

**OBTENCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO USANDO EL
PENETRÓMETRO DE CONO DE CAÍDA, CONSIDERANDO LOS DIFERENTES
CONOS EXISTENTES EN LA LITERATURA PARA UN SUELO BENTONÍTICO**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**MARÍA CAROLINA DUARTE NIÑO
HERMAN DANIEL ROJAS GARZÓN**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2017

**OBTENCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO USANDO EL
PENETRÓMETRO DE CONO DE CAÍDA, CONSIDERANDO LOS DIFERENTES
CONOS EXISTENTES EN LA LITERATURA PARA UN SUELO BENTONÍTICO**

MARÍA CAROLINA DUARTE NIÑO

HERMAN DANIEL ROJAS GARZÓN

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil

Director

JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS

Ingeniero civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2017



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 10 de noviembre de 2017

A Dios por ser nuestro guía y darnos las herramientas necesarias para alcanzar este objetivo.

A nuestros padres y familiares por estar siempre presentes y ayudando en cada momento.

Al ingeniero Juan Carlos Ruge Cárdenas por brindarnos su conocimiento y encaminarnos en el desarrollo de este trabajo.

A todos los docentes y personas que contribuyeron en nuestra enseñanza durante el tiempo de formación.

CONTENIDO

GLOSARIO	21
RESUMEN.....	24
INTRODUCCIÓN.....	26
1. GENERALIDADES	27
1.1. ANTECEDENTES.....	27
1.1.1. Determinación del límite líquido y plástico de los suelos mediante el uso del penetrómetro cónico.....	27
1.1.2. Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido en suelos de baja y media plasticidad.....	27
1.1.3. Determinación de los límites plásticos del suelo mediante el penetrómetro de cono: reevaluación.	27
1.1.4. Investigación sobre el límite líquido de arcillas por conos de penetración de formas diferentes.	28
1.1.5. Determinación de los límites de consistencia de las arcillas de alta plasticidad por el método de cono de caída.....	28
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	28
1.3. OBJETIVOS.....	29
1.3.1. General.	29
1.3.2. Específicos.....	29
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	29
1.5. DELIMITACIÓN	30
1.6. MARCO DE REFERENCIA	31
1.6.1. Marco Conceptual	31
1.6.1.1. Suelos.....	31
1.6.1.2. Tipos de suelo	32

1.6.1.3.	Clasificación del suelo	36
1.6.1.4.	Bentonita	37
1.6.1.5.	Penetrómetro	38
1.6.2.	Marco teórico	42
1.6.2.1.	Límite Líquido (LL).....	45
1.6.2.2.	Método Copa de Casagrande.....	45
1.6.2.3.	Método Penetrómetro de Cono o Vassilief	46
1.6.2.4.	Límite plástico (LP).....	46
1.6.2.5.	Método de los Rollos.	46
1.6.2.6.	Método Penetrómetro de Cono.....	46
1.6.2.7.	Método de Feng.....	47
1.6.2.8.	Método del doble peso	48
1.7.	METODOLOGÍA	48
1.7.1.	Determinación del límite líquido mediante copa de Casagrande I.N.V.E. – 125 – 07	52
1.7.2.	Determinación del límite líquido mediante el penetrómetro de cono de caída utilizando diferentes conos de penetración.....	57
1.7.3.	Determinación del límite plástico mediante los rollitos de material I.N.V.E. – 126 – 07	62
1.7.4.	Determinación del límite plástico mediante el penetrómetro de cono de caída utilizando diferentes conos de penetración.....	65
1.7.4.1.	Método del doble peso.....	65
1.7.4.2.	Método de Feng, 2000.....	68
2.	RESULTADOS	69
2.1.	RESULTADOS LÍMITE LÍQUIDO	69
2.1.1.	Método de penetrómetro de cono de caída.....	69

2.1.2. Metodo de copa de Casagrande.....	70
2.2. RESULTADOS LÍMITE PLÁSTICO	71
2.2.1. Método del doble peso	72
2.2.2. Método de Feng, 2000	73
2.2.3. Método de rollitos de material	74
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
3.1. LÍMITE LÍQUIDO	75
3.2. LÍMITE PLÁSTICO	80
3.2.1. Método del doble peso	80
3.2.2. Método de Feng, 2000	85
3.3. RESUMEN DE RESULTADOS.....	91
4. CONCLUSIONES	94
5. RECOMENDACIONES.....	96
6. TRABAJOS FUTUROS.....	97
7. BIBLIOGRAFÍA.....	98
ANEXOS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de suelo	32
Figura 2. Lámina de tipo silícico.....	33
Figura 3. Lámina de tipo alumínico	34
Figura 4. Arcilla caolinítica	34
Figura 5. Arcilla montmorilonítica.....	35
Figura 6. Arcillas ílticas	35
Figura 7. Cono ruso o de Vasilev.....	39
Figura 8. Cono de Georgia	40
Figura 9. Cono Hindú.....	41
Figura 10. Penetrómetro cónico moderno.....	42
Figura 11. Penetrómetro de cono de caída.....	44
Figura 12. Muestra de bentonita	49
Figura 13. Agua destilada, ranurador y espátulas.....	49
Figura 14. Balanza	50
Figura 15. Horno	50
Figura 16. Bentonita.....	51
Figura 17. Bentonita y agua destilada.....	51
Figura 18. Mezcla bentonita y agua destilada.....	52
Figura 19. Aparato del límite líquido.....	53
Figura 20. Aparato del límite líquido con bentonita	53
Figura 21. Aparato del límite líquido con bentonita	54
Figura 22. Aparato del límite líquido con bentonita	54
Figura 23. Fracción de bentonita	55

Figura 24. Peso recipiente	55
Figura 25. Peso del recipiente más bentonita	56
Figura 26. Bentonita en el horno.....	56
Figura 27. Equipo de penetrómetro de cono de caída	58
Figura 28. Tablero de penetración	58
Figura 29. Conos de penetración.....	59
Figura 30. Penetrómetro de cono de caída con bentonita	59
Figura 31. Penetrómetro de cono de caída con bentonita	60
Figura 32. Fracción de bentonita	60
Figura 33. Peso del recipiente	61
Figura 34. Peso del recipiente más bentonita	61
Figura 35. Bentonita en el horno.....	62
Figura 36. Rollos de bentonita	63
Figura 37. Peso del recipiente	63
Figura 38. Peso del recipiente más bentonita	64
Figura 39. Bentonita en el horno.....	64
Figura 40. Preparación de la bentonita para límite plástico	66
Figura 41. Penetrómetro de cono de caída con bentonita	66
Figura 42. Peso del recipiente más bentonita	67
Figura 43. Bentonita en el horno.....	67

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Ensayo N°1 LL cono británico	70
Grafica 2. Ensayo N°1 LL copa de Casagrande	71
Grafica 3. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono británico.....	72
Grafica 4. Ensayo N°1 LP método de Feng cono británico.....	73
Grafica 5. LL cono de penetración británico Vs LL Casagrande	76
Grafica 6.LL cono de penetración ruso Vs LL Casagrande	77
Grafica 7. LL cono de penetración canadiense Vs LL Casagrande	78
Grafica 8. LL cono de penetración indio Vs LL Casagrande.....	79
Grafica 9. LL cono de penetración colombiano Vs LL Casagrande	80
Grafica 10. LP cono de penetración británico Vs LP rollos de material	81
Grafica 11. LP cono de penetración ruso Vs LP rollos de material.....	82
Grafica 12. LP cono de penetración canadiense Vs LP rollos de material.....	83
Grafica 13. LP cono de penetración indio Vs LP rollos de material	84
Grafica 14. LP cono de penetración colombiano Vs LP rollos de material.....	85
Grafica 15. LP cono de penetración británico Vs LP rollos de material	86
Grafica 16. LP cono de penetración ruso Vs LP rollos de material.....	87
Grafica 17. LP cono de penetración canadiense Vs LP rollos de material.....	88
Grafica 18. LP cono de penetración indio Vs LP rollos de material	89
Grafica 19. LP cono de penetración colombiano Vs LP rollos de material.....	90
Grafica 20. Ensayo N°2 LL cono británico	101
Grafica 21. Ensayo N°3 LL cono británico	102
Grafica 22. Ensayo N°4 LL cono británico	103
Grafica 23. Ensayo N°5 LL cono británico	104

Grafica 24. Ensayo N°1 LL cono ruso.....	105
Grafica 25. Ensayo N°2 LL cono ruso.....	106
Grafica 26. Ensayo N°3 LL cono ruso.....	107
Grafica 27. Ensayo N°4 LL cono ruso.....	108
Grafica 28. Ensayo N°5 LL cono ruso.....	109
Grafica 29. Ensayo N°1 LL cono canadiense	110
Grafica 30. Ensayo N°2 LL cono canadiense	111
Grafica 31. Ensayo N°3 LL cono canadiense	112
Grafica 32. Ensayo N°4 LL cono canadiense	113
Grafica 33. Ensayo N°5 LL cono canadiense	114
Grafica 34. Ensayo N°1 LL cono indio	115
Grafica 35. Ensayo N°2 LL cono indio	116
Grafica 36. Ensayo N°3 LL cono indio	117
Grafica 37. Ensayo N°4 LL cono indio	118
Grafica 38. Ensayo N°5 LL cono indio	119
Grafica 39. Ensayo N°1 LL cono colombiano	120
Grafica 40. Ensayo N°2 LL cono colombiano	121
Grafica 41. Ensayo N°3 LL cono colombiano	122
Grafica 42. Ensayo N°4 LL cono colombiano	123
Grafica 43. Ensayo N°5 LL cono colombiano	124
Grafica 44. Ensayo N°2 LL copa de Casagrande	125
Grafica 45. Ensayo N°3 LL copa de Casagrande	126
Grafica 46. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono británico.....	127
Grafica 47. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono británico.....	128

Grafica 48. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono británico.....	129
Grafica 49. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono británico.....	130
Grafica 50. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono ruso	131
Grafica 51. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono ruso	132
Grafica 52. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono ruso	133
Grafica 53. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono ruso	134
Grafica 54. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono ruso	135
Grafica 55. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono canadiense	136
Grafica 56. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono canadiense	137
Grafica 57. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono canadiense	138
Grafica 58. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono canadiense	139
Grafica 59. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono canadiense	140
Grafica 60. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono indio.....	141
Grafica 61. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono indio.....	142
Grafica 62. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono indio.....	143
Grafica 63. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono indio.....	144
Grafica 64. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono indio.....	145
Grafica 65. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono colombiano	146
Grafica 66. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono colombiano	147
Grafica 67. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono colombiano	148
Grafica 68. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono colombiano	149
Grafica 69. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono colombiano	150
Grafica 70. Ensayo N°2 LP método de Feng cono británico.....	151
Grafica 71. Ensayo N°3 LP método de Feng cono británico.....	152

Grafica 72. Ensayo N°4 LP método de Feng cono británico.....	153
Grafica 73. Ensayo N°5 LP método de Feng cono británico.....	154
Grafica 74. Ensayo N°1 LP método de Feng cono ruso	155
Grafica 75. Ensayo N°2 LP método de Feng cono ruso	156
Grafica 76. Ensayo N°3 LP método de Feng cono ruso	157
Grafica 77. Ensayo N°4 LP método de Feng cono ruso	158
Grafica 78. Ensayo N°5 LP método de Feng cono ruso	159
Grafica 79. Ensayo N°1 LP método de Feng cono canadiense	160
Grafica 80. Ensayo N°2 LP método de Feng cono canadiense	161
Grafica 81. Ensayo N°3 LP método de Feng cono canadiense	162
Grafica 82. Ensayo N°4 LP método de Feng cono canadiense	163
Grafica 83. Ensayo N°5 LP método de Feng cono canadiense	164
Grafica 84. Ensayo N°1 LP método de Feng cono indio.....	165
Grafica 85. Ensayo N°2 LP método de Feng cono indio.....	166
Grafica 86. Ensayo N°3 LP método de Feng cono indio.....	167
Grafica 87. Ensayo N°4 LP método de Feng cono indio.....	168
Grafica 88. Ensayo N°5 LP método de Feng cono indio.....	169
Grafica 89. Ensayo N°1 LP método de Feng cono colombiano	170
Grafica 90. Ensayo N°2 LP método de Feng cono colombiano	171
Grafica 91. Ensayo N°3 LP método de Feng cono colombiano	172
Grafica 92. Ensayo N°4 LP método de Feng cono colombiano	173
Grafica 93. Ensayo N°5 LP método de Feng cono colombiano	174

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ensayo N°1 LL cono británico.....	69
Tabla 2. Ensayo N°1 LL copa de Casagrande.....	70
Tabla 3. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono británico	72
Tabla 4. Ensayo N°1 LP método de Feng cono británico	73
Tabla 5. Ensayo N°1 LP método rollos de material	74
Tabla 6. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración británico	75
Tabla 7. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración ruso...76	
Tabla 8. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración canadiense	77
Tabla 9. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración indio ..78	
Tabla 10. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración colombiano.....	79
Tabla 11. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración británico	81
Tabla 12. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración ruso.....	82
Tabla 13. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración canadiense	83
Tabla 14. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración indio	84
Tabla 15. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración colombiano.....	85
Tabla 16. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración británico	86
Tabla 17. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración ruso.....	87

Tabla 18. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración canadiense	88
Tabla 19. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración indio	89
Tabla 20. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración colombiano.....	90
Tabla 21. Resumen método copa de Casagrande y penetrómetro de cono de caída para LL.....	91
Tabla 22. Resumen método de Casagrande mediante rollitos de material y penetrómetro de cono de caída utilizando el doble peso para LP	92
Tabla 23. Resumen método de Casagrande mediante rollitos de material y penetrómetro de cono de caída utilizando el método de Feng 2000 para LP	93
Tabla 24. Ensayo N°2 LL cono británico.....	101
Tabla 25. Ensayo N°3 LL cono británico.....	102
Tabla 26. Ensayo N°4 LL cono británico.....	103
Tabla 27. Ensayo N°5 LL cono británico.....	104
Tabla 28. Ensayo N°1 LL cono ruso	105
Tabla 29. Ensayo N°2 LL cono ruso	106
Tabla 30. Ensayo N°3 LL cono ruso	107
Tabla 31. Ensayo N°4 LL cono ruso	108
Tabla 32. Ensayo N°5 LL cono ruso	109
Tabla 33. Ensayo N°1 LL cono canadiense	110
Tabla 34. Ensayo N°2 LL cono canadiense	111
Tabla 35. Ensayo N°3 LL cono canadiense	112
Tabla 36. Ensayo N°4 LL cono canadiense	113
Tabla 37. Ensayo N°5 LL cono canadiense	114
Tabla 38. Ensayo N°1 LL cono indio.....	115

Tabla 39. Ensayo N°2 LL cono indio.....	116
Tabla 40. Ensayo N°3 LL cono indio.....	117
Tabla 41. Ensayo N°4 LL cono indio.....	118
Tabla 42. Ensayo N°5 LL cono indio.....	119
Tabla 43. Ensayo N°1 LL cono colombiano	120
Tabla 44. Ensayo N°2 LL cono colombiano	121
Tabla 45. Ensayo N°3 LL cono colombiano	122
Tabla 46. Ensayo N°4 LL cono colombiano	123
Tabla 47. Ensayo N°5 LL cono colombiano	124
Tabla 48. Ensayo N°2 LL copa de Casagrande	125
Tabla 49. Ensayo N°3 LL copa de Casagrande.....	126
Tabla 50. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono británico	127
Tabla 51. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono británico	128
Tabla 52. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono británico	129
Tabla 53. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono británico	130
Tabla 54. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono ruso.....	131
Tabla 55. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono ruso.....	132
Tabla 56. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono ruso.....	133
Tabla 57. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono ruso.....	134
Tabla 58. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono ruso.....	135
Tabla 59. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono canadiense	136
Tabla 60. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono canadiense	137
Tabla 61. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono canadiense	138
Tabla 62. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono canadiense	139

Tabla 63. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono canadiense	140
Tabla 64. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono indio	141
Tabla 65. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono indio	142
Tabla 66. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono indio	143
Tabla 67. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono indio	144
Tabla 68. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono indio	145
Tabla 69. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono colombiano	146
Tabla 70. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono colombiano	147
Tabla 71. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono colombiano	148
Tabla 72. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono colombiano	149
Tabla 73. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono colombiano	150
Tabla 74. Ensayo N°2 LP método de Feng cono británico	151
Tabla 75. Ensayo N°3 LP método de Feng cono británico	151
Tabla 76. Ensayo N°4 LP método de Feng cono británico	152
Tabla 77. Ensayo N°5 LP método de Feng cono británico	153
Tabla 78. Ensayo N°1 LP método de Feng cono ruso	154
Tabla 79. Ensayo N°2 LP método de Feng cono ruso	155
Tabla 80. Ensayo N°3 LP método de Feng cono ruso	156
Tabla 81. Ensayo N°4 LP método de Feng cono ruso	157
Tabla 82. Ensayo N°5 LP método de Feng cono ruso	158
Tabla 83. Ensayo N°1 LP método de Feng cono canadiense.....	159
Tabla 84. Ensayo N°2 LP método de Feng cono canadiense.....	160
Tabla 85. Ensayo N°3 LP método de Feng cono canadiense.....	161
Tabla 86. Ensayo N°4 LP método de Feng cono canadiense.....	162

Tabla 87. Ensayo N°5 LP método de Feng cono canadiense.....	163
Tabla 88. Ensayo N°1 LP método de Feng cono indio	164
Tabla 89. Ensayo N°2 LP método de Feng cono indio	165
Tabla 90. Ensayo N°3 LP método de Feng cono indio	166
Tabla 91. Ensayo N°4 LP método de Feng cono indio	167
Tabla 92. Ensayo N°5 LP método de Feng cono indio	168
Tabla 93. Ensayo N°1 LP método de Feng cono colombiano.....	169
Tabla 94. Ensayo N°2 LP método de Feng cono colombiano.....	170
Tabla 95. Ensayo N°3 LP método de Feng cono colombiano.....	171
Tabla 96. Ensayo N°4 LP método de Feng cono colombiano.....	172
Tabla 97. Ensayo N°5 LP método de Feng cono colombiano.....	173
Tabla 98. Ensayo N°2 LP método rollos de material.....	174
Tabla 99. Ensayo N°3 LP método rollos de material.....	174
Tabla 100. Ensayo N°4 LP método rollos de material.....	175
Tabla 101. Ensayo N°5 LP método rollos de material.....	175

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados limite líquido	101
Anexo 2. Resultados limite plástico	127
Anexo 3. Medidas de los conos de penetración y los recipientes	176

GLOSARIO

ADSORCIÓN: Proceso de atracción de las moléculas o iones de una sustancia en la superficie de otra, siendo el tipo más frecuente el de la adhesión de líquidos y gases en la superficie de los sólidos. La adsorción es un fenómeno de naturaleza física o química (wordreference, 2005).

ALÚMINA: Óxido de aluminio que se halla en la naturaleza en estado puro o cristalizado formando, en combinación con la sílice y otros cuerpos, los feldespatos y las arcillas (wordreference, 2005).

ARCILLA: es una roca sedimentaria descompuesta constituida por agregados de silicatos de aluminio, hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura (DiccionArqui, 2017).

ARTILUGIO: Mecanismo, máquina o aparato, especialmente el de manejo complicado o el que tiene una función que no se percibe fácilmente o se desconoce (Oxforddictionaries, 2017).

