantenerlos húmedos y bien homogenizados.

#### **4.1.12. Ejemplo de cálculo**

Se tiene para un ensayo de límite plástico como resultado una humedad del 27,7% y otra de 27,2%.

Se calcula entonces el límite plástico a partir de promedio

$$LP = \frac{27,7 + 27,2}{2} = 27,5 \approx 28\%$$

#### **4.1.13. El índice plástico**

El índice plástico es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, y representa el rango de humedad en la que el suelo es capaz de sostenerse en estado plástico, si alguno de los dos límites ya sea el plástico o el líquido no puede ser determinado, o si el límite plástico es igual o mayor al límite líquido se define al suelo como NP (No plástico).

### **4.2. Descripción del ensayo de límite líquido según la Norma BS 1377**

Este ensayo determina el límite líquido midiendo la penetración en una muestra de suelo de un cono de 80 gr de peso, con un ángulo central de 30°. El límite líquido es el contenido de humedad al que se obtiene una penetración del cono de 20 milímetros en un lapso de 5 segundos.

Existen dos formas de realizar este método, una con no menos de tres puntos a distintas humedades y la de un solo punto, ambas dan resultados bastante satisfactorios. Siendo el ensayo un ensayo estático que depende del esfuerzo de corte inducido en el suelo, los resultados son más repetibles que en el método de Casagrande, este método también fue antes practicado por Sowers (1959) aunque con un cono ruso de 75 gramos, un tiempo de 10 segundos y una penetración de 10 milímetros.

#### **4.2.1. Equipo utilizado**

El equipo utilizado para realizar este ensayo es el siguiente:

- Tamiz No. 40
- Penetrómetro, con un una carrera no menor que 25 milímetros y un dial con una precisión de 0,01 milímetros
- Cono de acero inoxidable de 35 milímetros de longitud y ángulo central de  $0 \pm 1^\circ$ , y un peso de  $80 \pm 1$  gramos
- Un tarro metálico de 55 milímetros de diámetro y 40 milímetros de profundidad para colocar la muestra.
- Espátula
- Recipientes para contenido de humedad
- Recipiente apropiado para mezclar la muestra
- Cronómetro
- Balanza con una precisión de 0,01 g
- Probeta con agua destilada
- Horno con capacidad de mantener  $110 \pm 5$  °C

#### **4.2.2. Procedimiento**

Se coloca el penetrómetro sobre una superficie firme y se nivela.

Se debe revisar el cono periódicamente introduciendo su punta en un agujero de  $1,5 \pm 0,02$  milímetros de diámetro hecho en una lámina de  $1,75 \pm 0,1$  milímetros de espesor. El cono se remplazará en el momento que al ser introducido en el agujero no se pueda palpar la punta del cono con el dedo al otro lado de la lámina.

La preparación de la muestra ha de ser la misma que se utiliza en el método de Casagrande, utilizando material que pase el tamiz No. 40 cuya humedad haya sido homogenizada 24 horas antes del ensayo.

Se recomienda que el mezclado de la muestra se realice por al menos 10 minutos, pero algunos tipos de arcillas muy plásticas pueden requerir hasta 40 minutos para que la humedad sea homogénea en toda la muestra; el objetivo es que la primera penetración sea de unos 15 milímetros; al terminar la homogenización de la muestra se coloca en el tarro de ensayo con una espátula, tratando que no quede aire atrapado en el interior y luego rasando al borde para dejar una superficie lisa.

Hecho esto, el cono se mueve en el penetrómetro de forma de tener una lectura inicial del dial en 0 mm o con el mínimo posible de forma de tener una carrera adecuada para el ensayo, en esta posición se coloca el tarro de ensayo de manera que el cono caiga en el centro geométrico del tarro (para mantener en el ensayo una distribución uniforme de esfuerzo sobre el suelo), luego se baja el aparato sin perder la lectura inicial, teniendo precaución de dejarlo justo

al ras de la muestra, la posición exacta será donde al mover lateralmente el tarro, el cono raye ligeramente la superficie de la muestra.

El cono se deja caer en caída libre durante un tiempo de  $5 \pm 1$  s para luego detenerlo y tomar la lectura de penetración, si el aparato no cuenta con un freno automático hay que tener cuidado de no moverlo al momento de activarlo para no alterar el nivel ni la caída libre.

Figura 12. **Aparato penetrómetro**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.



Figura 13. **Cono de 80 gramos**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 14. **Muestra rasada en el tarro de ensayo**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 15. **Centrado de muestra en el penetrómetro**



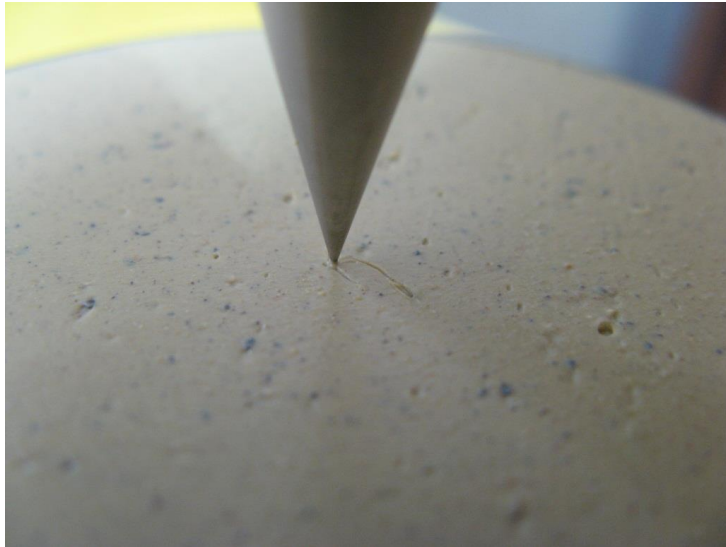
Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 16. **Penetrómetro al ras de la muestra**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 17. **Detalle del cono marcando ligeramente la superficie**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Figura 18. **Ensayo de penetrómetro luego de caída libre de 5 segundos en muestra arcillosa**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Se toma como penetración la diferencia entre la lectura del punto inicial y la lectura del punto final, luego se levanta y limpia con cuidado el cono, regresándolo a su posición inicial, se vuelve a repetir el proceso desde el llenado del tarro de ensayo y se anota la nueva penetración con la misma humedad; si la diferencia entre las dos penetraciones es menor a 0,5 milímetros se usará la media aritmética de las dos penetraciones obtenidas para reportar.

Si la segunda penetración tiene una diferencia mayor a 0,5 milímetros con la segunda, pero menor a 1 milímetro, se realizara un tercer ensayo, y si la diferencia entre los tres ensayos es menor a 1 milímetro se puede reportar como resultado la media aritmética de las tres penetraciones, de tener una diferencia mayor a 1 milímetro entre las tres, se debe de mezclar y ensayar el material de nuevo hasta obtener un resultado más consistente.

Figura 19. **Ensayo de penetrómetro luego de caída libre de 5 segundos en muestra limosa**



Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Al encontrar un resultado que satisfaga las anteriores consideraciones se procede a tomar la muestra de humedad, intentando que no sea del área de penetración del cono ya que la presión realizada sobre el suelo puede cambiar la cantidad de agua por unidad de suelo que existe en la muestra, cambiando así la humedad real; luego se puede variar la humedad de la muestra para buscar el siguiente punto.

Los puntos que se busquen para el ensayo usualmente son tres y se busca que el primer punto quede entre 10 y 18 milímetros, el segundo entre 18 y 22 milímetros y el tercero entre 22 y 30 milímetros de penetración. Si se realiza el método de un solo punto se debe intentar que la penetración esté entre 15 y 25 milímetros, lo más cercano posible a 20 milímetros, repitiendo el ensayo las veces necesarias para que dos resultados consecutivos den una diferencia máxima de 0,5 milímetros de diferencia.

#### **4.2.3. Cálculos y resultados**

El cálculo de la humedad se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{W_{BH} - W_{BS}}{W_{BS} - Tc}$$

Dónde:

$\omega$	=	Contenido de humedad
$W_{BH}$	=	Peso bruto húmedo (tara + material húmedo)
$W_{BS}$	=	Peso bruto seco (tara + material seco)
$Tc$	=	Tara del contenedor

Si se realizó el ensayo por el método de tres puntos se tiene como resultado tres penetraciones con sus respectivas humedades, los resultados se grafican colocando en el eje de las abscisas la penetración a escala aritmética y en el eje de las ordenadas la humedad también a escala aritmética.

Luego se traza la línea recta que mejor se ajuste a los puntos y de la recta se encuentra la humedad correspondiente a 20 milímetros de penetración.

Si se usa el método de un solo punto se hace el cálculo según lo que indica la norma BS 1377 4.4.5, multiplicando el resultado por un factor de corrección que depende de la humedad que haya tenido el punto y la penetración media encontrada:

$$LL = K * (\omega)$$

Siendo:

$\omega$  = El contenido de humedad.

K = El valor dado por la Tabla VIII de este informe (Tabla 1 BS 1377 4.4.5).

Tabla VIII. **Factores para determinar por un punto el límite líquido según Norma BS 1377**

<b>P</b> (Penetración en mm)	<b>Factores Dependiendo de Humedad</b>		
	menor a 35%	de 35% a 50%	mayor a 50%
15	1,057	1,094	1,098
16	1,052	1,076	1,075
17	1,042	1,058	1,055
18	1,030	1,039	1,036
19	1,015	1,020	1,018
20	1,000	1,000	1,000
21	0,984	0,984	0,984
22	0,971	0,968	0,967
23	0,961	0,954	0,949
24	0,955	0,943	0,929
25	0,954	0,934	0,909
Plasticidad	Baja	Intermedia	Alta

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2.4. Procedimientos alternos**

Ha de tomarse en cuenta que existe una relación lineal entre la penetración y la humedad, cuando se grafica en el eje de las abscisas la penetración a escala logarítmica de base 10 y en el vertical la humedad a escala aritmética, por lo que se puede hacer esta variante a la grafica del método de 3 puntos.

También se puede restringir el rango de las penetraciones buscadas para tener mejores resultados, dejando al primer punto entre 15 y 18 milímetros, el segundo entre 18 y 25 milímetros y el tercero entre 25 y 30 milímetros de penetración.

#### 4.2.5. Experiencias en laboratorio

Para este ensayo se encontró que una mejor forma para homogenizar la humedad del material es mezclarlo con las manos, dado que por la cantidad de muestra necesaria es difícil hacerlo con una espátula.

#### 4.2.6. Ejemplo de cálculo

Se han obtenido para un ensayo de límite líquido por método del penetrómetro con tres puntos los resultados siguientes:

Tabla IX. **Valores para determinar el límite líquido según Norma BS 1377**

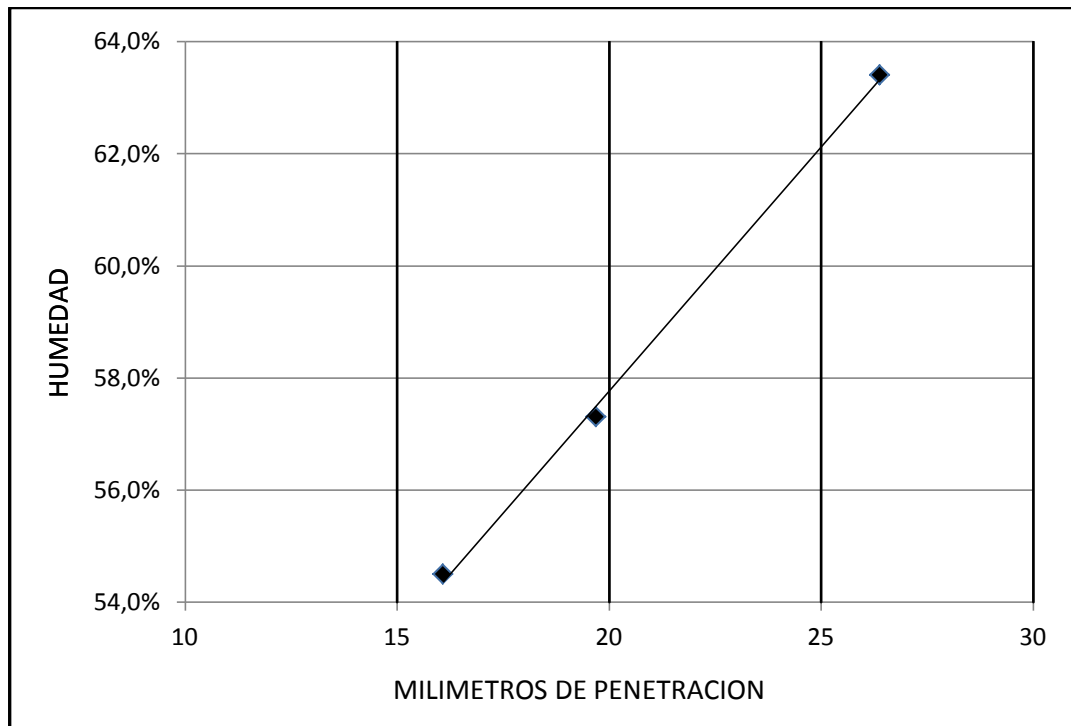
Penetración (mm)	16,1	19,7	26,4%
Humedad	54,5%	57,3%	63,4%

Fuente: elaboración propia.

Se dibujan los puntos en una gráfica de penetración vs. humedad con ambas dimensiones a escala aritmética, para luego trazar la línea de tendencia y encontrar gráficamente la humedad correspondiente a 20 milímetros de penetración, según se observa en la figura 20.



Figura 20. **Gráfica para límite líquido según norma BS 1377**

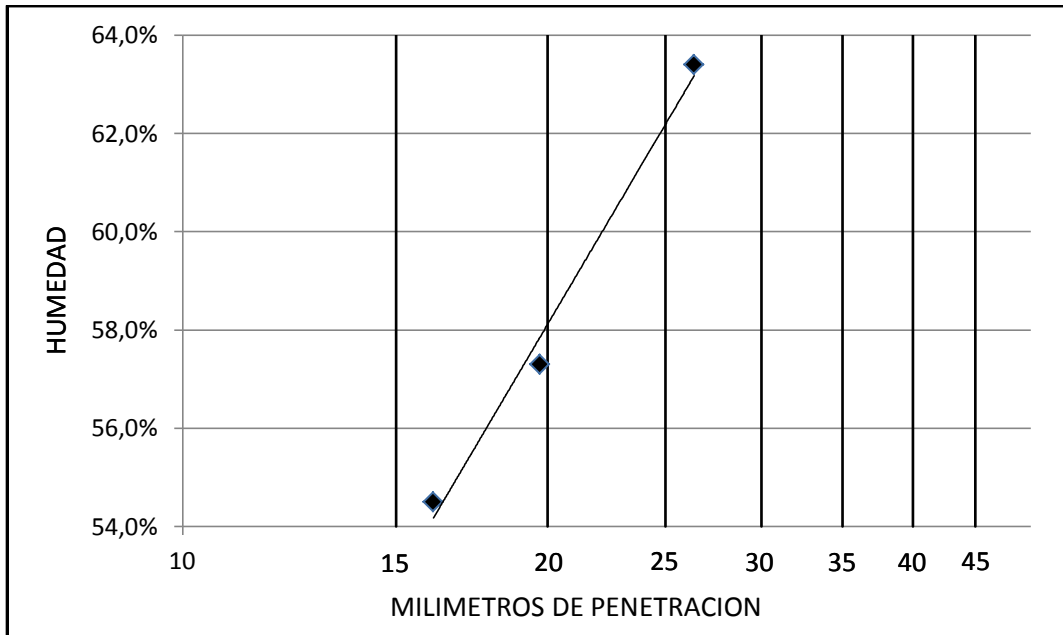


Fuente: elaboración propia.

Encontrando así que la mejor aproximación para reportar es un límite líquido de 58%. Si se hace la gráfica, con la dimensión del eje de penetración a escala logarítmica de base 10 y el eje de humedad a escala aritmética se obtiene lo mostrado en la figura 21.

Encontrando así un límite líquido del 58%; esto también muestra la linealidad de esta grafica con la penetración en escala logarítmica.

Figura 21. **Gráfica para límite líquido con penetrómetro y penetración en escala logarítmica**



Fuente: elaboración propia.

Para calcularlo por el método de un punto se puede usar la penetración de 19,7 mm con humedad de 57,3%, que usando la tabla VIII se encuentra un valor para  $K=1$ , quedando el límite líquido como

$$LL = K * \omega\% = (1) * (57,3) \approx 57\%$$

Reportando un límite líquido de 57%.

Como una comparación, este suelo al ensayarlo por el método de Casagrande da un límite líquido de 57%.

#### **4.3. Descripción del ensayo y análisis dimensional del Método de Wood y Wroth**

Littleton y Farmilo (1977) publicaron un artículo sobre el uso del penetrómetro de cono para determinar el límite líquido en suelos, tema que luego sería estudiado por Hansbo (1957) quien realizó un estudio bastante detallado sobre el ensayo del penetrómetro de cono, aunque su intención inicial fue la de medir la resistencia al corte.

Estudios como los de Skempton y Northey (1953), Casagrande (1958), Norman (1958), Youssef (1965) y Wood y Wroth (1978) mostraron que el suelo tiene una resistencia al corte al límite líquido con valores entre 1,7 KPa y 2,3 KPa.

Al hacer un análisis dimensional del ensayo lo primero es determinar que variables tienen relación con el ensayo, siendo estas: el esfuerzo de corte, la penetración, el peso, la gravedad y el ángulo del cono a utilizar.

Si se ordenan estas variables según su aparición en la tabla de dimensiones físicas de unidades de medida (tabla II de este informe) y colocando sus dimensionales se encuentra la tabla X.

El ángulo del cono y la humedad al no tener dimensional no se utilizarán en el análisis.

Al armar la matriz según lo indicado en el método de Buckingham se obtiene la tabla XI.

Tabla X. **Variabes para método del penetrómetro**

<b>Variable</b>	<b>Dimensiones físicas</b>	<b>Sigla</b>
Penetración	L	d
Peso del cono	MLT <sup>-2</sup>	W
Ángulo del cono	1	θ
Gravedad	LT <sup>-2</sup>	g
Esfuerzo de corte	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	Cu
Humedad del suelo	1	ω

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Matriz de variables del penetrómetro en el método de Buckingham**

	<b>d</b>	<b>G</b>	<b>W</b>	<b>Cu</b>
<b>L</b>	1	1	1	-1
<b>M</b>	0	0	1	1
<b>T</b>	0	-2	-2	-2
	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>K3</i>	<i>K4</i>

Fuente: elaboración propia.

Con estos datos se procede al cálculo de las determinantes para encontrar el número de productos adimensionales " $\pi$ " que podríamos tener resultantes, empezando desde la matriz menor (2x2) en la parte superior derecha.

$$\text{determinante} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = 2$$

$$\text{determinante} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & -2 \end{bmatrix} = -4$$

Como ninguno de los determinantes tuvo valor 0 se toma  $r = 3$ , ya que la última matriz cuadrada con determinante distinto de cero posee de dimensiones (3x3). El número de variables que se están tomando en cuenta será  $N = 4$ , quedando:

$$\pi = N - r = 4 - 3 = 1$$

Ya teniendo como premisa que solo se tiene un factor " $\pi$ " se puede proseguir con el método armando las ecuaciones como sigue:

$$L^{K_1+K_2+K_3-K_4} * M^{K_3+K_4} * T^{-2K_2-2K_3-2K_4} = 0$$

Sabiendo que el objetivo es que las ecuaciones sean iguales a 0 se tendrá:

$$K_1 + K_2 + K_3 - K_4 = 0$$

$$K_3 + K_4 = 0$$

$$-2K_2 - 2K_3 - 2K_4 = 0$$

Como se tiene tres ecuaciones y cuatro variables, para resolver se asume  $K_1 = 1$ , encontrando:

$$K_1 = 1, K_2 = 0, K_3 = -0.5, K_4 = 0.5$$

Y eliminando los exponentes fraccionarios se tiene:

$$K_1 = 2, K_2 = 0, K_3 = -1, K_4 = 1$$

Se sustituye de nuevo en las variables iniciales, de modo que:

$$d^{K_1} * G^{K_2} * W^{K_3} * Cu^{K_4}$$

$$d^2 * G^0 * W^{-1} * Cu^1$$

Se observa que la gravedad queda con exponente cero, indicando que no se puede tomar en cuenta para la ecuación final.

$$\pi_1 = \frac{d^2 * Cu}{W} = \text{constante adimensional}$$

Esta es la misma ecuación con la que Hansbo (1957) relacionó la penetración, la resistencia al corte y el peso del cono. Para una penetración constante, el peso del cono es proporcional al esfuerzo de corte inducido en el suelo, esto es:

$$Cu \propto W, \text{ cuando } d \text{ es constante}$$

Skempton y Northey (1953) con base en ensayos de laboratorio mostraron que la resistencia al corte de arcillas al límite plástico es aproximadamente cien veces la resistencia obtenida al límite líquido.

$$Cu_{LL} * 100 = Cu_{LP}$$

De la publicación de Schofield y Wroth (1968) “*Critical state of soil mechanics*” Wood y Wroth determinaron que podía existir una relación directa entre la resistencia al corte y la humedad ( $\omega$ ) contenida en el suelo, así:

$$\omega + A * \log_{10}(Cu) = \text{constante, donde } A \text{ es constante}$$

Relacionando estas teorías se tiene la siguiente igualdad:

$$(\omega_{LL} + A * \log_{10}(Cu_{LL})) - (\omega_{LP} + A * \log_{10}(100 * Cu_{LL})) = 0$$

Simplificando:

$$(\omega_{LL} - \omega_{LP}) + A * (\log_{10}(Cu_{LL}) - \log_{10}(100 * Cu_{LL})) = 0$$

$$(IP) + A * \log_{10}\left(\frac{Cu_{LL}}{100 * Cu_{LL}}\right) = 0$$

$$(IP) + A * \log_{10}(100^{-1}) = 0$$

$$IP = A * \log_{10}(100) = A * 2$$

De la relación lineal  $Cu \propto W$  y tomando como dato que el límite líquido es alcanzado por un cono de 80 gramos y 30° a los 20 milímetros de penetración, se puede encontrar el límite plástico con un cono de 8 kilogramos y 30° a 20 milímetros de penetración de forma directa.

Pero como es impráctico usar un cono de este peso, se pueden utilizar dos conos de pesos distintos  $W_1$  y  $W_2$  con sus respectivas humedades  $\omega_1$  y  $\omega_2$  obteniéndose de la ecuación de Schofield y Wroth.

$$\omega + A * \log_{10}(W) = \text{constante, donde } A \text{ es constante}$$

$$(\omega_1 + A * \log_{10}(W_1)) + (\omega_2 + A * \log_{10}(W_2)) = 0$$

$$(\omega_1 - \omega_2) + A * \log_{10}\left(\frac{W_1}{W_2}\right) = 0$$

$$A = \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{\log_{10}\left(\frac{W_1}{W_2}\right)}$$

Como  $IP = A * \log_{10}(100)$  se puede sustituir el valor de “A”, quedando:

$$IP = 2 * \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{\ln\left(\frac{W_1}{W_2}\right)}$$

Encontrando así finalmente la ecuación propuesta por Wood y Wroth para encontrar el índice de plasticidad a partir de un ensayo de dos conos de distintos pesos.

George y Wood (1976), citados por Wood y Wroth (1978) sugirieron una relación  $\left(\frac{W_1}{W_2}\right) = 3$ , quedando entonces como  $W_2$  el cono de 80 gramos (ya usado para encontrar el límite líquido), y como  $W_1$  un cono de 240 gramos.



Vale la pena denotar también que Wood (1983) propuso que la constante K de:

$$C_{u_{LL}} = K * \frac{W}{d^2}$$

Tendría valor de 1 y que en las últimas referencias de 1985, un ensayo con esfuerzo de corte no drenado para esta ecuación dio valores entre 1,96 kPa y 1,67 kPa, quedando la constante K como 0,85, ya que el W para un cono de 30° y 80 gramos es de 0,785 N.

#### **4.3.1. Equipo utilizado**

El equipo utilizado para realizar este ensayo es el siguiente:

- Tamiz No. 40
- Aparato de penetrómetro, con un rango de al menos 25 milímetros y precisión de 0,01 milímetros.
- Cono de penetración de acero inoxidable con unos 35 milímetros de longitud y ángulo de  $30 \pm 1^\circ$ , la masa del cono será de  $80 \pm 1$  gramos.
- Cono de penetración de acero inoxidable con un ángulo de  $30 \pm 1^\circ$  y una masa de  $240 \pm 1$  gramos.
- Un tarro metálico para ensaye con 55 milímetros de diámetro y 40 milímetros de profundidad.
- Espátula
- Recipientes para contenido de humedad
- Recipiente para el mezclado de la muestra
- Cronometro
- Balanza con precisión de 0,01 gramos
- Probeta con agua destilada
- Horno con capacidad de mantener  $110 \pm 5^\circ\text{C}$

### 4.3.2. Procedimiento

Para utilizar este método se usa lo indicado en la Norma BS 1377, con la variante de realizar dos iteraciones, primero con el cono de 240 gramos y luego con el cono de 80 gramos, este orden se debe a que es más práctico ir añadiendo humedad a la muestra, partiendo del punto de mayor resistencia del suelo, esto es cuando está más seco. Para el cono de 240 gramos también se busca la humedad a una penetración 20.

### 4.3.3. Cálculos y resultados

El cálculo de la humedad se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{W_{BH} - W_{BS}}{W_{BS} - Tc}$$

Dónde:

$\omega$  = Contenido de humedad

$W_{BH}$  = Peso bruto húmedo (tara + material húmedo)

$W_{BS}$  = Peso bruto seco (tara + material seco)

$Tc$  = Tara del contenedor

Figura 22. **Cono de 240 gramos**



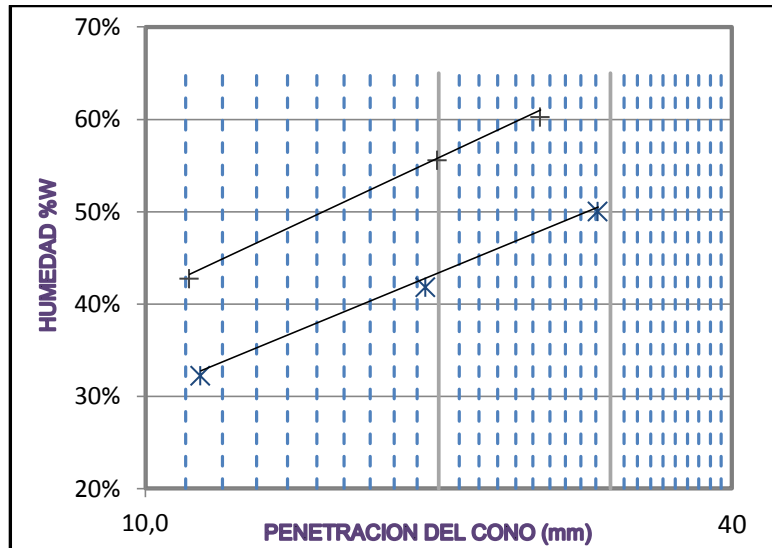
Fuente: Laboratorio Consultoría Dr. Rodolfo Semrau.

Con el método de tres puntos para cada cono se obtienen del ensayo seis penetraciones con sus respectivas humedades y con ellas se hace una gráfica de penetración vs. humedad, en el eje de las abscisas se coloca la penetración a escala logarítmica y en el eje de las ordenadas se coloca la humedad a escala aritmética, como se muestra en la figura 23.

En la gráfica se dibuja la recta de mejor tendencia para cada cono y se determina para cada cono el contenido de humedad para una penetración de 20 milímetros de penetración, para el cono de 80 gramos dicha humedad es el límite líquido, quedando el índice plástico definido por:

$$IP = 2 * \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{\log_{10} \left( \frac{W_1}{W_2} \right)}$$

Figura 23. **Gráfica ejemplo para método de Wood y Wroth**



Fuente: elaboración propia.

Donde la relación  $\left(\frac{W_1}{W_2}\right)$  es 3 y  $(\omega_2 - \omega_1)$  es la diferencia de humedades entre los conos de 80 y 240 gramos para una penetración de 20 milímetros.

Por lo que se reduce la ecuación a:

$$IP = \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{0,23856}$$

#### 4.3.4. Procedimientos alternos

Cabe mencionar que según lo expuesto en el desarrollo de este método se podría utilizar dos conos de cualquier peso para determinar el índice plástico (IP) de un suelo, pero el objetivo de tener como base uno de 80 gramos es poder determinar el límite líquido en el mismo ensayo.

#### 4.3.5. Experiencias en laboratorio

En la realización del ensayo se encontró más sencillo mezclar la muestra con las manos, ya que por la cantidad de muestra necesaria para la prueba con los dos conos y por la trabajabilidad de la misma resulta más sencilla una homogenización a mano que hacerlo con espátula.

#### 4.3.6. Ejemplo de cálculo

De la gráfica mostrada en la figura 23 de este informe se puede obtener los datos de la tabla XII para una penetración de 20 milímetros:

Tabla XII. **Ejemplo para cálculo de Wood y Wroth**

$\omega$ cono de 80g	0,56
$\omega$ cono de 240g	0,44

Fuente: elaboración propia.

Operando:

$$IP = \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{0,23856} = \frac{(0,56 - 0,44)}{0,23856} = 0,50$$

Por tanto  $IP = 50\%$

#### 4.4. Descripción del Método de Belviso y Ciampoli

Belviso y Ciampoli (1985) fundamentaron este método en el libro “*Critical state of soil mechanics*” publicado por Schofield y Wroth (1968) en el que se expone que existe una relación directa entre la resistencia al corte ( $Cu$ ) y la humedad contenida en el suelo ( $\omega$ ).

$$\omega + A * \log_{10} Cu = \text{constante, donde } A \text{ es constante}$$

Tomando que la resistencia al corte al límite plástico es 100 veces mayor que la resistencia al corte al límite líquido resulta que  $IP = 2 * A$  (mostrado con detalle en el inciso 4.3.1) y si se asume que se utilizará un solo cono, sin importar su peso, se tiene  $W$  constante en la siguiente relación:

$$\frac{Cu * d^2}{W} = K$$

Donde  $K$  y  $W$  son constantes.

$$Cu = \frac{\text{constante}}{d^2}$$

Usando estas tres ecuaciones para relacionar la humedad ( $\omega$ ), el índice de plasticidad ( $IP$ ) y la penetración ( $d$ ) se tendrá:

$$\omega + A * \log_{10} Cu = \text{constante}$$

$$\omega + \frac{IP}{2} * \log_{10} \left( \frac{\text{constante}}{d^2} \right) = \text{constante}$$

$$\omega - \frac{IP}{2} * 2 * \log_{10}(d) = constante$$

$$\omega = IP * \log_{10}(d) + constante$$

Observando en detalle esta ecuación veremos que tiene la forma de la ecuación de una línea recta, y como  $y = mx + c$ , tendremos entonces  $y = \omega$ ,  $m = IP$  y  $x = \log_{10}(d)$ , que nos da la posibilidad de encontrar el índice plástico a partir de la pendiente de la recta de flujo.

Al tomar dos puntos de la gráfica de un cono de peso determinado se tiene dos datos de humedad ( $\omega$ ) y de penetración ( $d$ ), en la práctica se usó el cono de 80 gramos ya que con este se encuentra el límite líquido en el mismo ensayo.

El cálculo será de la siguiente forma:

$$\tan \theta = \frac{\text{lado opuesto}}{\text{lado adyacente}} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\log_{10}(d_2) - \log_{10}(d_1)}$$

$$\theta = \cot^{-1} \left( \frac{\omega_2 - \omega_1}{\log_{10} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)} \right)$$

Se utilizaron los puntos  $d_1 = 10 \text{ mm}$  y  $d_2 = 20 \text{ mm}$  encontrados a partir de la gráfica las humedades.