ASENTAMIENTO: Es la deformación vertical en la superficie de un terreno proveniente de la aplicación de cargas o debido al peso propio de las capas (La guía, 2017).

BENTONITA: Es una arcilla de grano muy fino (coloidal) del tipo de montmorillonita que contiene bases y hierro. Tiene aplicaciones en cerámica, entre otros usos. El nombre deriva de un yacimiento que se encuentra en Fort Benton, Estados Unidos (Imagroca, 2017).

CALCÁREO: Se dice de los suelos que se componen de carbonato cálcico, suelen ser pedregosos y de color más o menos blanco-amarillento. También se llaman suelos calizos porque proceden de la descomposición de la piedra caliza (Wikcionario, 2017).

CONSISTENCIA: Es la firmeza con que se unen los materiales que componen el suelo o la resistencia a la deformación y la ruptura del mismo. La consistencia del suelo se mide por muestras de suelo mojado, húmedo y seco (wordreference, 2005).

CORRELACIÓN: Indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas (Oxforddictionaries, 2017).

CRIBADO: Método de separación de elementos de diferente tamaño por medio de barreras con orificios que permiten el paso de los más pequeños y retienen a los mayores (Wikcionario, 2017).

DIATOMEA: Clase de algas de color pardo que habitan en el mar, el agua dulce o en la tierra húmeda, características por su caparazón silíceo formado por dos valvas de tamaño desigual (Oxforddictionaries, 2017).

GRANULOMETRÍA: Es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas (Wikcionario, 2017).

GRAVIMETRÍA: consiste en determinar la cantidad proporcionada de un elemento, radical o compuesto presente en una muestra, eliminando todas las sustancias que interfieren y convirtiendo el constituyente o componente deseado en un compuesto de composición definida, que sea susceptible de pesarse (Wikcionario, 2017).

INTEMPERISMO: Es la acción combinada de procesos (climáticos, biológicos, etc.) mediante los cuales la roca es descompuesta y desintegrada por la exposición continua a los agentes atmosféricos, transformando a las rocas masivas y duras en un manto residual finamente fragmentado (Wikcionario, 2017).

LÍMITES DE CONSISTENCIA: Se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, aunque su comportamiento varía a lo largo del tiempo (Wikcionario, 2017).

LIMITE LÍQUIDO: Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido (Osorio, 2010).

LIMITE PLÁSTICO: Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico (Osorio, 2010).

MEZCLA: Es la agregación de varias sustancias o cuerpos que no se combinan químicamente entre sí. A cada una de las sustancias que conforman una mezcla se le llama componente, los cuales al estar juntos o separados conservan sus propiedades características, e intervienen en proporciones variables (wordreference, 2005).

OBTURACIÓN: Es el cierre o taponamiento de una abertura con el objetivo de evitar que haya filtraciones, fugas o vertidos (wordreference, 2005).

REOLOGÍA: Es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir (Oxforddictionaries, 2017).

PENETRÓMETRO DE CONO DE CAÍDA: Empleado para determinar el límite líquido está construido bajo las prescripciones de la norma BS 1377:1990, el cual dispone de una base de hierro fundido con patas niveladoras, un medidor de

penetración digital con una precisión de 0.01 mm, un dispositivo de ajuste vertical micrométrico y una puesta a cero automática (Instituto nacional de Vías, 2007).

PLASTICIDAD: Es atribuible al contenido de partículas escamosas de tamaño coloidal presentes en los suelos. Las partículas escamosas además son responsables de la alta compresibilidad y la baja permeabilidad de los suelos (Oxforddictionaries, 2017).

RESUMEN

Las arcillas son materiales altamente influyentes en el desarrollo de actividades relacionadas con la ingeniería civil, entre estos materiales se encuentra la bentonita utilizada en muchas ocasiones y de la cual se deben conocer sus características mediante los límites de consistencia para tener certeza de su comportamiento.

Los límites de consistencia se han determinado mediante diversos métodos tradicionales y alternativos a través de los años. En Colombia se han utilizado los métodos tradicionales de copa de Casagrande y rollitos de material para la obtención de los límites líquidos y los límites plásticos respectivamente, pero a nivel internacional y en algunos trabajos nacionales se ha utilizado el método de penetrómetro de cono de caída, el cual brinda ciertas garantías en la obtención de datos para la preparación de los mismos límites.

En este trabajo se usaron los métodos de copa de Casagrande, rollitos de material y el penetrómetro de cono de caída con diferentes conos de penetración utilizados a nivel mundial en una muestra de material bentonítico y se estableció una comparación entre los datos obtenidos.

Por tal razón, este trabajo se realizó con el fin de demostrar cual método brinda más eficiencia en la obtención de datos para el reconocimiento de los límites de plasticidad en los suelos, si el penetrómetro de cono de caída o Casagrande, asimismo, se radicó el equipo de penetración en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Colombia para futuras investigaciones y ensayos de laboratorio.

Palabras claves: bentonita, límites, penetrómetro.

ABSTRACT

Clays are highly influential materials in the development of activities related to civil engineering, among these materials is the bentonite used in many occasions and of which its characteristics must be known through the of consistency limits to be certain of its behavior.

Consistency limits have been determined by various traditional and alternative methods over the years. In Colombia, traditional Casagrande cup methods and rolls of material have been used to obtain the liquid limits and plastic limits respectively, but at international level and in some national papers have used the method of fall cone penetrometer, which provides certain guarantees and greater certainty in obtaining data to obtain the same limits.

In this work, Casagrande's cup methods were used rolls material and fall cone penetrometer with different cone penetration used worldwide in a sample of bentonite material and a comparison between the obtained data set.

For this reason, this work was performed in order to demonstrate that the method has more efficiency in obtaining data for the recognition of plasticity boundaries in soils, if the cone penetrometer of the fall or Casagrande, also, the penetration equipment was established in the soil laboratory of the Universidad Católica de Colombia for research and laboratory tests.

Key Words: bentonite, limits, penetrometer.

INTRODUCCIÓN

Los suelos bentoníticos poseen gran capacidad de adsorción y pueden aumentar su volumen al contacto con el agua presentando alta plasticidad debido al contenido de partículas finas de forma laminar en su estructura.

Este material arcilloso actualmente tiene muchas aplicaciones en el campo de la ingeniería civil ya que puede ser utilizado como material de sellado para la obturación de fugas en depósitos y canales, como aditivos para mortero, mejorando su resistencia mecánica y acelerando su fraguado, asimismo se utiliza para la disminución de la permeabilidad de los suelos, como material absorbente para contaminantes orgánicos o inorgánicos debido a que atrapa iones o moléculas de gas o líquidas presentes en soluciones acuosas, entre otros (Escobar, y otros, 2016).

La plasticidad es una propiedad eventual y dependiente del agua que contenga el material arcilloso por tal razón la determinación del límite líquido y límite plástico ayuda a su caracterización y permite tener un conocimiento sobre su contenido de humedad. Esta caracterización se puede determinar mediante ensayos de laboratorio, bien sea con los métodos tradicionales como por ejemplo el de copa de Casagrande y los rollitos de material o con métodos alternativos como por ejemplo el penetrómetro de cono de caída.

En el desarrollo del proyecto se determinó el límite líquido y el límite plástico de una muestra de suelo bentonítico utilizando los métodos alternativos (penetrómetro de cono de caída, con diferentes conos de penetración normalizados a nivel internacional) y los métodos tradicionales utilizados comúnmente en Colombia (la copa de Casagrande y los rollitos de material).

El método de determinación de límites líquido y plástico mediante el penetrómetro de cono de caída para este proyecto es nuevo y poco utilizado. Esta práctica consiste en poner una muestra de arcilla mezclada con agua en un recipiente cilíndrico, el cual está dado por el equipo, posteriormente se debe nivelar el material y se debe ubicar un cono de penetración a ras de este, el cono está sostenido al penetrómetro mediante una varilla que con ayuda de un tablero indica la medida en milímetros de penetración. Subsiguiente se suelta el cono con dimensiones y masa normalizadas y dependiendo la penetración en la muestra se pueden obtener datos para preparar una gráfica o para calcular una función entre la penetración y el contenido gravimétrico de humedad correspondiente.

Este proyecto hace parte de un macro proyecto donde otros trabajos de investigación analizaran y caracterizaran otros tipos de materiales, determinando los correspondientes límites líquidos y plásticos utilizando el penetrómetro de cono de caída.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. Determinación del límite líquido y plástico de los suelos mediante el uso del penetrómetro cónico.

En la ciudad de Quito, más exactamente en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en 2012 se realizó un trabajo de investigación en el que se establece la facilidad y los beneficios del uso del penetrómetro de cono de caída en la obtención del límite líquido y el límite plástico de los suelos. En este trabajo también se identificó la problemática que se da en los ensayos tradicionales debido a la falta de precisión que estos brindan en la obtención de límites en los diferentes tipos de suelo (Luna, 2012).

1.1.2. Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido en suelos de baja y media plasticidad.

En España, septiembre de 2016 se realizó un trabajo de investigación en el que se determinó la aplicabilidad del penetrómetro cónico, el cual se define en la norma británica (BS 1377:1990) y se determinó una comparación con el método de Casagrande norma (UNE 103-103-94). Básicamente lo que logro este trabajo es determinar el grado de confiabilidad del método de penetración en suelos de baja y media plasticidad mediante la comparación de los resultados obtenidos por ambos procedimientos (Blázquez, 2016).

1.1.3. Determinación de los límites plásticos del suelo mediante el penetrómetro de cono: reevaluación.

En la Universidad Malaya de Malasia se realizó una investigación patrocinada por el Ministerio de ciencia, tecnología y medio ambiente (MOSTE) donde se demostró la determinación de la reevaluación del límite plástico mediante el uso de un penetrómetro de cono de caída. Para esta investigación se prepararon muestras de suelo de acuerdo con el procedimiento indicado en la norma británica (BS 1377:1990), con los resultados obtenidos se realizó una correlación entre el límite líquido y la profundidad logarítmica de la penetración lo que determinó una relación no lineal en el intervalo de contenido de agua desde el límite líquido cercano hasta el límite plástico. También se dedujo con la correlación que el límite plástico se da a la profundidad de penetración de 2,2 milímetros (Muntohar, y otros, 2003).

1.1.4. Investigación sobre el límite líquido de arcillas por conos de penetración de formas diferentes.

En la ciudad de Esmirna, Turquía, en 2013 se desarrolló un trabajo de investigación en el cual se utilizaron quince conos de penetración con diferentes formas y pesos en dos tipos de arcilla. Este trabajo busco determinar los límites líquidos mediante el penetrómetro de cono de caída, el cual presenta mayor precisión en la obtención de datos debido a que tiene menor dependencia del operador. También busco estudiar la relación entre el contenido de agua y la penetración de los quince conos. En la investigación se observó que la penetración de los conos estuvo en el rango de los 8.99 milímetros a los 28.23 milímetros y que, al considerar la correlación de cada cono con peso constante, la penetración disminuye mientras el ángulo aumenta; mientras que cuando el peso aumenta en ángulo constante la penetración aumenta (Altıntaş, 2013).

1.1.5. Determinación de los límites de consistencia de las arcillas de alta plasticidad por el método de cono de caída.

En el reino unido se escribió un paper en el que se recomienda utilizar el método del cono de caída para determinar el límite líquido de los suelos debido a su alta precisión y facilidad de manejo para la obtención de resultados. Se hicieron pruebas en cuatro distintos tipos de arcillas y se demostró que el aparato de cono de caída era un método adecuado para determinar los límites de consistencia de las arcillas de alta plasticidad debido a su eficiencia y a que la intervención del operador no afectaba en gran medida los resultados (Feng, 2004).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La determinación de los límites líquidos y plásticos de un material a lo largo de la historia ha sido establecida mediante métodos tradicionales como lo es el método de copa de Casagrande para límite líquido y el método de rollitos para límite plástico, los cuales son antiguos y tienen muchos factores que alteran sus resultados, lo que los hace poco confiables y en muchos casos ineficientes.

Debido a las necesidades de obtención de los límites en un material para poder conocer sus características, se hace necesario tener alternativas innovadoras con nuevas tecnologías, utilizadas en países desarrollados con mayor precisión y eficiencia. Dentro de las alternativas innovadoras se encuentra el penetrómetro de cono de caída, el cual es un dispositivo que mejora las falencias de los métodos comunes y además cuenta con diversos conos de penetración utilizados a nivel mundial que permiten obtener varios datos, los cuales pueden ser estudiados y comparados para brindar mayor confiabilidad.

Por tal razón y partiendo de la necesidad de obtener límites de consistencia en muestras de suelo de manera fácil y confiable se adquirió el equipo de penetrómetro de cono de caída, con varios conos de penetración utilizados en diversos países. Es importante recalcar que para esta determinación se utilizó como material de prueba la bentonita, la cual es un material arcilloso, se encuentra en muchos lugares de trabajo y es utilizada en diversos campos de la ingeniería civil, por lo cual se hace necesario conocer de manera certera y rápida los límites para poder determinar su comportamiento.

Partiendo de la problemática la interrogante planteada fue la siguiente:

¿Es el penetrómetro de cono de caída, un equipo que brinda mayor certeza y confiabilidad en la obtención de límites líquidos y plásticos, comparándolo con los métodos tradicionales de copa de Casagrande y rollitos de material?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. General.

Determinar el límite líquido y el límite plástico en un suelo bentonítico usando el penetrómetro de cono de caída.

1.3.2. Específicos.

- Encontrar los límites líquidos y plásticos mediante diferentes conos de penetración utilizados en la literatura mundial en una muestra de suelo bentonítico.
- Hallar los límites líquidos y plásticos en una muestra de suelo bentonítico mediante los métodos de copa de Casagrande y los rollitos de material para conocer el comportamiento del espécimen.
- Evaluar los métodos utilizados del penetrómetro, Casagrande y rollitos de materia mediante los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio.
- Establecer el penetrómetro como material de trabajo en el laboratorio de suelos de la universidad católica de Colombia para determinar los límites líquido y plástico de materiales granulares.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Las instalaciones de laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Colombia presentan falencias con algunos equipos que son indispensables para la realización de ensayos para obtener límites de consistencia en muestras de suelo mediante métodos modernos. Por tal razón se dio una solución innovadora y moderna mediante la adquisición de un penetrómetro de cono de caída el cual

permite determinar los límites de diferentes materiales arcillosos de manera más exacta y confiable, en comparación al equipo de copa de Casagrande.

Este proyecto es trascendental en la determinación de los límites líquidos y los límites plásticos debido a que plantea nuevas alternativas y estrategias diferentes a las convencionales, además, el equipo de penetración fue adquirido con diversos conos (véase anexo 3) para la realización de diferentes prácticas, esto brinda grandes beneficios en la investigación de dichos límites y sirve como fundamento para nuevas investigaciones en busca de alternativas modernas y eficaces con mayor relevancia para conocer las características de los suelos y poder diferenciarlos e identificarlos de una manera más fácil.

En el proyecto se empleó la bentonita como material para los ensayos realizados debido a que es de gran importancia en diferentes procesos de la ingeniería civil, no solo por sus características, sino porque es un material que, aunque se le añada mucha agua, la mezcla no pierde estabilidad o consistencia, lo que exige el conocimiento de sus características, entre ellas los límites.

1.5. DELIMITACIÓN

Inicialmente no se contaba con el equipo (penetrómetro de cono de caída) necesario para realizar las prácticas de laboratorio, además este no se conseguía en Colombia por lo cual fue necesario importarlo. Posteriormente fue necesario mandar a construir los diferentes conos de penetración debido a que el equipo solo contaba con un cono.

El periodo establecido fue aproximadamente tres meses, un tanto corto para la realización de una gran cantidad de ensayos de laboratorio debido a que los límites por medio del penetrómetro de cono de caída se realizaron varias veces y con diferentes conos de penetración, del mismo modo se realizaron ensayos de laboratorio con el método de los rollitos y la copa de Casagrande.

Los alcances fueron la determinación de límites en una muestra de material arcillas bentoníticas, mediante métodos tradicionales y métodos novedosos, para luego realizar una comparación de los resultados obtenidos. Como derivación se realizó un documento y un artículo con los resultados obtenidos en los laboratorios y sus respectivos análisis, centrados en la comparación de los métodos utilizados para la determinación de límites.

1.6. MARCO DE REFERENCIA

1.6.1. Marco Conceptual

1.6.1.1. Suelos

El suelo es un conjunto definido y con propiedades particulares de material compuesto por partículas derivadas de roca o materia orgánica de la corteza terrestre, en este material se encuentra agua contenida, la cual debe ser considerada como parte fundamental de la estructura del suelo debido a que juega un papel fundamental en el comportamiento mecánico del mismo (véase figura 1).

El suelo puede ser producido por intemperismo, es decir por fracturas y rompimiento de varios tipos de roca en pequeñas piezas. Estas pequeñas piezas algunas veces permanecen en el lugar en el que se forman generando los suelos residuales. Cuando el material es movido por medios aluviales, fluviales, glaciales o por el viento se conocen como suelos transportados (Das, 1999).

Cuando la corteza terrestre es atacada por factores climáticos como el aire y el agua principalmente se crean procesos generadores de suelos, estos procesos son la desintegración mecánica y la descomposición química.

La desintegración mecánica es la intemperización de las rocas por agentes físicos que se da cuando hay cambios en el ambiente como temperatura, luz, viento efectos de organismos u otros y se modifica la estructura de la roca llevando a la formación de arenas, limos y en algunos casos arcillas.

La descomposición química es la afectación en las rocas que se genera por agentes que modifican la constitución mineralógica o química del material. El principal agente es el agua y genera procesos de oxidación, hidratación y carbonatación, del mismo modo los efectos químicos de la vegetación también juegan un papel fundamental como agente de cambio. Estos procesos generan como último proceso arcillas.

Los factores anteriores no son regla general para la creación de suelo debido a que la naturaleza actúa de diversas formas y con una complejidad que desafía los criterios conocidos, por tal razón los suelos tienen su origen en una gran variedad de causas que no pueden determinarse y que producen diferentes tipos de suelo (Badillo, y otros, 2005).

Figura 1. Perfil de suelo



Fuente. ck12 (2016)

1.6.1.2. Tipos de suelo

Los suelos de acuerdo con el origen de sus elementos se dividen en dos grandes grupos. El primer grupo es el de los suelos orgánicos y el segundo grupo es el de los suelos inorgánicos.

El origen de los suelos inorgánicos se da por descomposición física y/o química de las rocas, estos suelos se forman generalmente por causa del intemperismo y se dan debido a procesos de transporte de material generando suelos residuales.

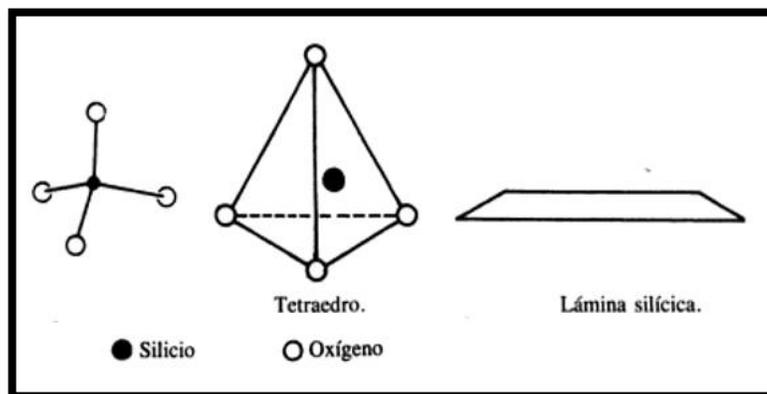
Los suelos orgánicos generalmente son formados in situ, comúnmente en zonas pantanosas donde el contenido vegetal es alto. Generalmente la materia orgánica es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico que la porción mineral queda prácticamente eliminada y se conforma un suelo orgánico.

Entre los suelos más comunes se encuentran grava, arena, limos, arcillas, caliche, loess, diatomita, gumbo, tepetate, entre otros.

- **Gravas:** son fragmentos de roca redondeada con más de 2 mm de diámetro las cuales son formadas por arrastre de material generado por corrientes de agua. Como material suelto se encuentran generalmente en lechos de ríos,
- **Arenas:** es un material de grano fino procedentes de la decantación de rocas o por trituración artificial, el tamaño de las arenas varía entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro.
Generalmente el origen de las arenas se da al tiempo con las gravas y estos dos materiales suelen encontrarse juntos. Las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas y si se aplica una carga se comprimen casi de inmediato.

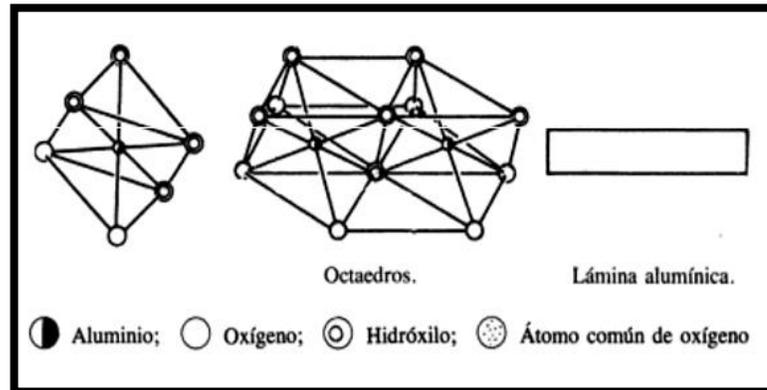
- **Limos:** son suelos de grano fino con poca plasticidad de diámetros entre 0.05 mm y 0.005 mm. En el planeta se pueden encontrar limos inorgánicos como el producido en canteras y limos orgánicos como el que se encuentra en los ríos. Los limos sueltos y saturados son inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas.
- **Arcillas:** son materiales con diámetros menores a 0.005 mm y cuya masa se vuelve plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado que en ocasiones contiene silicato de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos materiales es cristalina y sus átomos están dispuestos en forma laminar. Hay dos tipos clásicos de láminas, uno de tipo silícico y otro de tipo alumínico.
 Una lámina de tipo silícico se encuentra formada por un átomo de silicio rodeado de cuatro átomos de oxígeno conformándose un conjunto en forma de tetraedro los cuales se agrupan entre sí formando una unidad hexagonal, la cual se repite indefinidamente formando una retícula laminar (véase Figura 2).
 Una lámina del tipo alumínico se encuentra formada por un átomo de aluminio rodeado de seis átomos de oxígeno y de oxígeno e hidrógeno formándose un conjunto en forma de octaedro, los cuales se agrupan mediante un átomo de oxígeno común repitiéndose indefinidamente y generando una retícula laminar alumínica (véase Figura 3).

Figura 2. Lámina de tipo silícico



Fuente. Crespo (2004)

Figura 3. Lámina de tipo aluminico

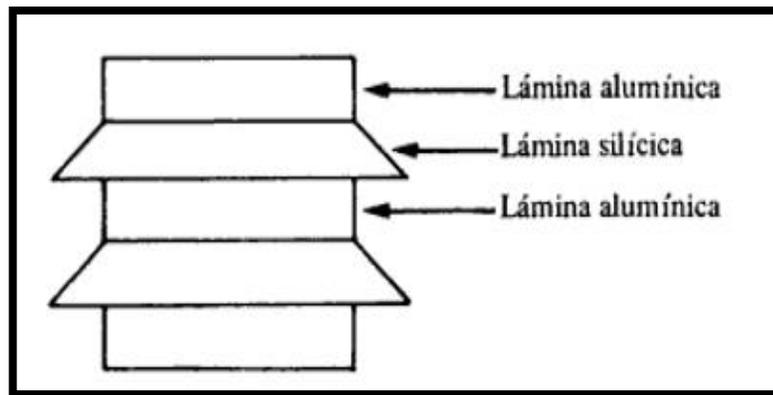


Fuente. Crespo (2004)

De acuerdo con la formación reticular las arcillas pueden clasificarse en:

- a. **Caolinítico:** procede de la carbonatación del feldespato potásico. Están formadas por una lámina silícica y una lámina aluminica superpuestas de manera indefinida y con tal unión que no permiten la penetración de moléculas de agua entre ellas (véase figura 4).

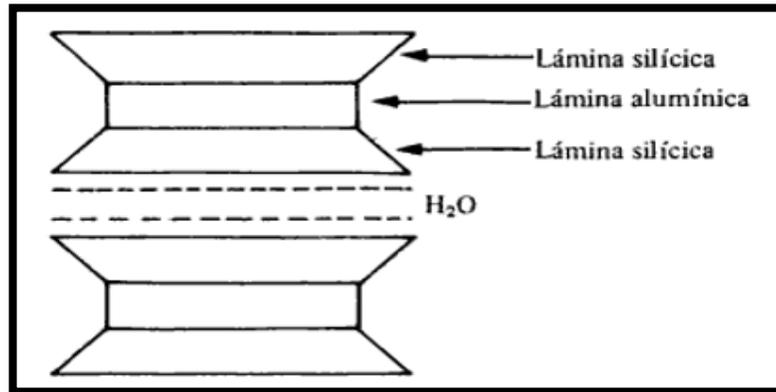
Figura 4. Arcilla caolinítica



Fuente. Crespo (2004)

- b. **Montmorilonítico:** a este grupo pertenecen las bentonitas, se forman por la superposición de una lámina aluminica entre dos láminas silícicas, pero su unión es débil y permite la penetración del agua en su estructura (véase Figura 5).

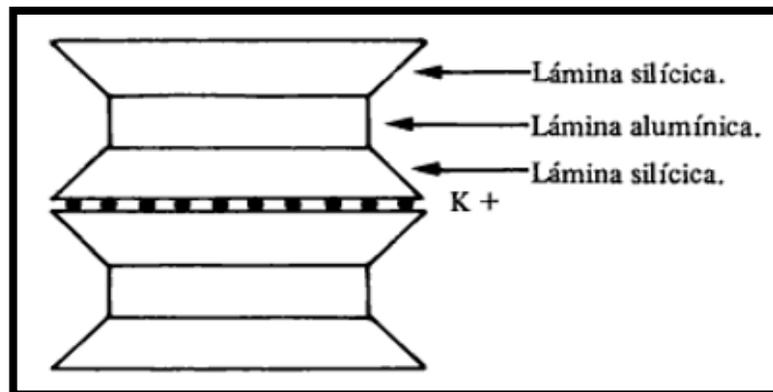
Figura 5. Arcilla montmorilonítica



Fuente. Crespo (2004)

- c. **Ilítico:** se genera por la hidratación de las micas y presentan un arreglo reticular similar al de las montmoriloníticas, pero formando grumos debido a la presencia de iones de potasio reduciendo su capacidad de absorción de agua y haciéndolas menos expansivas que las montmoriloníticas (véase Figura 6).

Figura 6. Arcillas ilíticas



Fuente. Crespo (2004)

- **Caliche:** cierto estrato de suelo cuyos granos se encuentran cementados por carbonatos calcáreos. Este tipo de suelo generalmente se forma en lugares con climas semiáridos.
- **Loess:** son sedimentos eólicos uniformes y cohesivos debido a un cementante de tipo calcáreo. El diámetro de las partículas varía entre 0.05 mm y 0.01 mm.

- **Diatomita:** son depósitos de polvo silíceo compuestos generalmente por residuos de algas marinas de agua dulce microscópicas y unicelulares (diatomeas).
- **Gumbo:** es un tipo de suelo fino arcilloso libre de arena, es pegajoso, plástico y muy esponjoso.
- **Tepetate:** es un material compuesto de arcillas, limos y arenas en proporciones variables con un cementante que generalmente es la misma arcilla o carbonato de calcio. Muchas veces el tepetate debe su origen a descomposición de cenizas volcánicas basálticas (Villalaz, 2004).

1.6.1.3. Clasificación del suelo

La clasificación del suelo depende de diversos sistemas instaurados a nivel mundial donde se establece un lenguaje común y se relacionan propiedades y características con determinados grupos de suelos asociándolos a un determinado lugar dentro de un grupo, considerando el suelo como material, los sistemas más importantes para su clasificación son:

- **American Association of state highway official AASHTO**

En esta categorización los suelos se clasifican en siete grupos (A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7), según su granulometría y plasticidad. Esto se hace en función del porcentaje que pasa por los tamices N°200, N°40 y N°10, y de los Límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz N°40. Estos siete grupos corresponden a dos grandes categorías de suelos, un grupo de suelos granulares (con no más del 35% que pasa por el tamiz n° 200) y un grupo suelos limo-arcillosos (más del 35% que pasa por el tamiz n° 200).

El grupo A-1 corresponde a cantos, gravas y arenas, el grupo A-2 corresponde a grava y arena limoarcillosas y el grupo A-3 corresponde a arena fina. Estos tres grupos y sus respectivos subgrupos se califican como excelentes a buenos.

Los grupos A-4 y A-5 corresponden a suelos limosos y los grupos A-6 y A-7 corresponden a suelos arcillosos. Estos tres grupos y sus respectivos subgrupos se califican como regular a malo (Tolosa, y otros, 2017).

- **Sistema unificado de clasificación de suelos USCS**

Este sistema divide los suelos en dos grupos, uno de grano grueso y otro de grano fino, el de grano grueso es aquel en el cual el 50% de su peso es mayor a 0.08 mm, si dentro de este porcentaje el 50% de su peso queda retenido en el tamiz de 5 mm se le asigna la letra G y si más del 50% pasa se le asigna la letra S.

A la letra G y S se les agrega una segunda letra que indica el tipo de gradación las cuales son W para buena gradación con poco o ningún fino, la letra P para

gradación pobre, uniforme o discontinua con poco o ningún fino, la letra M para los que contienen limo o limo y arena y la letra C para los que contienen arcilla o arena y arcilla.

Los suelos finos son los que contienen un 50% de su peso menor a 0.08 mm y se presentan en tres grupos. El grupo de la letra C corresponde a arcillas, el de la letra M corresponde a limos y el de la letra O corresponde a arcillas orgánicas. Adicionalmente se le agrega la letra L si el límite líquido es menor a 50 o la letra H si el límite líquido es mayor a 50 (Tolosa, y otros, 2017).

- **FAA**

Este sistema clasifica la muestra de material como arena gruesa, la cual es la que pasa el tamiz N°10 y queda retenida en el tamiz N°60, siendo las partículas de un tamaño comprendido entre 2mm a 0,25 mm. Arena fina, la cual pasa el tamiz N°60 y queda retenido en el tamiz N°270. El tamaño de sus partículas está comprendido entre 0.25 mm y 0.05 mm. Limo, es el material que pasa el tamiz N° 270 y cuyas partículas están comprendidas entre 0.05 mm y 0.005 mm. Arcilla, es el material que pasa el tamiz N° 270, y cuyas partículas son menores de 0.005 mm (Tolosa, y otros, 2017).

1.6.1.4. Bentonita

La bentonita como material de ensayo para el desarrollo del proyecto y además de haber sido y ser estudiada y caracterizada parcialmente en otras investigaciones incluso científicas, se destaca por su soporte catalítico, revelando propiedades excelentes que igualmente han sido reportadas en algunas publicaciones internacionales. Por tal motivo, se considera como un material de importancia científica y comercial.

El nombre bentonita se sugirió por primera vez en 1898 para la arcilla alojada en Benton Shale, Wyoming, Estados Unidos. Inicialmente se describió como arcilla formada por la alteración de ceniza volcánica, pero la definición comercial más ampliamente utilizada es que la bentonita es una arcilla que consiste esencialmente en minerales de esmectita (generalmente montmorillonita) independientemente de su origen.

En términos geológicos, la bentonita principalmente es una roca compuesta de esmectitas más cantidades de impurezas o minerales inertes como el cuarzo, el feldespato, la caolinita, la ilita, el yeso, la zeolita y la sílice opalina. La bentonita se caracteriza por cationes intercambiables que afectan su designación y propiedades. Por ejemplo, la bentonita se describe típicamente como bentonita hinchada o bentonita no hinchada. La hinchazón de la bentonita (también conocida como bentonita occidental) es la bentonita de sodio que se hincha en el agua y generalmente se usa en su estado natural. La bentonita no hinchada es la

bentonita de calcio (también conocida como bentonita del sur) que se usa como minado, después del tratamiento con ceniza de sosa para producir bentonita intercambiada con sodio.

La bentonita es verdaderamente un mineral de mil usos y se utiliza por su alta área superficial, adherencia, hinchamiento, absorción, sellado y propiedades reológicas. Estas propiedades se pueden modificar mediante el tratamiento con ácidos, carbonato de sodio u otros productos químicos, además de la calcinación, la molienda y el tamizado. La bentonita encuentra aplicación en diversos mercados, incluyendo: ingeniería civil, fundición de metales, perforación de pozos de petróleo, granulación de mineral de hierro, purificación de aceite comestible, papel, cerámica, detergentes, arena para gatos, entre otros.

La exploración de bentonita generalmente es similar a la de otros minerales, a menudo a partir del descubrimiento de un afloramiento, que luego se explora mediante métodos tales como mapeo de campo, zanjas, perforación y pruebas de laboratorio. Los datos generados de esta manera, si tienen éxito, podrían conducir a la estimación de un recurso mineral que define la geometría, el tonelaje y la calidad de un depósito.

La mayoría de los depósitos de bentonita se extraen de los pozos abiertos con topadoras y raspadores para eliminar la sobrecarga, seguido de la extracción selectiva con excavadoras o cargadoras frontales. Después de la extracción, la arcilla a menudo se almacena o se coloca en almohadillas de secado para permitir el secado natural antes de mezclarse en las reservas de productos. La bentonita se convierte típicamente en productos finales mediante un proceso de secado, trituración, molienda o cribado.

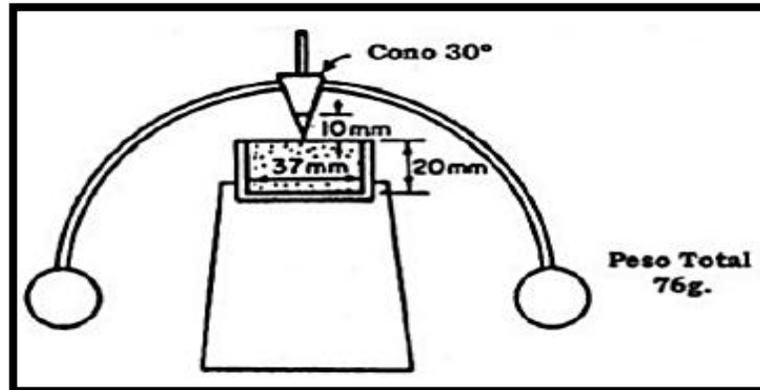
La producción mundial de bentonita fue estimada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en 16 millones de toneladas en 2015. Estados Unidos y China son los principales productores del mundo y se calcula que representan entre el 50% y el 60% del suministro total (Industrial Minerals, 2016).

1.6.1.5. Penetrómetro

El penetrómetro cónico es un método alternativo con el que se solventan algunas de las deficiencias del método tradicional. Por ejemplo, el ensayo del límite líquido es una medida de la resistencia al corte de un suelo blando cuya humedad se acerca al estado líquido. La teoría de plasticidad desarrollada por Prandtl estableció una relación entre la resistencia al corte y la resistencia a la penetración de un suelo, siendo esta relación una constante en materiales como las arcillas saturadas. Entonces, podemos decir que el ensayo de penetración debería ser una medida válida de límite líquido.

Históricamente distintos tipos de penetrómetros cónicos se han desarrollado para determinar el límite líquido. Inicialmente se usaron la aguja de Vicat y conos estrechos, con los que aparentemente no se obtenían resultados satisfactorios. El primer ensayo normalizado fue desarrollado por Vasilev en 1949, donde el aparato utilizado fue el denominado “cono ruso”, donde la humedad correspondiente a una penetración de 10 mm indicaba el límite líquido (véase figura 7)

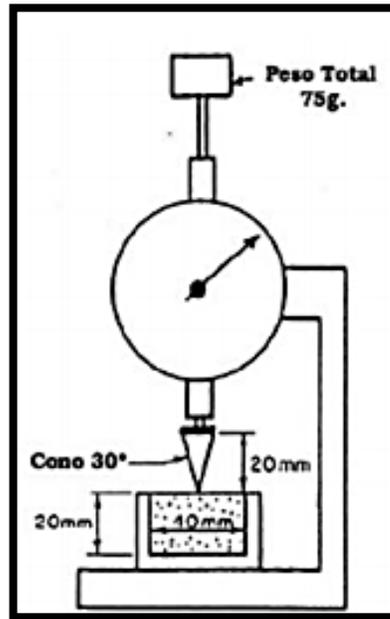
Figura 7. Cono ruso o de Vasilev



Fuente. Osorio, (2010)

Posteriormente en el año 1951 el Instituto Tecnológico de Georgia desarrolló un penetrómetro denominado “cono de Georgia” en el que la punta del cono penetra en el suelo empujado por un peso de 75 g. Para evitar efectos dinámicos se frena la caída, de modo que el peso total no actúe sobre la punta hasta pasados diez segundos desde el comienzo del ensayo. Con este aparato se dice que el suelo está en el límite líquido cuando la penetración de la punta es de 10 mm. Para ello se debe medir las penetraciones de muestras con distinta humedad e interpolar para 10 mm (véase Figura 8).

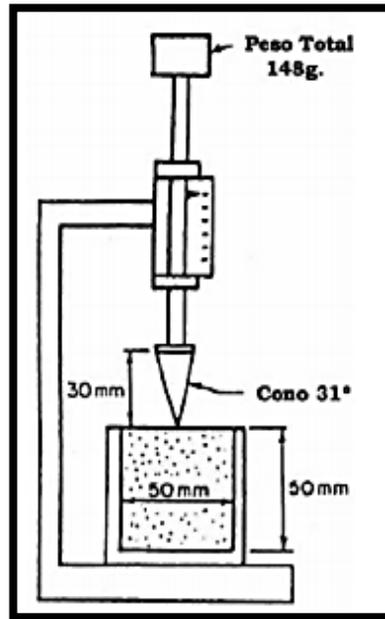
Figura 8. Cono de Georgia



Fuente. Adaptado Jiménez Salas (1975)

En el año 1953 el Indian Central Road Research Institute desarrolló un ensayo simplificado para determinar el límite líquido y propuso el dispositivo (véase figura 9), conocido con el nombre de "cono hindú" con el que se obtenía el límite líquido para una penetración de una pulgada.

Figura 9. Cono Hindú



Fuente. Osorio (2010)

Actualmente el equipo del penetrómetro cónico empleado para determinar el límite líquido, está construido bajo las prescripciones de la norma BS 1377:1990, el cual dispone de una base de hierro fundido con patas niveladoras, un medidor de penetración digital con una precisión de 0.01 mm, un dispositivo de ajuste vertical micrométrico y una puesta a cero automática (Blázquez, 2016) (véase Figura 10).

Figura 10. Penetrómetro cónico moderno



Fuente. Empresa Controls (2017)

1.6.2. Marco teórico

La necesidad de identificar los suelos y establecer la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos, puede ser determinada de manera rápida y sencilla mediante la obtención de los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia. La consistencia es la condición más importante que define el comportamiento del suelo, esta denotada por el estado físico de una mezcla de suelo y agua y se especifica por la resistencia al flujo, donde se relaciona la fuerza de atracción entre partículas y también el grado de firmeza; en los suelos coherentes varía desde un estado sólido cuando están secos a un estado líquido viscoso cuando su contenido de agua aumenta considerablemente, dicho procedimiento es más sencillo experimentarlo físicamente que describirlo cuantitativamente.