Por lo que la ecuación final a utilizar es:

$$IP = \theta = \cot^{-1} \left( \frac{\omega_2 - \omega_1}{0,301} \right)$$

#### **4.4.1. Equipo utilizado**

El equipo utilizado para realizar este ensayo es el siguiente:

- Tamiz No. 40
- Aparato de penetrómetro, con un rango de al menos 25 milímetros y precisión de 0,01 milímetros
- Cono de penetración de acero inoxidable con unos 35 mm de longitud y ángulo de  $30 \pm 1^\circ$ , la masa del cono será de  $80 \pm 1$  gramos
- Un tarro metálico para ensaye con 55 milímetros de diámetro y 40 milímetros de profundidad
- Espátula
- Recipientes para contenido de humedad.
- Recipiente para mezclado de muestra
- Cronometro
- Balanza con precisión de 0,01 gramos
- Probeta con agua destilada
- Horno con capacidad de mantener  $110 \pm 5$  °C.

#### **4.4.2. Procedimiento**

Se utilizó el mismo procedimiento para encontrar el límite líquido con el penetrómetro de cono de la norma BS 1377, ya que se pueden utilizar los mismos puntos obtenidos de esta gráfica para obtener las penetraciones de 10 y 20 milímetros.



#### 4.4.3. Cálculos y resultados

El cálculo de la humedad se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{W_{BH} - W_{BS}}{W_{BS} - Tc}$$

Dónde:

$\omega$  = Contenido de humedad

$W_{BH}$  = Peso bruto húmedo (tara + material húmedo)

$W_{BS}$  = Peso bruto seco (tara + material seco)

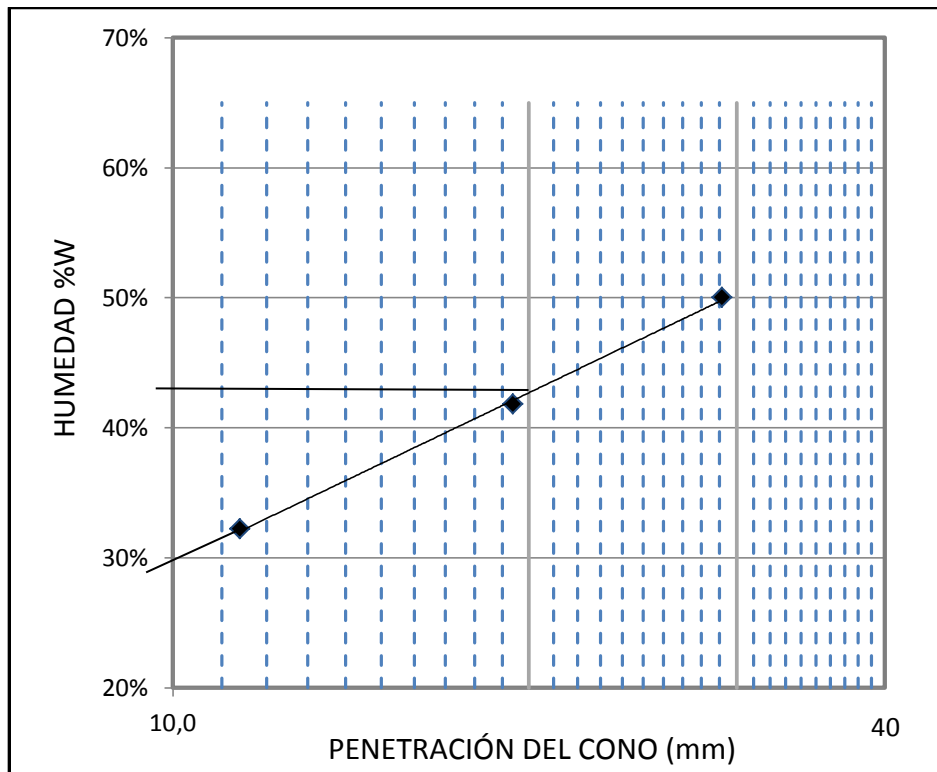
$Tc$  = Tara del contenedor

Con los resultados de humedad y penetración de los tres ensayos se hace una gráfica de penetración vs. humedad, en el eje de las abscisas se colocando la penetración con una escala logarítmica de base 10 y en el eje de las ordenadas se coloca la humedad a escala aritmética.

Si se extiende la línea de tendencia se nota que para una penetración de 10 milímetros se tendrá una humedad  $\omega_1 = 30\%$  y para la penetración de 20 milímetros una humedad  $\omega_2 = 44\%$ , con esto se procede al cálculo del índice de plasticidad según:

$$IP = \cot^{-1} \left( \frac{\omega_2 - \omega_1}{0,301} \right)$$

Figura 24. **Grafica ejemplo para método de Belviso y Ciampoli**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.4. Procedimientos alternos

Se puede utilizar como referencia cualquier par de puntos dentro de la línea de tendencia para este método, aunque es recomendable que no sean muy cercanos entre ellos para que los resultados sean más representativos, e inclusive, según la teoría se podría utilizar un cono con peso distinto a 80 gramos, ya que debería tener la misma pendiente en la gráfica sin importar el peso del cono.

#### 4.4.5. Experiencias en laboratorio

Observando las gráficas de los suelos ensayados se nota una mejor correlación de los datos cuando las penetraciones se encontraban en el rango de 15 a 35 milímetros.

También se recomienda como en los anteriores métodos hacer la homogenización para los primeros puntos con las manos, dada la cantidad y poca trabajabilidad del material a penetraciones bajas.

#### 4.4.6. Ejemplo de cálculo

En la gráfica de la figura 24 de este informe se puede obtener los datos de la Tabla XIII.

Tabla XIII. **Ejemplo de cálculo para método de Belviso y Ciampoli**

$d = 10 \text{ mm}$	$\omega = 30 \%$
$d = 20 \text{ mm}$	$\omega = 44 \%$

Fuente: elaboración propia.

Sustituyendo en la fórmula obtenida anteriormente se tiene:

$$IP = \cot^{-1} \left( \frac{\omega_2 - \omega_1}{0,301} \right) = \cot^{-1} \left( \frac{0,44 - 0,30}{0,301} \right)$$

$$IP = 24,9 \approx 25\%$$

#### **4.5. Método propuesto para determinar el límite plástico a partir del ensayo de límite líquido según la norma ASTM 4318 y el índice de fluidez**

Este método se fundamenta en la discusión de Harrison (1988) al artículo de Wijeyakulasuriya (1990) sobre el tema “*Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils*”, en la cual al discutir la precisión del método del penetrómetro de cono para determinar el índice plástico de los suelos, Harrison presenta dos gráficas (figura 25) donde se muestra la tendencia normal del esfuerzo de corte respecto al índice de fluidez de 8 muestras, además de determinar un modelo polinomial que describe el comportamiento típico de la curva. Por otra parte Jiménez Salas y Justo Alpañez (1975) muestra una gráfica de la misma comparación que incluye datos de Mitchell (1959) y Skempton y Northey (1952) de arcillas americanas, inglesas y españolas (figura 26).

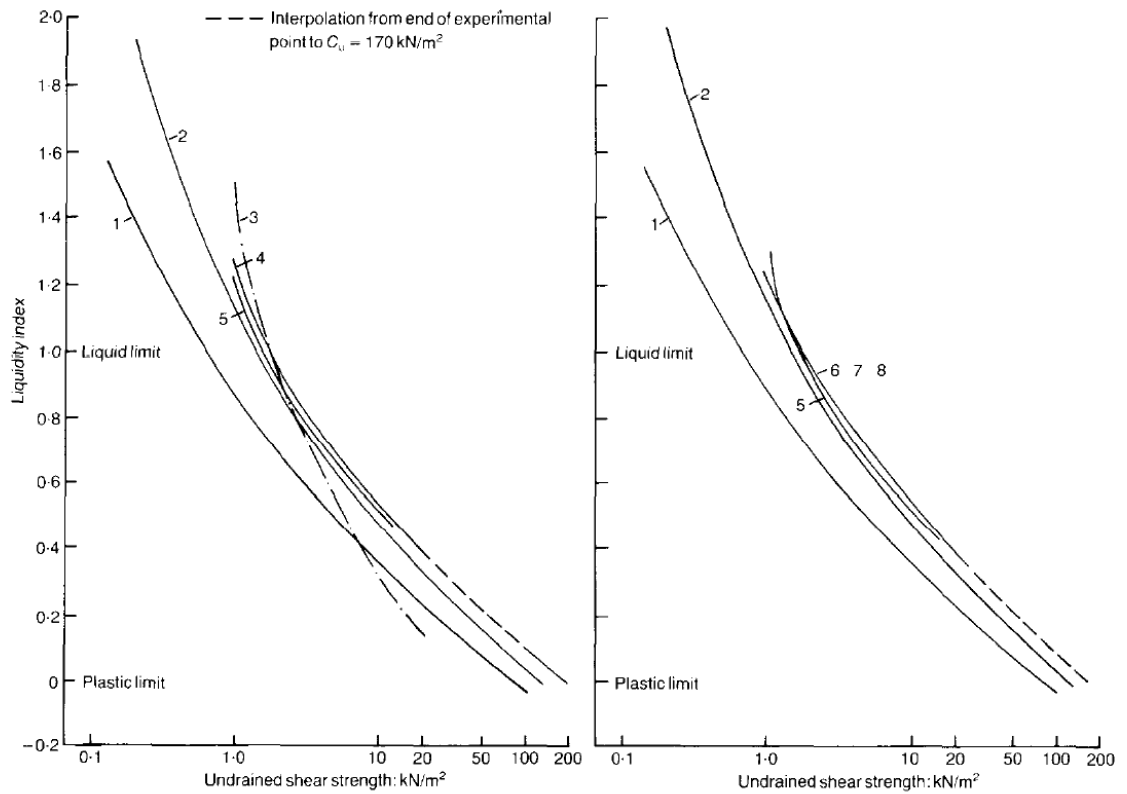
El índice de fluidez, definido por Terzaghi como la posición numérica de la humedad natural de un suelo respecto a los límites líquido y plástico, el que se escribe de la siguiente manera:

$$IL = (\omega - \omega_{LP})/IP$$

Dónde:

$\omega$  = Contenido de humedad

Figura 25. Relación entre el índice de fluidez y el esfuerzo de corte (1)



Clay	Test method	$W_L/W_p$
1. Shellhaven (Skempton & Northey, 1953)	—	97/32
2. Horten (Skempton & Northey, 1953)	—	30/16
3. Speswhite kaolin (Wood, 1985)	Vane shear	61/35
4. Cambridge Gault Clay (Wood, 1985)	Vane shear	69/28
5. Bandung ( $z^* = -7.0$ )	Fall-cone	61/39
6. Bandung ( $z = -7.0$ )	Fall-cone	64/36
7. Bandung ( $z = -2.0$ )	Fall-cone	30/36
8. Bandung ( $z = -5.0$ )	Fall-cone	66/41

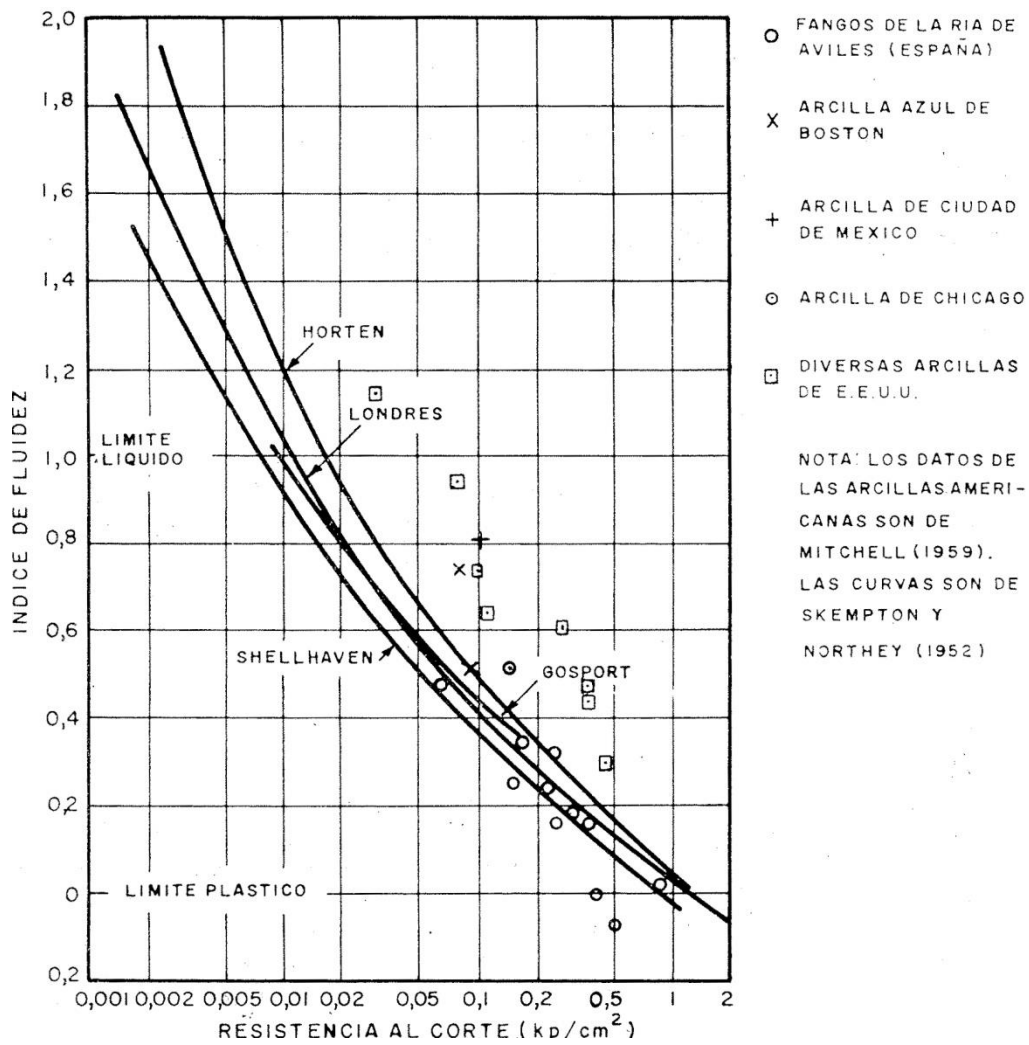
\*z = depth of sample from ground surface: m.

Curves 4, 5 and 6, 7, 8 can be represented by a polynomial model:

$$I_L = 1.182 - 0.768 (\log C_u) + 0.107 (\log C_u)^2$$

Fuente: HARRISON, J. A., *Geotechnique* 40, No. 2, p. 314.

Figura 26. Relación entre el índice de fluidez y el esfuerzo de corte (2)



Fuente: JIMÉNEZ SALAS, J. A. "Geotecnia y Cimientos 1, Propiedades de los suelos y las rocas" P.84.

$\omega_{LP}$  = Humedad del suelo al límite plástico

IP = Índice de plasticidad

IL = Índice de Fluidez

El índice de fluidez toma valor 1 cuando el suelo se encuentra a la humedad del límite líquido y 0 cuando está a la humedad del límite plástico.

Como el ensayo del límite líquido por el método de Casagrande, se basa en inducir un esfuerzo cortante en la muestra de suelo y se sabe que cada golpe aplica un esfuerzo de aproximadamente  $1 \text{ g/cm}^2$ , se puede relacionar las graficas expuestas anteriormente de forma directa con la cantidad de golpes del método de Casagrande.

De Harrison (1990) se tiene que el modelo polinomial típico de las curvas para el esfuerzo de corte en  $kN/m^2$  vs. el índice de fluidez, es:

$$IL = 1,182 - 0,768 * (\log_{10} C_U) + 0,107 * (\log_{10} C_U)^2$$

Mostrando que para un esfuerzo de corte constante el Índice de fluidez también tendrá un valor constante. Y partiendo de que se puede saber para un determinado número de golpes de la Copa de Casagrande una humedad específica y el esfuerzo de corte aplicado, se puede escribir la siguiente igualdad:

$$(\omega - \omega_p)/IP = IL = 1,182 - 0,768 * (\log_{10} C_U) + 0,107 * (\log_{10} C_U)^2$$

Donde el esfuerzo de corte se refiere al inducido en la muestra para una humedad " $\omega$ ", si se usa de referencia la humedad del suelo a los 35 golpes del aparato de Casagrande, el esfuerzo de corte esperado será  $35 \text{ g/cm}^2$  ó  $3,43 \text{ kN/m}^2$  y se obtiene un Índice de fluidez constante de la siguiente forma:

$$(\omega_{35 \text{ GOLPES}} - \omega_{LP})/IP = IL = 0,80155$$

$$IL = 0,80155$$

Y despejando para la humedad al límite plástico:

$$(\omega_{35 \text{ GOLPES}} - \omega_{LP})/(\omega_{LL} - \omega_{LP}) = IL$$

$$(\omega_{35 \text{ GOLPES}} - \omega_{LP}) = IL * (\omega_{LL} - \omega_{LP})$$

$$(\omega_{35 \text{ GOLPES}} - \omega_{LP}) = IL * \omega_{LL} - IL * \omega_{LP}$$

$$(IL - 1) * \omega_{LP} = IL * \omega_{LL} - \omega_{35 \text{ GOLPES}}$$

$$\omega_{LP} = \frac{IL * \omega_{LL} - \omega_{35 \text{ GOLPES}}}{(IL - 1)}$$

Quedando entonces el valor de la humedad del límite plástico en función de la constante que da el esfuerzo de corte para los 35 golpes, su humedad y la humedad del límite líquido.

#### **4.5.1. Equipo utilizado**

El equipo utilizado para realizar este ensayo se enumera a continuación:

- Copa de Casagrande (ASTM D 4318-84 6.1)
- Ranurador (ASTM D 4318-84 6.2)
- Tamiz No. 40
- Capsula de porcelana



- Espátula
- Recipientes para contenido de humedad.
- Balanza con precisión de 0.01 gramos
- Probeta con agua destilada
- Horno con capacidad de mantener  $110 \pm 5$  °C.

#### 4.5.2. Procedimiento

Se usó el mismo procedimiento, descrito en el inciso 4.1.3, para definir el límite líquido según la norma ASTM 4318-84, el ensayo se hará con tres pruebas de distintas humedades que queden distribuidas entre los 10 y 50 golpes. Con la variante de interpolar gráficamente el valor de la humedad a 35 golpes.

#### 4.5.3. Cálculos y resultados

El cálculo de la humedad se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{W_{BH} - W_{BS}}{W_{BS} - Tc}$$

Dónde:

$\omega$  = Contenido de humedad

$W_{BH}$  = Peso bruto húmedo (tara + material húmedo)

$W_{BS}$  = Peso bruto seco (tara + material seco)

$Tc$  = Tara del contenedor

Para encontrar el límite líquido y la humedad a 35 golpes, se dibujan los resultados en una gráfica de humedad vs. golpes, estando los golpes en el eje de las abscisas con una escala logarítmica y la humedad en el eje de las ordenadas con

Luego de graficados los puntos, se trazará una línea, tratando que sea la mejor aproximación lineal de los puntos, para encontrar gráficamente cual es la humedad correspondiente a los 25 y 35 golpes.

El cálculo del límite plástico se hace sustituyendo estos valores en la siguiente fórmula:

$$\omega_{LP} = \frac{0,80155 * \omega_{LL} - \omega_{35 \text{ GOLPES}}}{-0,19845}$$

Dónde:

$\omega_{LL}$  = Humedad al límite líquido

$\omega_{35 \text{ GOLPES}}$  = Humedad a los 35 golpes del aparato de Casagrande

$\omega_{LP}$  = Humedad al límite plástico

#### **4.5.4. Experiencias en laboratorio**

Observando las gráficas de los suelos ensayados se nota una mejor correlación de los datos cuando estos se encuentran bien mezclados y han sido homogenizados durante al menos 24 horas, aunque para arcillas muy plásticas se recomienda homogeneizarlas por 48 horas.

#### 4.5.5. Ejemplo de cálculo

Se han obtenido para un ensayo de tres puntos los siguientes resultados mostrados en la tabla XIV.

Que al graficarlo se obtiene lo mostrado en la figura 27 de este informe.

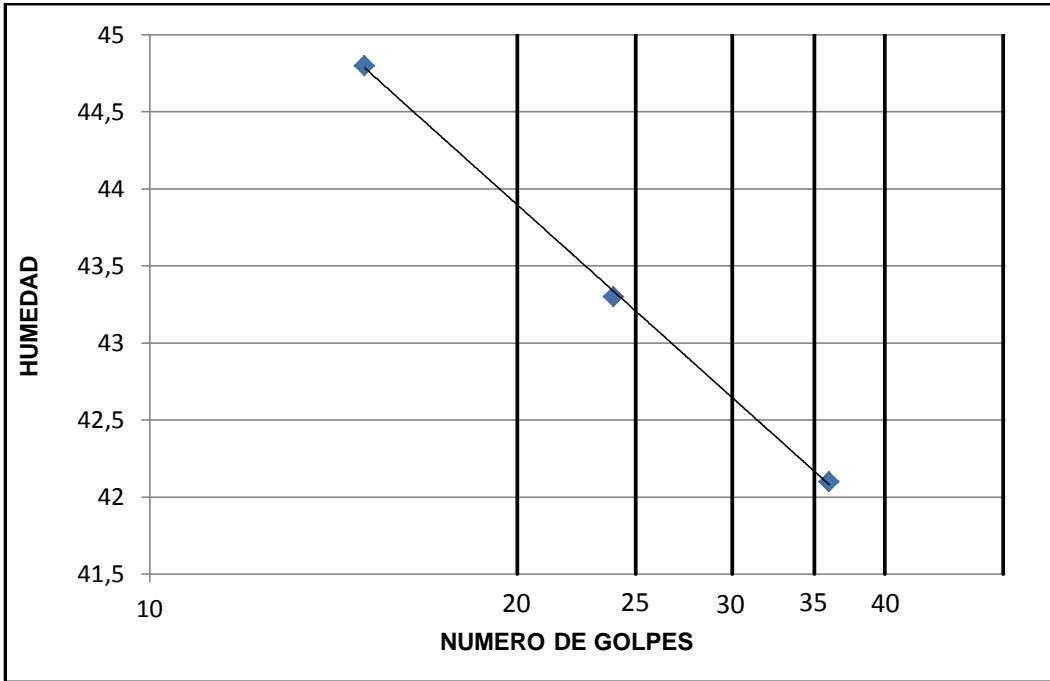
Tabla XIV. **Ejemplo de cálculo para límite líquido y límite plástico, relación del índice de fluidez**

Golpes	36	24	15
Humedad	42,1%	43,3%	44,8%

Fuente: elaboración propia.

Luego se traza una línea de tendencia para encontrar la humedad para los 25 y 35 golpes, obteniendo un límite líquido de 43% y para 35 golpes una humedad de 42%, estos valores se sustituyen en la ecuación propuesta en forma decimal, obteniendo también el valor del límite plástico en forma decimal.

Figura 27. **Ejemplo de grafica para límite líquido y límite plástico con el Método del índice de fluidez**



Fuente: elaboración propia.

De donde se obtiene que:

$$LP = \frac{0,80155 * \omega_L - \omega_{35 \text{ GOLPES}}}{-0,19845} = \frac{0,80155 * 0,43 - 0,42}{-0,19845} = 38\%$$

## 5. SUELOS ENSAYADOS

Los suelos utilizados para ensayar los métodos propuestos se muestran en las tablas de la XV a la XXII.

Tabla XV. **Resumen de muestras ensayadas con penetrómetro de cono**

Numero de muestra	Ubicación	Porcentaje pasa tamiz 200	Porcentaje retenido tamiz 40	Clasificación Sistema unificado	Límite líquido	Límite plástico	índice de plasticidad
1	La Libertad, Petén	15,9	20,6	GC	26	19	7
2	Quetzaltepeque, Chiquimula	85,8	95,1	CH	62	26	36
3	Salamá, Baja Verapaz	68,2	99,9	ML	24	21	3
4	Cobán, Alta Verapaz	96,8	100	CH	57	25	32
5	CA 1, km 12, Guatemala	83	100	MH	47	27	20
6	Cotzal, Quiché	95,1	100	CH	61	30	31
7	Sta. Cruz del Quiché, Quiché	84,2	97,4	ML	37	26	11
8	Fraijanes, Guatemala	98,6	100	MH	89	49	40
9	Cotzal, Quiché	92	100	CL	32	22	10
10	Ciudad Vieja, Sacatepéquez	29,2	51	SM	36	32	4
11	Mazatenango, Suchitepéquez	83,2	100	ML	66	63	3
12	Salamá, Baja Verapaz	81,9	100	CL	48	25	23
13	Caserío Satélite, Escuintla	74,7	100	ML	38	27	11
14	Barberena, Santa Rosa	89	97,4	MH	68	32	36
15	Las Charcas, Guatemala	82,8	100	MH	73	34	39
16	Escuintla, Escuintla	66,1	100	ML	47	43	4
17	Sumpango, Chimaltenango	70	92,2	CH	51	28	23
18	Sta. Catarina Pinula, Guatemala	86,4	93,7	CH	63	26	37
19	Santa Elena, Petén	96,2	98,4	CL	28	19	9
20	Santa Elena, Petén	89,5	91,4	CH	57	23	34
21	Santa Elena, Petén	91,4	96	CH	107	30	77
22	Quetzaltenango, Quetzaltenango	55,8	81,3	ML	44	37	7
23	Santa Elena, Petén	99,3	99,9	CL	47	21	26
24	Santa Elena, Petén	99,3	99,9	MH	56	41	15
25	Sayaiché, Petén	92,4	100	CH	122	31	91
26	Sayaiché, Petén	89,4	100	CH	128	30	98
27	Sayaiché, Petén	94,9	100	CH	98	33	65

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Resumen de muestras utilizadas para método del índice de fluidez (1)**

Numero de muestra	Ubicación	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido	Límite plástico	IP
1	Guatemala	39/31,6%	26/33,7%	16/37,5%	34	19	15
2	Guatemala	39/41%	27/43,2%	14/46,2%	43	30	13
3	Guatemala	40/50,7%	26/52,8%	17/55,8%	53	30	23
4	Guatemala	37/44,2%	25/45,4%	16/47,6%	46	31	15
5	Guatemala	39/45,8%	26/47,4%	16/48,4%	47	34	13
6	Guatemala	42/41,8%	24/43,5%	15/45,2%	43	32	11
7	Guatemala	14/56%	24/54%	36/53%	54	41	13
8	Guatemala	36/42,1%	24/43,3%	15/44,8%	43	39	4
9	Guatemala	34/62,9%	24/64,9%	16/68,1%	65	29	36
10	Guatemala	37/41,4%	26/42,3%	17/44,1%	43	31	12
11	Guatemala	37/53,3%	24/57,7%	13/59,5%	56	41	15
12	Guatemala	40/40,7%	26/41,5%	14/43,2%	42	35	7
13	Guatemala	39/31,6%	26/33,7%	16/37,5%	34	19	15
14	Guatemala	33/40,4%	25/41,3%	15/42%	41	27	14
15	Guatemala	38/49,2%	26/50,6%	17/52,9%	51	37	14
16	Guatemala	40/29,8%	25/32,2%	16/34,3%	32	21	11
17	Guatemala	17/31,6%	23/30,8%	37/29,2%	30	23	7
18	Guatemala	34/49,2%	20/50,9%	14/51,6%	50	38	12
19	Guatemala	42/40,6%	25/42,3%	15/44%	42	26	16
20	Suchitepéquez	35/42,3%	26/43,6%	15/45,5%	44	33	11
21	Suchitepéquez	37/64,1%	24/66,9%	16/70,3%	67	44	23
22	Guatemala	13/50%	20/49,2%	47/45,6%	48	28	20
23	Guatemala	16/45,7%	26/43,6%	38/42,6%	44	27	17
24	Guatemala	15/49,9%	25/47,3%	38/46,2%	48	35	13
25	Guatemala	16/50,2%	26/48,7%	42/47,2%	49	42	7
26	Guatemala	11/30,7%	20/29,7%	32/28,6%	29	24	5
27	Guatemala	15/59,6%	24/57,9%	39/55,6%	58	38	20

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resumen de muestras utilizadas para método del índice de fluidez (2)**

Numero de muestra	Ubicación	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Límite líquido	Límite plástico	IP
28	Guatemala	16/45,7%	25/43,9%	37/42,5%	44	32	12
29	Guatemala	16/59,7%	24/58%	35/57,4%	58	47	11
30	Guatemala	16/30,8%	23/29,7%	42/27,7%	29	20	9
31	Guatemala	15/30,7%	28/29,9%	40/28,3%	30	25	5
32	Guatemala	14/50,6%	23/48%	41/45,8%	48	27	21
33	Guatemala	14/46,3%	23/44,6%	32/43,8%	44	30	14
34	Guatemala	14/47,4%	24/45,9%	40/45%	46	36	10
35	Guatemala	17/34,4%	28/32,7%	33/32,3%	33	24	9
36	Guatemala	17/55,4%	25/54,1%	38/53,7%	54	44	10
37	Guatemala	14/29%	25/27,5%	38/26,8%	28	21	7
38	Quetzaltenango	16/82,3%	24/79%	37/74,6%	78	46	32
39	Quetzaltenango	17/74,3%	26/72,1%	40/70,3%	72	47	25
40	Quetzaltenango	34/69,1%	21/72,2%	15/76,6%	72	57	15
41	Quetzaltenango	37/58%	24/59,6%	11/62,1%	59	44	15
42	Quetzaltenango	44/65,9%	23/70,2%	15/72,2%	69	45	24
43	Quetzaltenango	37/76%	26/79,2%	17/83,2%	80	52	28
44	Quetzaltenango	36/66,3%	25/68,3%	15/73,1%	69	49	20
45	Quetzaltenango	36/64,7%	24/67,7%	15/69,9%	67	51	16
46	Quetzaltenango	33/62,3%	25/64,3%	15/67,1%	64	43	21
47	Quetzaltenango	32/50,3%	26/53,6%	15/56,9%	53	35	18
48	Quetzaltenango	36/78,9%	25/81,4%	16/86,3%	82	61	21
49	Quetzaltenango	37/61,5%	24/63,6%	16/67,5%	64	46	18
50	Quetzaltenango	42/59,8%	27/62,2%	16/64,9%	63	39	24
51	Quetzaltenango	34/58,4%	22/61,3%	16/62,4%	60	45	15
52	Quetzaltenango	33/66,4%	26/70,3%	16/74,9%	70	51	19
53	Guatemala	36/35,8%	25/38,4%	14/40,6%	38	23	15
54	Guatemala	36/39,6%	26/40,5%	16/41,6%	41	29	12

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resumen de muestras utilizadas para método del índice de fluidez (3)**

Numero de muestra	Ubicación	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Límite líquido	Límite plástico	IP
55	Guatemala	36/44,8%	25/45,8%	15/48,3%	46	26	20
56	Guatemala	38/57,3%	24/59,3%	16/60,8%	59	39	20
57	Guatemala	41/34,8%	26/36,7%	16/39,2%	37	25	12
58	Guatemala	17/38,8%	27/36,3%	31/35,2%	37	25	12
59	Guatemala	35/39%	25/40,4%	15/42,7%	40	29	11
60	Guatemala	14/53,3%	21/50,9%	41/48,2%	50	30	20
61	Guatemala	37/54,3%	24/56,1%	16/59,6%	56	32	24
62	Guatemala	36/48%	24/49,5%	15/51,1%	49	35	14
63	Guatemala	35/66,6%	26/68,7%	17/72,1%	69	34	35
64	Guatemala	36/52,8%	26/53,7%	16/56,7%	54	39	15
65	Guatemala	35/42,2%	26/42,9%	15/45,3%	43	31	12
66	Guatemala	40/43,3%	25/44,3%	15/46,7%	45	34	11
67	Guatemala	37/36,6%	24/37,3%	14/38,9%	37	28	9
68	Guatemala	25/45,8%	39/44,9%	16/46,5%	46	36	10
69	Guatemala	13/29%	22/27,8%	39/26,4%	27	25	2
70	Guatemala	15/42,8%	25/41,6%	43/40,4%	42	31	11
71	Guatemala	39/40,4%	26/41,4%	16/43,7%	42	29	13
72	Guatemala	41/41,8%	26/43,2%	17/45,4%	44	29	15
73	Quiché	35/103,1%	24/107,1%	14/112,6%	107	52	55
74	Quiché	44/39,2%	25/42,6%	15/44,9%	42	23	19
75	Quiché	35/30,5%	22/31,4%	14/32,2%	31	24	7
76	Guatemala	42/33,7%	28/35,5%	20/37,3%	36	25	11
77	Quiché	44/45,7%	28/47,6%	13/53,3%	49	26	23
78	Quiché	38/41,1%	27/42,3%	16/43,9%	42	29	13
79	San marcos	45/40,6%	22/43,5%	14/44,3%	43	27	16
80	Guatemala	46/30,3%	24/32,4%	15/33,7%	32	20	12
81	Quiché	39/63%	26/66,4%	14/72,7%	67	33	34

Fuente: elaboración propia.