Al detallar mejor esta condición, es necesario aclarar que existen siete límites de Atterberg: límite líquido, límite plástico, límite de retracción o contracción, índice de plasticidad, índice de fluidez, índice de tenacidad e índice de liquidez; están basados en el concepto de los suelos finos presentes en la naturaleza, los cuales pueden encontrarse en cualquiera de estos estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan.

Dichos límites parten de la necesidad de identificar los suelos y establecer la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos, estos

ensayos resultan muy útiles en la mecánica de suelos para poder caracterizar las arcillas, por ejemplo, según su consistencia definida anteriormente y de igual manera su comportamiento. De esta forma se puede predecir la capacidad portante frente a las cargas, las propiedades de consolidación y compactación y los posibles asentamientos y expansiones. (INCONTEC, 2012).

Los límites de Atterberg pertenecen, junto al análisis granulométrico, al tipo de ensayos de identificación. Pero, si el análisis granulométrico permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, los límites de Atterberg indican su calidad, complementando así el conocimiento del suelo (Badillo, y otros, 2005).

Atterberg en 1911, definió el límite líquido como el contenido de humedad al que un suelo pasa del estado plástico al líquido. Atterberg determinó que dicho contenido de humedad coincidía con el que tenía una muestra de suelo colocada en una cápsula de porcelana de 10 o 12 cm de diámetro cuando una ranura hecha en la misma se cerraba al golpear la cápsula 25 veces contra la palma de la mano.

Casagrande en 1932, diseñó un artilugio en el que la muestra de suelo se colocaba en una cuchara de bronce que golpeaba cayendo desde una altura de 1 cm sobre una base dura. A la muestra se le hacía un surco con un acanalador normalizado y el límite líquido se definió como el contenido de humedad a la que el surco se cerraba en una longitud de 13 mm al ser golpeada la cuchara 25 veces. Esto dio origen al famoso ensayo de copa de Casagrande.

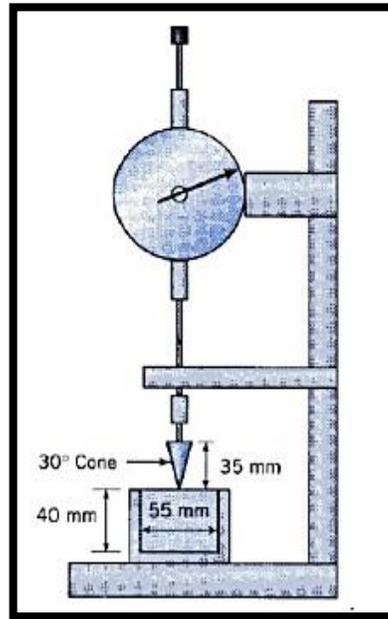
Sin embargo, aun usando el aparato de Casagrande, se ha llegado a la conclusión que el valor de límite líquido obtenido es afectado por el operador de manera muy significativa, además factores como el ritmo de golpeo de la cuchara sobre la base, la forma y la cantidad de la muestra colocada en la cuchara, la manera en que se realice el surco o la rigidez de la superficie sobre la que se golpea tienen una gran incidencia en los resultados obtenidos.

Ante esta situación y dándole respuesta y validez al proyecto, se encontraron varios investigadores que han utilizado el penetrómetro de cono de caída en sus investigaciones para determinar los límites de un suelo por considerarlo más fiable: Sowers en 1959, utilizó el cono de Georgia para determinar el límite líquido; Littleton y Farmilo (1977) y posteriormente Landris T. Lee y Reeed B. Freeman en 2009, utilizaron dos conos de diferente peso para definir el índice plástico; Belviso en 1985, tomando como base los resultados de los ensayos de límite líquido con el penetrómetro cónico y las características de la recta de flujo, obtuvieron el índice plástico; Jefferson y Foss Roger en 1997 lo utilizaron para estudiar la relación entre el límite líquido y la sensibilidad a la temperatura de las arcillas; etc.

El ensayo del cono es el método alternativo que más se ha estudiado. Su funcionamiento se basa en que la punta del cono penetre en el suelo al ser empujada por un peso y para evitar efectos dinámicos se frena la caída, de modo

que el peso total no actúe sobre la punta hasta pasando un tiempo desde el comienzo del ensayo. Naturalmente, cuanto mayor sea el contenido de humedad del suelo más se introducirá la punta en él. El límite líquido será la humedad correspondiente a una profundidad de penetración determinada en función del cono que se utilice y que se obtendría tras la realización de un ajuste de varias parejas profundidad de penetración vs humedad (véase figura 11).

Figura 11. Penetrómetro de cono de caída



Fuente: (Blázquez, 2016)

Entre las principales ventajas de la utilización del penetrómetro de cono de caída están:

- Los resultados obtenidos por diferentes laborantes tienen una variabilidad bastante inferior en comparación con el método de copa de Casagrande.
- Al tener el operador poca influencia en el ensayo las comparativas interlaboratorio son más efectivas.
- Es un método “estático” sin los efectos dinámicos del método de Casagrande.
- Es válido para cualquier tipo de suelo al no incorporar pendientes fijas.
- Detecta suelos “no plásticos” (no se pueden obtener penetraciones inferiores al objetivo).

De estos dos tipos de ensayo, el propuesto por Casagrande ha sido el que mayor difusión ha tenido, habiéndose adoptado dicho ensayo como el de referencia por la inmensa mayoría de los países del mundo para la determinación del límite

líquido. No obstante, en países como el Reino Unido, España y otros, la normativa contempla los dos tipos de ensayos para su determinación, recomendando el empleo del penetrómetro de cono de caída por sus ventajas (Osorio, 2010).

Al complementar un poco más dichas situaciones, a continuación, se enuncian las características de los límites de interés (líquido y plástico) y el procedimiento para realizar los ensayos mediante la utilización de los equipos de Casagrande y del penetrómetro de cono de caída:

1.6.2.1. Límite Líquido (LL)

Es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado líquido. En este estado la mezcla se comporta como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso, por debajo de éste contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado plástico. En otras palabras, es el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remoldeado o amasado donde cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de límite líquido produce un cambio en el volumen del suelo (Osorio, 2010).

Para determinar esta característica existen dos ensayos totalmente válidos y probados, pero basados en diferentes efectos físicos. La norma ASTM propone el ensayo usando la copa de Casagrande, mientras que la norma británica, propone la utilización del penetrómetro de cono de caída. Los procedimientos a seguir en estos ensayos se detallan así:

1.6.2.2. Método Copa de Casagrande

El límite líquido es determinado sobre un espécimen procesado para remover cualquier material retenido en el tamiz # 40 (425 mm) mezclado con agua, esta mezcla se extiende en un recipiente esférico de bronce y se divide diametralmente en dos partes con un ranurador y luego se le hace fluir hasta unir las en una longitud aproximada de 13 mm, esto es producido por los golpes de caída del recipiente, con un aparato mecánico normalizado desde una altura de 10 mm. Con los datos del ensayo se prepara un gráfico, o se calcula una función entre el logaritmo del número de golpes necesario para cerrar la ranura y la correspondiente humedad del suelo (interpolación) (INCONTEC, 2012).

La Norma I.N.V.E – 125 - 07 “Determinación del Límite Líquido de los suelos” explica claramente como determinar este límite (INVIAS, 2007).

1.6.2.3. Método Penetrómetro de Cono o Vassilief

El límite líquido es determinado sobre un espécimen procesado para remover cualquier material retenido en el tamiz # 40 (425 mm) mezclado con agua. Para este ensayo se utiliza una porción del espécimen, la cual se introduce en un recipiente cilíndrico, y luego se penetra con un cono con dimensiones y masa normalizadas bajo la acción de su propio peso. Con los datos del ensayo se prepara una gráfica, o se calcula una función, entre la penetración y el contenido gravimétrico de humedad correspondiente (interpolación). Norma BS 1377, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Requirements and Sample Preparation (INCONTEC, 2012).

1.6.2.4. Límite plástico (LP)

El límite plástico (LP) es la humedad a partir de la cual un suelo deja de tener un comportamiento frágil para pasar a tenerlo plástico, es decir, la humedad límite entre el estado sólido y el plástico. A partir de esta humedad, el suelo puede sufrir cambios de forma irreversibles sin llegar a fracturar, y por debajo de esta el suelo no presenta plasticidad. El límite plástico también es definido como el contenido de humedad fronterizo entre el estado plástico y el estado semi sólido del suelo. El ensayo normado tanto dentro de la ASTM como en la norma británica es el ensayo en el cual una pequeña cantidad de suelo se enrolla mediante una presión manual y a una frecuencia normada, para realizar un rollo cuyo diámetro sea de 3.2 mm, el cual debe llegar a una humedad en la cual el rollo presenta fisuras y no se podrá volver a remoldar (Osorio, 2010).

1.6.2.5. Método de los Rollos.

El límite plástico se determina amasando y preparando manualmente rollos de 3 mm de diámetro hasta que el contenido gravimétrico de agua queda reducido a un punto en el cual los rollos se desmoronan y no pueden ser amasados nuevamente y vueltos a enrollar. El contenido gravimétrico de agua en esta condición se reporta como el límite plástico (INCONTEC, 2012).

La norma I.N.V.E – 126 – 07 “Limite plástico e índice de plasticidad de suelos” explica el procedimiento (INVIAS, 2007).

1.6.2.6. Método Penetrómetro de Cono.

El método de los rollos, así como el de Casagrande puede generar problemas a la hora de realizar un ensayo de determinación del límite plástico, es así como AGUS SETYO MUNTOHAR AND ROSLAN HASHIM (2002) hacen referencia a varias investigaciones en las cuales se plantea la penetración a través del método penetrómetro de cono para determinar dicho límite.

El ensayo consiste en hacer penetrar un cono de 80 gramos de masa a un ángulo de 30 grados, dentro de una masa de suelo contenida en un recipiente cuyo diámetro sea de 55mm y una altura de 40 mm en un tiempo de 5 segundos. Se debe determinar la penetración del cono en la muestra de suelo y sacar el contenido de humedad de la misma.

Una de las dificultades en la manipulación de los suelos cerca del límite plástico es la dureza que presenta, para poder sobre llevar esta dificultad se aconseja moldear y mezclar suelo en cantidades tales que su volumen sea superior al volumen del recipiente, el cual se presionará sobre la masa de suelo, atrapando así la muestra que se va a ensayar. Por otro lado, cabe resaltar que en todos los ensayos, la lectura de la penetración se realiza desde la superficie de la muestra (Luna, 2012).

1.6.2.7. Método de Feng

Tao Wei Feng propone como límite plástico el contenido de humedad a una penetración de 2mm, de acuerdo a las investigaciones realizadas por Houlsby, el cual dice que el esfuerzo de corte no drenado es inversamente proporcional al cuadrado de la penetración. Como parte central del método la relación que se usa, es un modelo lineal entre el logaritmo de la penetración y el logaritmo del contenido de humedad estudiado por Feng en el año 2000-2001.

Al igual que en la norma británica se mide la penetración del cono, partiendo de la superficie de la muestra de suelo hasta cuando la punta del cono topa la muestra. El suelo debe ser remoldeado en su contenido natural de humedad y antes de cada penetración, se recomienda hacer una masa de suelo de dimensiones superiores a la del recipiente, para poder introducir la misma en la masa de suelo, evitando así el aire atrapado en el recipiente.

El recipiente empleado facilita la preparación de la muestra. La influencia del operador es mínima en este ensayo de cono. El recipiente está diseñado para evitar los efectos de frontera para penetraciones de hasta 10 mm. Se puede obtener de manera confiable regresiones lineales de alta correlación mediante cuatro penetraciones. Si los resultados de ambos ensayos (rollitos y penetrómetro) coinciden de manera aproximada, se dirá que están bien relacionados (Luna, 2012).

Feng plante la ecuación:

$$\text{Limite plastico} = C2^m \quad [1]$$

Donde:

C: valor del corte en el eje Y de la línea contenido de humedad Vs penetración.

m: pendiente de la línea contenido de humedad Vs penetración (Budhu, 2015).

1.6.2.8. Método del doble peso

En la mayoría de investigaciones acerca del penetrómetro de cono se hace referencia de manera singular a varias investigaciones en todo el mundo, por tanto, es conveniente hacer una síntesis de las investigaciones que son más relevantes, una de ellas fue realizada por T. Houslby y T Koumoto, en ella se explica de manera clara la teoría y la práctica de penetrómetro de cono.

Los autores encontraron que para suelos de baja plasticidad los ensayos de la copa de Casagrande y del rollo de 3 mm no se adaptan bien. Se realizó una nueva investigación en la cual se muestra una gran variedad de valores de límite plástico para un mismo suelo. De la investigación se notó que el límite plástico obtenido con el cono se encuentra dentro del promedio de valores.

Para la realización de este método es conveniente regirse por la norma británica que exige implementar las especificaciones contenidas en ella como las siguientes: usar un cono de 30 grados y 80 gramos de masa, con la particularidad de permitir cambiar su peso sin tener que mover la punta del cono.

Se debe dividir la masa de suelo en 4 partes, teniendo en cuenta que a mayor número de sub muestras, mayor es la precisión, para ello se añadirá la suficiente cantidad de agua o se secará la muestra al aire. El contenido de agua en la regresión lineal que se obtiene del esfuerzo de corte no drenado y el límite plástico, se da cuando se usa un cono del mismo peso, pero se ha demostrado que se puede aplicar para un cono de peso doble (Luna, 2012).

1.7. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto “obtención del límite líquido y límite plástico usando el penetrómetro de cono de caída, considerando los diferentes conos existentes en la literatura para un suelo bentonítico” se realizaron pruebas de laboratorio donde se determinó mediante el método de penetrómetro de cono de caída, copa de Casagrande y rollitos de material los límites líquidos y plásticos de una muestra de bentonita. Esto se hizo con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos.

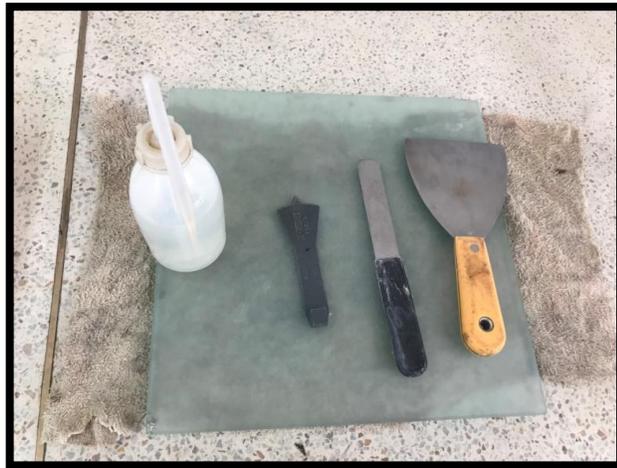
A modo general para realizar estos ensayos de laboratorio se utilizó como material de prueba la bentonita, en los cuatro procesos se mezcló con agua destilada y se usaron ranuradores, espátulas y soporte de vidrio. El material se pesó con una balanza y se secó en un horno.

Figura 12. Muestra de bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 13. Agua destilada, ranurador y espátulas



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 14. Balanza



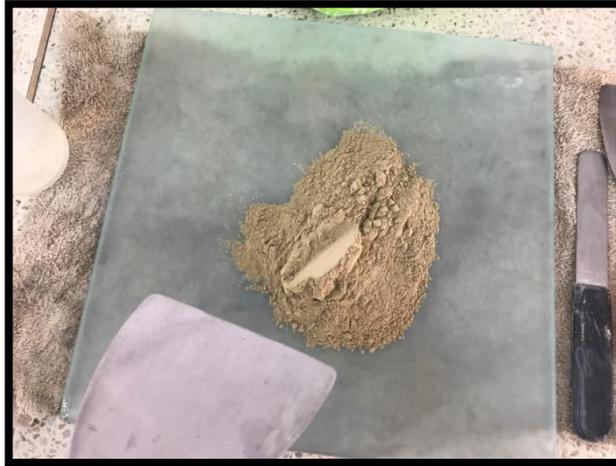
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 15. Horno



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 16. Bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 17. Bentonita y agua destilada



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 18. Mezcla bentonita y agua destilada



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

1.7.1. Determinación del límite líquido mediante copa de Casagrande

I.N.V.E. – 125 – 07

Para la determinación de este límite se tomaron aproximadamente 100 gramos de material el cual paso el tamiz n° 40, se mezcló completamente con agua destilada, se depositó en la cazuela de forma uniforme, se le hizo una ranura en el centro y se procedió a realizar los giros a una velocidad aproximada de dos revoluciones por segundo hasta que las dos mitades de la muestra se pusieron en contacto con una distancia de unos 13 o 14 milímetros y se anotó la cantidad de golpes que se produjeron.

Continuamente se extrajo una fracción de muestra de la cazuela, se depositó en un recipiente y se le tomo el peso. Luego se llevó la muestra al horno con una temperatura aproximada de 110 °C hasta que se obtuvo una masa constante y se volvió a pesar. Después de esto se le agrego más agua destilada al material sobrante y se realizó el mismo procedimiento. Esto se hizo dos veces más.

Con los datos obtenidos se realizó una gráfica de curva de fluidez en la que en las abscisas o eje X se ubicaron los números de golpes, y en la ordenada o eje Y se colocaron los contenidos de humedad calculados con la ecuación 2. Con estos datos se realizó una línea aproximada a los tres puntos y se leyó el límite líquido a los 25 golpes.

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} * 100 \quad [2]$$

Figura 19. Aparato del límite líquido



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 20. Aparato del límite líquido con bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 21. Aparato del límite líquido con bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 22. Aparato del límite líquido con bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 23. Fracción de bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 24. Peso recipiente



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 25. Peso del recipiente más bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 26. Bentonita en el horno



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

1.7.2. Determinación del límite líquido mediante el penetrómetro de cono de caída utilizando diferentes conos de penetración

Para la determinación de este límite se tomaron aproximadamente 100 gramos de material, se mezclaron con agua destilada, se introdujeron en el recipiente del equipo de penetración y se enrasó de tal manera que las burbujas de aire salieran. A continuación, con ayuda del equipo se ubicó el cono a ras de la muestra, se soltó y se tomó el valor de penetración.

Continuamente se extrajo una fracción de muestra, se depositó en un recipiente y se le tomó el peso. Luego se llevó la muestra al horno con una temperatura aproximada de 110 °C hasta que se obtuvo una masa constante y se volvió a pesar. Después de esto se le agregó más agua destilada al material sobrante y se realizó el mismo procedimiento. Esto se hizo tres veces más.

Con los datos obtenidos se realizó una gráfica de contenido de humedad vs penetración en la que en las abscisas o eje X se ubicaron los valores de penetración, y en la ordenada o eje Y se colocaron los contenidos de humedad calculados con la ecuación 2. Con estos datos se realizó una línea aproximada a los cuatro puntos y se leyó el límite en un valor dado por los conos. Es importante resaltar que los ejes de la gráfica son logarítmicos.

Para el cono británico el límite líquido se lee a los 20 milímetros de penetración, para el ruso a los 10 milímetros de penetración, para el canadiense a los 20 milímetros de penetración, para el indio a los 25.4 milímetros de penetración, y para el colombiano a los 20 milímetros de penetración. Para cada tipo de cono se hicieron cinco pruebas y cada una consta de cuatro ensayos de penetración.