Tabla XIX. **Resumen de muestras utilizadas para método del índice de fluidez (4)**

Numero de muestra	Ubicación	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Límite líquido	Límite plástico	IP
82	Huehuetenango	42/51,1%	24/53,4%	12/56,6%	53	23	30
83	Quiché	38/34,5%	25/37%	14/40%	37	26	11
84	Guatemala	42/26,6%	26/28%	19/28,4%	28	23	5
85	Guatemala	39/58,8%	22/59,7%	10/63,3%	60	46	14
86	Escuintla	40/37%	24/38,4%	14/40,2%	38	35	3
87	Petén	35/120,8%	23/123,5%	18/124,8%	123	42	81
88	Petén	14/26,4%	22/25,6%	34/24,4%	25	13	12
89	Escuintla	47/46,3%	24/48,4%	12/51,5%	49	33	16
90	Guatemala	35/43,4%	26/46,5%	17/51,7%	47	26	21
91	Guatemala	43/42,7%	28/45,9%	17/51,1%	47	27	20
92	Sacatepéquez	30/35%	22/36%	10/38,5%	36	32	4
93	Guatemala	17/91,4%	29/88,1%	42/86,4%	89	49	40
94	Izabal	16/83,7%	21/81,4%	39/78,6%	81	42	39
95	Izabal	13/93,5%	26/90%	37/88,8%	90	59	31
96	Izabal	17/90,2%	25/87,6%	37/85,4%	88	52	36
97	Izabal	35/86,3%	24/90,1%	14/93,3%	89	46	43
98	Izabal	16/89,5%	22/87,2%	38/83,9%	87	56	31
99	Alta Verapaz	17/73,2%	24/72,3%	36/70,7%	72	32	40
100	Alta Verapaz	15/46,4%	23/44,6%	36/42,6%	44	24	20
101	Alta Verapaz	15/40,5%	26/37,7%	38/35,8%	38	21	17
102	Alta Verapaz	10/57,3%	21/50,7%	31/48,3%	50	26	24
103	Alta Verapaz	14/35,8%	20/34,6%	39/32,3%	34	22	12
104	Alta Verapaz	14/40%	21/38,5%	35/36,6%	38	21	17
105	Alta Verapaz	19/52,4%	26/51,5%	46/48,8%	51	30	21
106	Alta Verapaz	18/59%	30/55%	44/52,1%	56	27	29
107	Petén	18/67,1%	26/64,4%	38/62,4%	65	38	27
108	Petén	14/34,5%	28/32,2%	39/30,6%	32	15	17

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resumen de muestras utilizadas para método del índice de fluidez (5)**

Numero de muestra	Ubicación	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Límite líquido	Límite plástico	IP
109	Petén	39/107,9%	27/118,8%	17/126,3%	119	30	89
110	Petén	17/130,6%	28/122,1%	39/114,4%	123	33	90
111	Petén	14/97,7%	27/91,7%	39/89,7%	93	36	57
112	Petén	42/89,5%	24/95,8%	13/99,5%	94	33	61
113	Petén	39/136,7%	23/142,5%	13/153,6%	143	39	104
114	Petén	39/108,2%	27/116,9%	16/124,3%	117	32	85
115	Petén	11/68,8%	25/62,6%	38/59,7%	63	22	41
116	Petén	35/76,6%	22/78,9%	11/83%	78	32	46
117	Petén	35/93,1%	24/98,5%	13/105,7%	98	33	65
118	Petén	16/113,5%	28/104,9%	38/102,1%	107	43	64
119	Petén	39/45,4%	26/46,4%	12/53,9%	48	19	29
120	Petén	35/22,9%	24/23,9%	15/25,4%	24	13	11
121	Petén	42/40,5%	24/43%	17/46,2%	43	16	27
122	Petén	34/77,6%	26/81,8%	16/85,4%	81	34	47
123	Petén	41/83,7%	27/89,2%	14/95%	89	32	57
124	Petén	38/129,5%	27/134%	15/144,7%	136	45	91
125	Petén	42/43,9%	24/46,3%	12/51,3%	47	17	30
126	Petén	36/36,5%	27/38,8%	14/41,3%	39	16	23
127	Petén	44/89,6%	27/93,5%	15/96,8%	94	34	60
128	Petén	42/118,6%	27/125,1%	15/132,4%	126	37	89
129	Petén	12/55,6%	24/53,2%	42/51,1%	53	16	37
130	Petén	39/97%	27/104,6%	14/112,9%	105	29	76
131	Petén	38/93,2%	27/97,9%	16/104,2%	99	33	66
132	Petén	17/115,9%	26/107,7%	39/99,7%	108	31	77
133	Petén	59/62,2%	26/64,9%	13/69%	66	19	47
134	Petén	28/88,7%	22/94,1%	13/102,2%	91	34	57
135	Petén	13/110,1%	24/104,6%	37/100,4%	104	35	69

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Resumen de muestras utilizadas para método del índice de fluidez (6)**

Numero de muestra	Ubicación	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido	Límite plástico	IP
136	Petén	41/94,1%	23/98,1%	13/101,5%	97	35	62
137	Petén	37/97,9%	23/105,7%	14/112,6%	104	35	69
138	Petén	42/113,8%	28/122,6%	17/132,6%	125	33	92
139	Petén	37/62,5%	26/68%	16/74,4%	68	23	45
140	Petén	13/80,1%	24/75,3%	35/72,6%	75	25	50
141	Petén	15/92,8%	25/88,7%	39/84,9%	89	29	60
142	Petén	38/90,3%	27/93,2%	15/100,2%	95	34	61
143	Petén	41/74%	26/77,8%	15/83,3%	78	23	55
144	Petén	38/25%	26/26,4%	11/30%	27	17	10
145	Petén	39/82,4%	23/87,3%	12/91,4%	86	33	53
146	Petén	44/81%	24/86,5%	16/83,2%	84	34	50
147	Petén	36/85,8%	24/89,8%	15/94,1%	89	34	55
148	Petén	35/102,6%	22/106,1%	11/110,1%	105	38	67
149	Petén	38/84,8%	23/87,5%	12/93,4%	88	24	64
150	Petén	44/55,9%	24/57,1%	12/62,9%	58	19	39
151	Petén	44/85,5%	27/90,8%	14/96,2%	91	30	61
152	Petén	37/76,6%	23/80,9%	13/85,8%	80	31	49
153	Petén	41/53,5%	22/56,4%	14/58,1%	56	15	41
154	Petén	42/113,2%	24/123,3%	13/135,9%	123	32	91
155	Petén	42/86,3%	28/91,6%	17/97,3%	93	27	66
156	Petén	44/98,9%	27/104,2%	15/110,8%	105	32	73
157	Petén	13/100,2%	24/97,7%	37/94,5%	97	29	68
158	Petén	15/107,1%	24/101,2%	34/96,5%	101	28	73
159	Petén	37/113,3%	23/124,1%	16/129,3%	121	31	90
160	Petén	33/92%	25/95,2%	16/101%	95	32	63
161	Petén	36/120%	27/125,9%	17/134,1%	127	30	97
162	Petén	39/75,2%	25/86,3%	17/91,3%	85	26	59

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Resumen de muestras utilizadas para método del índice de fluidez (7)**

Numero de muestra	Ubicación	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Golpes/ humedad	Límite líquido	Límite plástico	IP
163	Petén	43/94%	27/106,5%	13/117%	106	27	79
164	Petén	13/119,3%	26/111,5%	39/105,9%	112	40	72
165	Petén	18/125%	24/123,1%	34/120,8%	123	42	81
166	Petén	16/115%	25/113,3%	41/111,2%	113	38	75
167	Petén	16/109,6%	24/107,4%	48/100%	106	34	72
168	Petén	15/113,9%	26/107%	48/105%	109	36	73
169	Petén	14/74,8%	22/71,2%	31/68,7%	70	23	47
170	Petén	14/68,2%	22/66,6%	32/65,5%	66	23	43
171	Petén	11/110,6%	24/106%	34/104,3%	106	31	75
172	Petén	16/109%	25/104,3%	37/100,1%	104	36	68
173	Petén	12/129,9%	24/121,6%	43/112,2%	120	35	85
174	Petén	16/105,2%	27/101,5%	41/98,1%	102	37	65
175	Petén	18/103,7%	26/101,7%	34/99,7%	102	37	65
176	Petén	16/90,9%	25/86,6%	35/84,9%	87	32	55
177	Petén	11/66,6%	25/62,7%	31/61,5%	63	21	42
178	Petén	19/72,4%	27/70,3%	44/67,3%	71	42	29
179	Petén	11/30,2%	23/27,7%	45/25,7%	28	17	11
180	Petén	15/63,4%	28/56,7%	43/52,2%	58	17	41
181	Petén	12/23,2%	24/21,2%	39/19,2%	21	19	2
182	Escuintla	41/41%	20/42%	13/42,7%	42	33	9
183	Escuintla	43/42,6%	27/43,5%	17/44,2%	44	32	12
184	Escuintla	38/47,3%	21/48,3%	15/49,1%	48	34	14
185	Escuintla	41/52,5%	27/54,9%	17/57,1%	55	32	23
186	Escuintla	41/44,1%	26/44,5%	11/45,6%	45	34	11
187	Escuintla	41/39,1%	22/40,2%	13/41,6%	40	27	13
188	Escuintla	13/29%	24/27,8%	41/27%	28	25	3

Fuente: elaboración propia.

## 6. MÉTODO DE ENSAYO

El método que se usó para los ensayos realizados con el penetrómetro de cono debía de incluir las tres opciones propuestas en el presente documento, siendo éstas:

- La verificación del método para encontrar el límite líquido de un suelo a partir del penetrómetro de cono, según la norma BS 1377;
- La verificación del método propuesto por Wood y Wroth (1978) para encontrar el Índice Plástico por medio de dos conos de pesos distintos a una penetración de 20 milímetros;
- La comprobación del método propuesto por Belviso y Ciampoli (1985) que utiliza la pendiente de la línea de flujo de la gráfica de un cono de peso dado.

Cada muestra se ensayó con un cono de 80 gramos y uno de 240 gramos, dentro de un rango de penetraciones de 10 y 40 milímetros, iniciando el ensayo con el cono de 240 gramos para empezar con el suelo en su estado más seco y así incrementar paulatinamente la humedad, simultáneamente se hizo un ensayo con el aparato de Casagrande y el ensayo del límite plástico según la Norma ASTM D4318 - 84.

Los formularios usados para anotar los resultados del penetrómetro se muestran en el apéndice.

Para la revisión del método del índice de fluidez se recopilaron ensayos de límite líquido realizados en el laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago de suelos de diferentes sitios de la República de Guatemala y los datos de las muestras utilizadas en los ensayos del penetrómetro de cono.

## 7. RESULTADOS Y SU COMPARACIÓN

Los resultados de los métodos del penetrómetro de cono se resumen en la Tabla XXIII. En esta tabla se comparan los límites líquido y plástico obtenidos por el método de Casagrande con los resultados obtenidos con los otros métodos propuestos usando el penetrómetro de cono, y la correspondiente diferencia entre resultados.

Una mejor comparación de los datos de la tabla XXIII se puede ver de mejor manera en las gráficas de las figuras 28, 29 y 30.

Los resultados método del índice de fluidez se resumen de las Tablas XXIV a la XXX.

Se observa en la gráfica que hay una muy buena correlación entre el límite líquido por ASTM 4318-48 y el límite líquido obtenido por BS 1377, nótese que se lograron mejores resultados para límites líquidos menores a 100.

En la figura 29 se comparan los índices plásticos obtenidos por la norma ASTM con los calculados según el método de Wood y Wroth (1978) y se observa que el método brinda valores más altos.

En la figura 30 se comparan los índices plásticos obtenidos por la norma ASTM con los del método de Belviso y Ciampoli (1985), mostrando que para índices plásticos menores a 40 hay una buena correlación de los datos, lo que indica que el método de Belviso y Ciampoli logra mejores resultados para índices plásticos bajos.

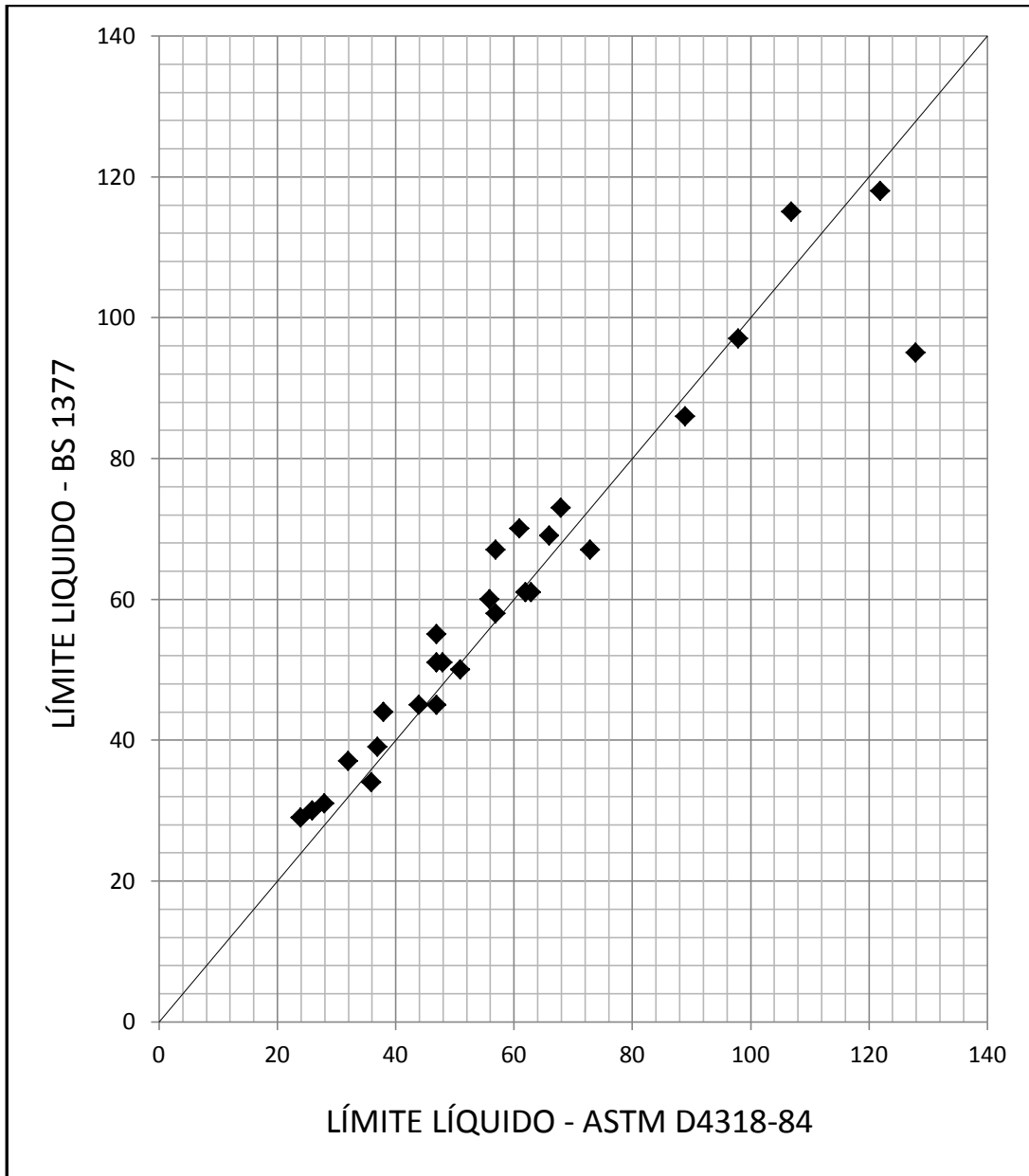
Tabla XXIII. **Comparación de resultados de ensayos por la norma ASTM 4318-84 y los métodos con penetrómetro**

Número de muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Límite líquido método del cono	Diferencia	Índice plástico Wood y Wroth	Diferencia	Índice plástico Belviso y Ciampoli	Diferencia
1	26	19	7	30	4	24	17	11	4
2	62	26	36	61	1	42	6	20	16
3	24	21	3	29	5	18	15	9	6
4	57	25	32	67	10	62	30	27	5
5	47	27	20	55	8	52	32	26	6
6	61	30	31	70	9	66	35	30	1
7	37	26	11	39	2	24	13	15	4
8	89	49	40	86	3	82	42	38	2
9	32	22	10	37	5	26	16	19	9
10	36	32	4	34	2	8	4	4	0
11	66	63	3	69	3	8	5	7	4
12	48	25	23	51	3	36	13	21	2
13	38	27	11	44	6	26	15	11	0
14	68	32	36	73	5	60	24	43	7
15	73	34	39	67	6	70	31	36	3
16	47	43	4	45	2	10	6	12	8
17	51	28	23	50	1	42	19	24	1
18	63	26	37	61	2	68	31	31	6
19	28	19	9	31	3	22	13	8	1
20	57	23	34	58	1	48	14	23	11
21	107	30	77	115	8	56	21	35	42
22	44	37	7	45	1	16	9	10	3
23	47	21	26	51	4	34	8	21	5
24	56	41	15	60	4	18	3	18	3
25	122	31	91	118	4	150	59	59	32
26	128	30	98	95	33	82	16	11	87
27	98	33	65	97	1	84	19	44	21

Fuente: elaboración propia.

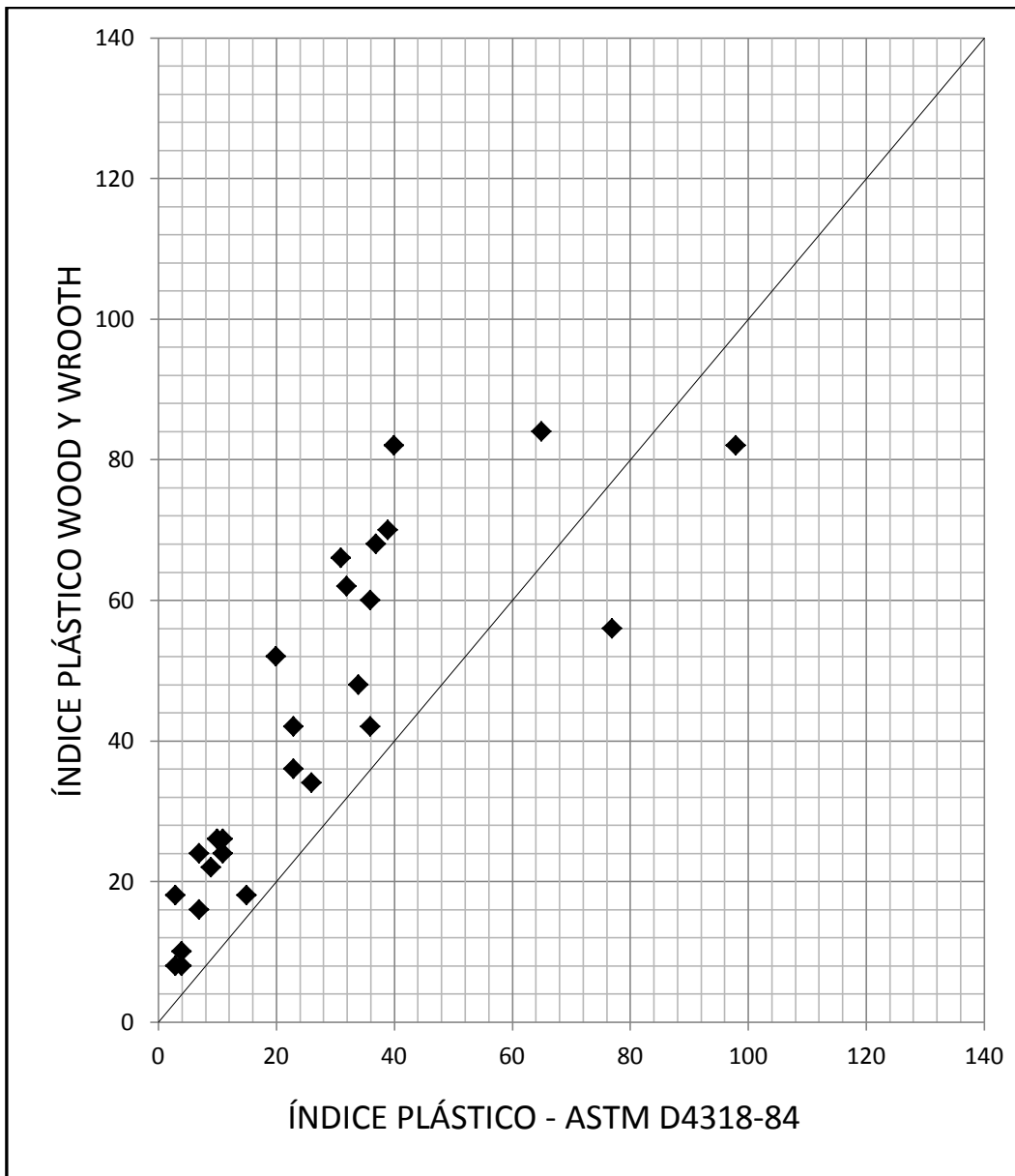


Figura 28. Límite líquido, ASTM D4318-84 vs. BS1377



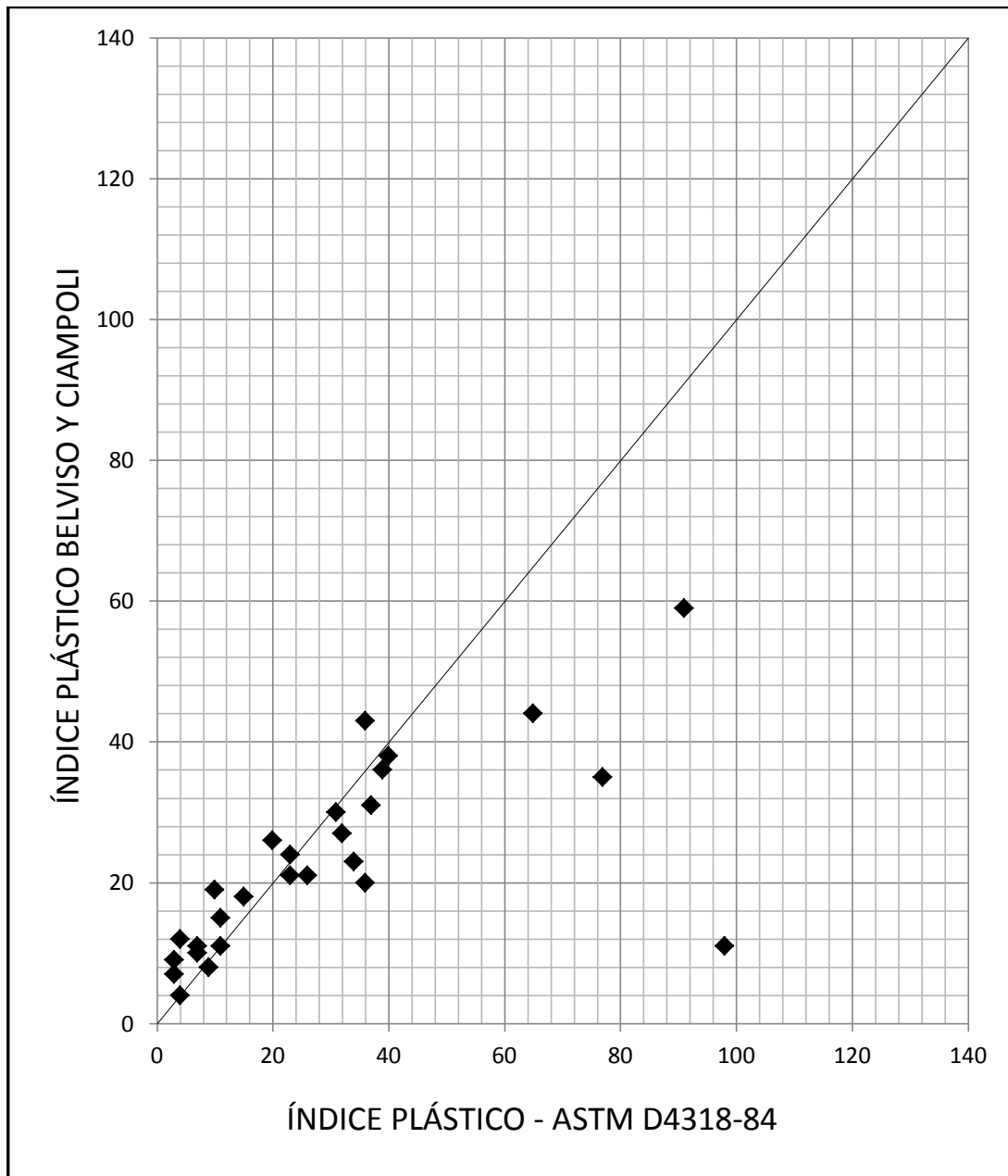
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Wood y Wroth



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Belviso y Ciampoli



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (1)**

Número de muestra	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Humedad para 35 golpes	(LP) por índice de fluidez
1	39/31,6%	26/33,7%	16/37,5%	34	19	32,1	24
2	39/41%	27/43,2%	14/46,2%	43	30	41,7	36
3	40/50,7%	26/52,8%	17/55,8%	53	30	51,3	45
4	37/44,2%	25/45,4%	16/47,6%	46	31	44,3	37
5	39/45,8%	26/47,4%	16/48,4%	47	34	46,3	43
6	42/41,8%	24/43,5%	15/45,2%	43	32	42,4	40
7	14/56%	24/54%	36/53%	54	41	53,0	49
8	36/42,1%	24/43,3%	15/44,8%	43	39	42,2	39
9	34/62,9%	24/64,9%	16/68,1%	65	29	62,6	53
10	37/41,4%	26/42,3%	17/44,1%	43	31	41,5	35
11	37/53,3%	24/57,7%	13/59,5%	56	41	54,3	48
12	40/40,7%	26/41,5%	14/43,2%	42	35	40,9	37
13	39/31,6%	26/33,7%	16/37,5%	34	19	32,1	24
14	33/40,4%	25/41,3%	15/42%	41	27	40,4	38
15	38/49,2%	26/50,6%	17/52,9%	51	37	49,5	43
16	40/29,8%	25/32,2%	16/34,3%	32	21	30,5	24
17	17/31,6%	23/30,8%	37/29,2%	30	23	29,4	27
18	34/49,2%	20/50,9%	14/51,6%	50	38	49,2	46
19	42/40,6%	25/42,3%	15/44%	42	26	41,2	38
20	35/42,3%	26/43,6%	15/45,5%	44	33	42,4	36
21	37/64,1%	24/66,9%	16/70,3%	67	44	64,4	54
22	13/50%	20/49,2%	47/45,6%	48	28	46,8	42
23	16/45,7%	26/43,6%	38/42,6%	44	27	42,8	38
24	15/49,9%	25/47,3%	38/46,2%	48	35	46,3	40
25	16/50,2%	26/48,7%	42/47,2%	49	42	47,8	43
26	11/30,7%	20/29,7%	32/28,6%	29	24	28,4	26
27	15/59,6%	24/57,9%	39/55,6%	58	38	56,1	49
28	16/45,7%	25/43,9%	37/42,5%	44	32	42,7	37
29	16/59,7%	24/58%	35/57,4%	58	47	57,2	54
30	16/30,8%	23/29,7%	42/27,7%	29	20	28,3	25

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (2)**

Número de muestra	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Humedad para 35 golpes	(LP) por índice de fluidez
31	15/30,7%	28/29,9%	40/28,3%	30	25	28,9	24
32	14/50,6%	23/48%	41/45,8%	48	27	46,4	40
33	14/46,3%	23/44,6%	32/43,8%	44	30	43,4	41
34	14/47,4%	24/45,9%	40/45%	46	36	45,2	42
35	17/34,4%	28/32,7%	33/32,3%	33	24	32,1	28
36	17/55,4%	25/54,1%	38/53,7%	54	44	53,7	52
37	14/29%	25/27,5%	38/26,8%	28	21	26,9	23
38	16/82,3%	24/79%	37/74,6%	78	46	75,3	64
39	17/74,3%	26/72,1%	40/70,3%	72	47	70,9	66
40	34/69,1%	21/72,2%	15/76,6%	72	57	68,4	54
41	37/58%	24/59,6%	11/62,1%	59	44	58,2	55
42	44/65,9%	23/70,2%	15/72,2%	69	45	67,4	61
43	37/76%	26/79,2%	17/83,2%	80	52	76,5	62
44	36/66,3%	25/68,3%	15/73,1%	69	49	66,2	55
45	36/64,7%	24/67,7%	15/69,9%	67	51	65,1	57
46	33/62,3%	25/64,3%	15/67,1%	64	43	62,0	54
47	32/50,3%	26/53,6%	15/56,9%	53	35	50,3	39
48	36/78,9%	25/81,4%	16/86,3%	82	61	78,9	66
49	37/61,5%	24/63,6%	16/67,5%	64	46	61,6	52
50	42/59,8%	27/62,2%	16/64,9%	63	39	60,8	52
51	34/58,4%	22/61,3%	16/62,4%	60	45	58,4	52
52	33/66,4%	26/70,3%	16/74,9%	70	51	66,2	51
53	36/35,8%	25/38,4%	14/40,6%	38	23	36,2	29
54	36/39,6%	26/40,5%	16/41,6%	41	29	39,7	35
55	36/44,8%	25/45,8%	15/48,3%	46	26	44,7	40
56	38/57,3%	24/59,3%	16/60,8%	59	39	57,7	52
57	41/34,8%	26/36,7%	16/39,2%	37	25	35,4	29
58	17/38,8%	27/36,3%	31/35,2%	37	25	34,7	25
59	35/39%	25/40,4%	15/42,7%	40	29	38,9	35
60	14/53,3%	21/50,9%	41/48,2%	50	30	48,8	44

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (3)**

Número de muestra	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Humedad para 35 golpes	(LP) por índice de fluidez
61	37/54,3%	24/56,1%	16/59,6%	56	32	54,3	48
62	36/48%	24/49,5%	15/51,1%	49	35	48,1	45
63	35/66,6%	26/68,7%	17/72,1%	69	34	66,5	56
64	36/52,8%	26/53,7%	16/56,7%	54	39	52,7	47
65	35/42,2%	26/42,9%	15/45,3%	43	31	42,0	38
66	40/43,3%	25/44,3%	15/46,7%	45	34	43,5	38
67	37/36,6%	24/37,3%	14/38,9%	37	28	36,6	35
68	25/45,8%	39/44,9%	16/46,5%	46	36	45,1	41
69	13/29%	22/27,8%	39/26,4%	27	25	26,7	25
70	15/42,8%	25/41,6%	43/40,4%	42	31	40,9	36
71	39/40,4%	26/41,4%	16/43,7%	42	29	40,6	35
72	41/41,8%	26/43,2%	17/45,4%	44	29	42,3	36
73	35/103,1%	24/107,1%	14/112,6%	107	52	103,1	87
74	44/39,2%	25/42,6%	15/44,9%	42	23	40,6	35
75	35/30,5%	22/31,4%	14/32,2%	31	24	30,5	28
76	42/33,7%	28/35,5%	20/37,3%	36	25	34,5	29
77	44/45,7%	28/47,6%	13/53,3%	49	26	46,8	38
78	38/41,1%	27/42,3%	16/43,9%	42	29	41,4	39
79	45/40,6%	22/43,5%	14/44,3%	43	27	41,6	36
80	46/30,3%	24/32,4%	15/33,7%	32	20	31,1	28
81	39/63%	26/66,4%	14/72,7%	67	33	63,8	51
82	42/51,1%	24/53,4%	12/56,6%	53	23	51,8	47
83	38/34,5%	25/37%	14/40%	37	26	35,0	27
84	42/26,6%	26/28%	19/28,4%	28	23	27,1	23
85	39/58,8%	22/59,7%	10/63,3%	60	46	58,8	54
86	40/37%	24/38,4%	14/40,2%	38	35	37,4	35
87	35/120,8%	23/123,5%	18/124,8%	123	42	120,8	112
88	14/26,4%	22/25,6%	34/24,4%	25	13	24,4	22
89	47/46,3%	24/48,4%	12/51,5%	49	33	47,3	40
90	35/43,4%	26/46,5%	17/51,7%	47	26	43,2	28