Es importante recalcar que los conos varían de peso y ángulo de penetración, así como los recipientes donde se deposita el material varían de diámetro y profundidad.

Figura 27. Equipo de penetrómetro de cono de caída



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 28. Tablero de penetración



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 29. Conos de penetración



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 30. Penetrómetro de cono de caída con bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 31. Penetrómetro de cono de caída con bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 32. Fracción de bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 33. Peso del recipiente



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 34. Peso del recipiente más bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 35. Bentonita en el horno



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

1.7.3. Determinación del límite plástico mediante los rollitos de material

I.N.V.E. – 126 – 07

El límite plástico o contenido más bajo de agua en la bentonita se determinó con aproximadamente 20 gramos de material, el cual se preparó previamente mezclándolo con agua destilada. Con el material se hicieron rollitos de unos 3 milímetros de diámetro enrollándolos en la palma de la mano a una razón aproximada de 90 rotaciones por minuto. Esto se hizo hasta tener aproximadamente 8 gramos de material enrollado.

Se pesó un recipiente vacío, se le agregó el material y se volvió a pesar. Continuamente la materia se puso a secar en el horno y luego de seco se volvió a pesar para calcular el límite plástico con la ecuación 3.

$$\text{Limite plastico} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} * 100 \quad [3]$$

Figura 36. Rollos de bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 37. Peso del recipiente



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 38. Peso del recipiente más bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 39. Bentonita en el horno



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

1.7.4. Determinación del límite plástico mediante el penetrómetro de cono de caída utilizando diferentes conos de penetración

Para la determinación del límite plástico en la muestra de bentonita se utilizaron dos métodos distintos que se explican a continuación:

1.7.4.1. Método del doble peso

Para la determinación de este límite se tomaron aproximadamente 100 gramos de material, se mezclaron con agua destilada, se introdujeron en el recipiente del equipo de penetración y se enrasó de tal manera que las burbujas de aire salieran. A continuación, con ayuda del equipo se ubicó el cono para límite plástico a ras de la muestra, se soltó y se tomó el valor de penetración.

Continuamente se extrajo una fracción de muestra, se depositó en un recipiente y se le tomó el peso. Luego se llevó la muestra al horno con una temperatura aproximada de 110 °C hasta que se obtuvo una masa constante y se volvió a pesar. Después de esto se le agregó más agua destilada al material sobrante y se realizó el mismo procedimiento. Esto se hizo tres veces más.

Con los datos obtenidos se realizó una gráfica de contenido de humedad vs penetración en la que en las abscisas o eje X se ubicaron los valores de penetración, y en la ordenada o eje Y se colocaron los contenidos de humedad calculados con la ecuación 2. Posteriormente el contenido de humedad se dividió en dos y volvió a realizar una gráfica del nuevo contenido de humedad vs penetración, con estos datos se realizó una línea aproximada a los cuatro puntos y se leyó el límite en un valor dado por los conos. Es importante resaltar que los ejes de la gráfica son logarítmicos.

Para el cono británico el límite plástico se lee a los 20 milímetros de penetración, para el ruso a los 10 milímetros de penetración, para el canadiense a los 20 milímetros de penetración, para el indio a los 25.4 milímetros de penetración, y para el colombiano a los 20 milímetros de penetración. Para cada tipo de cono se hicieron cinco pruebas y cada una constó de cuatro ensayos de penetración.

Es importante recalcar que los conos también varían de peso y ángulo de penetración, así como los recipientes donde se deposita el material varían de diámetro y profundidad.

Figura 40. Preparación de la bentonita para límite plástico



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 41. Penetrómetro de cono de caída con bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 42. Peso del recipiente más bentonita



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Figura 43. Bentonita en el horno



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

1.7.4.2. Método de Feng, 2000

Este método fue diseñado por Feng en el 2000 y propone la siguiente ecuación:

$$\text{Limite plastico} = C2^m \quad [1]$$

Donde:

C: valor del corte en el eje Y de la línea contenido de humedad Vs penetración.

m: pendiente de la línea contenido de humedad Vs penetración.

Para este método se utilizan los datos obtenidos con los conos de penetración para límite líquido. Se incrementa la línea contenido de humedad Vs penetración hasta que corte en el eje Y, se extrae ese valor y el valor de la pendiente de dicha línea y se reemplaza en la ecuación 3 para obtener el límite plástico en cada uno de los ensayos con los diferentes conos de penetración.

2. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para la arcilla bentonita de límites líquidos y plásticos por los métodos de penetrómetro de cono de caída, Casagrande y rollitos de material se encuentran sintetizados en diferentes tablas a continuación.

Conjuntamente, en la última parte se encuentran anexos con los resultados de todos los conos de penetración y todos los ensayos por Casagrande y rollitos de material debido a que fueron procesos similares y en el caso de los conos solo cambio la penetración.

2.1. RESULTADOS LÍMITE LÍQUIDO

En las tablas 1 – 2, se muestran los resultados de límite líquido obtenidos en la bentonita con el cono británico y el método de copa de Casagrande. Cada resultado contiene su respectiva gráfica.

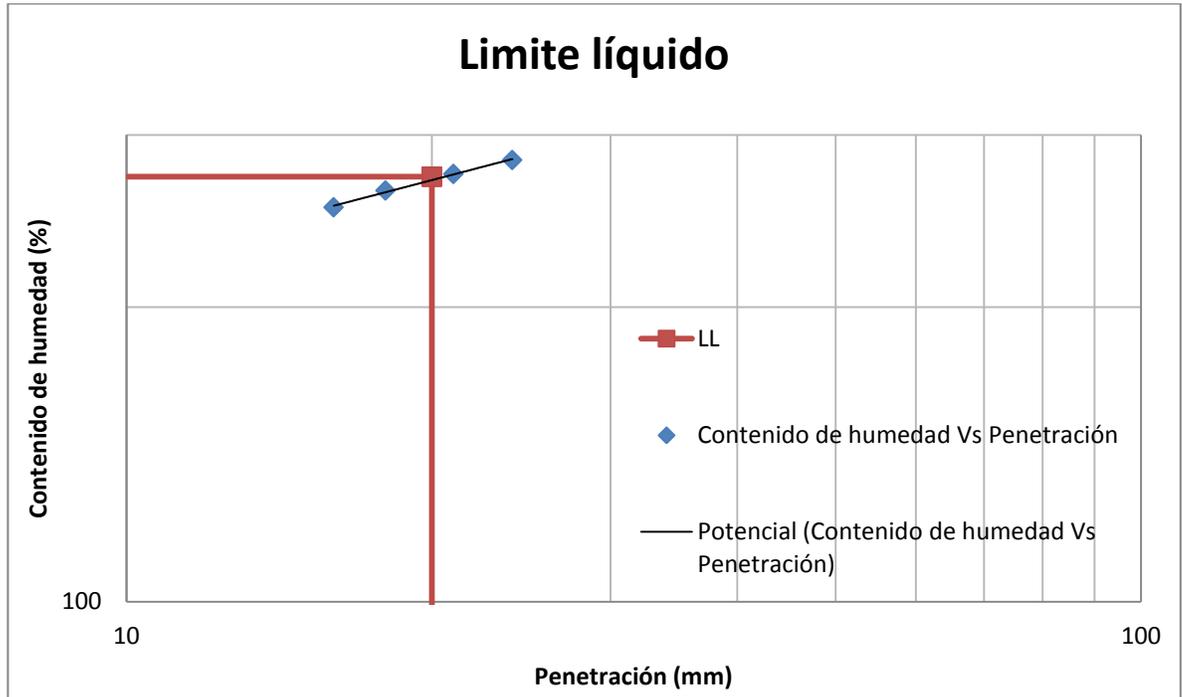
2.1.1. Método de penetrómetro de cono de caída

Tabla 1. Ensayo N°1 LL cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	24
Recipiente N°	5	9	13	16
Peso recipiente (gr)	14.13	13.65	14.01	13.57
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	34.01	33.16	32.40	30.15
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.76	19.02	18.93	17.9
Contenido de humedad (%)	253.11	263.31	273.78	282.91
Límite líquido	272			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 1. Ensayo N°1 LL cono británico



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

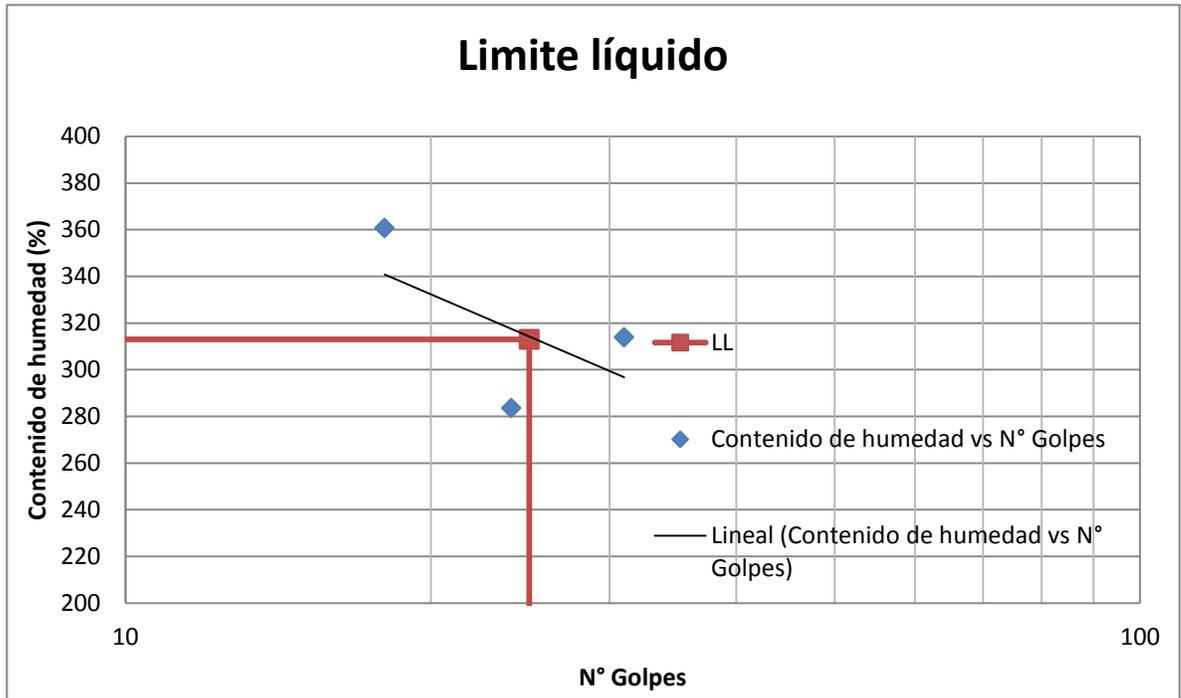
2.1.2. Metodo de copa de Casagrande

Tabla 2. Ensayo N°1 LL copa de Casagrande

Humedad			
N° golpes	15-20	20-30	25-35
Peso recipiente (gr)	12.88	6.19	4.77
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	19.10	14.82	12.22
Peso recipiente + suelo seco (gr)	14.23	8.44	6.57
Contenido de humedad (%)	360.74	283.56	313.89
N° golpes	18	24	31
LL		313	

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 2. Ensayo N°1 LL copa de Casagrande



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

2.2. RESULTADOS LÍMITE PLÁSTICO

En las tablas 3 – 4 – 5, se muestran los resultados de límite plásticos obtenidos en la bentonita con el cono británico mediante los métodos doble peso y Feng, así como el método de rollos de material. Los dos primeros métodos contienen su respectiva gráfica.

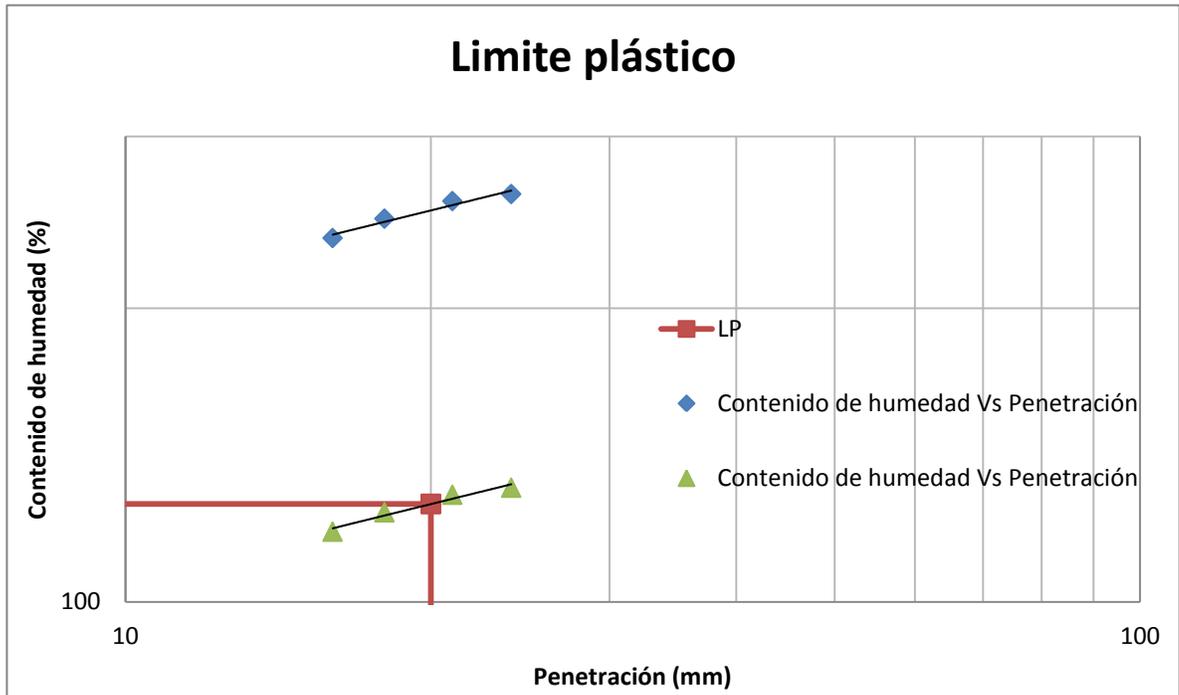
2.2.1. Método del doble peso

Tabla 3. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	24
Recipiente N°	19	18	16	17
Peso recipiente (gr)	14.88	13.64	13.83	13.9
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.58	30.16	30.24	30.87
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.85	18.4	18.42	18.59
Contenido de humedad (%)	236.02	247.06	257.52	261.83
Contenido de humedad (%)	118.01	123.53	128.76	130.92
Limite plástico (%)	126			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 3. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono británico



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

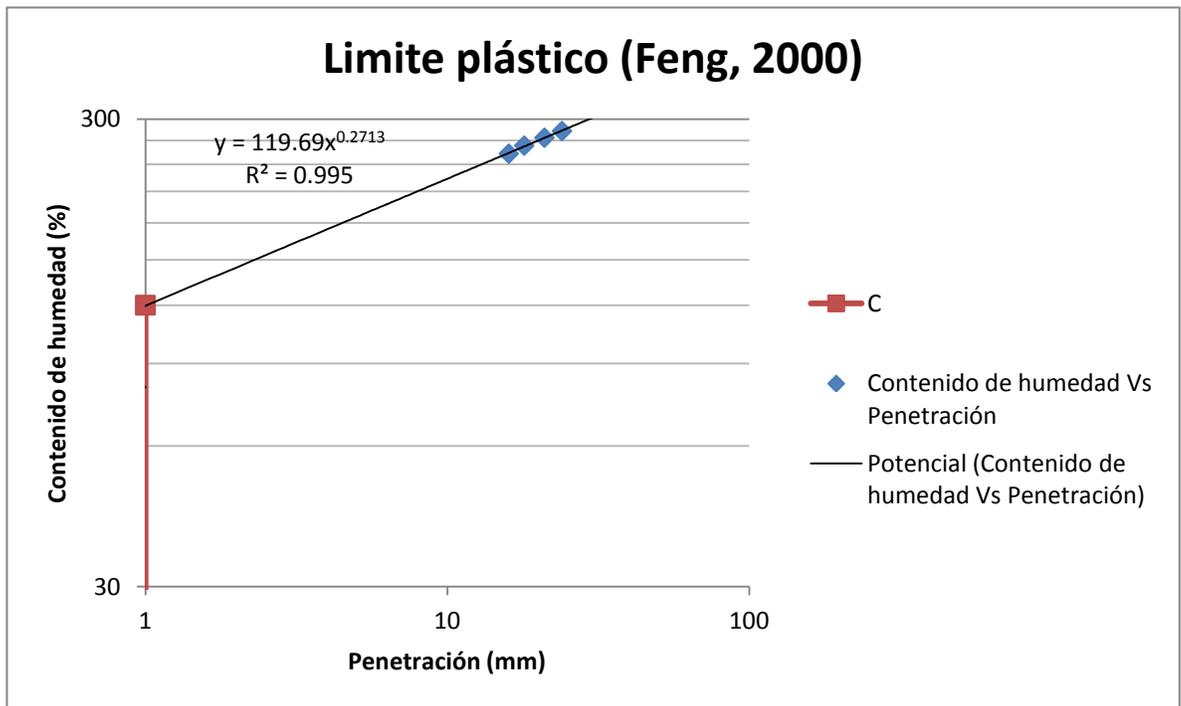
2.2.2. Método de Feng, 2000

Tabla 4. Ensayo N°1 LP método de Feng cono británico

C	119.69
m	0.2713
LP	144

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 4. Ensayo N°1 LP método de Feng cono británico



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

2.2.3. Método de rollitos de material

Tabla 5. Ensayo N°1 LP método rollos de material

Humedad	
Peso recipiente (gr)	8.25
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	14.43
Peso recipiente + suelo seco (gr)	11.87
Contenido de humedad LP (%)	71

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al analizar los resultados de la investigación obtenidos a partir de la muestra de bentonita, fue conveniente comparar los métodos de estudio (penetrómetro de cono de caída con Casagrande y rollitos de material). Para facilitar dichos análisis se realizaron gráficos que poseen una línea de tendencia y una ecuación, estas gráficas fueron obtenidas a partir de cada uno de los conos empleados en la elaboración de los ensayos y los métodos mencionados anteriormente.

3.1. LIMITE LÍQUIDO

El coeficiente de determinación (r^2) de las gráficas LL cono Vs LL Casagrande para todos los conos arrojo un valor cercano a 1, por tanto, la ecuación que mejor relaciono las variables es una potencial y se pudo ver que existe una relación lineal positiva casi perfecta entre las variables, indicativo de que hubo un mayor poder explicativo del modelo de regresión.

También se observó que, por el método de los conos, los datos obtenidos son menos dispersos en comparación a los datos obtenidos por el método de Casagrande, pero no tan exactos para algunos conos.

En la tabla 6, el límite líquido calculado por el metodo del penetrometro de cono de caida britanico, arrojo valores mínimos y máximos de 268 y 272 respectivamente, cuando se comparó con el límite líquido calculado por el metodo tradicional de copa de Casagrande fue menor, pues los valores teóricos de dicho método se encuentran entre 281 y 313, lo que indicó que para un tipo de material arcilloso como la bentonita y utilizando un angulo de 30 grados, un peso de 80 gramos y una penetración de 20 milímetros (según norma Britanica) los parámetros son bajos.