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (4)**

Número de muestra	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Humedad para 35 golpes	(LP) por índice de fluidez
91	43/42,7%	28/45,9%	17/51,1%	47	27	44,3	34
92	30/35%	22/36%	10/38,5%	36	32	34,5	29
93	17/91,4%	29/88,1%	42/86,4%	89	49	87,3	80
94	16/83,7%	21/81,4%	39/78,6%	81	42	79,1	71
95	13/93,5%	26/90%	37/88,8%	90	59	88,9	84
96	17/90,2%	25/87,6%	37/85,4%	88	52	85,7	76
97	35/86,3%	24/90,1%	14/93,3%	89	46	86,7	77
98	16/89,5%	22/87,2%	38/83,9%	87	56	84,4	74
99	17/73,2%	24/72,3%	36/70,7%	72	32	70,9	66
100	15/46,4%	23/44,6%	36/42,6%	44	24	42,7	38
101	15/40,5%	26/37,7%	38/35,8%	38	21	36,2	29
102	10/57,3%	21/50,7%	31/48,3%	50	26	47,0	35
103	14/35,8%	20/34,6%	39/32,3%	34	22	32,7	27
104	14/40%	21/38,5%	35/36,6%	38	21	36,6	31
105	19/52,4%	26/51,5%	46/48,8%	51	30	50,0	46
106	18/59%	30/55%	44/52,1%	56	27	53,8	45
107	18/67,1%	26/64,4%	38/62,4%	65	38	62,8	54
108	14/34,5%	28/32,2%	39/30,6%	32	15	31,2	28
109	39/107,9%	27/118,8%	17/126,3%	119	30	111,3	80
110	17/130,6%	28/122,1%	39/114,4%	123	33	117,0	93
111	14/97,7%	27/91,7%	39/89,7%	93	36	90,2	79
112	42/89,5%	24/95,8%	13/99,5%	94	33	91,6	82
113	39/136,7%	23/142,5%	13/153,6%	143	39	137,6	116
114	39/108,2%	27/116,9%	16/124,3%	117	32	110,9	86
115	11/68,8%	25/62,6%	38/59,7%	63	22	60,2	49
116	35/76,6%	22/78,9%	11/83%	78	32	76,5	70
117	35/93,1%	24/98,5%	13/105,7%	98	33	93,3	75
118	16/113,5%	28/104,9%	38/102,1%	107	43	102,7	85
119	39/45,4%	26/46,4%	12/53,9%	48	19	45,4	35
120	35/22,9%	24/23,9%	15/25,4%	24	13	22,9	18

Fuente: elaboración propia

Tabla XXVIII. **Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (5)**

Número de muestra	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Humedad para 35 golpes	(LP) por índice de fluidez
121	42/40,5%	24/43%	17/46,2%	43	16	41,4	35
122	34/77,6%	26/81,8%	16/85,4%	81	34	77,9	65
123	41/83,7%	27/89,2%	14/95%	89	32	85,8	73
124	38/129,5%	27/134%	15/144,7%	136	45	130,4	108
125	42/43,9%	24/46,3%	12/51,3%	47	17	44,7	35
126	36/36,5%	27/38,8%	14/41,3%	39	16	37,0	29
127	44/89,6%	27/93,5%	15/96,8%	94	34	91,4	81
128	42/118,6%	27/125,1%	15/132,4%	126	37	121,3	102
129	12/55,6%	24/53,2%	42/51,1%	53	16	51,8	47
130	39/97%	27/104,6%	14/112,9%	105	29	99,4	77
131	38/93,2%	27/97,9%	16/104,2%	99	33	94,4	76
132	17/115,9%	26/107,7%	39/99,7%	108	31	101,8	77
133	59/62,2%	26/64,9%	13/69%	66	19	64,2	57
134	28/88,7%	22/94,1%	13/102,2%	91	34	85,4	63
135	13/110,1%	24/104,6%	37/100,4%	104	35	101,0	89
136	41/94,1%	23/98,1%	13/101,5%	97	35	95,2	88
137	37/97,9%	23/105,7%	14/112,6%	104	35	98,9	79
138	42/113,8%	28/122,6%	17/132,6%	125	33	117,7	88
139	37/62,5%	26/68%	16/74,4%	68	23	63,5	45
140	13/80,1%	24/75,3%	35/72,6%	75	25	72,5	63
141	15/92,8%	25/88,7%	39/84,9%	89	29	85,8	73
142	38/90,3%	27/93,2%	15/100,2%	95	34	90,9	74
143	41/74%	26/77,8%	15/83,3%	78	23	75,3	64
144	38/25%	26/26,4%	11/30%	27	17	25,3	18
145	39/82,4%	23/87,3%	12/91,4%	86	33	83,5	74
146	44/81%	24/86,5%	16/83,2%	84	34	82,7	78
147	36/85,8%	24/89,8%	15/94,1%	89	34	86,1	75
148	35/102,6%	22/106,1%	11/110,1%	105	38	102,8	94
149	38/84,8%	23/87,5%	12/93,4%	88	24	85,0	73
150	44/55,9%	24/57,1%	12/62,9%	58	19	56,4	50

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXIX. **Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (6)**

Número de muestra	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Humedad para 35 golpes	(P) por índice de fluidez
151	44/85,5%	27/90,8%	14/96,2%	91	30	87,9	75
152	37/76,6%	23/80,9%	13/85,8%	80	31	77,1	66
153	41/53,5%	22/56,4%	14/58,1%	56	15	54,2	47
154	42/113,2%	24/123,3%	13/135,9%	123	32	116,5	90
155	42/86,3%	28/91,6%	17/97,3%	93	27	88,6	71
156	44/98,9%	27/104,2%	15/110,8%	105	32	101,4	87
157	13/100,2%	24/97,7%	37/94,5%	97	29	95,1	88
158	15/107,1%	24/101,2%	34/96,5%	101	28	96,2	77
159	37/113,3%	23/124,1%	16/129,3%	121	31	114,9	90
160	33/92%	25/95,2%	16/101%	95	32	91,2	76
161	36/120%	27/125,9%	17/134,1%	127	30	120,7	95
162	39/75,2%	25/86,3%	17/91,3%	85	26	78,1	50
163	43/94%	27/106,5%	13/117%	106	27	99,3	72
164	13/119,3%	26/111,5%	39/105,9%	112	40	107,5	89
165	18/125%	24/123,1%	34/120,8%	123	42	120,6	111
166	16/115%	25/113,3%	41/111,2%	113	38	111,9	107
167	16/109,6%	24/107,4%	48/100%	106	34	103,1	92
168	15/113,9%	26/107%	48/105%	109	36	106,5	97
169	14/74,8%	22/71,2%	31/68,7%	70	23	67,7	58
170	14/68,2%	22/66,6%	32/65,5%	66	23	65,2	62
171	11/110,6%	24/106%	34/104,3%	106	31	104,0	96
172	16/109%	25/104,3%	37/100,1%	104	36	100,7	87
173	12/129,9%	24/121,6%	43/112,2%	120	35	115,5	97
174	16/105,2%	27/101,5%	41/98,1%	102	37	99,4	89
175	18/103,7%	26/101,7%	34/99,7%	102	37	99,6	90
176	16/90,9%	25/86,6%	35/84,9%	87	32	84,6	75
177	11/66,6%	25/62,7%	31/61,5%	63	21	61,0	53
178	19/72,4%	27/70,3%	44/67,3%	71	42	68,7	59
179	11/30,2%	23/27,7%	45/25,7%	28	17	26,5	20
180	15/63,4%	28/56,7%	43/52,2%	58	17	54,4	40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Resumen de resultados de muestras ensayadas vs. Método de índice de fluidez (7)**

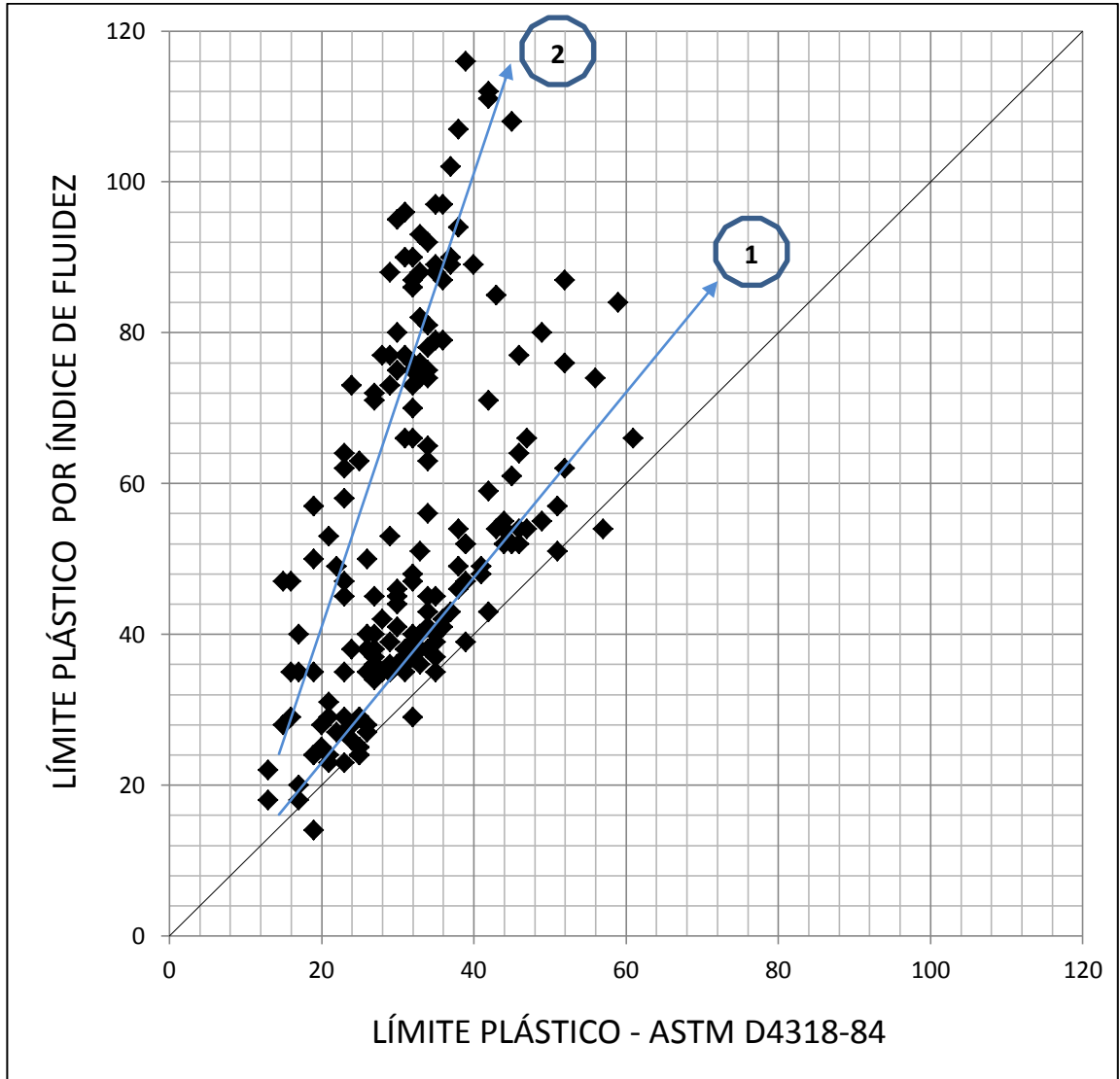
Número de muestra	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Golpes/humedad	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Humedad para 35 golpes	(LP) por índice de fluidez
181	12/23,2%	24/21,2%	39/19,2%	21	19	19,7	14
182	41/41%	20/42%	13/42,7%	42	33	41,3	38
183	43/42,6%	27/43,5%	17/44,2%	44	32	43,0	39
184	38/47,3%	21/48,3%	15/49,1%	48	34	47,5	45
185	41/52,5%	27/54,9%	17/57,1%	55	32	53,4	47
186	41/44,1%	26/44,5%	11/45,6%	45	34	44,2	41
187	41/39,1%	22/40,2%	13/41,6%	40	27	39,4	37
188	13/29%	24/27,8%	41/27%	28	25	27,3	24

Fuente: elaboración propia.

En la figura 31 se comparan los índices plásticos de la norma ASTM con los calculados por el método del índice de fluidez y se observa que los resultados del límite plástico obtenidos por el método del índice de fluidez son más altos que los obtenidos por el método de la ASTM, en esta figura también se ve que existen dos tendencias lineales (nombradas (1) y (2) en la figura 31), una bastante cercana a la línea de 45° y otra que da resultados más altos.

Estas dos tendencias lineales muestran tener su origen en la coordenada (0, 0) de las ordenadas y las abscisas, denotando así una mejor correlación de resultados para límites plásticos bajos.

Figura 31. Límite plástico, ASTM D4318-84 vs. Método del índice de fluidez



Fuente: elaboración propia.



## 8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Utilizando el coeficiente de correlación de Pearson como guía para determinar la dispersión existente en los resultados obtenidos en los métodos ensayados, se observa para el método de límite líquido por medio del cono (Norma BS 1377) una correlación del 96,2% lo que indica un gran grado de confiabilidad.

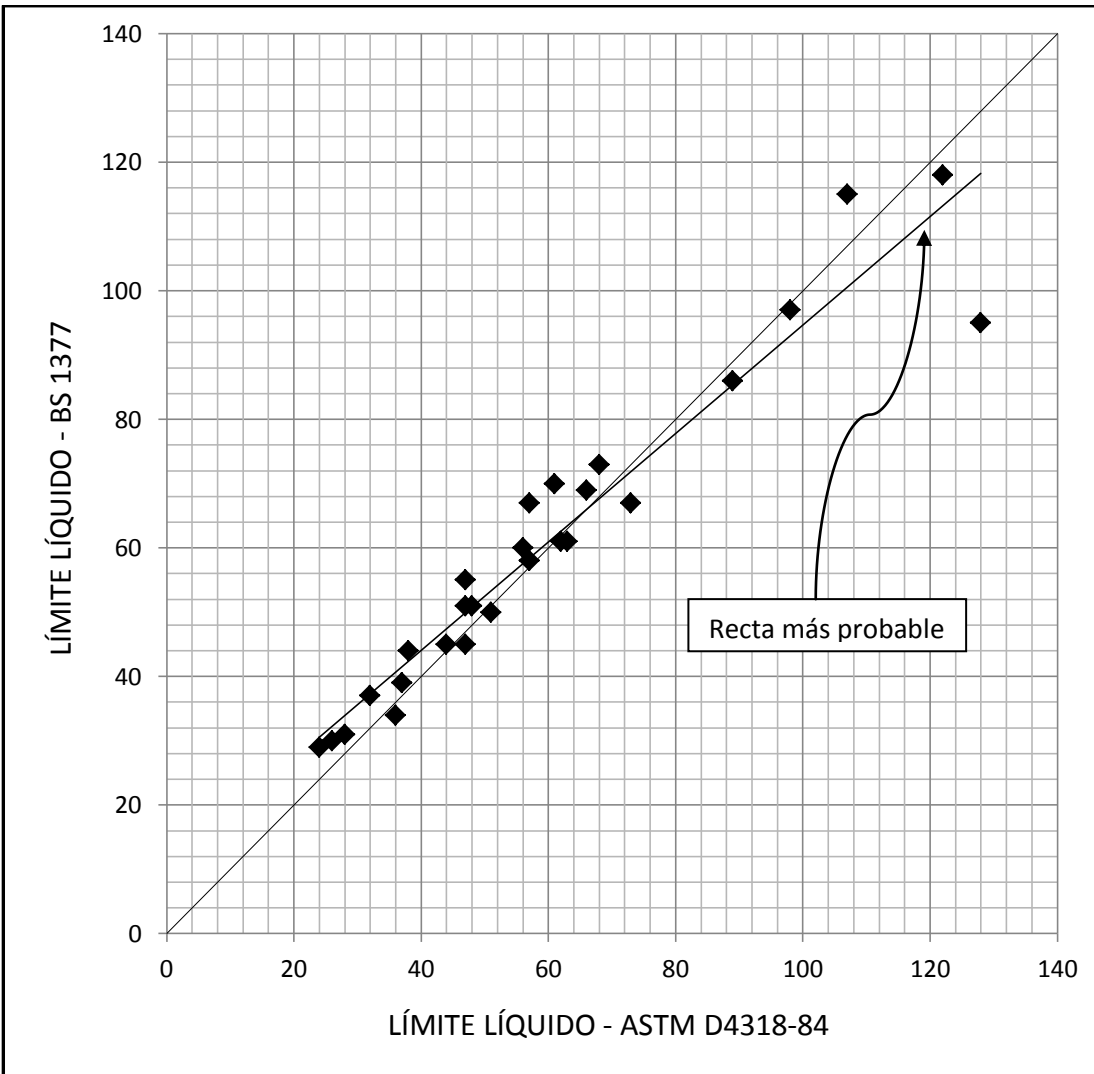
Aunque gráficamente se observa una mayor dispersión en límites líquidos mayores a 100, al encontrar la recta más probable que define a la serie de datos obtenemos la Figura 32, que muestra una recta muy parecida a la de la Figura 33, grafica obtenida por Sowers (1959), para el límite líquido a partir del penetrómetro de cono.

Con estos datos como base y la existencia de una recta de mejor tendencia que relaciona los datos se puede proponer una ecuación de corrección para mejorar la aproximación del método del cono a los resultados de la norma ASTM D4318-84.

Para que lograr mejores resultados en esta corrección no se tomó en cuenta el Ensayo 26 de los ensayos hechos con penetrómetro de cono, que posee límite líquido de 128 por el método ASTM D4318-84, por ser el valor que se mostraba más lejano a la recta esperada de los resultados.

Ya con esto se encuentra por el método de mínimos cuadrados la ecuación de la recta que define la tendencia lineal de los datos, como se muestra en la figura 34.

Figura 32. Límite líquido, ASTM D4318-84 vs. BS1377, recta más probable

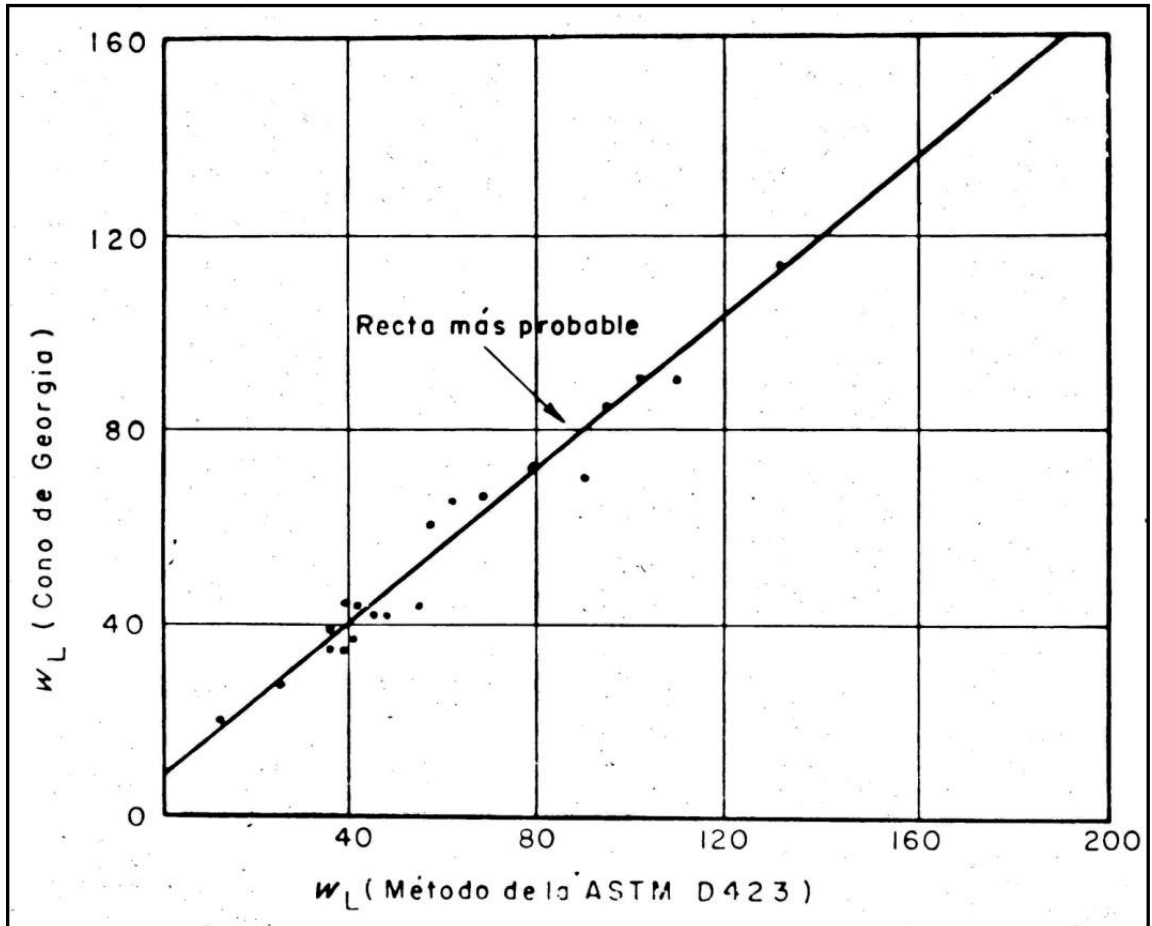


Fuente: elaboración propia.

A partir de la ecuación de la recta se logró encontrar el siguiente factor de corrección:

$$LL_{\text{corregido del cono}} = LL_{\text{cono}} + (LL_{\text{cono}} * 1,05152 - 5,0634)$$

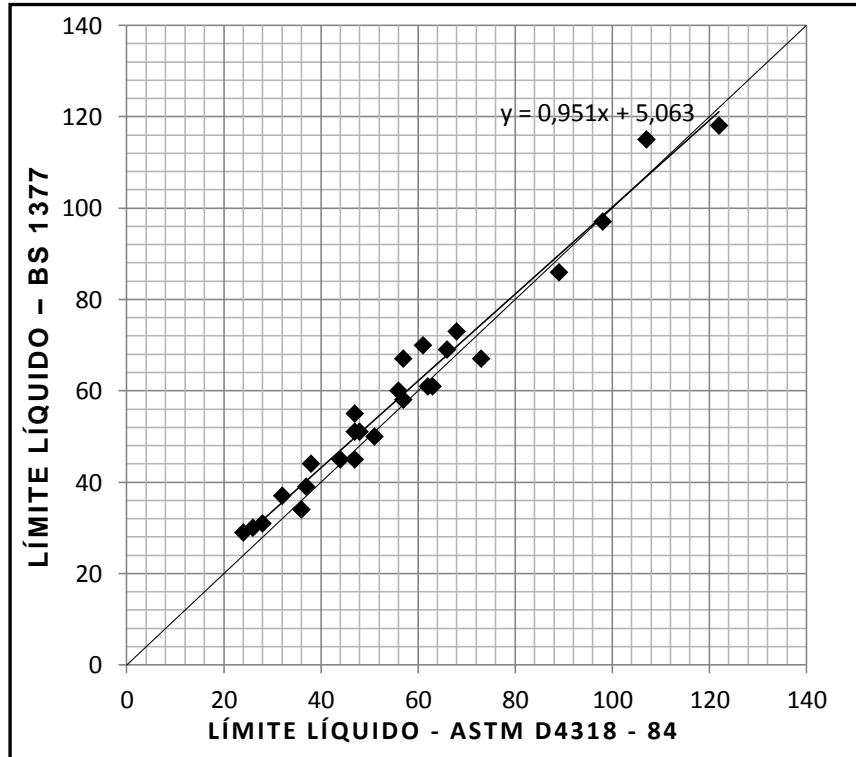
Figura 33. Límite líquido, ASTM D423 vs. Penetrómetro de cono, resultados obtenidos por Sowers, G. F. (1959)



Fuente: JIMÉNEZ SALAS, J. A. "Geotecnia y Cimientos 1, Propiedades de los suelos y las rocas" p.78.

Logrando una mejoría perceptible en los límites líquidos menores al 100%, según se muestra en la figura 35, al calcular el coeficiente de Pearson para los límites líquidos luego de aplicado el factor de corrección se obtiene un valor de 98,5%, esto es un grado de confiabilidad mejor que el obtenido anteriormente.

Figura 34. Límite líquido, ASTM D4318-84 vs. BS1377, eliminando el ensayo 26, con ecuación de la recta de tendencia



Fuente: elaboración propia.

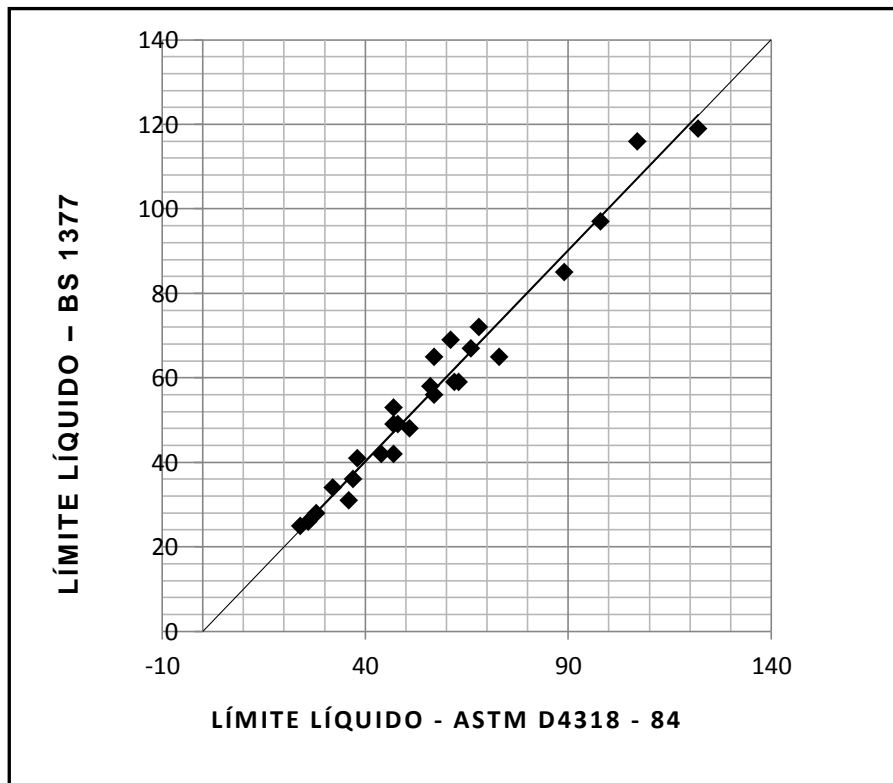
Posterior a esto se puede verificar el intervalo de confianza para el que resultaría válido este método aplicándole el factor de corrección, como se tienen menos de 30 datos se opta por la distribución de t-student para su cálculo, cuya ecuación es:

$$\text{Intervalo de Confianza de } T - \text{student} = \bar{x} \pm t_{\alpha/2, n-1} * \frac{S}{\sqrt{n}}$$



En la tabla XXXI se muestra un resumen de los cálculos realizados para encontrar los valores de la media aritmética y la desviación estándar, los resultados que se muestra a continuación:

Figura 35. Límite líquido, ASTM D4318-84 vs. BS1377, aplicando factor de corrección



Fuente: elaboración propia.

$$(\bar{x}) \text{ Media Aritmética} = \frac{\sum(X_i)}{n} = -0,03704$$

$$(S) \text{ Desviación Estándar} = \sqrt{\frac{\sum(xi - \bar{x})^2}{n}} = 7,401108$$

De la tabla de t-student, teniendo como base que se busca un intervalo de confianza del 95% se tiene un  $\alpha = 100\% - 95\% = 0,05$  y un total de 27 datos, se tendrá t como:  $t_{\alpha/2, n-1} = t_{0,05/2, 27-1} = t_{0,025, 26}$

Tabla XXXI. **Tabla resumen de cálculos para intervalos de confianza del límite líquido por el método del cono**

No.	LL del cono corregido	LL por ASTM 4318	X=LL cono - LL ASTM	$(X_i - \bar{X})^2$
1	24	24	0	0,00137174
2	25	26	-1	0,92729767
3	27	28	-1	0,92729767
4	33	32	1	1,07544582
5	30	36	-6	35,5569273
6	36	37	-1	0,92729767
7	41	38	3	9,22359396
8	42	44	-2	3,85322359
9	53	47	6	36,4458162
10	42	47	-5	24,6310014
11	49	47	2	4,14951989
12	49	48	1	1,07544582
13	48	51	-3	8,77914952
14	59	56	3	9,22359396
15	67	57	10	100,742112
16	57	57	0	0,00137174
17	70	61	9	81,6680384
18	60	62	-2	3,85322359
19	60	63	-3	8,77914952
20	69	66	3	9,22359396
21	73	68	5	25,3717421
22	67	73	-6	35,5569273
23	88	89	-1	0,92729767
24	100	98	2	4,14951989
25	120	107	13	169,964335
26	124	122	2	4,14951989
27	98	128	-30	897,77915
$\Sigma =$			-1	<u>1478,96296</u>

Fuente: elaboración propia.

A partir de la tabla de distribución de t-student  $\alpha = 0,025$  con intersección de  $\Gamma = 26$  (*grados de libertad*) se encuentra el valor de 2,056.

Se procede entonces al cálculo del límite superior e inferior del intervalo de confianza:

$$\text{Intervalo de Confianza de } T - \text{student} = -0,03704 \pm 2,056 * \frac{7,401108}{\sqrt{27}}$$

$$\text{Limite superior} = 2,89$$

$$\text{Limite inferior} = -2,97$$

Dando un resultado bastante aceptable de concordancia para el 95% de los datos, pero como anteriormente se observó, los resultados tienden a mayor dispersión luego de límites líquidos mayores a 100 por lo que se puede verificar la mejoría del intervalo de confianza para este segmento, el resumen de los cálculos para encontrar la nueva media aritmética y desviación estándar se muestra en la tabla XXXII, teniendo como nuevos datos para el cálculo:

$$(\bar{x}) \text{ Media Aritmética} = \sum(X_i)/n = 0,522$$

$$(S) \text{ Desviación Estándar} = \sqrt{\sum(xi - \bar{x})^2/n} = 4,14802$$

$$t_{\alpha/2, n-1} = t_{0,05/2, 23-1} = t_{0,025, 22} = 2,074$$

$$\text{Intervalo de Confianza de } T - \text{student} = 0,522 \pm 2,074 * \frac{4,14802}{\sqrt{23}}$$

$$\text{Limite superior} = 2,21$$

$$\text{Limite inferior} = -1,21$$

Se nota entonces que para límites líquidos menores a 100 se esperaría que el 95% de los resultados de los ensayos realizados con el método del penetrómetro de cono tuviera una diferencia máxima contra la de la norma ASTM 4318-84 de 2,2 puntos porcentuales de humedad.

Tabla XXXII. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza del límite líquido por el método del cono para valores menores a 100**

No.	LL del cono corregido	LL por ASTM 4318	LL cono - LL ASTM	$(X_i - \bar{X})^2$
1	24	24	0	0,27242032
2	25	26	-1	2,31629832
3	27	28	-1	2,31629832
4	33	32	1	0,22854232
5	30	36	-6	42,5356883
6	36	37	-1	2,31629832
7	41	38	3	6,14078632
8	42	44	-2	6,36017632
9	53	47	6	30,0091523
10	42	47	-5	30,4918103
11	49	47	2	2,18466432
12	49	48	1	0,22854232
13	48	51	-3	12,4040543
14	59	56	3	6,14078632
15	67	57	10	89,8336403
16	57	57	0	0,27242032
17	70	61	9	71,8775183
18	60	62	-2	6,36017632
19	60	63	-3	12,4040543
20	69	66	3	6,14078632
21	73	68	5	20,0530303
22	67	73	-6	42,5356883
23	88	89	-1	2,31629832
		$\Sigma =$	12	395,739131

Fuente: elaboración propia.

Para el método de Wood y Wroth de encontrar el Índice Plástico con dos conos de distinto peso el coeficiente de Pearson brinda 85,5%, pero observando la gráfica de la Figura 29 se ve que los datos no describen una línea de 45° como se esperaba, por lo que se propone aplicar un método de corrección.

El método de Wood y Wroth en igualdad con el método de Belviso y Ciampoli utilizan algunas premisas básicas, como la relación que existe entre la humedad y el esfuerzo de corte:

$$\omega + A * \ln Cu = \text{constante, donde } A \text{ es constante}$$

El factor adimensional encontrado para este fenómeno específico

$$\pi_1 = \frac{d^2 * Cu}{W} = \text{constante adimensional}$$

Y la relación que existe entre la resistencia al corte de un suelo al límite líquido y límite plástico (Skempton y Northey (1953)):

$$Cu_{LL} * 100 = Cu_{LP}$$

La validez de esta ecuación fue discutida por Wijeyakulasuriya (1990) quien al evaluar muestras de suelos de Nueva Gales de Sur, Australia, encontró que para suelos residuales predominantemente kaoliniticos, la idealización de una linealidad en los resultados, en una gráfica de penetración contra humedad, con penetración a escala logarítmica, era bastante válida; sin embargo mientras la humedad del suelo disminuía la gráfica tendía a formar una curva, mostrando

un crecimiento más rápido para el esfuerzo de corte, aunque esta conclusión no fue válida para todos los suelos ensayados (figura 36).

Luego, propuso redefinir la relación  $Cu_{LL} * 100 = Cu_{LP}$ , ya que “para límites plásticos con humedades muy bajas era difícil lograr resultados adecuados y en los peores casos podía dar resultados negativos para el límite plástico de los suelos” (Wijeyakulasuriya (1986), Wasti y Berzirci (1986)). Logrando esto con una constante  $R$  como la relación que existe entre  $Cu_{LL}$  y  $Cu_{LP}$ .

El valor de  $R$  obtenido en los ensayos de Wijeyakulasuriya (1990) varió entre 7 y 28, dando una media de 18 para nueve muestras ensayadas, un valor muy cercano al valor de 25 obtenido por Lawrence (1980).

Wasti y Berzirci (1986) atribuyo la inaplicabilidad del método del cono para determinar índices plásticos a la invalidez de asumir una linealidad entre la humedad y la penetración del cono, lo cual es justificable para bentonitas altamente compresibles. En el caso de los suelos kaoliniticos de moderada compresibilidad Wijeyakulasuriya (1990) propone una reducción del valor de  $R$ , basándose en una medición directa de resultados de límite plástico con el penetrómetro y el sistema convencional.

Con el objetivo de comprobar si esta situación podría estar afectando los resultados de los ensayos para suelos nacionales se realizaron dos pruebas de varios puntos para observar la tendencia que tomaban en la gráfica de humedad contra penetración, las muestras destinadas para esto fueron la 25 y 26.

Se puede observar que la muestra 25 (figura 37) tuvo una estructura muy parecida a la muestra (b), así como la 26 (figura 38) a la (a) de las ensayada por Wijeyakulasuriya (1990) mostradas en la Figura 36, procedemos entonces a realizar el despeje para encontrar la razón que se utilizará entre  $Cu_{LL}$  y  $Cu_{LP}$ .

Para esto se denominará una variable X, donde  $X = Cu_{LL}/Cu_{LP}$  quedando la ecuación propuesta por Wood y Wroth como:

$$IP = \log_{10}(X) * \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{\ln\left(\frac{W_1}{W_2}\right)}$$

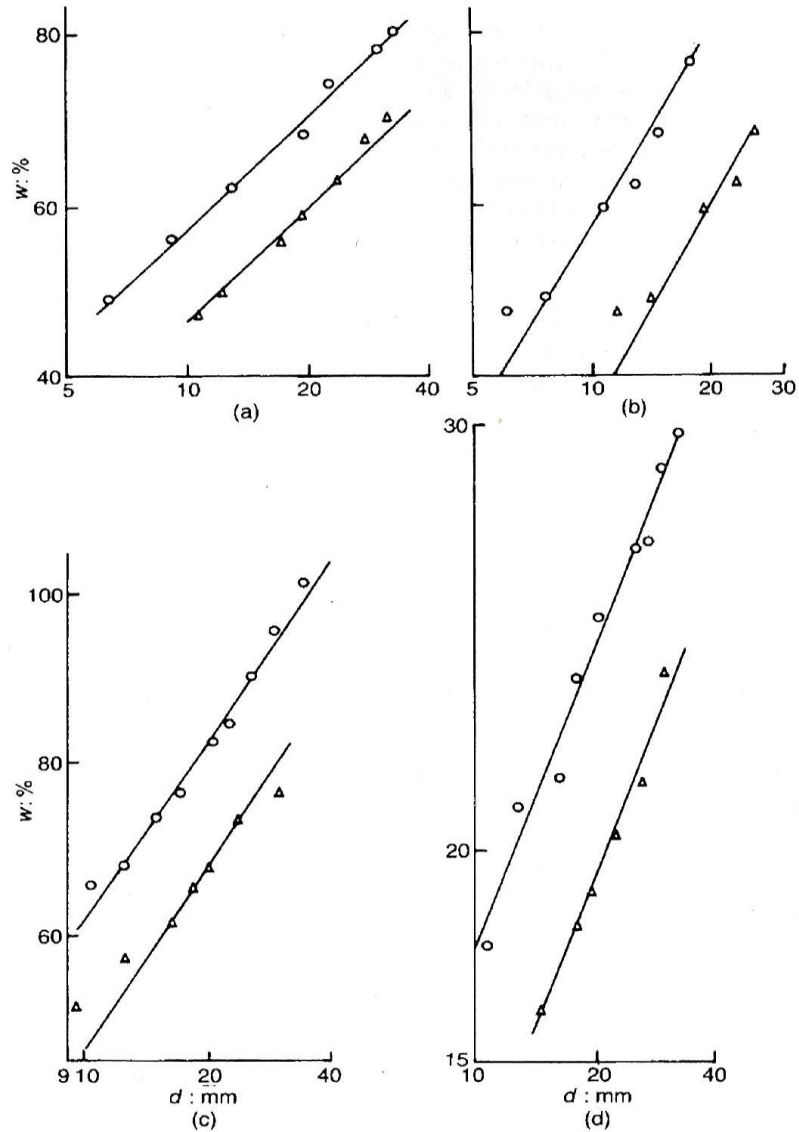
$$X = 0,3333^{(PI/(\omega_1 - \omega_2))}$$

Usando el cono de 240 gf como 1 y el cono de 80 gf como 2 para las respectivas humedades encontradas para una penetración de 20 milímetros en 5 segundos de caída libre y el índice plástico obtenido por la norma ASTM.

Se puede proceder a encontrar la variable X por medio de ensayos realizados a muestras de suelo de una región específica.

Para este caso se ven las muestras de suelo enumeradas en la tabla XV.

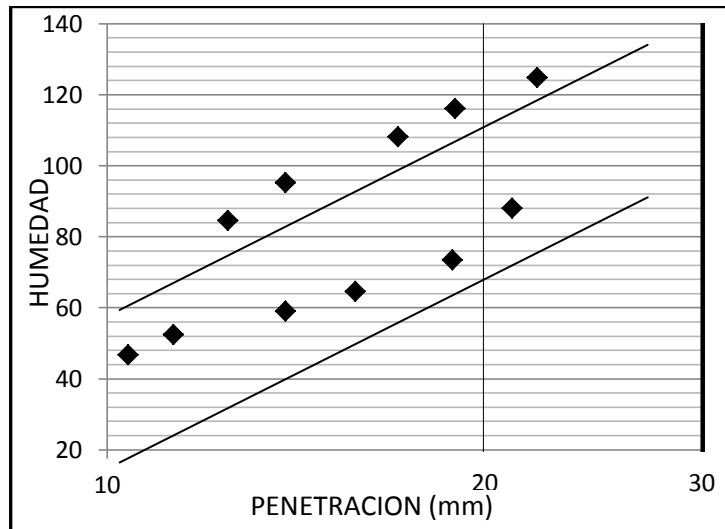
Figura 36. Variación de penetración respecto al contenido de humedad para conos con peso de 80 gf y 230 gf con un ángulo de 60°, (a) Kotmale, (b) Kelanitisa, (c) Kaolin y (d) Kopay, muestras ensayadas por Wijeyakulasuriya, C. V.



Fuente: Wijeyakulasuriya, C. V., *Geotechnique* 40, No. 2. P. 312.

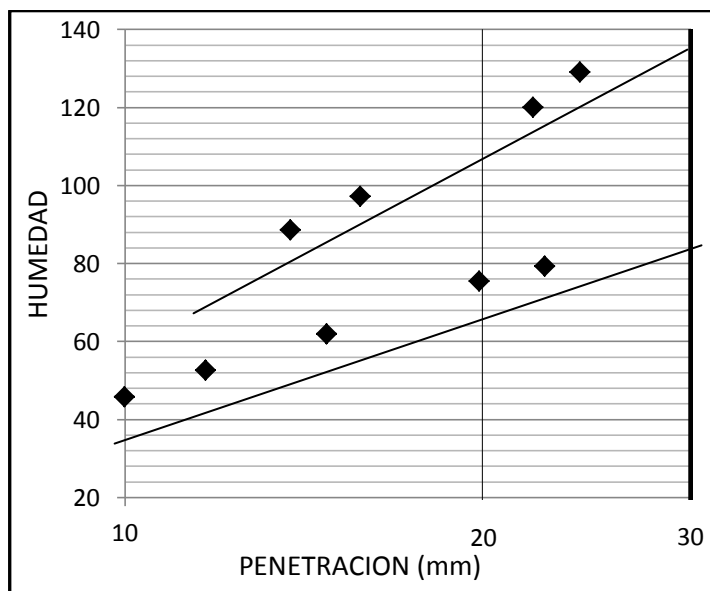


Figura 37. **Ensayo extenso, muestra 25**



Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Ensayo extenso, muestra 26**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Cálculo de Factores X, método de Wood y Wroth**

Número de muestra	$\omega_1$	$\omega_2$	Índice de plasticidad	X
1	29,5	23,8	7	4
2	61,2	51,1	36	50
3	28,8	24,5	3	2
4	66,8	51,8	32	11
5	55,3	42,7	20	6
6	70,4	54,8	31	9
7	39,3	33,4	11	6
8	85,7	66,2	40	10
9	37,2	30,9	10	6
10	34,1	32,3	4	12
11	68,7	66,7	3	5
12	51,3	42,9	23	20
13	43,8	37,4	11	7
14	72,8	58,3	36	15
15	67,1	50,4	39	13
16	45,4	42,9	4	6
17	50,3	40,1	23	12
18	60,9	44,5	37	12
19	31,2	26,0	9	7
20	58,1	46,5	34	25
21	114,7	101,5	77	607
22	44,7	40,6	7	7
23	51,3	43,0	26	31
24	60,4	56,0	15	42
25	118,3	82,5	91	16
26	94,8	75,0	98	230
27	97,0	76,8	65	34

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene el valor de X para cada muestra, como se muestra en la tabla XXXIII.

En estos resultados se observa que para suelos con límite líquido menor a 45 se sostiene un rango de X entre 2 y 10 para una media de 6,125.

Si se utiliza esta nueva relación en la ecuación de Wood y Wroth se obtiene la nueva ecuación general:

$$IP = \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{0,606}$$

Al hacer esta corrección a los datos se encuentra una nueva serie de resultados para índices plásticos calculados por el método de Wood y Wroth, mostrándose estos en la tabla XXXIV.

En esta tabla se puede notar que unos datos se acercan más a los valores calculados por el método de la norma ASTM, los que más se apegan son los índices plásticos bajos.

El cálculo del valor X por Wijeyakulasuriya (1990), se basa en que no todos los tipos de suelos plásticos poseen la misma constante, al clasificar las muestras del presente informe con el sistema de clasificación unificado se pueden dividir en: limos de baja compresibilidad (ML), limos de alta compresibilidad (MH), arcillas de baja compresibilidad (CL), arcillas de alta compresibilidad (CH) y limos orgánicos de baja compresibilidad (OL) y para observar el comportamiento de estos con la nueva constante se generó la figura 35.

En esta se muestra que los limos de baja compresibilidad (ML), el limo orgánico de baja compresibilidad (OL) y algunas arcillas de baja compresibilidad (CL) son los que se acercan más a la línea de 45°.

Tabla XXXIV. **Resultados de Wood y Wroth con X = 6,125**

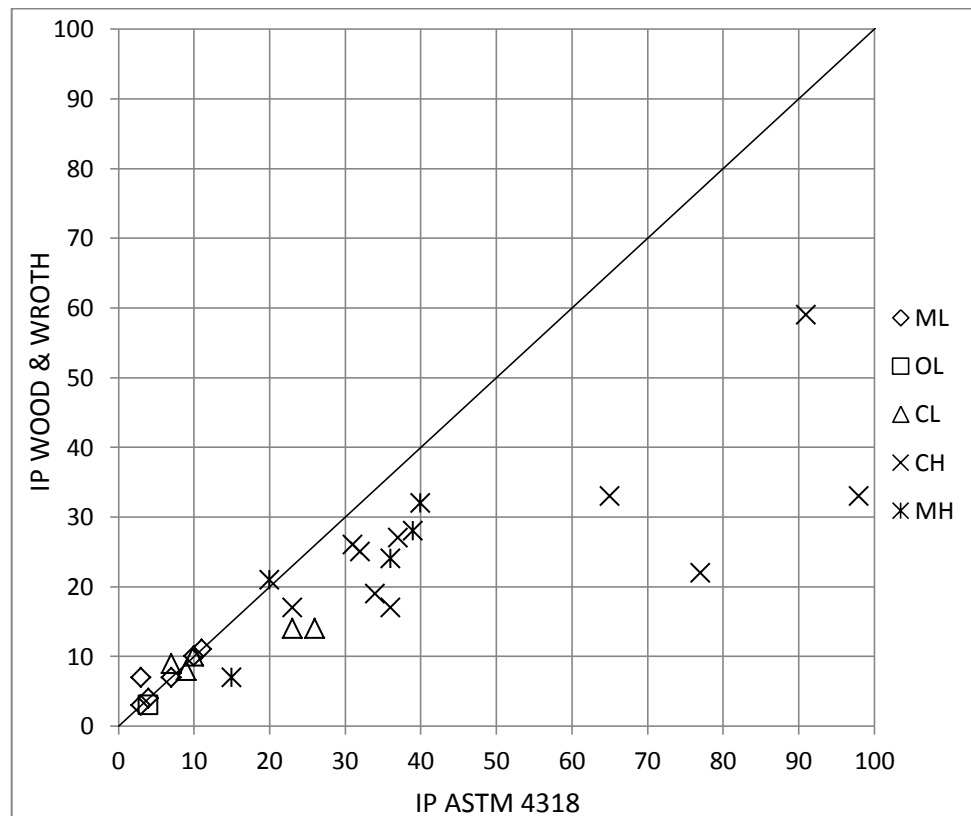
Número	IP ASTM	IP Por Wood y Wroth
1	7	9
2	36	17
3	3	7
4	32	25
5	20	21
6	31	26
7	10	10
8	40	32
9	10	10
10	4	3
11	3	3
12	23	14
13	11	11
14	36	24
15	39	28
16	4	4
17	23	17
18	37	27
19	9	8
20	34	19
21	77	22
22	7	7
23	26	14
24	15	7
25	91	59
26	98	33
27	65	33

Fuente: elaboración propia.

En estos resultados se puede observar que para índices plásticos con valores menores o iguales a 10 se logran valores aceptables y que los datos en la Figura 39 donde se compara entre los índices plásticos obtenidos por la norma ASTM y los índices plásticos obtenidos por método de Wood y Wroth corregidos tienen una forma logarítmica, por lo que se propone realizar una corrección para todos los valores mayores a 10 de la siguiente manera:

$$IP_{\text{corregido de Wood y Wroth}} = IP_{\text{Wood y Wroth}} * \log_{10}(IP_{\text{Wood y Wroth}})$$

Figura 39. Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Wood y Wroth, con X = 6,125



Fuente: elaboración propia.

Al usar esta corrección logarítmica se obtienen los datos mostrados en la tabla XXXV y graficándolos nuevamente vs. los resultados de la ASTM se obtiene la figura 40.

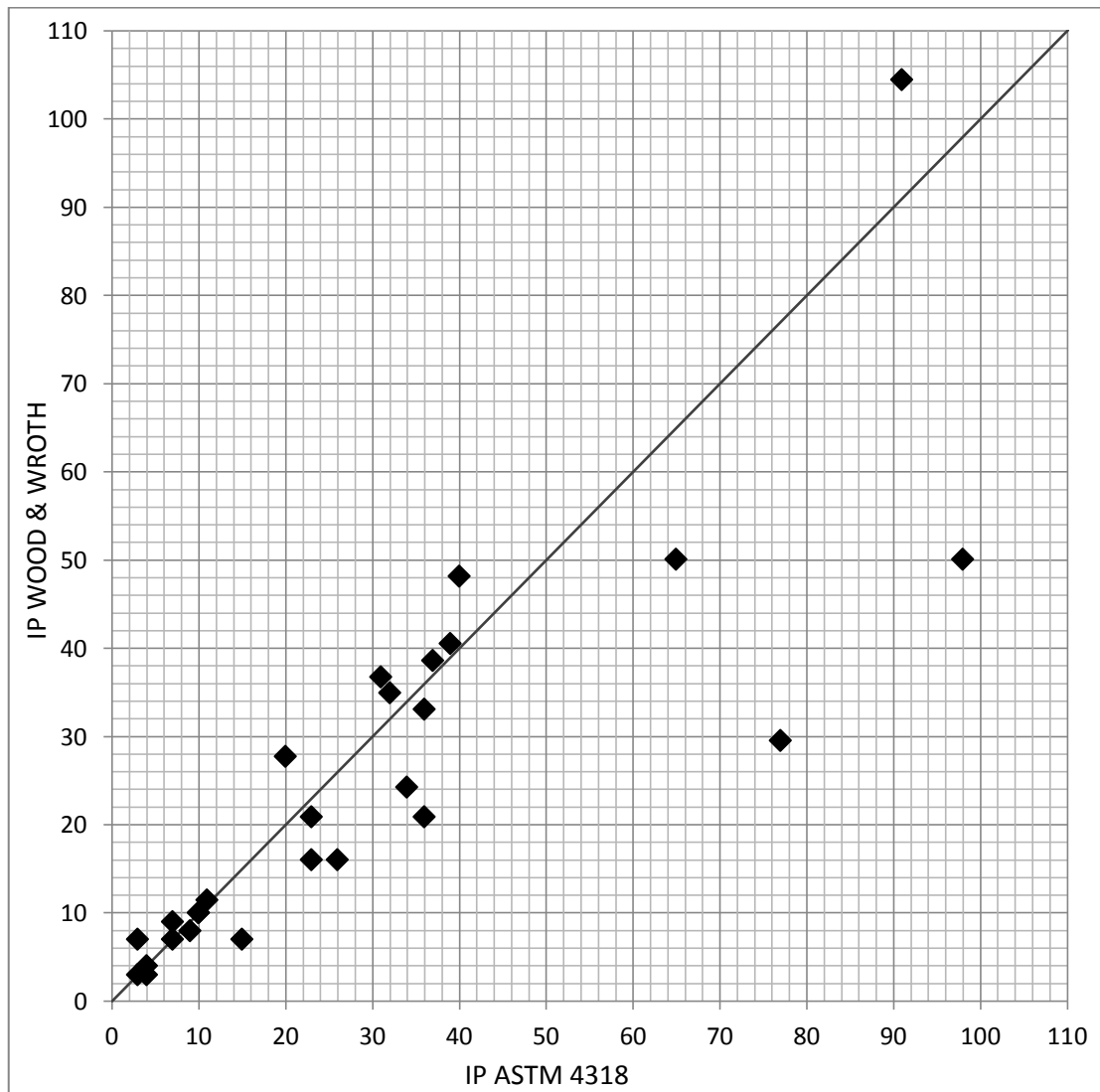
Tabla XXXV. **IP de Wood y Wroth con corrección logarítmica para valores mayores a 10**

Número	IP ASTM	IP Por Wood y Wroth
1	7	7
2	36	10
3	3	3
4	32	11
5	20	4
6	31	7
7	10	3
8	40	9
9	10	10
10	4	16
11	3	8
12	23	16
13	11	28
14	36	48
15	39	33
16	4	41
17	23	7
18	37	21
19	9	35
20	34	37
21	77	21
22	7	39
23	26	24
24	15	30
25	91	104
26	98	50
27	65	50

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la figura 40 que el método de Wood y Wroth para determinar índices plásticos, inclusive luego de las correcciones, resulta con una dispersión apreciable en suelos con índice plástico alto y mejora para muestras con índice plástico menor a 50.

Figura 40. Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Wood y Wroth, con corrección logarítmica



Fuente: elaboración propia.

Para calcular el intervalo de confianza del método de Wood y Wroth primero se limitará el rango aplicable del método para índices plásticos de 0 a un valor máximo de 50, el resumen de los cálculos para encontrar la media aritmética y desviación estándar se muestra en la tabla XXXVI.

Tabla XXXVI. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza del índice plástico por el método de Wood y Wroth para valores > 50**

No. de Muestra	IP de Wood y Wroth corregido	IP por ASTM 4318	X = IP de Wood y Wroth - IP ASTM	$(X_i - \bar{X})^2$
1	9	7	2	23,77
2	21	36	-15	147,02
3	7	3	4	47,27
4	35	32	3	34,52
5	28	20	8	118,27
6	37	31	6	78,77
7	10	10	0	8,27
8	48	40	8	118,27
9	10	10	0	8,27
10	3	4	-1	3,52
11	3	3	0	8,27
12	16	23	-7	17,02
13	11	11	0	8,27
14	33	36	-3	0,02
15	41	39	2	23,77
16	4	4	0	8,27
17	21	23	-2	0,77
18	39	37	2	23,77
19	8	9	-1	3,52
20	24	34	-10	50,77
21	30	77	-47	1947,02
22	7	7	0	8,27
23	16	26	-10	50,77
24	7	15	-8	26,27
$\Sigma =$			-69	2764,73

Fuente: elaboración propia.



$$(\bar{x}) \text{ Media Aritmética} = \sum(X_i)/n = -2,875$$

$$(S) \text{ Desviación Estándar} = \sqrt{\sum(xi - \bar{x})^2/n} = 10,73$$

$$t_{\alpha/2, n-1} = t_{0,05/2, 24-1} = t_{0,025, 23} = 2,069$$

$$\text{Intervalo de Confianza de } T - \text{student} = -2,875 \pm 2,069 * \frac{10,73}{\sqrt{24}}$$

$$\text{Limite superior} = 1,75$$

$$\text{Limite inferior} = -7,50$$

Para índices plásticos menores a 50 se esperaría que el 95% de los resultados de los ensayos realizados con el método del Wood y Wroth tuvieran una diferencia máxima contra la de la obtenida con la norma ASTM 4318-84 de 7,5% en contenido de humedad. Este error esperado se reduce si se examinan los datos que tienen un índice plástico menor o igual a 10 como se muestra en la tabla XXXVII y en los cálculos siguientes.

$$(\bar{x}) \text{ Media Aritmética} = \sum(X_i)/n = -0,4$$

$$(S) \text{ Desviación Estándar} = \sqrt{\sum(xi - \bar{x})^2/n} = 2,91$$

$$t_{\alpha/2, n-1} = t_{0,05/2, 10-1} = t_{0,025, 9} = 2,262$$

$$\text{Intervalo de Confianza de } T - \text{student} = -0,4 \pm 2,262 * \frac{2,91}{\sqrt{10}}$$

$$\text{Limite superior} = 1,68$$

$$\text{Limite inferior} = -2,48$$

Tabla XXXVII. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza del Índice Plástico por el método de Wood y Wroth para valores menores o iguales a 10**

No. de Muestra	IP de Wood y Wroth corregido	IP por ASTM 4318	X = IP de Wood y Wroth - IP ASTM	$(X_i - \bar{X})^2$
1	9	7	2	5,76
3	7	3	4	19,36
7	10	10	0	0,16
9	10	10	0	0,16
10	3	4	-1	0,36
11	3	3	0	0,16
16	4	4	0	0,16
19	8	9	-1	0,36
22	7	7	0	0,16
24	7	15	-8	57,76
$\Sigma =$			-4	84,4

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados muestran que el método de Wood y Wroth, aunque aplicable con cierta certeza para la mayoría de los datos, tiene un margen mínimo de error posible para suelos con índices plásticos menores o iguales a 10, esperando que un 95% de los suelos ensayados tengan una diferencia máxima de 2,5 puntos de humedad contra los encontrados con la norma ASTM.

Para el método de Belviso y Ciampoli el coeficiente de Pearson resulta de 66,6%, y la gráfica no describe la línea de 45° esperada, por lo que se propone aplicar un método de corrección.

Como este método se basa en la comparativa con la ecuación de una recta, se puede realizar una revisión de la relación entre  $IP_{ASTM}$  e  $IP_{BC}$  buscando como resultado un factor “M” que puede establecer un factor de corrección multiplicativo.

$$M = \frac{IP_{astm}}{IP_{BC}}$$

Los resultados de este cálculo para todas las muestras con límite líquido menor a 45 (Dado que fueron las que mostraron resultados más consistentes), se encuentran en la tabla XXXVIII.

Logrando así para “M” un rango de 0,333 a 1,125 y un promedio de 0,757 entre las ocho muestras.

Si se multiplica los valores obtenidos por el método de Belviso y Ciampoli por la constante M se logran los resultados mostrados en la tabla XXXIX.

Aplicando el factor M se esperaba lograr mejores resultados, pero el coeficiente de correlación de Pearson para resultados corregidos es de 65.9% y los datos se siguen mostrando dispersos en la grafica luego de aplicarlo, indicando que no se logra una mejoría estadística de los resultados.

Tabla XXXVIII. **Cálculo de factor “M”, Método de Belviso y Ciampoli**

Número de muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice plástico Belviso y Ciampoli	M
1	26	19	7	11	0,6364
3	24	21	3	9	0,3333
7	37	26	11	15	0,7333
9	32	22	10	19	0,5263
10	36	32	4	4	1
13	38	27	11	11	1
19	28	19	9	8	1,125
22	44	37	7	10	0,7

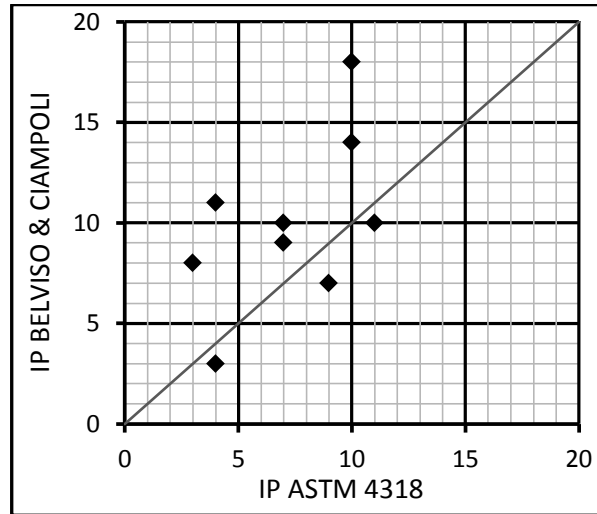
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Resultados de Belviso y Ciampoli corregido para límites líquidos menores a 45**

Número de muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice plástico Belviso y Ciampoli corregido	Diferencia
1	26	19	7	8	1
3	24	21	3	7	4
7	37	26	11	11	0
9	32	22	10	14	4
10	36	32	4	3	1
13	38	27	11	8	3
19	28	19	9	6	3
22	44	37	7	8	1

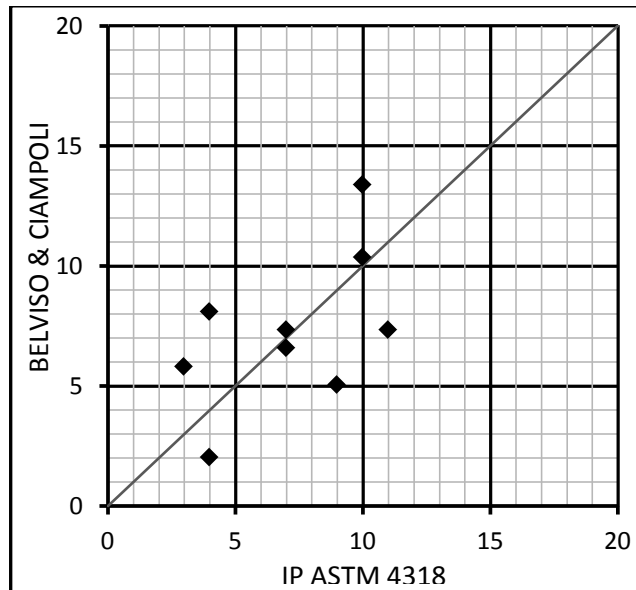
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Belviso y Ciampoli, para límites líquidos menores a 45



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Índice plástico, ASTM D4318-84 vs. Belviso y Ciampoli, para límites líquidos menores a 45, con corrección



Fuente: elaboración propia.

Los cambios gráficos en las figuras 41 y 42 muestran que esta corrección tiene poca o ninguna ventaja para mejorar los resultados del método.

Para la revisión del método de cálculo del límite plástico por medio del índice de fluidez se calcula primeramente el coeficiente de Pearson, para el cual se encuentra una correlación de 49,8%. Como este resultado no refleja una relación lineal dentro de los datos y anteriormente, en la Figura 31, se había dejado indicado ya que las sucesiones de datos mostraban dos grupos con tendencias lineales distintas se puede optar por plantear un factor de corrección que mejore los resultados del grupo de datos sobre la línea de tendencia (1) de la figura 31, ya que es donde se encuentra la mayor cantidad de datos.