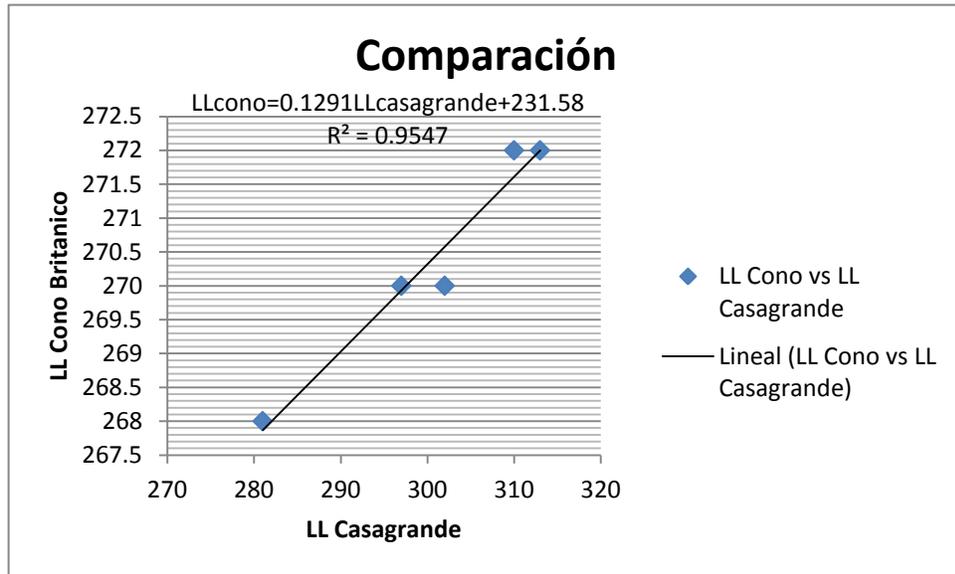
En cuanto al coeficiente de correlacion (r^2) determinado en la gráfica de comparación, fue realmente bueno pues obtuvo un valor de 0.95 que es cercano a 1, lo que indicó que existe una relación lineal positiva entre los dos métodos.

Tabla 6. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración británico

LL Casagrande	LL Cono Británico
281	268
297	270
302	270
310	272
313	272

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 5. LL cono de penetración británico Vs LL Casagrande



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

En la tabla 7, para el análisis del cono de penetración ruso, cabe resaltar que los valores obtenidos fueron muy diversos en comparación con los otros conos, puesto que dichos valores mínimos y máximos estuvieron entre 207 y 221 respectivamente, lo que evidenció valores de límite líquido más dispersos. Esto reflejó que penetrar 10 milímetros con un ángulo de 30 grados y un peso de 76 gramos según especificaciones para dicho cono, no son convenientes para un material tan plástico y que cambia drásticamente su volumen al contacto con el agua.

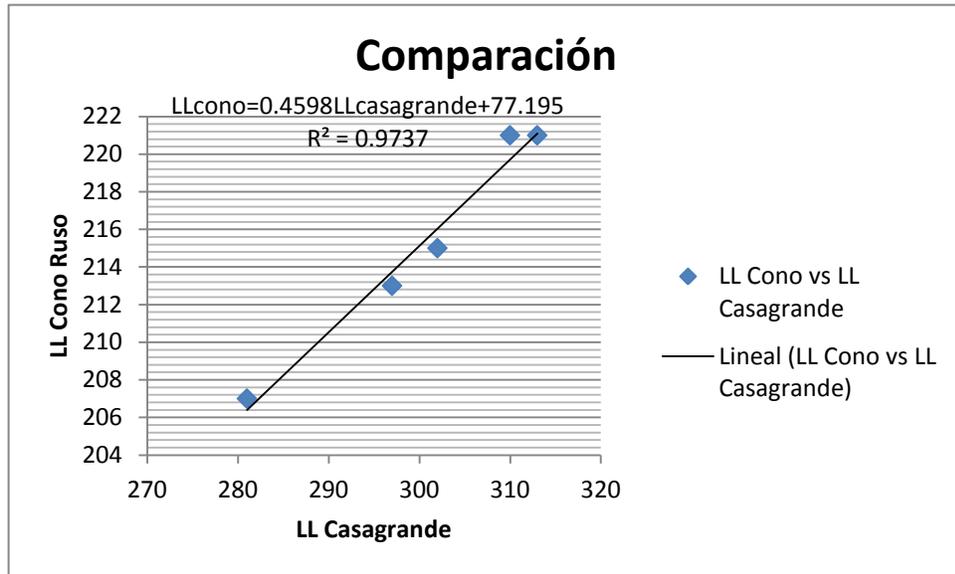
De igual manera al comparar los resultados con el método tradicional fueron un poco erróneos, pues se alejaron de los datos teóricos lo que generó que el uso del cono ruso sea poco preciso, en cambio en cuanto a la relación lineal los dos métodos se correlacionaron muy bien obteniendo un valor de 0.97.

Tabla 7. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración ruso

LL Casagrande	LL Cono Ruso
281	207
297	213
302	215
310	221
313	221

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 6.LL cono de penetración ruso Vs LL Casagrande



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

En cuanto a la tabla 8, los datos obtenidos con el cono canadiense se aproximaron a los obtenidos con el método de Casagrande, pues dichos valores experimentales tuvieron valores de 278 y 280 cercanos a los teóricos de 281 y 313, lo que indicó que este cono puede ser utilizado en materiales altamente plásticos como la bentonita con unas especificaciones para el cono de 60° un peso de 60 g tomando lectura del limite a una profundidad de 20 mm pues de esta manera los resultados obtenidos fueron óptimos y confiables.

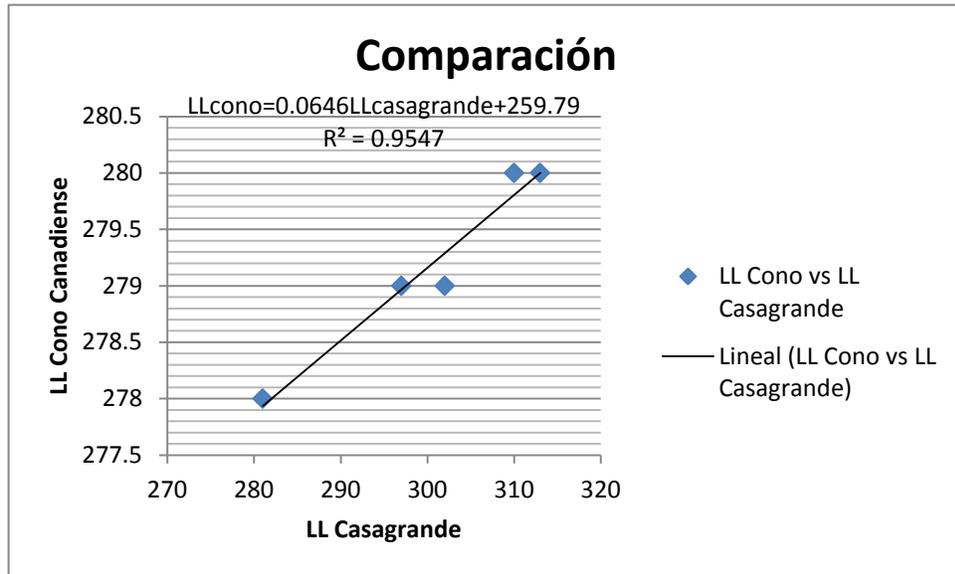
Este cono fue el mejor y ayudó a darle algo de importancia y validéz a la investigación. En cuanto a la correlación también fue buena, pues se obtuvo un valor de 0.95.

Tabla 8. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración canadiense

LL Casagrande	LL Cono Canadiense
281	278
297	279
302	279
310	280
313	280

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 7. LL cono de penetración canadiense Vs LL Casagrande



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Analizando la tabla 9, el cono indio también permitió obtener datos parecidos al método de Casagrande, además según la gráfica presentó una correlación de 0.98, indicativos que generaron que este cono fuera uno de los mejores al igual que el canadiense, para la obtención del límite líquido en arcillas altamente plásticas.

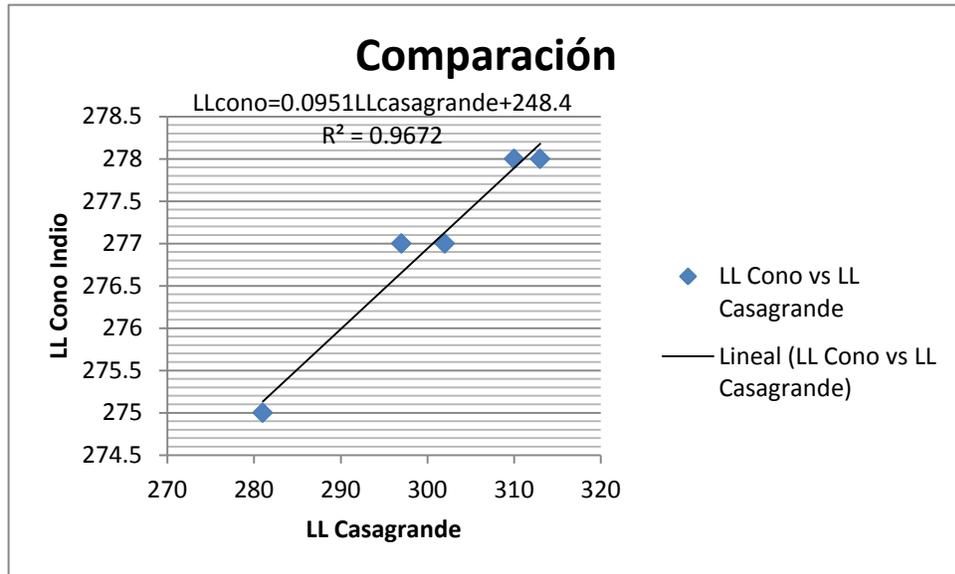
Este cono fue regido a partir de un ángulo de 31° , un peso de 148 g, tomando lectura del límite líquido a una profundidad de 25,4 mm en un recipiente de 50 mm de diámetro, por lo cual se pudo ver que estas medidas satisficieron de manera positiva la obtención de dicho limite.

Tabla 9. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración indio

LL Casagrande	LL Cono Indio
281	275
297	277
302	277
310	278
313	278

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 8. LL cono de penetración indio Vs LL Casagrande



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

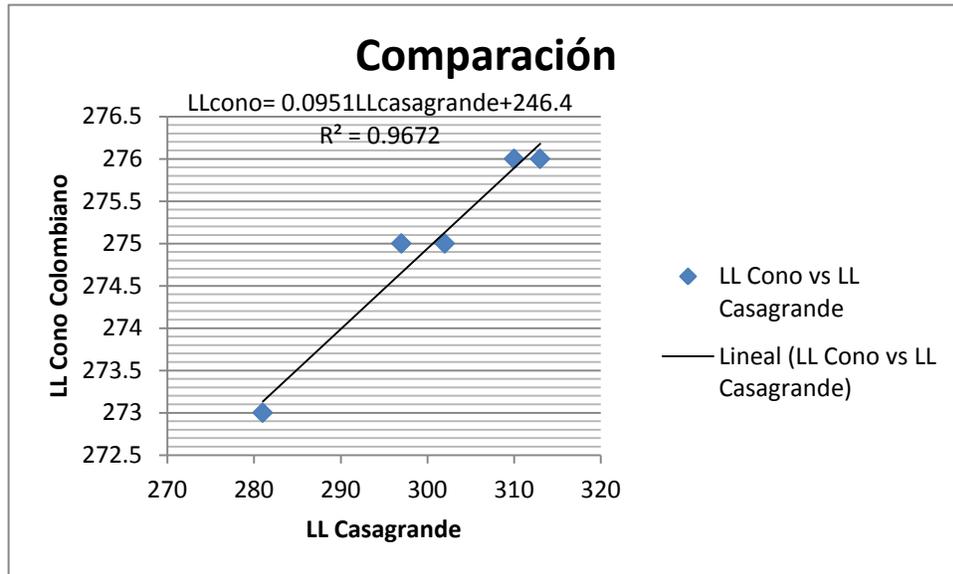
En la tabla 10 se tabularon los respectivos resultados para el cono colombiano obteniendo valores de 273 como mínimo y 276 como máximo, dicha relación fue mas o menos buena y estuvo regida por un ángulo de 45°, peso de 75 g y una lectura del límite líquido a una profundidad de 40 mm, aunque los resultados fueron un tanto menores en comparación con los de Casagrande la correlación fue relativamente buena obteniendo un valor de 0.96.

Tabla 10. Datos LL por los métodos de Casagrande y cono de penetración colombiano

LL Casagrande	LL Cono Colombiano
281	273
297	275
302	275
310	276
313	276

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 9. LL cono de penetración colombiano Vs LL Casagrande



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

3.2. LIMITE PLÁSTICO

3.2.1. Método del doble peso

Para este método al analizar los resultados se pudo intuir de manera más sencilla, gracias a que la relación y la comparación establecida fue determinada a partir de una serie de datos teóricos para el método de los rollitos de material y una serie de datos experimentales tomados para cada cono a partir de sus especificaciones ya normadas.

Cabe resaltar que se realizaron las respectivas gráficas que representaron la comparación de los dos métodos donde se obtuvo una correlación medianamente buena para cada cono, pero en la obtención de los datos en algunos de ellos se observaron ciertas variaciones considerables, por tanto, fueron analizados cada uno por separado como se muestra a continuación.

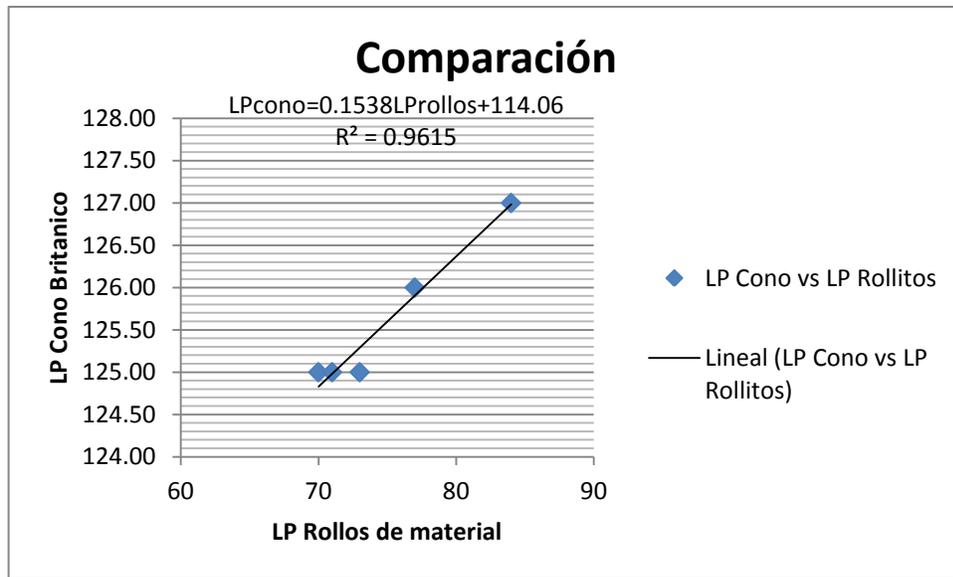
En la tabla 11 se encuentran contenidos los respectivos resultados para el cono de penetración británico, que arrojó resultados alejados en relación con los datos del método de los rollitos pero muy similares entre sí, con valores mínimos y máximos de 125 y 127 respectivamente, dichos valores experimentados demostraron que la bentonita como material posee características de plasticidad muy altas y que el cono británico no es tan certero para la obtención de este límite, aunque si se correlacionó bien arrojando un resultado de 0.96.

Tabla 11. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración británico

LP Rollos de material	LP Cono Británico
70	125
71	125
73	125
77	126
84	127

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 10. LP cono de penetración británico Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

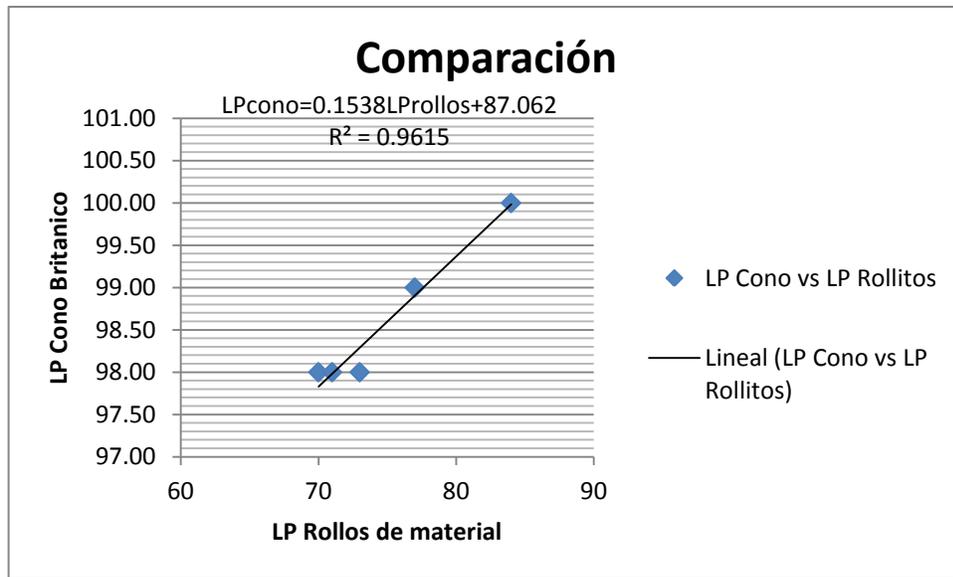
En cuanto a la tabla 12 perteneciente a los resultados del cono ruso, los datos obtenidos se relacionaron entre sí, pues fueron similares con valores entre 98 y 100, pero por otro lado no fueron exactos confrontados con los teóricos y aunque su correlación fue de 0.96 lo que indicó que fue buena, se pudo analizar que el método del doble peso para dicho cono no es relativamente fiable.

Tabla 12. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración ruso

LP Rollos de material	LP Cono Ruso
70	98
71	98
73	98
77	99
84	100

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 11. LP cono de penetración ruso Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

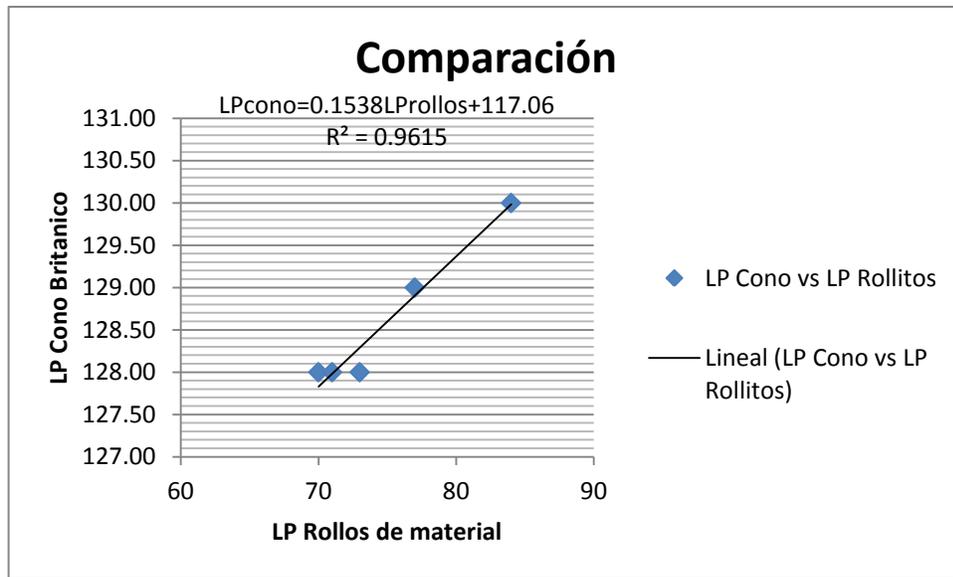
En la tabla 13 se encuentran consignados los valores que se leyeron en el ensayo para el cono canadiense, en este caso también se comprobó que la obtención de datos entre sí se relacionaron pues la variación de los mismos fue baja con diferencias de 128 a 130, pero al compararlo con los rollitos aun fue cambiante igual que los conos analizados anteriormente, su correlacion fue de 0.96.