Primeramente se calcula el intervalo de confianza para el grupo completo de datos sin ninguna corrección para tener un parámetro de referencia, como se muestra a continuación:

$$(\bar{x}) \text{ Media Aritmética} = \sum(X_i)/n = \sum(LP_{ASTM} - LP_{METODO IL})/188 = 22,45$$

$$(S) \text{ Desviación Estándar} = \sqrt{\sum(xi - \bar{x})^2/n} = \sqrt{\sum(LP_{METODO IL} - \bar{x})^2/188} = 20,29$$

$$\text{Intervalo de Confianza} = -22,45 \pm 1,96 * \frac{20,29}{\sqrt{188}}$$

$$\text{Limite superior} = 25,35$$

$$\text{Limite inferior} = 19,55$$

Luego se propone una corrección con forma lineal, de modo que:

$$Y = m * x + b \rightarrow LP_{IL - CORREGIDO} = 0,7 * LP_{IL} + 3$$

Esta corrección genera la nueva distribución de datos que se muestra en la figura 43. En la que ya se observa que el grupo más denso de datos se acerca mejor a la línea de 45°, existiendo siempre otro grupo con una tendencia a dar resultados de límite plástico más altos de los que da la norma ASTM, pero de manera consistente en todo el rango de límites plásticos estudiados, por lo que se calcula el nuevo intervalo de confianza sin restringir el rango de límites plásticos utilizables como sigue:

$$(\bar{x}) \text{ Media Aritmética} = \sum(X_i)/n = \sum(LP_{ASTM} - LP_{POR IL CORREGIDO})/188 = 9,22$$

$$(S) \text{ Desviación Estándar} = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / n} = \sqrt{\sum (LP_{POR IL CORREG.} - \bar{x})^2 / 188} = 14,14$$

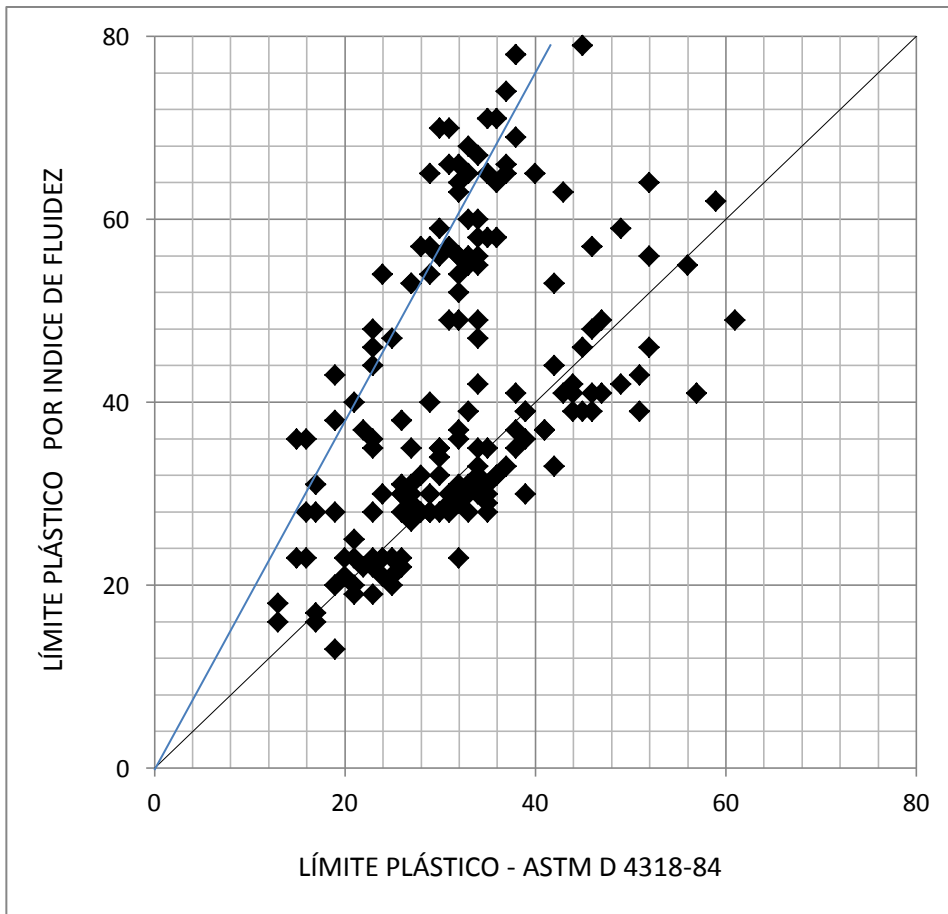
$$\text{Intervalo de Confianza} = -9,22 \pm 1,96 * \frac{14,14}{\sqrt{188}}$$

$$\text{Limite superior} = 11,25$$

$$\text{Limite inferior} = 7,22$$

Estos resultados reflejan una mejoría notable en los resultados encontrados luego de la aplicación del factor de corrección, reduciendo el margen de error en poco más de un 50% para la totalidad de los datos, aunque la existencia de las dos líneas de tendencia marcadas en los datos mostrados en la figura 43 denotan una posible relación de la aplicación del método con la mineralogía del suelo.

Figura 43. **Límite plástico, ASTM D4318 vs. Método del Índice de Fluidez, aplicando factor de corrección**



Fuente: elaboración propia.

Se muestra un resumen de los cálculos utilizados para encontrar los intervalos de confianza a los datos originales y corregidos del método del índice de fluidez en las tablas de la XL a la XLV de esta investigación.

Para tener otro parámetro de referencia en el análisis final de los resultados se realizó un ensayo de límites de Atterberg por la norma ASTM a dos muestras de suelo con distintas plasticidades, la primera, una arcilla café



claro de alta plasticidad, procedente de Cobán, Alta Verapaz y la segunda a una arcilla café de baja plasticidad procedente de la Ciudad de Guatemala.

Esta prueba fue realizada a cada muestra por cinco laboratoristas experimentados, denominados como laboratorista A, laboratorista B, laboratorista C, laboratorista D y el autor, teniendo como objetivo comprobar la repetitividad que puede existir en resultados para límites de Atterberg en una misma muestra de suelo en circunstancias comparables.

Los resultados de estos ensayos se muestran de la figura 44 a la 53 y en el resumen de resultados en la tabla XLVI donde también se muestra la diferencia que tuvo cada laboratorista contra la media aritmética de los cinco ensayos.

De los resultados de la Tabla XLVI se puede notar que existe para arcillas de alta plasticidad una variabilidad de resultados en límites líquidos de hasta un 11% respecto de la media, para límites plásticos un máximo de 4% respecto de la media y en el índice plástico una variante máxima de 11% de humedad respecto de la media. Para la arcilla de baja plasticidad la variante se reduce significativamente, siendo de 2% respecto de la media para el límite líquido, 2% respecto de la media para el límite plástico y 1% respecto de la media para el índice plástico.

Con esto se puede notar que mientras más altos sean los índices, mayor es la probabilidad de que exista una variante en los resultados al repetir el ensayo.

Tabla XL. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza de límite plástico por el Método del índice de fluidez (1)**

Número de muestra	Límite plástico por ASTM	Límite plástico por IL	IPIL-IPASTM	(IPIL- $\bar{x}$ )	LP por IL corregido	IPIL CORR. -IPASTM	(IPIL CORR - $\bar{x}$ )
1	19	24	5	304,39	20	1	67,62
2	30	36	6	270,50	28	-2	125,96
3	30	45	15	55,45	35	5	17,84
4	31	37	6	270,50	29	-2	125,96
5	34	43	9	180,82	33	-1	104,52
6	32	40	8	208,71	31	-1	104,52
7	41	49	8	208,71	37	-4	174,86
8	39	39	0	503,86	30	-9	332,09
9	29	53	24	2,41	40	11	3,16
10	31	35	4	340,28	28	-3	149,41
11	41	48	7	238,60	37	-4	174,86
12	35	37	2	418,07	29	-6	231,75
13	19	24	5	304,39	20	1	67,62
14	27	38	11	131,03	30	3	38,73
15	37	43	6	270,50	33	-4	174,86
16	21	24	3	378,18	20	-1	104,52
17	23	27	4	340,28	22	-1	104,52
18	38	46	8	208,71	35	-3	149,41
19	26	38	12	109,14	30	4	27,28
20	33	36	3	378,18	28	-5	202,31
21	44	54	10	154,92	41	-3	149,41
22	28	42	14	71,35	32	4	27,28
23	27	38	11	131,03	30	3	38,73
24	35	40	5	304,39	31	-4	174,86
25	42	43	1	459,97	33	-9	332,09
26	24	26	2	418,07	21	-3	149,41
27	38	49	11	131,03	37	-1	104,52
28	32	37	5	304,39	29	-3	149,41
29	47	54	7	238,60	41	-6	231,75
30	20	25	5	304,39	21	1	67,62
31	25	24	-1	549,75	20	-5	202,31
32	27	40	13	89,24	31	4	27,28

Fuente: elaboración propia.  $A = \pi$

Tabla XLI. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza de límite plástico por el Método del índice de fluidez (2)**

Número de muestra	Límite plástico por ASTM	Límite plástico por IL	IP <sub>IL</sub> -IP <sub>ASTM</sub>	(IP <sub>IL</sub> - $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>	LP por IL corregido	IP <sub>IL</sub> CORR. - IP <sub>ASTM</sub>	(IP <sub>IL</sub> CORR. - $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>
33	30	41	11	131,03	32	2	52,18
34	36	42	6	270,50	32	-4	174,86
35	24	28	4	340,28	23	-1	104,52
36	44	52	8	208,71	39	-5	202,31
37	21	23	2	418,07	19	-2	125,96
38	46	64	18	19,77	48	2	52,18
39	47	66	19	11,88	49	2	52,18
40	57	54	-3	647,54	41	-16	636,22
41	44	55	11	131,03	42	-2	125,96
42	45	61	16	41,56	46	1	67,62
43	52	62	10	154,92	46	-6	231,75
44	49	55	6	270,50	42	-7	263,20
45	51	57	6	270,50	43	-8	296,65
46	43	54	11	131,03	41	-2	125,96
47	35	39	4	340,28	30	-5	202,31
48	61	66	5	304,39	49	-12	450,43
49	46	52	6	270,50	39	-7	263,20
50	39	52	13	89,24	39	0	85,07
51	45	52	7	238,60	39	-6	231,75
52	51	51	0	503,86	39	-12	450,43
53	23	29	6	270,50	23	0	85,07
54	29	35	6	270,50	28	-1	104,52
55	26	40	14	71,35	31	5	17,84
56	39	52	13	89,24	39	0	85,07
57	25	29	4	340,28	23	-2	125,96
58	25	25	0	503,86	21	-4	174,86
59	29	35	6	270,50	28	-1	104,52
60	30	44	14	71,35	34	4	27,28
61	32	48	16	41,56	37	5	17,84
62	35	45	10	154,92	35	0	85,07
63	34	56	22	0,20	42	8	1,50
64	39	47	8	208,71	36	-3	149,41

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza de límite plástico por el Método del índice de fluidez (3)**

Número de muestra	Límite plástico por ASTM	Límite plástico por IL	IP <sub>IL</sub> -IP <sub>ASTM</sub>	(IP <sub>IL</sub> - $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>	LP por IL corregido	IP <sub>IL</sub> CORR. - IP <sub>ASTM</sub>	(IP <sub>IL</sub> CORR. - $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>
65	31	38	7	238,60	30	-1	104,52
66	34	38	4	340,28	30	-4	174,86
67	28	35	7	238,60	28	0	85,07
68	36	41	5	304,39	32	-4	174,86
69	25	25	0	503,86	21	-4	174,86
70	31	36	5	304,39	28	-3	149,41
71	29	35	6	270,50	28	-1	104,52
72	29	36	7	238,60	28	-1	104,52
73	52	87	35	157,58	64	12	7,71
74	23	35	12	109,14	28	5	17,84
75	24	28	4	340,28	23	-1	104,52
76	25	29	4	340,28	23	-2	125,96
77	26	38	12	109,14	30	4	27,28
78	29	39	10	154,92	30	1	67,62
79	27	36	9	180,82	28	1	67,62
80	20	28	8	208,71	23	3	38,73
81	33	51	18	19,77	39	6	10,39
82	23	47	24	2,41	36	13	14,26
83	26	27	1	459,97	22	-4	174,86
84	23	23	0	503,86	19	-4	174,86
85	46	54	8	208,71	41	-5	202,31
86	35	35	0	503,86	28	-7	263,20
87	42	112	70	2 261,31	81	39	886,65
88	13	22	9	180,82	18	5	17,84
89	33	40	7	238,60	31	-2	125,96
90	26	28	2	418,07	23	-3	149,41
91	27	34	7	238,60	27	0	85,07
92	32	29	-3	647,54	23	-9	332,09
93	49	80	31	73,16	59	10	0,60
94	42	71	29	42,94	53	11	3,16
95	59	84	25	6,52	62	3	38,73
96	52	76	24	2,41	56	4	27,28

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza de límite plástico por el Método del índice de fluidez (4)**

Número de muestra	Límite plástico por ASTM	Límite plástico por IL	IP <sub>IL</sub> -IP <sub>ASTM</sub>	(IP <sub>IL</sub> - x ) <sup>2</sup>	LP por IL corregido	IP <sub>IL</sub> CORR. - IP <sub>ASTM</sub>	(IP <sub>IL</sub> CORR. - x ) <sup>2</sup>
97	46	77	31	73,16	57	11	3,16
98	56	74	18	19,77	55	-1	104,52
99	32	66	34	133,48	49	17	60,48
100	24	38	14	71,35	30	6	10,39
101	21	29	8	208,71	23	2	52,18
102	26	35	9	180,82	28	2	52,18
103	22	27	5	304,39	22	0	85,07
104	21	31	10	154,92	25	4	27,28
105	30	46	16	41,56	35	5	17,84
106	27	45	18	19,77	35	8	1,50
107	38	54	16	41,56	41	3	38,73
108	15	28	13	89,24	23	8	1,50
109	30	80	50	759,18	59	29	391,11
110	33	93	60	1 410,24	68	35	664,43
111	36	79	43	422,43	58	22	163,24
112	33	82	49	705,07	60	27	316,01
113	39	116	77	2 976,05	84	45	1 279,96
114	32	86	54	995,60	63	31	474,22
115	22	49	27	20,73	37	15	33,37
116	32	70	38	241,90	52	20	116,14
117	33	75	42	382,33	56	23	189,79
118	43	85	42	382,33	63	20	116,14
119	19	35	16	41,56	28	9	0,05
120	13	18	5	304,39	16	3	38,73
121	16	35	19	11,88	28	12	7,71
122	34	65	31	73,16	49	15	33,37
123	32	73	41	344,22	54	22	163,24
124	45	108	63	1 644,56	79	34	613,88
125	17	35	18	19,77	28	11	3,16
126	16	29	13	89,24	23	7	4,94
127	34	81	47	602,86	60	26	281,45
128	37	102	65	1 810,77	74	37	771,54

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza de límite plástico por el Método del índice de fluidez (5)**

Número de muestra	Límite plástico por ASTM	Límite plástico por IL	IP <sub>IL</sub> -IP <sub>ASTM</sub>	(IP <sub>IL</sub> - $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>	LP por IL corregido	IP <sub>IL</sub> CORR. - IP <sub>ASTM</sub>	(IP <sub>IL</sub> CORR. - $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>
129	16	47	31	73,16	36	20	116,14
130	29	77	48	652,97	57	28	352,56
131	33	76	43	422,43	56	23	189,79
132	31	77	46	554,75	57	26	281,45
133	19	57	38	241,90	43	24	218,35
134	34	63	29	42,94	47	13	14,26
135	35	89	54	995,60	65	30	431,67
136	35	88	53	933,50	65	30	431,67
137	35	79	44	464,54	58	23	189,79
138	33	88	55	1 059,71	65	32	518,77
139	23	45	22	0,20	35	12	7,71
140	25	63	38	241,90	47	22	163,24
141	29	73	44	464,54	54	25	248,90
142	34	74	40	308,11	55	21	138,69
143	23	64	41	344,22	48	25	248,90
144	17	18	1	459,97	16	-1	104,52
145	33	74	41	344,22	55	22	163,24
146	34	78	44	464,54	58	24	218,35
147	34	75	41	344,22	56	22	163,24
148	38	94	56	1 125,82	69	31	474,22
149	24	73	49	705,07	54	30	431,67
150	19	50	31	73,16	38	19	95,58
151	30	75	45	508,65	56	26	281,45
152	31	66	35	157,58	49	18	77,03
153	15	47	32	91,26	36	21	138,69
154	32	90	58	1 264,03	66	34	613,88
155	27	71	44	464,54	53	26	281,45
156	32	87	55	1 059,71	64	32	518,77
157	29	88	59	1 336,14	65	36	716,99
158	28	77	49	705,07	57	29	391,11
159	31	90	59	1 336,14	66	35	664,43
160	32	76	44	464,54	56	24	218,35

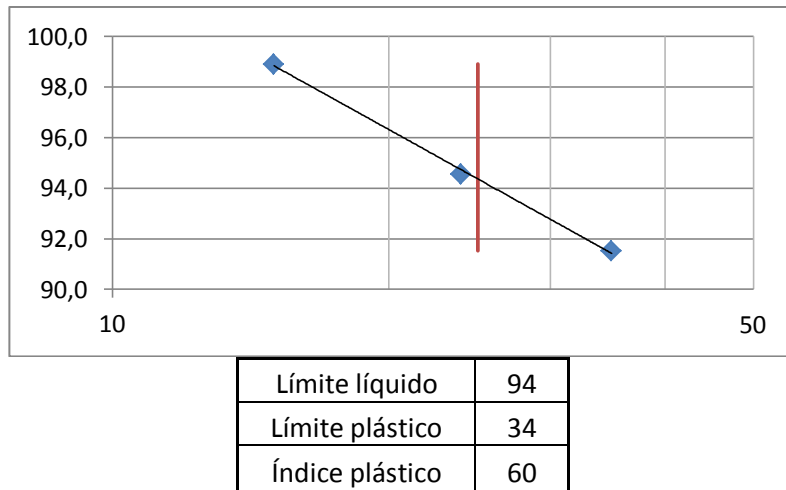
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Resumen de cálculos para intervalos de confianza de límite plástico por el Método del índice de fluidez (6)**

Número de muestra	Límite plástico por ASTM	Límite plástico por IL	IPIL-IPASTM	$(IPIL - \bar{x})^2$	LP por IL corregido	IPIL CORR. - IPASTM	$(IPIL CORR. - \bar{x})^2$
161	30	95	65	1 810,77	70	40	947,20
162	26	50	24	2,41	38	12	7,71
163	27	72	45	508,65	53	26	281,45
164	40	89	49	705,07	65	25	248,90
165	42	111	69	2 167,20	81	39	886,65
166	38	107	69	2 167,20	78	40	947,20
167	34	92	58	1 264,03	67	33	565,33
168	36	97	61	1 486,35	71	35	664,43
169	23	58	35	157,58	44	21	138,69
170	23	62	39	274,01	46	23	189,79
171	31	96	65	1 810,77	70	39	886,65
172	36	87	51	815,28	64	28	352,56
173	35	97	62	1 564,45	71	36	716,99
174	37	89	52	873,39	65	28	352,56
175	37	90	53	933,50	66	29	391,11
176	32	75	43	422,43	56	24	218,35
177	21	53	32	91,26	40	19	95,58
178	42	59	17	29,67	44	2	52,18
179	17	20	3	378,18	17	0	85,07
180	17	40	23	0,31	31	14	22,82
181	19	14	-5	753,33	13	-6	231,75
182	33	38	5	304,39	30	-3	149,41
183	32	39	7	238,60	30	-2	125,96
184	34	45	11	131,03	35	1	67,62
185	32	47	15	55,45	36	4	27,28
186	34	41	7	238,60	32	-2	125,96
187	27	37	10	154,92	29	2	52,18
188	25	24	-1	549,75	20	-5	202,31

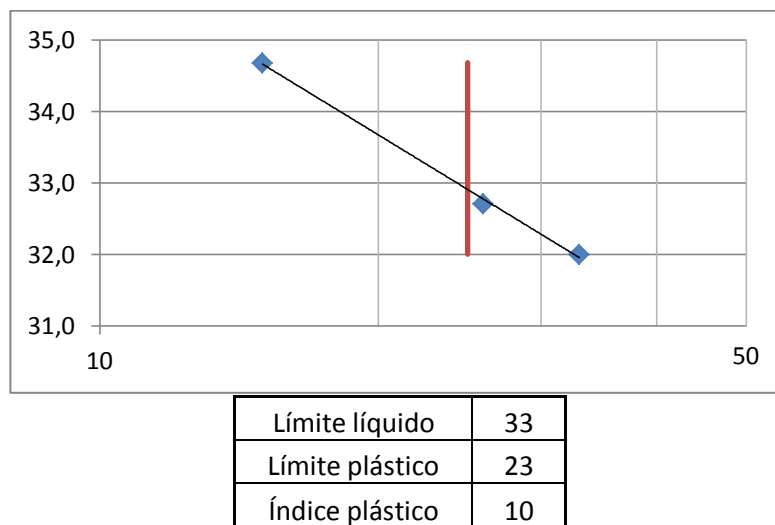
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Limites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista A (Carlos Córdoba)**



Fuente: elaboración propia.

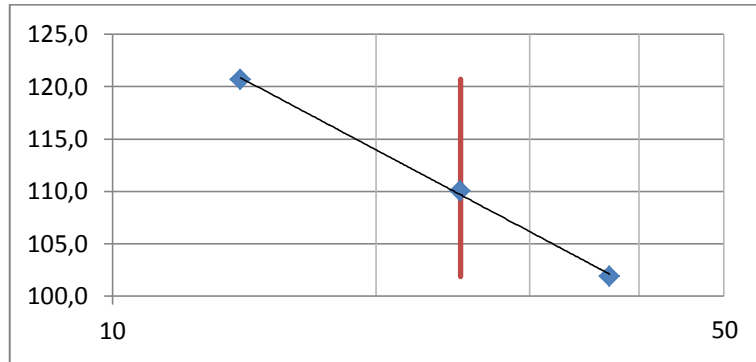
Figura 45. **Limites de Atterberg, arcilla de baja plasticidad, laboratorista A (Carlos Córdoba)**



Fuente: elaboración propia.



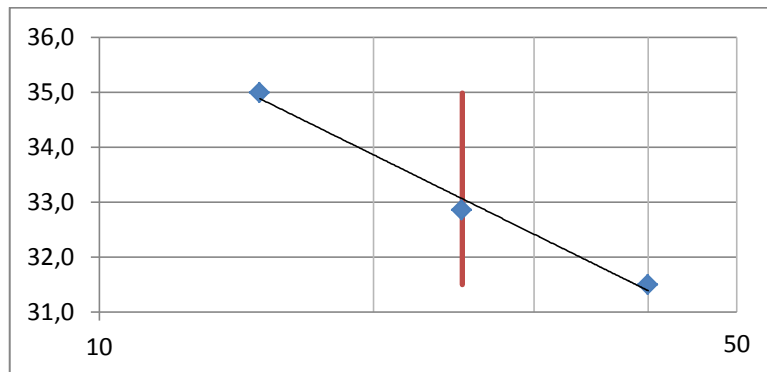
Figura 46. **Limites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista B (Carlos Xicón)**



Límite líquido	110
Límite plástico	30
Índice plástico	80

Fuente: elaboración propia.

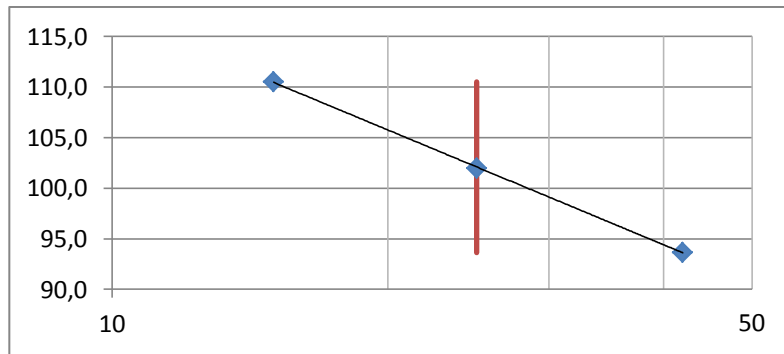
Figura 47. **Limites de Atterberg, arcilla de baja plasticidad, laboratorista B (Carlos Xicón)**



Límite líquido	33
Límite plástico	23
Índice plástico	10

Fuente: elaboración propia.

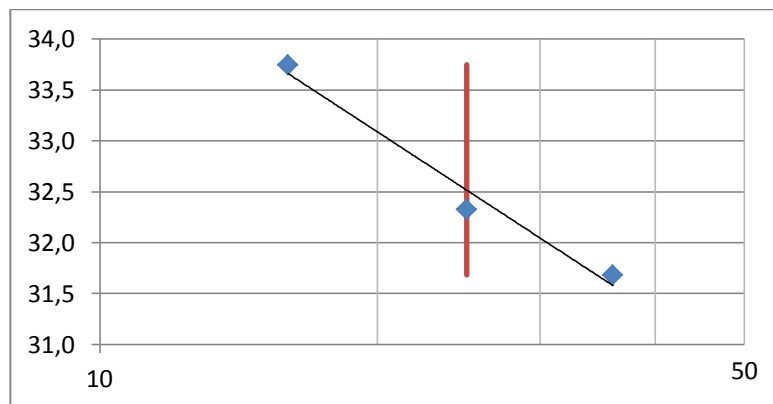
Figura 48. **Limites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista C (Samuel Cancinos)**



Límite líquido	102
Límite plástico	35
Índice plástico	67

Fuente: elaboración propia.

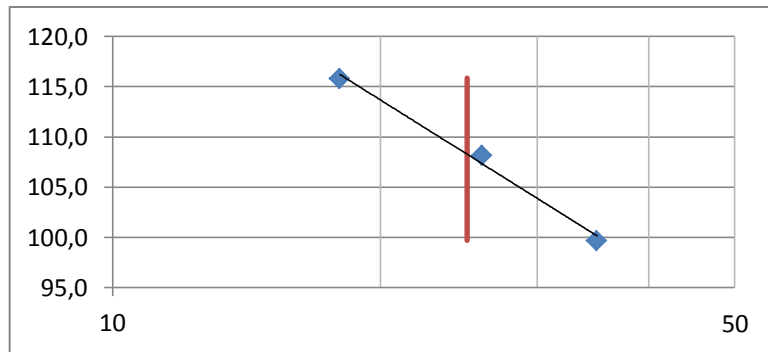
Figura 49. **Limites de Atterberg, arcilla de baja plasticidad, laboratorista C (Samuel Cancinos)**



Límite líquido	33
Límite plástico	24
Índice plástico	9

Fuente: elaboración propia.

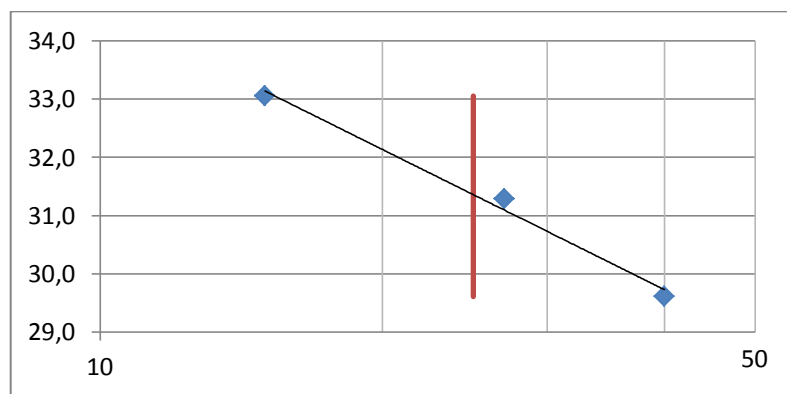
Figura 50. **Limites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad, laboratorista D (Víctor Chioc)**



Límite líquido	108
Límite plástico	34
Índice plástico	74

Fuente: elaboración del autor

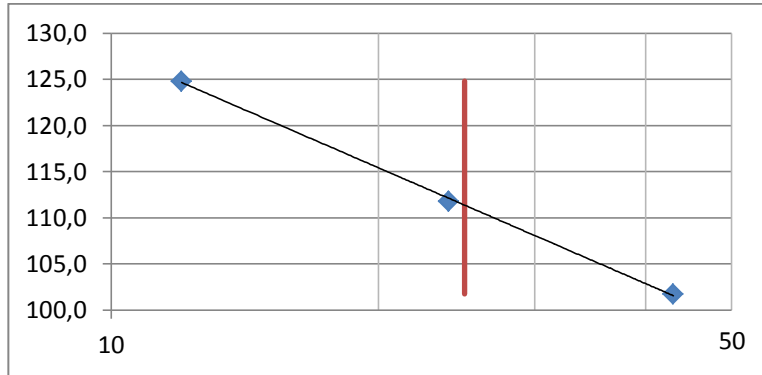
Figura 51. **Limites de Atterberg, arcilla de baja plasticidad, laboratorista D (Víctor Chioc)**



Límite líquido	31
Límite plástico	22
Índice plástico	9

Fuente: elaboración propia.

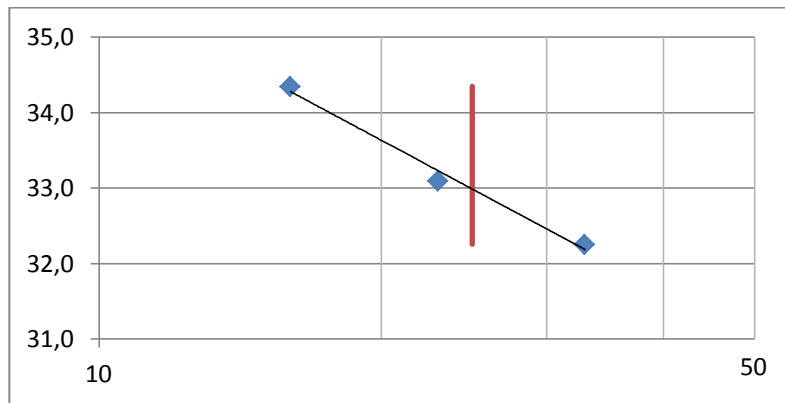
Figura 52. **Limites de Atterberg, arcilla de alta plasticidad por el autor**



Límite líquido	111
Límite plástico	36
Índice plástico	75

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Limites de Atterberg, arcilla de baja plasticidad por el autor**



Límite líquido	33
Límite plástico	25
Índice plástico	8

Fuente: elaboración propia.

Así se muestra también que los datos usados como referencia (ensayos realizados por la norma ASTM) para evaluar los métodos estudiados en este informe puede usarse como un rango aceptable que se incrementa directamente proporcional a la humedad en vez de tomarlos cómo un punto fijo, establecido y repetible.

Tabla XLVI. **Resumen de resultados para comprobar repetitividad de los ensayos de la norma ASTM para límites de Atterberg en suelos de Guatemala**

	Límite Líquido	LL vs $\bar{X}$	Límite Plástico	LP vs $\bar{X}$	Índice Plástico	IP vs $\bar{X}$
Arcilla de alta plasticidad						
Laboratorista A	94	-11	34	0	60	-11
Laboratorista B	110	5	30	-4	80	9
Laboratorista C	102	-3	35	1	67	-4
Laboratorista D	108	3	34	0	74	3
Autor	111	6	36	2	75	4
$\bar{X} =$	105		34		71	
Arcilla de baja plasticidad						
Laboratorista A	33	0	23	0	10	1
Laboratorista B	33	0	23	0	10	1
Laboratorista C	33	0	24	1	9	0
Laboratorista D	31	-2	22	-1	9	0
Autor	33	0	25	2	8	-1
$\bar{X} =$	33		23		9	

Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. Los resultados muestran que para los suelos nacionales se puede encontrar el límite líquido a partir del penetrómetro de cono con resultados muy confiables mientras el límite líquido tenga un valor menor a 100%, mostrando un intervalo de confianza con una diferencia máxima de 2% en contenido de humedad respecto a los resultados obtenidos por la norma ASTM, luego de aplicar un factor de corrección que deja la ecuación final de la siguiente forma:

$$LL_{\text{corregido del cono}} = LL_{\text{cono}} + (LL_{\text{cono}} * 1,05152 - 5,0634)$$

2. El método para encontrar el índice de plasticidad propuesto por Wood y Wroth (1978) es válido para ciertos tipos de arcillas y limos siempre y cuando sean de baja plasticidad (suelos con límite líquido menor a 50), el intervalo de confianza muestra que el 95% de los datos pueden dar una diferencia de 7% en contenido de humedad respecto a la norma ASTM, disminuyendo este error mientras menos plástico sea el suelo y mejorando luego de aplicarle los métodos de corrección mostrados en este informe, dejando la ecuación general final como:

$$IP_{\text{WOOD Y WROTH}} = \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{0,606}$$

Y, para  $IP_{\text{WOOD Y WROTH}} > 10$ ,

$$IP_{\text{WOOD Y WROTH FINAL}} = IP_{\text{WOOD Y WROTH}} * \log_{10}(IP_{\text{WOOD Y WROTH}})$$

3. Para los métodos de Belviso y Ciampoli (1985) no fue posible encontrar un factor de corrección que mejorara los resultados de manera que los hiciera lo suficientemente confiables como para utilizarlo como un método que dé resultados comparables con los obtenidos con la norma ASTM.
4. Para el método de obtención del límite plástico por el índice de fluidez se encontró que era válido para un cierto porcentaje de suelos sin poder restringirlo en un rango de humedades del límite líquido, esto refleja que el método es aplicable para ciertos tipos de arcillas y limos plásticos, lo que podría tener relación también con el origen geológico del suelo, por lo que se propone a futuro realizar un estudio más detallado al respecto, sectorizando áreas del territorio nacional según el evento geológico formador del suelo o intentar aplicar el método en otros países con formaciones de suelo menos variadas.
5. Aunque la repetitividad de los resultados se incrementa, el tiempo requerido para realizar los ensayos con el penetrómetro de cono se incrementa, mayormente a razón de la cantidad de suelo que se usa en este el ensayo y la dificultad de mezclarlo, lo cual también crea problemas en casos en los que no se puede recuperar mucha muestra en la campaña de prospección.
6. En los ensayos con el penetrómetro de cono para suelos poco plásticos se mejora la trabajabilidad ya que para este rango de plasticidades el ranurado en el ensayo en la copa de Casagrande y la realización de los cilindros para el límite plástico por la norma ASTM requieren mayor experiencia y pericia por parte del operador.