Tabla 13. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración canadiense

LP Rollos de material	LP Cono Canadiense
70	128
71	128
73	128
77	129
84	130

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 12. LP cono de penetración canadiense Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

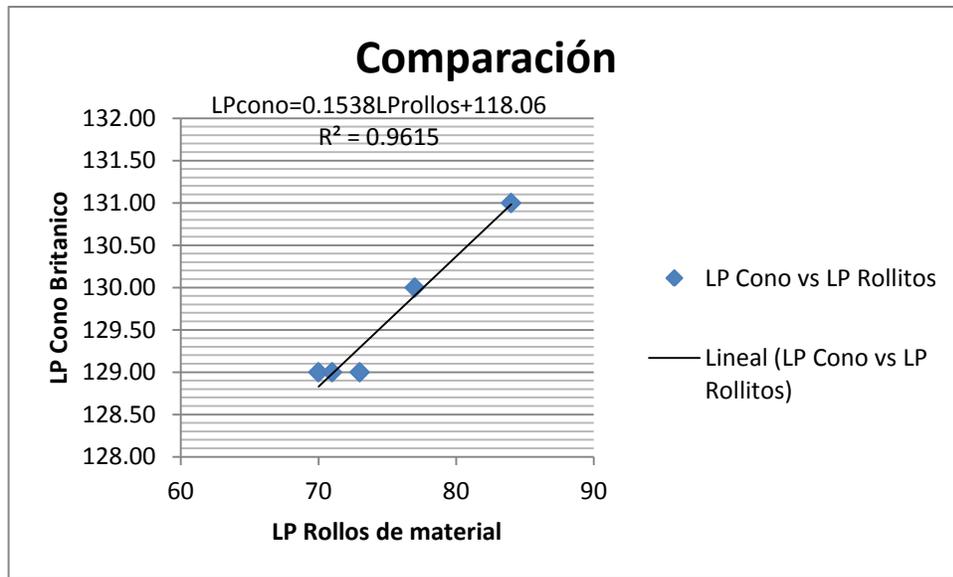
La tabla 14 contiene los resultados para el cono indio que arrojó los valores mas alejados en comparación con los otros conos y de igual manera con los rollitos, aunque obtuvo la misma correlación que los demas de 0.96, los valores se aproximaron a doblar los teóricos con resultados de 129 y 131 a diferencia de 70 y 84.

Tabla 14. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración indio

LP Rollos de material	LP Cono Indio
70	129
71	129
73	129
77	130
84	131

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 13. LP cono de penetración indio Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

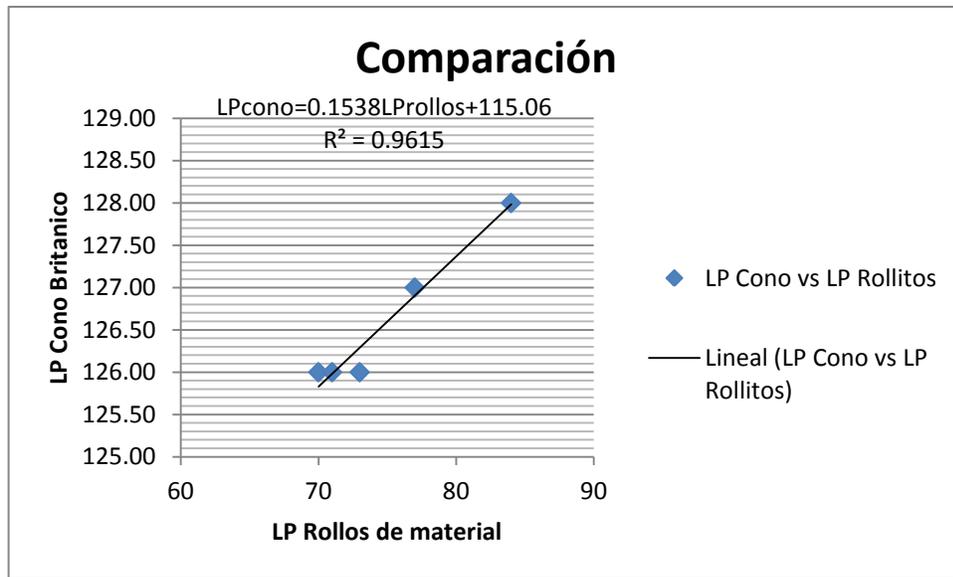
Con este último ensayo para el cono colombiano y de acuerdo a la tabla 15, se corroboró que el método del doble peso arroja valores no confiables y un poco alejados de los datos que han sido experimentados en muchas investigaciones y que por lo tanto ya se encuentran estandarizados, lo que quiere decir que no es fiable optar por llevarlo a la práctica para otros ensayos pero si para seguir estableciendo comparaciones, pues fue un método que se correlacionó muy bien y para este cono también dió un valor de 0.96 pero con datos de 126 y 128 no cercanos a los teóricos como se mencionó al principio.

Tabla 15. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración colombiano

LP Rollos de material	LP Cono Colombiano
70	126
71	126
73	126
77	127
84	128

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 14. LP cono de penetración colombiano Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

3.2.2. Método de Feng, 2000

La comparación de resultados para este método se propuso también mediante el análisis de gráficas y de acuerdo a los datos tanto experimentales como teóricos obtenidos. Dentro de lo que es el límite plástico, cuyo ensayo fue bastante básico, además de que fue igual para todos los casos, se pudo ver una gran variación en la utilización de los diferentes conos de penetración, así como en los respectivos resultados.

El método de Feng en relación con el de doble peso arrojó valores aun mas lejanos a los que se propusieron como teóricos, el cono británico cuyos resultados estan consignados en la tabla 16, muestra valores entre 144 y 162 con una

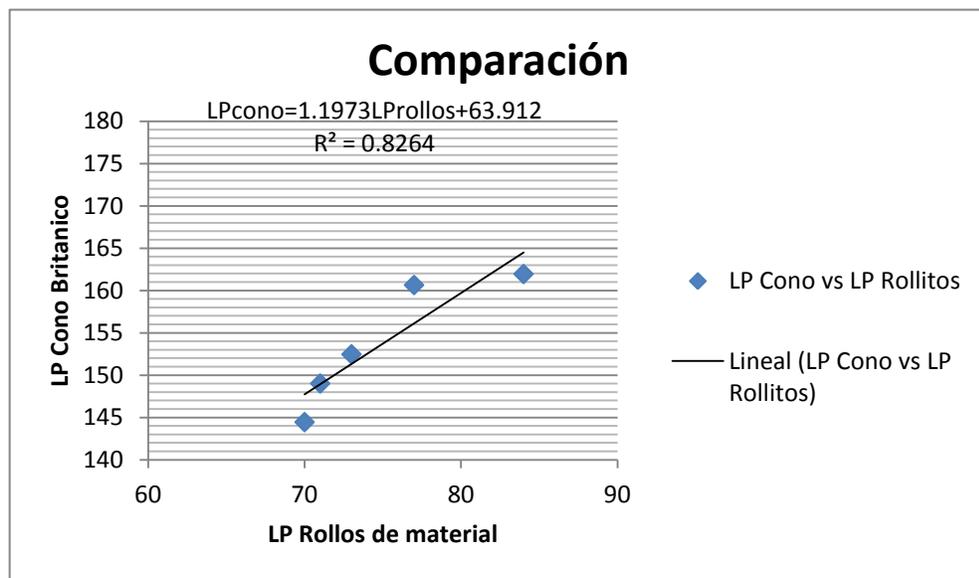
correlación baja de 0.83, indicativo de que los dos metodos no presentan relacion lineal.

Tabla 16. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración británico

LP Rollos de material	LP Cono Británico
70	144
71	149
73	152
77	161
84	162

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 15. LP cono de penetración británico Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

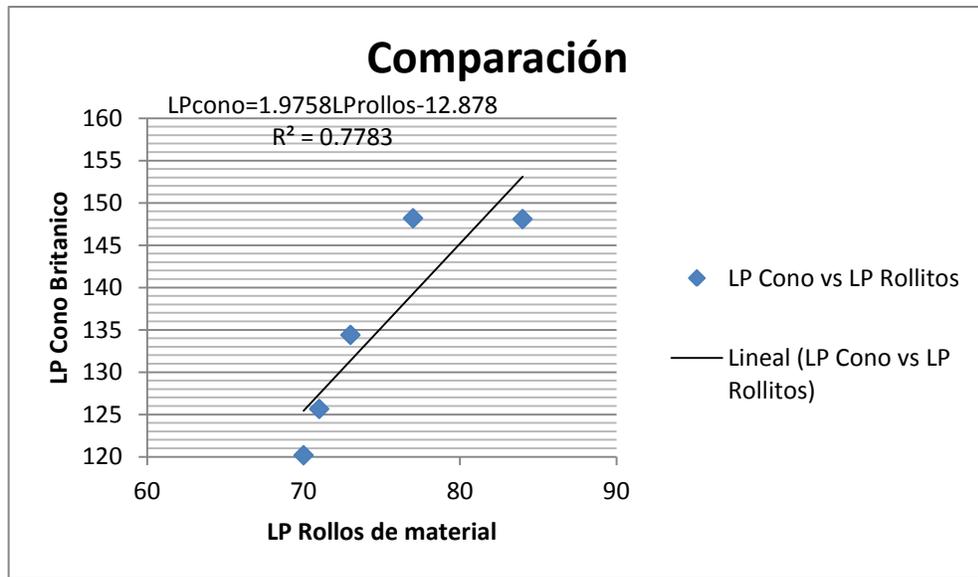
Según la tabla 17 los resultados arrojaron valores mínimos y máximos de 120y 148 respectivamente, que no solo demostró que dichos datos no fueran fiables, sino que ademas ocasionó que la correlación disminuyera obteniendo un valor de 0.78 lo que demostró que no fue buena.

Tabla 17. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración ruso

LP Rollos de material	LP Cono Ruso
70	120
71	126
73	134
77	148
84	148

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 16. LP cono de penetración ruso Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

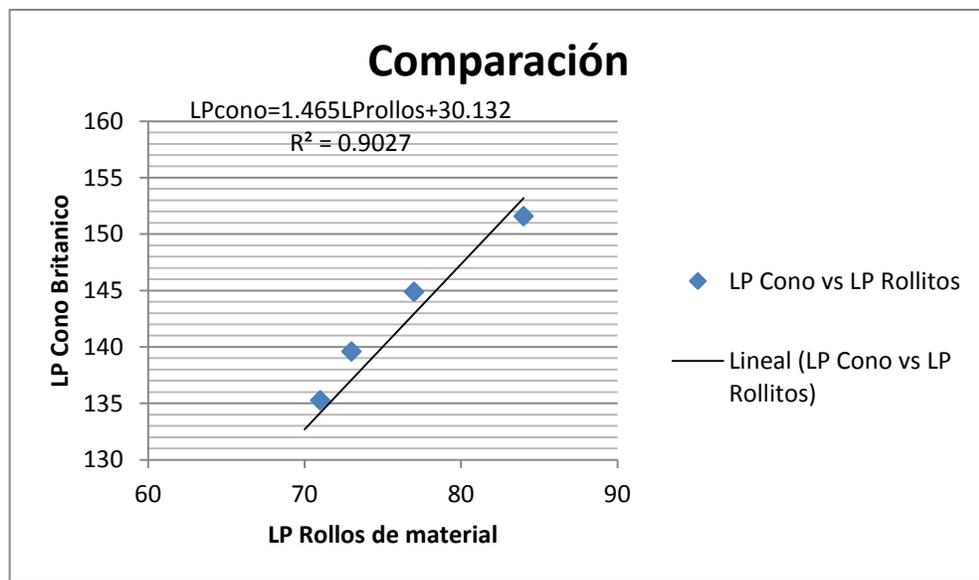
Los resultados de la tabla 18 correspondientes al cono canadiense, estuvieron aproximados a doblar los teóricos con valores entre 129 y 152, pero se salvaguardo que el cono canadiense para el método de Feng se correlacionara un poco mejor que el anterior, pues de acuerdo a la gráfica se obtuvo un valor de 0.90 aunque para la práctica no fue bueno, pues siempre se buscó y se esperó que dicho valor estuviera cercano a 1 para poder considerarlo como preciso.

Tabla 18. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración canadiense

LP Rollos de material	LP Cono Canadiense
70	129
71	135
73	140
77	145
84	152

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 17. LP cono de penetración canadiense Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

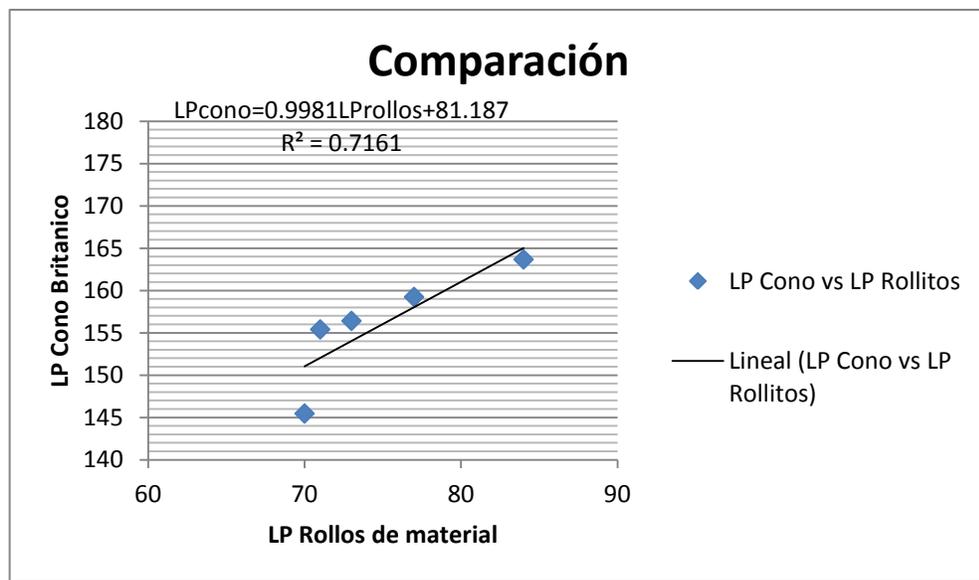
La tabla 19 consignó los datos para el cono de penetración indio que fueron poco precisos pues dieron valores un poco altos que demostraron que el método de Feng es muy cambiante en relación con el método tradicional de los rollitos, los valores fueron 145 como mínimo y 164 como máximo. La correlación para el cono indio mejoró arrojando un valor bastante malo de 0.72.

Tabla 19. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración indio

LP Rollos de material	LP Cono Indio
70	145
71	155
73	156
77	159
84	164

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 18. LP cono de penetración indio Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

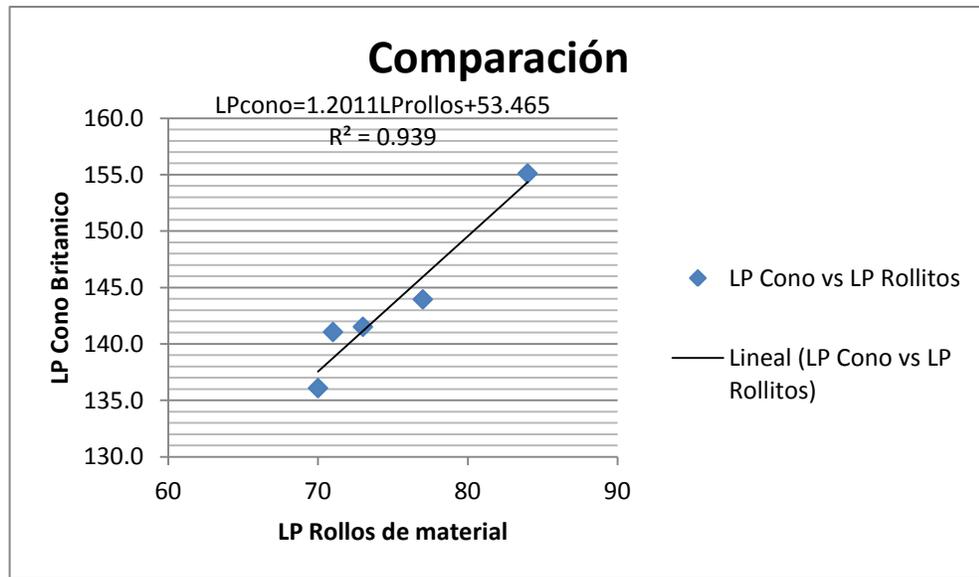
De acuerdo a la tabla 20 los datos para el cono colombiano no fueron los esperados, pero sirvieron para poder establecer la comparación entre los dos métodos donde para este caso se obtuvieron valores de 136 y 155 mínimos y máximos respectivamente, cercanos entre sí, pero muy cambiantes en cuanto a 70 y 84 que fueron los obtenidos por el método de los rollitos. La correlación para el cono colombiano fue igual a la del cono indio con un valor de 0.94, lo que demostró que la relación lineal de estos dos conos fuera mejor pero no buena.

Tabla 20. Datos LP por los métodos de rollitos de material y cono de penetración colombiano

LP Rollos de material	LP Cono Colombiano
70	136
71	141
73	142
77	144
84	155

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 19. LP cono de penetración colombiano Vs LP rollos de material



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

3.3. RESUMEN DE RESULTADOS

Tabla 21. Resumen método copa de Casagrande y penetrómetro de cono de caída para LL

METODO EMPLEADO		RESULTADOS PROMEDIO LL	COMPARACION
Copa de Casagrande	Casagrande	301	El método del penetrómetro arroja resultados muy cercanos a los teóricos en especial el cono canadiense, lo que resulta de gran importancia para esta investigación, pues dicho método puede ser utilizado en la realización de ensayos a la hora de determinar el límite líquido mostrando resultados confiables.
Penetrómetro de cono de caída	Cono británico	270	
	Cono ruso	215	
	Cono canadiense	279	
	Cono indio	277	
	Cono colombiano	275	

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 22. Resumen método de Casagrande mediante rollitos de material y penetrómetro de cono de caída utilizando el doble peso para LP

METODO EMPLEADO		RESULTADOS PROMEDIO LP	COMPARACION
Casagrande	Rollitos de material	75	Para la determinación del límite plástico, el método del doble peso arroja resultados no cercanos a los teóricos, lo que deja como consecuencia que para la determinación de dicho límite es recomendable seguir utilizando métodos tradicionales como los rollitos de material o por lo menos para materiales altamente plásticos como la bentonita. Mediante más investigaciones o con la utilización de otros materiales se podrá determinar si este método es óptimo o no.
Doble peso, utilizando el penetrómetro de cono de caída	Cono británico	126	
	Cono ruso	99	
	Cono canadiense	129	
	Cono indio	130	
	Cono colombiano	127	

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 23. Resumen método de Casagrande mediante rollitos de material y penetrómetro de cono de caída utilizando el método de Feng 2000 para LP

METODO EMPLEADO		RESULTADOS PROMEDIO LP	COMPARACION
Casagrande	Rollitos de material	75	En cuanto al método de Feng utilizado también para determinar el límite plástico, los resultados obtenidos fueron poco razonables pues dichos valores estuvieron desfasados en comparación con los teóricos, por ende tampoco es recomendable utilizar este método para la elaboración de ensayos pues los resultados no serán los esperados.
Feng 2000, utilizando el penetrómetro de cono de caída	Cono británico	154	
	Cono ruso	135	
	Cono canadiense	140	
	Cono indio	156	
	Cono colombiano	144	

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

4. CONCLUSIONES

La investigación aclaró algunas dudas sobre la utilización del penetrómetro de cono de caída en una muestra de suelo bentonítico, además permitió obtener los resultados necesarios para estudiar y analizar un poco más a fondo la interrogante planteada sobre la aplicabilidad y precisión de este equipo en ensayos para la determinación del límite líquido y plástico comparándolo con los métodos tradicionales de copa de Casagrande y rollitos de material.