7. La comparación de la variabilidad de resultados que se puede obtener de una muestra de suelo bajo los métodos controlados, con usuarios experimentados, usando la norma ASTM denota que estos índices deben de ser utilizados como parámetros guías de la plasticidad, en vez de idealizarlos como valores específicos únicos, incrementándose este rango de variabilidad de manera proporcional a la humedad del suelo estudiado.
8. Guatemala posee una gran variedad de suelos con distintas características por su origen geológico, lo que hace muy difícil generar constantes en los métodos estudiados que abarquen el rango completo de limos, arcillas y sus posibles combinaciones, aunque se observa que en la mayoría de los métodos para las arcillas y limos de baja plasticidad se logra mejores resultados, mostrando también que para los suelos de alta plasticidad, al igual que con el método de la norma ASTM se incrementa la variabilidad de resultados que se pueden obtener.
9. Inicialmente el método de Wood y Wroth (1978) y el método de Belviso y Ciampoli (1985) se fundamentan en la existencia de una relación única entre el esfuerzo al corte al límite plástico y al límite líquido de cien, relación que fue encontrada experimentalmente para arcillas, pero para el desarrollo de este trabajo de investigación se usaron limos y arcillas de baja y alta plasticidad, suelos en los que luego de aplicar los métodos originales propuestos brindaron resultados insatisfactorios, mostrando que la constante de cien no podía ser aplicada en suelos guatemaltecos.

10. Con base en los resultados experimentales encontrados por Wijeyakulasuriya (1990) para suelos kaoliniticos de mediana compresibilidad se optó por desarrollar la tabla XVIII de este informe, donde el factor denominado "X" muestra la relación existente entre el esfuerzo de corte al límite líquido y plástico en suelos guatemaltecos, mostrando que esta relación para las muestras ensayadas con el penetrómetro de cono se encontraba en un rango de 2 a 607, mostrando un rango más restringido para suelos con límite líquidos menores a 45 (arcillas y limos de baja plasticidad) quedando entre 2 y 10, esto probablemente debido a que la variedad de limos y arcillas en este rango es menor.
  
11. El método de Casagrande puede generar resultados de límite líquido en los que el suelo no alcanza el esfuerzo de corte esperado (1,7 a 2.3 kpa), ya que al ser un método de percusión puede provocar una falla por licuefacción en el suelo, explicando también la diferencia existente entre los resultados de límites líquidos bajos obtenidos con el método de la norma inglesa BS 1377 y los de la norma ASTM D4318 mostrados en la figura 34 de este trabajo de investigación y en los resultados obtenidos por Sowers (1959) mostrados en la figura 33.

## RECOMENDACIONES

1. Se deberán realizar más ensayos en lugares específicos de la República con el fin de establecer si se puede determinar constantes de corrección por región para los métodos estudiados.
2. Para todos los métodos expuestos en este informe se debería realizar una revisión de las constantes de modo experimental en cada región donde se intente aplicarlos, puesto que esto mejoraría en sobremanera los resultados.
3. La certeza y repetitividad en la determinación de límites de Atterberg con el penetrómetro de cono depende de varios factores, por lo que se debe procurar limpiar el aparato cada cierto tiempo, así como verificar el centrado y verticalidad del mismo.
4. Revisar el cono utilizado en el ensayo según lo muestra la norma BS 1377, ya que si alguna de estas variables cambia, los resultados del ensayo cambiarían.
5. De correo electrónico personal, Das, B. (2012) expresó mayor confianza en el método de Wood y Wroth (1978) para encontrar el límite líquido y el límite plástico en un solo ensayo, proponiendo una modificación al ensayo propuesto originalmente, dado que si se puede obtener con un cono de 80 gf el límite líquido y con uno de 240 gf el límite plástico, si se realizaran varios ensayos a varios contenidos de humedad con los dos conos antes mencionados y otro de 150 gf se podría hacer tablas, en las que se podría interpolar a partir de un solo ensayo con un cono de 150 gf el límite líquido y el límite plástico.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AL-DAHLAKI, Mohammed Hussein; AL-SHARIFY, Ghiath A. “A Proposed Approach for Plastic Limit Determination Using the Drop Cone Penetrometer Device”. Al-Mustansiriya University, *Journal of Engineering and Development*, vol. 12, No. 1, ISSN 1813-7822. (Marzo 2008)117 p.
2. BELVISO, R.; CIAMPOLI, S.; COTECCHIA, V. “Use of the Cone Penetrometer to Determine Consistency Limits”. *Ground Engineering*, vol. 18, núm. 5 (1985) 22 p.
3. BIZARRETA ORTEGA, Julio César. *EL Penetrómetro del cono como una alternativa para determinar el límite líquido – experiencias*. Cusco, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 2002. 15 p.
4. HARISON, J. A.; WIJEYAKULASURIYA, C. V. “Discussion: using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils”. *Geotechnique* 40, núm. 2, 315 p.
5. JIMÉNEZ SALAS, J. A.; DE JUSTO ALPAÑES, J. L. *Geotecnia y cimientos I, Propiedades de los suelos y de las rocas*. 2ª. ed. Madrid: Rueda, 1975. 466 p.
6. LANDRIS, T., et al. “Dual-Weight Fall Cone Method for Simultaneous Liquid and Plastic Limit Determination”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009, ASCE, vol. 135, núm. 1, ISSN 1090-0241/2009/1, 161 p.

7. LANGHAAR, H. L. *Dimensional analysis and Theory of Models*. New York: John Wiley & Sons. 1951. 166 p.
8. LEROUEIL, S.; LE BIHAN, J. P. "Liquid Limits and Fall Cones " *Canadian Geotechnical Journal*. 1996. vol. 33, 798 p.
9. MURTHY, V. N. S. *Geotechnical Engineering, Principles and practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. USA: CRC Press, 2002. 1029 p.
10. RASHID, B. A.; safuan, a. *Determination of plastic limit of soil using modified cone penetration method*. Universidad Tecnológica de Malasia, Facultad de ingeniería, 2005. 99 p.
11. SCHOFIELD, A.; WROTH, P. *Critical state soil mechanics*. New York. McGraw-Hill, 1968. 310 p.
12. SRIDHARAN, A.; PRAKASH, K. "Liquid Limits and Fall Cones: Discussion". *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 35, 1998. 408 p.
13. TERZAGHI, K.; PECK, R. B. *Soil mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley & Sons, 1968. 592 p.
14. WOOD, D. M.; WROTH, C. P. *Use of the Cone Penetrometer o Determine Consistency Limits*. *Ground Engineering*, 1978. vol. 11, No. 3, 37 p.

## **APÉNDICES**

**Formulario de ensayo, muestra 1**



UBICACIÓN		LA LIBERTAD, PETÉN						FECHA		10/02/2010			MUESTRA						
% - 200		15.9		% - 40		20.6		CLASIF.		GC			NÚMERO						
													1						
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
		LL			26			LP			19			IP			7		
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,4	5,3	0	5,5	5,5	0	5,4	5,5	0
LECT. FINAL (mm)		13,8	13,6	0	21,2	21,7	0	24	24,2	0	30,4	30,2	0	41,7	41,6	0	24,1	24,1	0
DIFERENCIA (mm)		13,8	13,6	0,0	21,2	21,7	0,0	24,0	24,2	0,0	25,0	24,9	0,0	36,2	36,1	0,0	18,7	18,6	0,0
P. MEDIA (mm)		13,7			21,5			24,1			25,0			36,2			18,7		
TARRO		L-71			L-51			H-13			L-43			L-78			L-32		
PBH (g)		40,31			43,39			50,27			39,79			41,63			41,09		
PBS (g)		38,17			40,54			45,82			37,92			39,35			39,35		
TARA (g)		30,03			30,99			31,67			30,70			31,50			31,83		
DIF (g)		2,14			2,85			4,45			1,87			2,28			1,74		
PNS (g)		8,14			9,55			14,15			7,22			7,85			7,52		
%W (g)		26,3%			29,8%			31,4%			25,9%			29,0%			23,1%		

LL= 30

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 24$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 11$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

fuelle: elaboración propia.

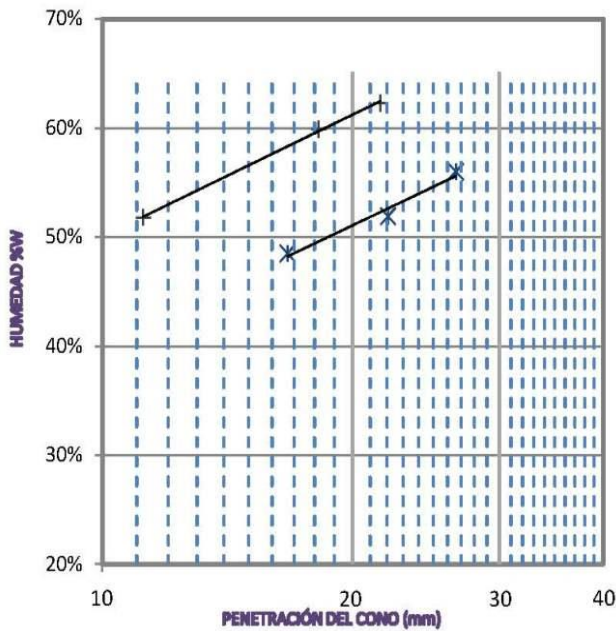
## Formulario de ensayo, muestra 2

UBICACIÓN	QUETZALTEPEQUE, CHIQUIMULA		FECHA	22/02/2010		MUESTRA NÚMERO 2
% - 200	85.8	%	% - 40	95.1	%	
CLASIF.	CH					

**RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318**

LL 62 LP 26 IP 36

CONO	80 g									240 g								
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,3	5,4	0	5,4	5,4	0	5,5	5,5	0
LECT. FINAL (mm)	11,3	11,1	0	18	18,4	0	21,8	21,4	0	21,8	22,3	0	27,7	27,2	0	32,2	32	0
DIFERENCIA (mm)	11,3	11,1	0,0	18,0	18,4	0,0	21,8	21,4	0,0	16,5	16,9	0,0	22,3	21,8	0,0	26,7	26,5	0,0
P. MEDIA (mm)	11,2			18,2			21,6			16,7			22,1			26,6		
TARRO	H-59			L-25			L-74			L-48			H-73			L-33		
PBH (g)	33,54			37,39			36,75			35,22			35,98			37,13		
PBS (g)	32,22			35,30			34,82			33,76			34,06			35,23		
TARA (g)	29,67			31,81			31,72			30,75			30,36			31,84		
DIF (g)	1,32			2,09			1,93			1,46			1,92			1,90		
PNS (g)	2,55			3,49			3,10			3,01			3,70			3,39		
%W (g)	51,8%			59,9%			62,3%			48,5%			51,9%			56,0%		



LL = 61

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 43$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 20$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 3

UBICACIÓN		SALAMÁ, BAJA VERAPAZ						FECHA		15/02/2010			MUESTRA NÚMERO 3					
% - 200		68.2		% - 40		99.9		CLASIF.		ML								
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																		
LL		24			LP			21			IP			3				
CONO	80 g									240 g								
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5	0	5,5	5,4	0	5,5	5,5	0
LECT. FINAL (mm)	12,9	12,8	0	21,1	21,1	0	25,4	25	0	20,7	20,9	0	29,3	29,7	0	34,1	34,3	0
DIFERENCIA (mm)	12,9	12,8	0,0	21,1	21,1	0,0	25,4	25,0	0,0	15,2	15,4	0,0	23,8	24,3	0,0	28,6	28,8	0,0
P. MEDIA (mm)	12,9			21,1			25,2			15,3			24,1			28,7		
TARRO	H-53			L-54			H-67			H-71			H-37			L-32		
PBH (g)	33,54			34,03			35,08			33,32			34,03			35,33		
PBS (g)	32,98			33,33			33,89			32,71			33,58			34,59		
TARA (g)	30,83			30,83			30,07			29,99			31,86			31,83		
DIF (g)	0,56			0,70			1,19			0,61			0,45			0,74		
PNS (g)	2,15			2,50			3,82			2,72			1,72			2,76		
%W (g)	26,0%			28,0%			31,2%			22,4%			26,2%			26,8%		

PENETRACIÓN DEL CONO (mm)

LL = 29

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 18$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 9$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

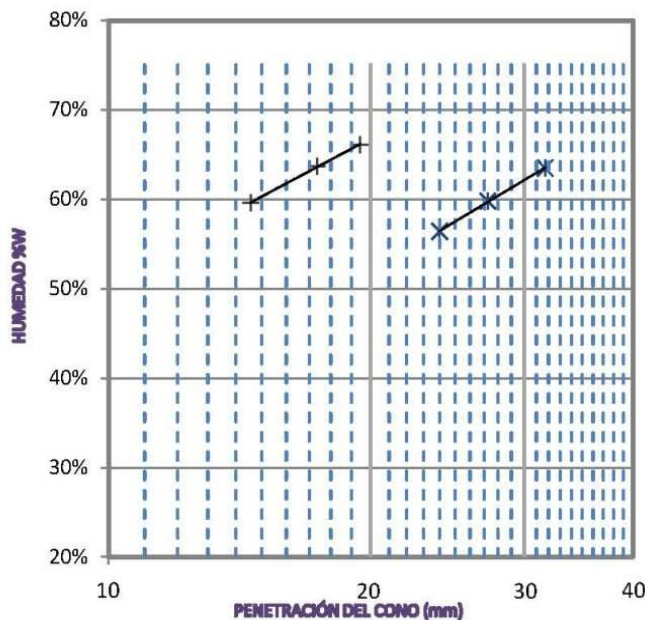
### Formulario de ensayo, muestra 4

UBICACIÓN	COBÁN, ALTA VERAPAZ				FECHA	12/02/2010	MUESTRA NÚMERO 4
% - 200	96.8	%	% - 40	100.0	CLASIF.	CH	

**RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318**

LL 57      LP 25      IP 32

CONO	80 g									240 g								
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,6	5,7	0	5,6	5,7	0	5,5	5,5	5,5
LECT. FINAL (mm)	14,6	15,1	14	17,6	17,1	0	19,3	19,6	0	37,1	37,6	0	32,8	33	0	30	29,2	29,3
DIFERENCIA (mm)	14,6	15,1	14,0	17,6	17,1	0,0	19,3	19,6	0,0	31,5	31,9	0,0	27,2	27,3	0,0	24,5	23,7	23,8
P. MEDIA (mm)	14,6			17,4			19,5			31,7			27,3			24,0		
TARRO	H-48			L-32			H-78			H-49			L-5			L-68		
PBH (g)	33,50			38,18			37,25			38,16			37,09			35,72		
PBS (g)	32,51			35,71			35,01			35,32			35,08			33,52		
TARA (g)	30,85			31,83			31,62			30,85			31,72			29,62		
DIF (g)	0,99			2,47			2,24			2,84			2,01			2,20		
PNS (g)	1,66			3,88			3,39			4,47			3,36			3,90		
%W (g)	59,6%			63,7%			66,1%			63,5%			59,8%			56,4%		



LL = 67

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 63$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 27$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

**Formulario de ensayo, muestra 5**

UBICACIÓN		CA 1 , Km 12, GUATEMALA, GUATEMALA						FECHA		12/02/2010			MUESTRA NÚMERO 5					
% - 200		83.0 %			% - 40			100.0 %			CLASIF.					MH		
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																		
LL		47			LP			27			IP			20				
CONO	80 g									240 g								
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5	0	5,4	5,4	0	5,5	5,5	0
LECT. FINAL (mm)	10,9	11,3	0	20	19,9	0	25,7	25,2	0	17,1	16,7	0	24,7	24,9	0	34,4	34,9	0
DIFERENCIA (mm)	10,9	11,3	0,0	20,0	19,9	0,0	25,7	25,2	0,0	11,6	11,2	0,0	19,3	19,5	0,0	28,9	29,4	0,0
P. MEDIA (mm)	11,1			20,0			25,5			11,4			19,4			29,2		
TARRO	H-26			H-5			H-56			L-60			H-73			H-12		
PBH (g)	37,49			39,10			39,20			35,79			33,21			37,30		
PBS (g)	35,73			36,52			35,65			34,43			32,37			35,55		
TARA (g)	31,61			31,87			29,75			30,20			30,36			32,05		
DIF (g)	1,76			2,58			3,55			1,36			0,84			1,75		
PNS (g)	4,12			4,65			5,90			4,23			2,01			3,50		
%W (g)	42,7%			55,5%			60,2%			32,2%			41,8%			50,0%		
LL = <u>55</u>																		
<b>ÍNDICES DE PLASTICIDAD</b> WOOD & WROTH																		
$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 53$																		
W <sub>80</sub> : W% cono 80g W <sub>240</sub> : W% cono 240g para d=20mm																		
<b>BELVISO &amp; CIAMPOLI</b>																		
$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 26$																		
W <sub>20</sub> : intersección d=20mm W <sub>10</sub> : intersección d=10mm para cono de 80g																		

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 6

UBICACIÓN	CA 40, COTZAL, QUICHÉ	FECHA	10/02/2010	MUESTRA NÚMERO	6													
% - 200	95.1 %	% - 40	100.0 %	CLASIF.	CH													
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																		
LL	61	LP	30	IP	31													
CONO	80 g									240 g								
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,6	5,5	0	5,3	5,3	0	5,4	5,5	0
LECT. FINAL (mm)	13,3	13,2	0	18,1	18,2	0	22,9	23	0	37,4	29,8	0	34,4	35,1	0	23,9	23,5	0
DIFERENCIA (mm)	13,3	13,2	0,0	18,1	18,2	0,0	22,9	23,0	0,0	24,8	24,3	0,0	29,1	29,8	0,0	18,5	18,0	0,0
P. MEDIA (mm)	13,3			18,2			23,0			24,6			29,5			18,3		
TARRO	L-79			L-67			L-10			L-74			H-75			L-18		
PBH (g)	42,77			39,32			45,44			37,31			38,25			36,90		
PBS (g)	38,56			35,65			39,55			35,21			35,63			35,06		
TARA (g)	31,60			30,12			31,67			31,72			31,64			31,54		
DIF (g)	4,21			3,67			5,89			2,10			2,62			1,84		
PNS (g)	6,96			5,53			7,88			3,49			3,99			3,52		
%W (g)	60,5%			66,4%			74,7%			60,2%			65,7%			52,3%		

LL = 70

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 65$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 30$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia

### Formulario de ensayo, muestra 7

UBICACIÓN		U.R.L. QUICHÉ						FECHA		15/02/2010			MUESTRA						
% - 200		84.2		% - 40		97.4		CLASIF.		ML			NÚMERO						
											7								
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
		LL			37			LP			26			IP			10		
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,4	5,4	5,4	5,4	5,5	5,4	5,5	5,5	0
LECT. FINAL (mm)		16,9	16,9	0	19,8	19,8	0	27,7	27,3	0	27,1	27,9	28	36,8	37,6	37	24,2	23,7	0
DIFERENCIA (mm)		16,9	16,9	0,0	19,8	19,8	0,0	27,7	27,3	0,0	21,7	22,5	22,6	31,4	32,1	31,6	18,7	18,2	0,0
P. MEDIA (mm)		16,9			19,8			27,5			22,3			31,7			18,5		
TARRO		L-8			L-72			H-8			H-39			L-40			L-32		
PBH (g)		35,78			33,90			38,36			35,83			36,11			35,77		
PBS (g)		34,62			32,79			36,35			34,87			34,90			34,80		
TARA (g)		31,54			29,92			31,71			32,07			31,71			31,83		
DIF (g)		1,16			1,11			2,01			0,96			1,21			0,97		
PNS (g)		3,08			2,87			4,64			2,80			3,19			2,97		
%W (g)		37,7%			38,7%			43,3%			34,3%			37,9%			32,7%		

		<p>LL= <u>39</u></p> <p>ÍNDICES DE PLASTICIDAD WOOD &amp; WROTH</p> $\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 25$ <p>W<sub>80</sub>: W% cono 80g W<sub>240</sub>: W% cono 240g para d=20mm</p> <p>BELVISO &amp; CIAMPOLI</p> $\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 15$ <p>W<sub>20</sub>: intersección d=20mm W<sub>10</sub>: intersección d=10mm para cono de 80g</p>
--	--	--

Fuente: elaboración propia.

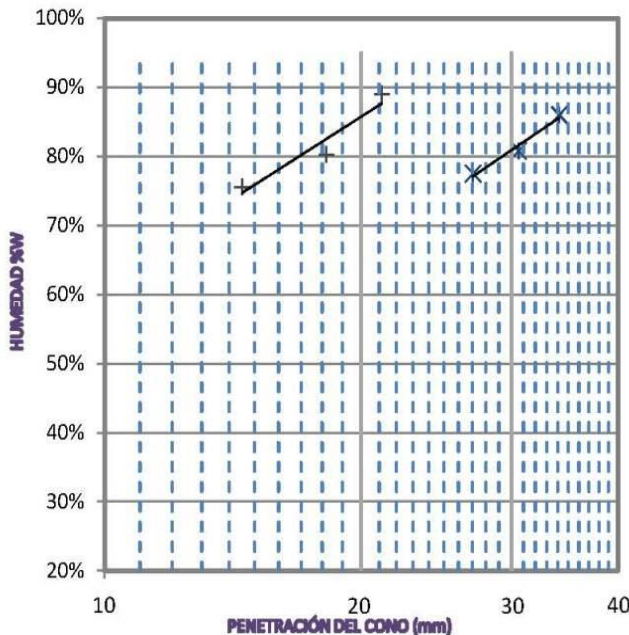
### Formulario de ensayo, muestra 8

UBICACIÓN	ARRAZOLA, FRAIJANES, GUATEMALA				FECHA	16/02/2010		MUESTRA
% - 200	98,6	%	% - 40	100,0	CLASIF.	MH		NÚMERO
								8

**RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318**

LL 89 LP 49 IP 40

CONO	80 g									240 g								
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5	0	5,5	5,5	0	5,5	5,5	0
LECT. FINAL (mm)	14,5	14,5	0	18,4	18	0	21	21,3	0	32,3	32,8	0	36,2	36	0	39,8	39,5	0
DIFERENCIA (mm)	14,5	14,5	0,0	18,4	18,0	0,0	21,0	21,3	0,0	26,8	27,3	0,0	30,7	30,5	0,0	34,3	34,0	0,0
P. MEDIA (mm)	14,5			18,2			21,2			27,1			30,6			34,2		
TARRO	H-79			L-18			H-75			H-81			L-22			H-13		
PBH (g)	33,68			34,84			34,55			34,10			34,31			34,33		
PBS (g)	32,66			33,37			33,18			33,10			33,09			33,10		
TARA (g)	31,31			31,54			31,64			31,81			31,58			31,67		
DIF (g)	1,02			1,47			1,37			1,00			1,22			1,23		
PNS (g)	1,35			1,83			1,54			1,29			1,51			1,43		
%W (g)	75,6%			80,3%			89,0%			77,5%			80,8%			86,0%		



LL= 86

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 82$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 38$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

**Formulario de ensayo, muestra 9**



UBICACIÓN	CA 58, COTZAL, QUICHÉ	FECHA	23/02/2010	MUESTRA NÚMERO	9													
% - 200	92.0 %	% - 40	100.0 %	CLASIF.	CL													
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																		
LL	32	LP	22	IP	10													
CONO	80 g						240 g											
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,3	0	5,4	5,4	5,5	5,4	5,4	0
LECT. FINAL (mm)	10,8	10,5	9,6	20,7	21,1	0	30,5	30,6	0	24,5	24,2	0	21,9	21,3	22,1	28,2	28,6	0
DIFERENCIA (mm)	10,8	10,5	9,6	20,7	21,1	0,0	30,5	30,6	0,0	19,0	18,9	0,0	16,5	15,9	16,6	22,8	23,2	0,0
P. MEDIA (mm)	10,3			20,9			30,6			19,0			16,3			23,0		
TARRO	H-7			H-36			L-39			H-26			H.33			L-81		
PBH (g)	32,99			34,78			36,21			33,84			34,89			34,47		
PBS (g)	32,73			33,82			34,82			33,32			34,22			33,78		
TARA (g)	31,78			31,30			31,60			31,61			31,84			31,67		
DIF (g)	0,26			0,96			1,39			0,52			0,67			0,69		
PNS (g)	0,95			2,52			3,22			1,71			2,38			2,11		
%W (g)	27,4%			38,1%			43,2%			30,4%			28,2%			32,7%		

**LL = 37**

**ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH**

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 26$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

**BELVISO & CIAMPOLI**

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 19$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 10

UBICACIÓN		CIUDAD VIEJA, SACATEPEQUEZ						FECHA		23/02/2010			MUESTRA						
% - 200		29.2		%		% - 40		51.0		%		CLASIF.		SM organico		NÚMERO			
																10			
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
		LL			36			LP			32			IP			4		
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,4	5,5	0	5,5	5,5	5,4	5,4	5,5	5,4
LECT. FINAL (mm)		17,4	17,5	0	24,7	24,2	0	26,5	27,3	27	27,8	27,3	0	38,1	37,1	37,7	31,3	31,9	31,7
DIFERENCIA (mm)		17,4	17,5	0,0	24,7	24,2	0,0	26,5	27,3	27,0	22,4	21,8	0,0	32,6	31,6	32,3	25,9	26,4	26,3
P. MEDIA (mm)		17,5			24,5			26,9			22,1			32,2			26,2		
TARRO		L-52			L-37			L-75			H-78			H-22			H-59		
PBH (g)		33,40			33,71			37,31			33,91			34,68			33,01		
PBS (g)		32,73			33,19			35,77			33,35			33,93			32,18		
TARA (g)		30,75			31,67			31,44			31,62			31,68			29,67		
DIF (g)		0,67			0,52			1,54			0,56			0,75			0,83		
PNS (g)		1,98			1,52			4,33			1,73			2,25			2,51		
%W (g)		33,8%			34,2%			35,6%			32,4%			33,3%			33,1%		

LL= 34

**ÍNDICES DE PLASTICIDAD**  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 8$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 4$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 11

UBICACIÓN		MAZATENANGO, SUCHITEPEQUEZ						FECHA		26/02/2010			MUESTRA NÚMERO 11						
% - 200		83.2 %		% - 40		100.0 %		CLASIF.		ML									
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
LL		66			LP			63			IP			3					
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5	0	5,6	5,6	0	5,6	5,6	0
LECT. FINAL (mm)		16,5	16,6	0	24,1	24,1	0	36,3	35,3	35,7	38,9	39	0	17,7	17,2	0	20,7	20,7	0
DIFERENCIA (mm)		16,5	16,6	0,0	24,1	24,1	0,0	36,3	35,3	35,7	33,4	33,5	0,0	12,1	11,6	0,0	15,1	15,1	0,0
P. MEDIA (mm)		16,6			24,1			35,8			33,5			11,9			15,1		
TARRO		H-61			L-55			L-1			L-59			H-82			L-11		
PBH (g)		31,10			31,26			34,75			32,30			33,50			33,31		
PBS (g)		30,56			30,65			33,56			31,36			32,78			32,59		
TARA (g)		29,76			29,78			31,90			30,02			31,64			31,48		
DIF (g)		0,54			0,61			1,19			0,94			0,72			0,72		
PNS (g)		0,80			0,87			1,66			1,34			1,14			1,11		
%W (g)		67,5%			70,1%			71,7%			70,1%			63,2%			64,9%		

LL = 69

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 8$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 7$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 12

UBICACIÓN		SALAMÁ, BAJA VERAPAZ						FECHA		26/02/2010			MUESTRA						
% - 200		81.9		%		% - 40		100.0		%		CLASIF.		CL		NÚMERO			
																12			
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
LL		48			LP			25			IP			23					
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5	0	5,6	5,5	5,6	5,6	5,6	0
LECT. FINAL (mm)		14,5	14,2	0	17,3	17,8	0	21	21	0	19	19,4	0	20,9	20,1	20,3	31,4	31,2	0
DIFERENCIA (mm)		14,5	14,2	0,0	17,3	17,8	0,0	21,0	21,0	0,0	13,5	13,9	0,0	15,3	14,6	14,7	25,8	25,6	0,0
P. MEDIA (mm)		14,4			17,6			21,0			13,7			14,9			25,7		
TARRO		L-47			L-69			H-29			H-49			L-35			H-35		
PBH (g)		34,60			32,40			37,22			33,39			35,09			34,81		
PBS (g)		33,44			31,50			35,36			32,70			34,08			33,84		
TARA (g)		30,88			29,70			31,76			30,85			31,45			31,76		
DIF (g)		1,16			0,90			1,86			0,69			1,01			0,97		
PNS (g)		2,56			1,80			3,60			1,85			2,63			2,08		
%W (g)		45,3%			50,0%			51,7%			37,3%			38,4%			46,6%		

LL= 51

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 36$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 21$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 13

UBICACIÓN		PARCELAMIENTO LOS ANGELES, ESCUINTLA						FECHA		08/03/2010			MUESTRA						
% - 200		74.7		%		% - 40		100.0		%		CLASIF.		ML		NÚMERO			
														13					
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
		LL			38			LP			27			IP			11		
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,4	5,4	0	5,4	5,3	0	5,4	5,3	0
LECT. FINAL (mm)		15,6	14,4	15	20,2	20,5	0	24,6	25	0	19,7	19,2	0	26,9	27,2	0	33,2	33,2	0
DIFERENCIA (mm)		15,6	14,4	15,0	20,2	20,5	0,0	24,6	25,0	0,0	14,3	13,8	0,0	21,5	21,9	0,0	27,8	27,9	0,0
P. MEDIA (mm)		15,0			20,4			24,8			14,1			21,7			27,9		
TARRO		H-20			L-70			H-76			L-52			H-48			L-44		
PBH (g)		34,22			33,52			34,99			33,50			33,53			33,62		
PBS (g)		33,44			32,55			33,87			32,79			32,79			32,83		
TARA (g)		31,57			30,32			31,43			30,75			30,85			30,84		
DIF (g)		0,78			0,97			1,12			0,71			0,74			0,79		
PNS (g)		1,87			2,23			2,44			2,04			1,94			1,99		
%W (g)		41,7%			43,5%			45,9%			34,8%			38,1%			39,7%		
																	LL= <u>44</u>		
		<p style="text-align: center;">ÍNDICES DE PLASTICIDAD WOOD &amp; WROTH</p> $\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 27$ <p style="text-align: center;">W<sub>80</sub>: W% cono 80g W<sub>240</sub>: W% cono 240g para d=20mm</p> <p style="text-align: center;">BELVISO &amp; CIAMPOLI</p> $\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 11$ <p style="text-align: center;">W<sub>20</sub>: intersección d=20mm W<sub>10</sub>: intersección d=10mm para cono de 80g</p>																	

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 14

UBICACIÓN		BARBERENA, SANTA ROSA						FECHA		17/03/2010			MUESTRA NÚMERO 14						
% - 200		89.0		%		% - 40		97.4		%		CLASIF.				MH			
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
		LL			68			LP			32			IP			36		
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5	0	5,5	5,6	0	5,4	5,6	0
LECT. FINAL (mm)		12,6	13	0	21,2	20,9	0	26,3	26,4	0	16,7	16,9	0	19,6	19,5	0	22,5	22,7	0
DIFERENCIA (mm)		12,6	13,0	0,0	21,2	20,9	0,0	26,3	26,4	0,0	11,2	11,4	0,0	14,1	13,9	0,0	17,1	17,1	0,0
P. MEDIA (mm)		12,8			21,1			26,4			11,3			14,0			17,1		
TARRO		H-64			H-69			H-26			H-38			H-31			L-36		
PBH (g)		33,11			32,60			34,37			33,10			33,29			34,12		
PBS (g)		32,24			31,35			33,11			32,64			32,74			33,36		
TARA (g)		30,65			29,68			31,61			31,56			31,58			31,96		
DIF (g)		0,87			1,25			1,26			0,46			0,55			0,76		
PNS (g)		1,59			1,67			1,50			1,08			1,16			1,40		
%W (g)		54,7%			74,9%			84,0%			42,6%			47,4%			54,3%		
		<p style="text-align: center;">LL = <u>73</u></p> <p style="text-align: center;">ÍNDICES DE PLASTICIDAD WOOD &amp; WROTH</p> $\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 61$ <p style="text-align: center;">W<sub>80</sub>: W% cono 80g W<sub>240</sub>: W% cono 240g para d=20mm</p> <p style="text-align: center;">BELVISO &amp; CIAMPOLI</p> $\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 43$ <p style="text-align: center;">W<sub>20</sub>: intersección d=20mm W<sub>10</sub>: intersección d=10mm para cono de 80g</p>																	

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 15

UBICACIÓN		LAS CHARCAS, GUATEMALA						FECHA		01/03/2010			MUESTRA NÚMERO			15			
% - 200		82.8		%		% - 40		100.0		%		CLASIF.		MH					
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
LL		73			LP			34			IP			39					
CONO	80 g									240 g									
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,4	5,4	0	5,4	5,5	0	5,4	5,6	0	
LECT. FINAL (mm)	14,2	14,4	0	19,6	19,4	0	25,8	25,7	0	16,6	16,9	0	20,1	19,8	0	26,4	26,5	0	
DIFERENCIA (mm)	14,2	14,4	0,0	19,6	19,4	0,0	25,8	25,7	0,0	11,2	11,5	0,0	14,7	14,3	0,0	21,0	20,9	0,0	
P. MEDIA (mm)	14,3			19,5			25,8			11,4			14,5			21,0			
TARRO	L-39			H-39			H-40			L-68			L-70			L-22			
PBH (g)	34,21			35,71			34,22			31,15			32,00			34,22			
PBS (g)	33,27			34,25			32,95			30,70			31,47			33,33			
TARA (g)	31,60			32,07			31,25			29,62			30,32			31,58			
DIF (g)	0,94			1,46			1,27			0,45			0,53			0,89			
PNS (g)	1,67			2,18			1,70			1,08			1,15			1,75			
%W (g)	56,3%			67,0%			74,7%			41,7%			46,1%			50,9%			
										<p style="text-align: center;">LL = <u>67</u></p> <p style="text-align: center;">ÍNDICES DE PLASTICIDAD WOOD &amp; WROTH</p> $\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 70$ <p style="text-align: center;">W<sub>80</sub>: W% cono 80g W<sub>240</sub>: W% cono 240g para d=20mm</p> <p style="text-align: center;">BELVISO &amp; CIAMPOLI</p> $\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 36$ <p style="text-align: center;">W<sub>20</sub>: intersección d=20mm W<sub>10</sub>: intersección d=10mm para cono de 80g</p>									

Fuente: Elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 16

UBICACIÓN		ESCUINTLA, ESCUINTLA, LAS PALMAS II							FECHA		01/03/2010			MUESTRA NÚMERO 16					
% - 200		66.1		%		% - 40		100.0		%		CLASIF.					ML		
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
LL		47			LP			43			IP			4					
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,3	5,5	0	5,6	5,4	0	5,5	5,4	0
LECT. FINAL (mm)		12,2	12,2	0	18,2	18,1	0	32,8	33,3	0	27,9	28,1	0	19,4	19,3	0	34,4	34,1	0
DIFERENCIA (mm)		12,2	12,2	0,0	18,2	18,1	0,0	32,8	33,3	0,0	22,6	22,6	0,0	13,8	13,9	0,0	28,9	28,7	0,0
P. MEDIA (mm)		12,2			18,2			33,1			22,6			13,9			28,8		
TARRO		H-28			H-30			H-14			L-57			L-43			L-42		
PBH (g)		33,96			34,62			38,23			33,99			32,99			32,75		
PBS (g)		33,23			33,66			36,07			32,72			32,33			32,35		
TARA (g)		31,47			31,46			31,78			29,77			30,70			31,48		
DIF (g)		0,73			0,96			2,16			1,27			0,66			0,40		
PNS (g)		1,76			2,20			4,29			2,95			1,63			0,87		
%W (g)		41,5%			43,6%			50,3%			43,1%			40,5%			46,0%		

LL= 45

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 10$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 12$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 17



UBICACIÓN	SAN ANTONIO LAS FLORES, CHIMALTENANGO	FECHA	26/03/2010	MUESTRA NÚMERO 17
% - 200	70.0 %	% - 40	92.2 %	CLASIF.
				CH
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>				
	LL	51	LP	28
			IP	23

CONO	80 g									240 g								
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5	0	5,5	5,6	0	5,5	5,4	0
LECT. FINAL (mm)	13,5	13,7	0	17,7	18,3	0	20,4	20,6	0	16,1	16,6	0	23,7	23,9	0	30,5	30,7	0
DIFERENCIA (mm)	13,5	13,7	0,0	17,7	18,3	0,0	20,4	20,6	0,0	10,6	11,1	0,0	18,2	18,3	0,0	25,0	25,3	0,0
P. MEDIA (mm)	13,6			18,0			20,5			10,9			18,3			25,2		
TARRO	H-36			L-25			L-45			L-2			L-74			H-58		
PBH (g)	34,67			38,43			34,56			35,78			36,88			34,20		
PBS (g)	33,66			36,28			33,21			34,83			35,44			32,92		
TARA (g)	31,30			31,81			30,56			31,87			31,72			29,96		
DIF (g)	1,01			2,15			1,35			0,95			1,44			1,28		
PNS (g)	2,36			4,47			2,65			2,96			3,72			2,96		
%W (g)	42,8%			48,1%			50,9%			32,1%			38,7%			43,2%		

LL = 50

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 43$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 24$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 18

UBICACIÓN		SANTA CATARINA PINULA, GUATEMALA						FECHA		26/03/2010			MUESTRA						
% - 200		86.4		%		% - 40		93.7		%		CLASIF.		CH		NÚMERO			
																18			
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
		LL			63			LP			26			IP			37		
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,4	5,4	0	5,3	5,3	0	5,4	5,3	0
LECT. FINAL (mm)		10,4	10,6	0	14,4	14,4	0	19,8	19,5	0	15,7	15,5	0	18,4	18,1	0	20,5	20,3	0
DIFERENCIA (mm)		10,4	10,6	0,0	14,4	14,4	0,0	19,8	19,5	0,0	10,3	10,1	0,0	13,1	12,8	0,0	15,1	15,0	0,0
P. MEDIA (mm)		10,5			14,4			19,7			10,2			13,0			15,1		
TARRO		H-74			H-82			H-16			L-59			L-76			L-58		
PBH (g)		34,93			35,07			36,10			32,51			34,92			32,78		
PBS (g)		33,98			33,89			34,50			31,86			34,01			32,00		
TARA (g)		31,83			31,64			31,85			30,02			31,62			30,09		
DIF (g)		0,95			1,18			1,60			0,65			0,91			0,78		
PNS (g)		2,15			2,25			2,65			1,84			2,39			1,91		
%W (g)		44,2%			52,4%			60,4%			35,3%			38,1%			40,8%		

LL = 61

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 69$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 31$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 19

UBICACIÓN		SANTA ELENA, PETÉN - 9M						FECHA		11/05/2010			MUESTRA NÚMERO			19		
% - 200		96.2 %		% - 40		98.4 %		CLASIF.		CL								
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																		
LL		28			LP			19			IP			9				
CONO	80 g									240 g								
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,4	0	5,5	5,5	0	5,6	5,5	0
LECT. FINAL (mm)	20,1	20	0	24,4	24,4	0	28,5	28,7	0	20	19,8	0	22,5	22,6	0	26,6	26,4	0
DIFERENCIA (mm)	20,1	20,0	0,0	24,4	24,4	0,0	28,5	28,7	0,0	14,5	14,4	0,0	17,0	17,1	0,0	21,0	20,9	0,0
P. MEDIA (mm)	20,1			24,4			28,6			14,5			17,1			21,0		
TARRO	H-58			L-73			H-18			H-69			H-61			L-19		
PBH (g)	35,54			37,82			37,06			32,71			34,65			36,55		
PBS (g)	34,21			36,25			35,72			32,12			33,66			35,49		
TARA (g)	29,96			31,39			31,73			29,68			29,76			31,45		
DIF (g)	1,33			1,57			1,34			0,59			0,99			1,06		
PNS (g)	4,25			4,86			3,99			2,44			3,90			4,04		
%W (g)	31,3%			32,3%			33,6%			24,2%			25,4%			26,2%		
										<b>LL = 31</b> <b>ÍNDICES DE PLASTICIDAD</b> <b>WOOD &amp; WROTH</b> $\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 22$ <p>W<sub>80</sub>: W% cono 80g  W<sub>240</sub>: W% cono 240g  para d=20mm</p> <p>BELVISO &amp; CIAMPOLI  <math display="block">\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 8</math> <p>W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  para cono de 80g</p> </p>								

Fuente: elaboración propia.

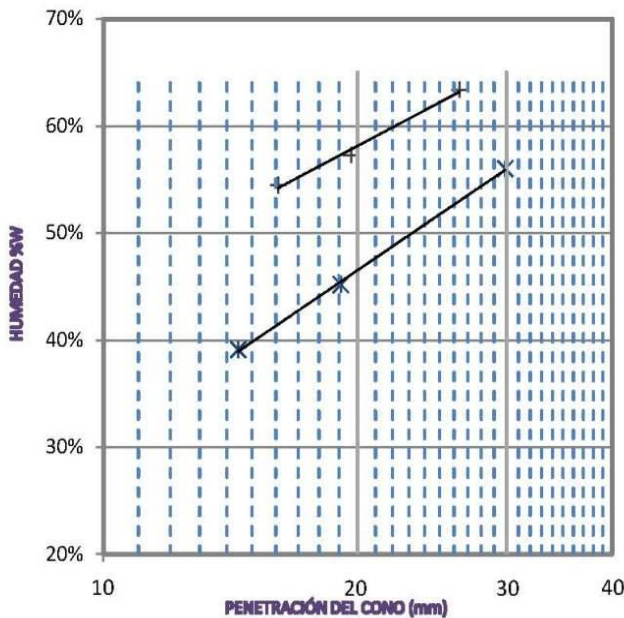
## Formulario de ensayo, muestra 20

UBICACIÓN	SANTA ELENA, PETÉN - 6M		FECHA	23/04/2010		MUESTRA NÚMERO 20	
% - 200	89,5	%	% - 40	91,4	%		CLASIF.

**RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318**

LL 57      LP 23      IP 34

CONO	80 g									240 g								
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,4	5,3	0	5,3	5,5	0	5,3	5,4	0
LECT. FINAL (mm)	15,9	16,3	0	19,6	19,7	0	26,2	26,6	0	20	19,6	0	24,4	24,6	0	35,1	35,4	0
DIFERENCIA (mm)	15,9	16,3	0,0	19,6	19,7	0,0	26,2	26,6	0,0	14,6	14,3	0,0	19,1	19,1	0,0	29,8	30,0	0,0
P. MEDIA (mm)	16,1			19,7			26,4			14,5			19,1			29,9		
TARRO	L-10			L-5			H-23			L-79			L-53			H-77		
PBH (g)	33,88			34,52			34,42			33,38			32,78			34,51		
PBS (g)	33,10			33,50			33,40			32,88			32,21			33,49		
TARA (g)	31,67			31,72			31,79			31,60			30,95			31,67		
DIF (g)	0,78			1,02			1,02			0,50			0,57			1,02		
PNS (g)	1,43			1,78			1,61			1,28			1,26			1,82		
%W (g)	54,5%			57,3%			63,4%			39,1%			45,2%			56,0%		



LL = 58

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 49$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 23$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

## Formulario de ensayo, muestra 21

UBICACIÓN	SANTA ELENA, PETÉN - 14M	FECHA	26/04/2010	MUESTRA NÚMERO	
% - 200	91.4 %	% - 40	96.0 %	CLASIF. CH	
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>					
LL	107	LP	30	IP	77

CONO	80 g									240 g								
PUNTO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,3	5,3	0	5,5	5,4	0	5,4	5,5	0
LECT. FINAL (mm)	17,9	18,2	0	21,1	21,1	0	23,5	23,4	0	21,7	21,6	0	28,1	28,5	0	30,5	30,6	0
DIFERENCIA (mm)	17,9	18,2	0,0	21,1	21,1	0,0	23,5	23,4	0,0	16,4	16,3	0,0	22,6	23,1	0,0	25,1	25,1	0,0
P. MEDIA (mm)	18,1			21,1			23,5			16,4			22,9			25,1		
TARRO	L-10			L-48			L-65			L-13			H-82			L-68		
PBH (g)	33,64			33,47			33,13			33,45			34,38			32,17		
PBS (g)	32,60			32,01			31,74			32,38			32,97			30,84		
TARA (g)	31,67			30,75			30,58			31,25			31,64			29,62		
DIF (g)	1,04			1,46			1,39			1,07			1,41			1,33		
PNS (g)	0,93			1,26			1,16			1,13			1,33			1,22		
%W (g)	111,8%			115,9%			119,8%			94,7%			106,0%			109,0%		

LL = 115

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 56$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 35$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

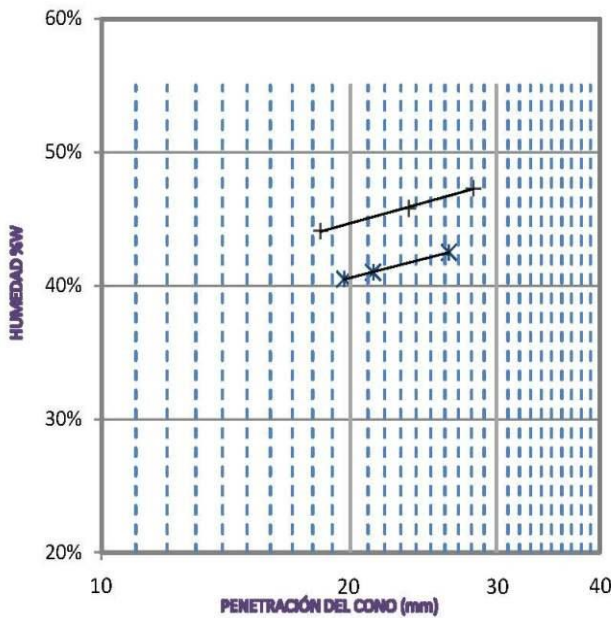
## Formulario de ensayo, muestra 22

UBICACIÓN	QUETZALTENANGO, QUETZALTENANGO		FECHA	11/05/2010		MUESTRA NÚMERO 22	
% - 200	55.8	%	% - 40	81.3	%		CLASIF.

**RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318**

LL 44      LP 37      IP 7

CONO	80 g									240 g								
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,3	5,3	0	5,4	5,3	0	5,3	5,3	0
LECT. FINAL (mm)	18,5	18,3	0	23,6	23,4	0	28,3	28	0	25,1	24,8	0	26,8	26,5	0	31,7	31,5	0
DIFERENCIA (mm)	18,5	18,3	0,0	23,6	23,4	0,0	28,3	28,0	0,0	19,8	19,5	0,0	21,4	21,2	0,0	26,4	26,2	0,0
P. MEDIA (mm)	18,4			23,5			28,2			19,7			21,3			26,3		
TARRO	L-81			L-48			H-22			H-66			H-42			L-40		
PBH (g)	36,54			37,56			38,78			35,21			35,42			36,10		
PBS (g)	35,05			35,42			36,50			33,78			34,32			34,79		
TARA (g)	31,67			30,75			31,68			30,25			31,64			31,71		
DIF (g)	1,49			2,14			2,28			1,43			1,10			1,31		
PNS (g)	3,38			4,67			4,82			3,53			2,68			3,08		
%W (g)	44,1%			45,8%			47,3%			40,5%			41,0%			42,5%		



LL = 45

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 17$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 10$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

**Formulario de ensayo, muestra 23**

UBICACIÓN		SANTA ELENA, PETÉN 0% cal						FECHA		23/04/2010			MUESTRA						
% - 200		99.3		%		% - 40		99.9		%		CLASIF.		CL		NÚMERO			
																23			
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
		LL			47			LP			21			IP			26		
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,3	0	5,3	5,3	0	5,3	5,4	0
LECT. FINAL (mm)		12,3	12,2	0	23,2	23,2	0	29,3	29,4	0	17,2	17,1	0	22,6	22,3	0	27,1	27,6	0
DIFERENCIA (mm)		12,3	12,2	0,0	23,2	23,2	0,0	29,3	29,4	0,0	11,7	11,8	0,0	17,3	17,0	0,0	21,8	22,2	0,0
P. MEDIA (mm)		12,3			23,2			29,4			11,8			17,2			22,0		
TARRO		H-29			L-57			H-37			H-40			L-54			H-37		
PBH (g)		34,31			32,83			38,03			35,95			33,95			35,27		
PBS (g)		33,54			31,76			35,78			34,71			33,05			34,09		
TARA (g)		31,76			29,77			31,86			31,25			30,83			31,44		
DIF (g)		0,77			1,07			2,25			1,24			0,90			1,18		
PNS (g)		1,78			1,99			3,92			3,46			2,22			2,65		
%W (g)		43,3%			53,8%			57,4%			35,8%			40,5%			44,5%		
		<p style="text-align: right;">LL = <u>51</u></p> <p style="text-align: center;"><b>ÍNDICES DE PLASTICIDAD</b> WOOD &amp; WROTH</p> $\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 35$ <p style="text-align: center;">W<sub>80</sub>: W% cono 80g W<sub>240</sub>: W% cono 240g para d=20mm</p> <p style="text-align: center;">BELVISO &amp; CIAMPOLI</p> $\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 20$ <p style="text-align: center;">W<sub>20</sub>: intersección d=20mm W<sub>10</sub>: intersección d=10mm para cono de 80g</p>																	

Fuente: elaboración propia.

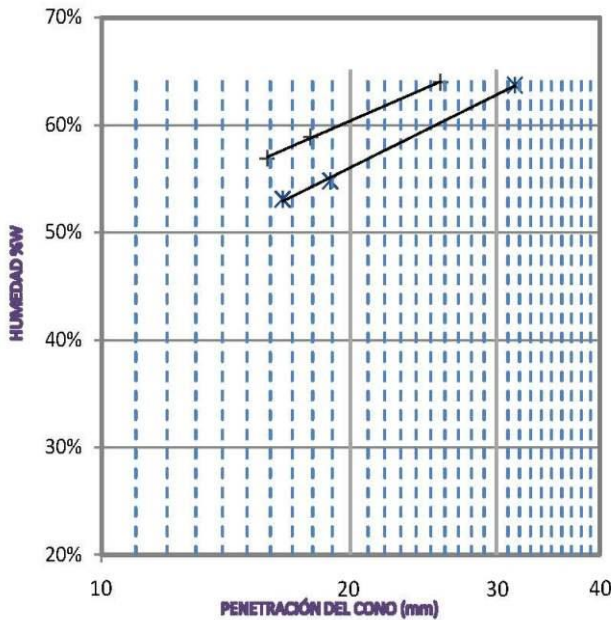
### Formulario de ensayo, muestra 24

UBICACIÓN	SANTA ELENA, PETÉN 4% cal			FECHA	26/04/2010	MUESTRA NÚMERO 24	
% - 200	99.3	%	% - 40	99.9	%		CLASIF.

**RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318**

LL 56      LP 41      IP 15

CONO	80 g									240 g								
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,4	5,5	0	5,5	5,5	0	5,4	5,5	0
LECT. FINAL (mm)	15,9	15,8	0	17,9	17,9	0	25,8	25,6	0	21,9	22,1	0	24,2	24,6	0	36,9	37,2	0
DIFERENCIA (mm)	15,9	15,8	0,0	17,9	17,9	0,0	25,8	25,6	0,0	16,5	16,6	0,0	18,7	19,1	0,0	31,5	31,7	0,0
P. MEDIA (mm)	15,9			17,9			25,7			16,6			18,9			31,6		
TARRO	H-70			L-68			H-31			H-63			H-71			L-66		
PBH (g)	32,11			32,29			35,09			32,59			32,42			33,42		
PBS (g)	31,29			31,30			33,72			31,64			31,56			32,14		
TARA (g)	29,85			29,62			31,58			29,85			29,99			30,13		
DIF (g)	0,82			0,99			1,37			0,95			0,86			1,28		
PNS (g)	1,44			1,68			2,14			1,79			1,57			2,01		
%W (g)	56,9%			58,9%			64,0%			53,1%			54,8%			63,7%		



LL = 60

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 18$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 19$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

Fuente: elaboración propia.

**Formulario de ensayo, muestra 25**



UBICACIÓN		SAYAJCHÉ, PETÉN						FECHA		21/05/2010			MUESTRA						
% - 200		92.4		%		% - 40		100		%		CLASIF.		CH		NÚMERO			
																25			
<b>RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318</b>																			
		LL			122			LP			31			IP			91		
CONO		80 g									240 g								
PUNTO		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5	5,5	0	5,4	5,5	0	5,5	5,5	0
LECT. FINAL (mm)		12,4	12,7	0	17,1	17	0	22	22,2	0	21,3	21,4	0	24,2	24,3	0	26,6	26,5	0
DIFERENCIA (mm)		12,4	12,7	0,0	17,1	17,0	0,0	22,0	22,2	0,0	15,8	15,9	0,0	18,8	18,8	0,0	21,1	21,0	0,0
P. MEDIA (mm)		12,6			17,1			22,1			15,9			18,8			21,1		
TARRO		H-43			L-2			H-66			H-50			L-11			L-17		
PBH (g)		33,52			34,66			33,15			32,80			33,11			33,67		
PBS (g)		32,64			33,21			31,54			32,09			32,41			32,72		
TARA (g)		31,60			31,87			30,25			30,99			31,48			31,64		
DIF (g)		0,88			1,45			1,61			0,71			0,70			0,95		
PNS (g)		1,04			1,34			1,29			1,10			0,93			1,08		
%W (g)		84,6%			108,2%			124,8%			64,5%			75,3%			88,0%		
		<p style="text-align: right;">LL= <u>118</u></p> <p style="text-align: center;"><b>ÍNDICES DE PLASTICIDAD</b> WOOD &amp; WROTH</p> $\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 150$ <p style="text-align: center;">W<sub>80</sub>: W% cono 80g W<sub>240</sub>: W% cono 240g para d=20mm</p> <p style="text-align: center;">BELVISO &amp; CIAMPOLI</p> $\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 59$ <p style="text-align: center;">W<sub>20</sub>: intersección d=20mm W<sub>10</sub>: intersección d=10mm para cono de 80g</p>																	

Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 26

UBICACIÓN	SAYAJCHÉ, PETÉN	FECHA	21/05/2010	MUESTRA NÚMERO 26
% - 200	89,4 %	% - 40	100 %	CLASIF. CH

**RESULTADOS POR MÉTODO ASTM 4318**

LL 128      LP 30      IP 98

CONO	80 g									240 g								
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
LECT. INICIAL (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,3	5,4	0	5,4	5,4	0	5,3	5,4	0
LECT. FINAL (mm)	13,7	13,8	0	15,8	16	0	22,2	21,9	0	20,1	20,2	0	25,3	25,1	0	28	27,8	0
DIFERENCIA (mm)	13,7	13,8	0,0	15,8	16,0	0,0	22,2	21,9	0,0	14,8	14,8	0,0	19,9	19,7	0,0	22,7	22,4	0,0
P. MEDIA (mm)	13,8			15,9			22,1			14,8			19,8			22,6		
TARRO	H-42			L-50			L-51			L-69			H-49			L-16		
PBH (g)	34,30			34,60			34,05			31,74			32,78			34,83		
PBS (g)	33,05			32,79			32,72			30,96			31,95			33,56		
TARA (g)	31,64			30,93			31,31			29,70			30,85			31,96		
DIF (g)	1,25			1,81			1,33			0,78			0,83			1,27		
PNS (g)	1,41			1,86			1,41			1,26			1,10			1,60		
%W (g)	88,7%			97,3%			94,3%			61,9%			75,5%			79,4%		

LL= 95

ÍNDICES DE PLASTICIDAD  
WOOD & WROTH

$$\frac{(W_{80} - W_{240})}{0,23856} * 100 = 83$$

W<sub>80</sub>: W% cono 80g  
W<sub>240</sub>: W% cono 240g  
para d=20mm

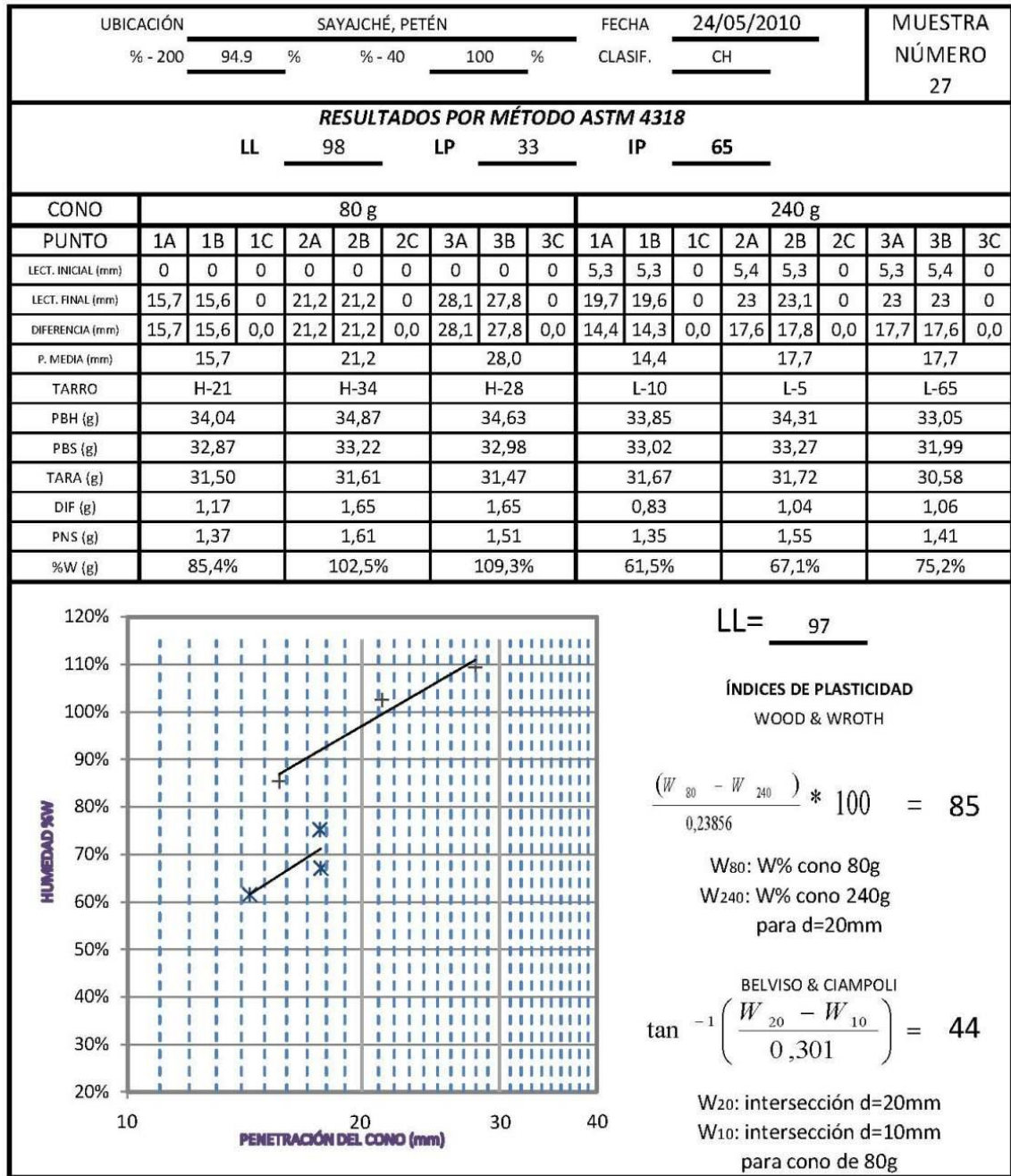
BELVISO & CIAMPOLI

$$\tan^{-1} \left( \frac{W_{20} - W_{10}}{0,301} \right) = 11$$

W<sub>20</sub>: intersección d=20mm  
W<sub>10</sub>: intersección d=10mm  
para cono de 80g

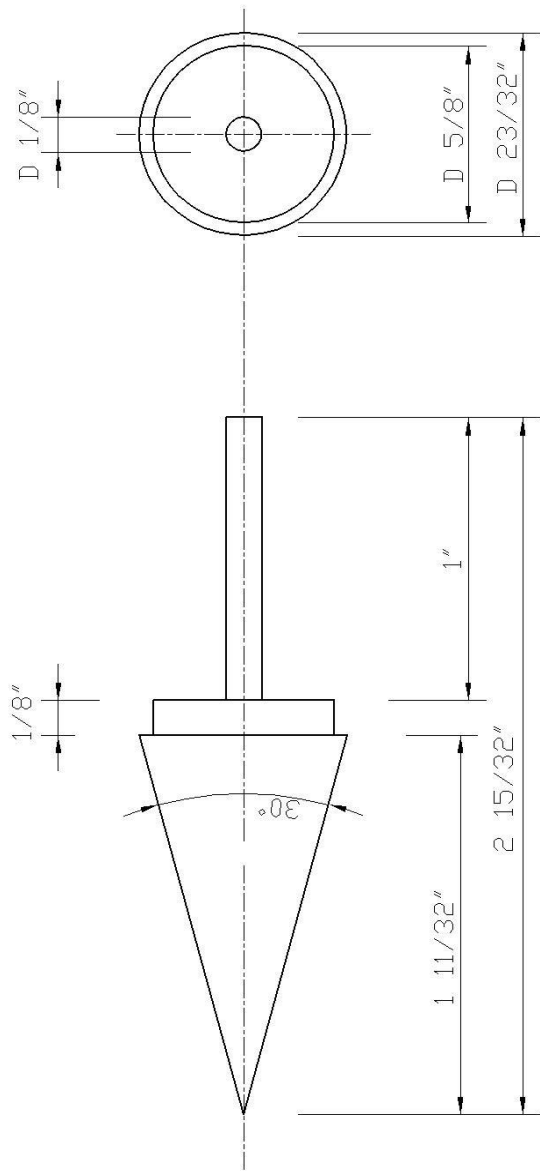
Fuente: elaboración propia.

### Formulario de ensayo, muestra 27



Fuente: elaboración propia.

### Esquema del cono utilizado en los ensayos



**ALZADO**

**VISTA  
LATERAL**

**CONO PARA PENETRÓMETRO**

Fuente: elaboración propia.