Es importante mencionar que existen las normas ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils y BS 1377 Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. General Requirements and Sample Preparation para determinar el límite líquido de los suelos empleando el penetrómetro de cono, pero para la obtención del límite plástico no existe una norma que regule su utilización, por tanto, se usaron dos métodos empleados en la literatura mundial y así se pudo despejar las dudas sobre el manejo y obtención de dicho límite.

En cuanto a los dos métodos utilizados para la obtención del límite plástico (doble peso y Feng, 2000) la variación entre los resultados comparados con el método tradicional de rollitos de material es muy alto, indicando que para un material altamente plástico como la bentonita no es aconsejable utilizar el penetrómetro de cono de caída, incluso porque su correlación tampoco fue buena.

Los ensayos de penetración realizados con los diferentes conos fueron válidos en la determinación del límite líquido gracias a que se presentó una buena correlación de acuerdo a cada comparación que se realizó en los diferentes gráficos de resultados, aun así, es importante recalcar que los ensayos realizados con el cono canadiense e indio son los más aproximados a los métodos tradicionales en el límite líquido. Al ser un método válido no significa que esté por encima de la metodología tradicional de copa de Casagrande, pero sí que se debería considerar como un método alternativo y complementario para la obtención de datos coherentes entre ambos ensayos.

Mediante el penetrómetro de cono se logra superar varios inconvenientes respecto a la influencia del operador ya que se especifica de una manera más clara el procedimiento a seguir, por ejemplo, en el caso del límite líquido el operador ya no da una apreciación de cuanto se juntó la muestra, por el contrario, toma una lectura de un micrómetro, en cuanto al límite plástico el operador deja de realizar el ensayo con sus manos y pasa a ser ensayado por un aparato mecánico.

Si bien es cierto que hay una gran influencia del operador al realizar el ensayo del rollo, también hay una dependencia del laboratorista al utilizar solamente gráficas para obtener los datos correspondientes al penetrómetro de cono, este inconveniente fue el que generó tanta dispersión en los respectivos resultados de

límite plástico además de que impidió que los dos métodos se correlacionaran de una mejor manera.

Al realizar el ensayo con los conos se evidenció varias dificultades, entre las principales se tiene la dificultad al preparar la muestra para el límite plástico, colocarla dentro del recipiente, no tener aire atrapado dentro de la masa de suelo, así como el enrasar la bentonita que es uno de los materiales más complicados de trabajar, o incluso la sensación de compactación al momento de colocar la muestra. Por ende, una forma de superar los problemas antes descritos es por medio de la existencia de una norma más técnica y precisa, en la cual se especifique por ejemplo la forma de llenar el recipiente o que determine y especifique otros parámetros de peso, ángulo, profundidad, etc.

La principal ventaja que se tiene al realizar ensayos similares y de manera simultánea, es la relación que existe entre los datos obtenidos, por eso en la mayoría de ellos se obtuvo una buena correlación y aunque el tiempo que se demoró la realización de los ensayos no se tuvo en cuenta, todo estuvo regido y cumplido a cabalidad por las respectivas normas y métodos propuestos.

5. RECOMENDACIONES

El aspecto más importante en cualquier tipo de ensayo que se vaya a realizar, es la correcta calibración de los equipos, por tanto, no está de más recomendar que tanto la balanza, los recipientes utilizados y el penetrómetro principalmente, deben estar calibrados, en el caso del penetrómetro se debe poner una puesta a cero automática que genere confiabilidad y eficacia a la hora de tomar los datos.

Debido a la cantidad de ensayos que se deben ejecutar para este tipo de investigaciones o proyectos, es importante contar con un equipo de laboratorio certificado con sus respectivas normas de seguridad y aplicabilidad, así como también un operador con mano de obra calificada que pueda ser preciso para obtener los mejores resultados, pues la variación, alteraciones o errores en la toma de datos depende exclusivamente de él.

Como recomendación principal de esta investigación, se quiere hacer énfasis en que el penetrómetro de cono de caída al ser un método válido, solo se utilice como método alternativo o complementario en relación con el de Casagrande para la obtención del límite líquido en materiales altamente plásticos como la bentonita pues, aunque la metodología es un poco diferente la obtención de datos es similar.

6. TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto sirve como fundamento para nuevas investigaciones sobre la determinación de límites líquido y plástico, así como para próximos trabajos de caracterización de la bentonita debido a que fue el material de prueba. Además, despejar ciertas dudas sobre la utilización del penetrómetro de cono de caída como un equipo para la determinación de límites en materiales de alta plasticidad.

Como continuación a este trabajo de tesis y como en cualquier otro proyecto de investigación, existen diversas líneas de investigación que quedan abiertas y en las que es posible continuar trabajando.

Durante el desarrollo de esta tesis han surgido algunos aspectos que por los respectivos resultados obtenidos es importante que se siga estudiando e investigando sobre la aplicación del penetrómetro de cono de caída en otros tipos de suelos que no sean precisamente arcillosos.

A continuación, se presentan algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse como resultado de esta investigación:

- Implementar el penetrómetro de cono de caída con su respectiva metodología en otros tipos de suelo para determinar de igual manera límite líquido y plástico, así como establecer la respectiva comparación con los métodos tradicionales y poder definir características y comportamiento.
- Mejorar o trabajar en pro de una norma que contenga las especificaciones cada vez más exactas para que dichos ensayos sean realizados de la mejor manera, esto logrado a través de expertos e investigadores apasionados por este tema.

Gracias a que se entregó un equipo de penetración con diferentes conos al laboratorio de suelos de la universidad católica de Colombia el cual podrá ser utilizado en futuras prácticas de laboratorio y en nuevas investigaciones sobre temas similares.

7. BIBLIOGRAFÍA

Altıntaş, Emre. 2013. An investigation on liquid limit of clays by differently shaped penetration cones. [Online] 10 2013. [Cited: 03 15, 2017.] https://www.researchgate.net/publication/272090577_An_investigation_on_liquid_limit_of_clays_by_differently_shaped_penetration_cones.

Badillo, Eulalio Juarez and Rodríguez, Alfonso Rico. 2005. *Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos*. s.l. : LIMUSA, S.A., 2005.

Blázquez, Álvaro Rabat. 2016. Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido en suelos de baja y media plasticidad. [Online] 09 2016. [Cited: 03 15, 2017.] https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/58086/1/APLICABILIDAD_DEL_PENETROMETRO_CONICO_EN_LA_DETERMI_Rabat_Blazquez_Alvaro.pdf.

Budhu, Muni. 2015. *Soil mechanics fundamentals*. s.l. : Wiley Blackwell, 2015.

Das, Braja M. 1999. *Fundamento de ingeniería geotécnica*. California : Thomson Learning, 1999.

DiccionArqui. 2017. Diccionario De Arquitectura – Definiciones Y Traducciones. [Online] 2017. [Cited: 08 09, 2017.] <http://diccionarqui.com/>.

Escobar, Gonzalo Duque and Potes, Carlos Enrique Escobar. 2016. Geomecánica para ingenieros. [Online] 2016. [Cited: 03 15, 2017.] <http://www.bdigital.unal.edu.co/53252/85/introduccion.pdf>.

Feng, TW. 2004. Dermining the consistency limits of high plasticity by the BS fall cone method. [Online] 2004. [Cited: 03 15, 2017.] <https://www.newcivilengineer.com/download?ac=1409603>.

Imagroca. 2017. Bentonita Calcica. [Online] 2017. [Cited: 08 09, 2017.] <http://www.imagro.com/productos-imagro/8323-BENTONITA-CALCICA-ALIMENTO-AGROPECUARIO.html>.

INCONTEC. 2012. Norma técnica Colombiana/4630. [Online] 2012. [Cited: 09 08, 2017.] <https://ssio.icontec.org.co/IGDtemp/e883b856-ac65-4314-a5cb-160a16864b5b.doc>.

—. 2012. Norma técnica Colombiana/4630. [Online] 2012. [Cited: 03 15, 2017.] <https://ssio.icontec.org.co/IGDtemp/e883b856-ac65-4314-a5cb-160a16864b5b.doc>.

Industrial Minerals. 2016. Soaking it up: Bentonite's global reach. [Online] 05 01, 2016. [Cited: 10 16, 2017.] <https://search-proquest->

com.ezproxyucdc.ucatolica.edu.co/docview/1800518213/abstract/4D2CE9CBB39C4DF5PQ/1?accountid=45660.

Instituto nacional de Vías. 2007. Método de ensayo normal para el uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad. [Online] 2007. [Cited: 08 09, 2017.] ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-172-07.pdf.

INVIAS. 2007. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS. [Online] 2007. [Cited: 03 15, 2017.] ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-125-07.pdf.

—. 2007. LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS. [Online] 2007. [Cited: 03 15, 2017.] ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-126-07.pdf.

La guía. 2017. Mecánica de Suelos. [Online] 2017. [Cited: 08 09, 2017.] <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/mecanica-de-suelos-asentamientos>.

Luna, Andrés Sebastián Cevallos. 2012. Determinación del límite líquido y plástico de los suelos mediante el uso del penetrómetro cónico. [Online] 2012. [Cited: 03 15, 2017.] <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/6403/9.20.001327.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.

Muntohar, Agus Setyo and Hashim, Roslan. 2003. Determination of plastic limits of soils using cone penetrometer: Re-Appraisal. [Online] 2003. [Cited: 03 15, 2017.] https://www.academia.edu/1585736/DETERMINATION_OF_PLASTIC_LIMITS_OF_SOILS_USING_CONE_PENETROMETER_Re-Appraisal.

Osorio, Santiago. 2010. Apuntes de geotecnia con énfasis en laderas. [Online] 11 09, 2010. [Cited: 09 08, 2017.] http://geotecnia-sor.blogspot.com.co/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_19.html.

Oxforddictionaries. 2017. [Online] 2017. [Cited: 08 09, 2017.] <https://es.oxforddictionaries.com/>.

Tolosa, Julieth Tatiana and Parrado, Breidy Julieth. 2017. Determinación de la superficie específica en suelos caoliníticos y bentoníticos mediante la técnica de adsorción de agua destilada aplicando diferentes gradientes térmicos. Bogotá : s.n., 2017.

Villalaz, Carlos Crespo. 2004. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. s.l. : Limusa, 2004.

Wikcionario. 2017. [Online] 2017. [Cited: 08 09, 2017.] <https://es.wiktionary.org/wiki/Wikcionario:Portada>.

wordreference. 2005. WordReference.com. [Online] 2005. [Cited: 08 09, 2017.] <http://www.wordreference.com/>.

ANEXOS

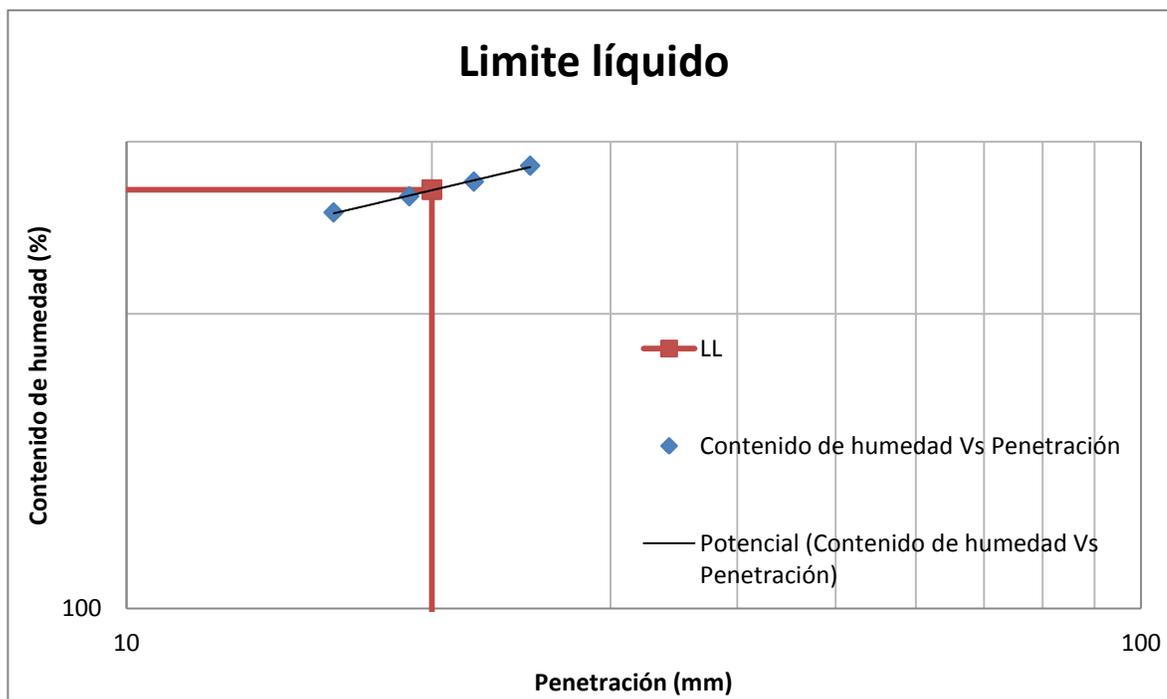
Anexo 1. Resultados limite líquido

Tabla 24. Ensayo N°2 LL cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	2	22	8	6
Peso recipiente (gr)	13.97	13.51	13.67	13.84
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.28	31.63	32.25	32.71
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.86	18.49	18.65	18.76
Contenido de humedad (%)	253.99	263.86	273.09	283.54
Limite líquido	268			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 20. Ensayo N°2 LL cono británico



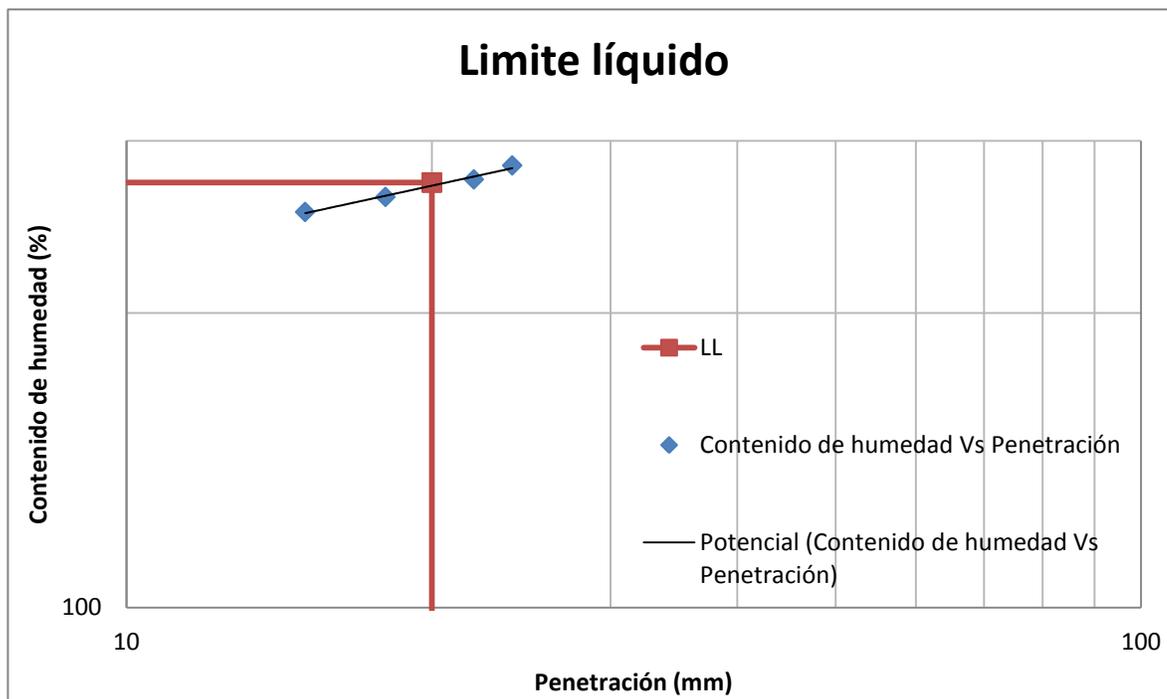
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 25. Ensayo N°3 LL cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	22	24
Recipiente N°	4	19	17	14
Peso recipiente (gr)	13.77	14.01	13.17	14
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	32.45	32.81	30.45	30.17
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.05	19.19	17.79	18.22
Contenido de humedad (%)	253.79	262.93	274.03	283.18
Limite líquido	272			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 21. Ensayo N°3 LL cono británico



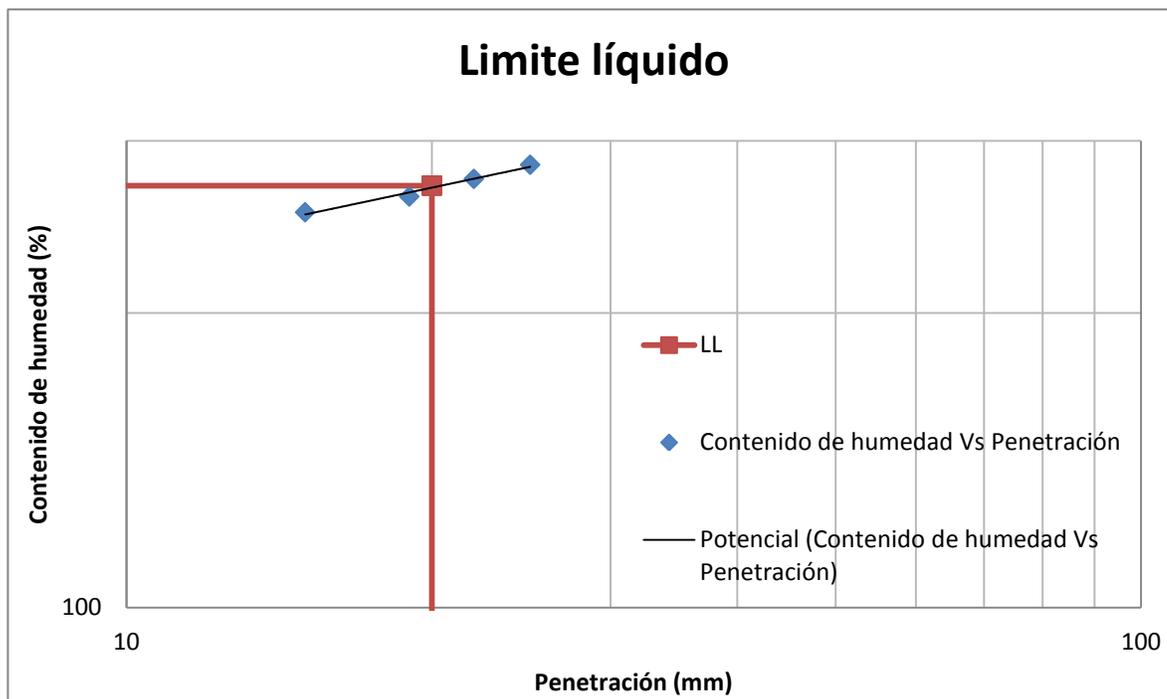
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 26. Ensayo N°4 LL cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	22	25
Recipiente N°	11	12	7	24
Peso recipiente (gr)	14.02	12.16	13.86	13.84
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.64	30.90	31.08	33.52
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.72	17.32	18.46	18.97
Contenido de humedad (%)	253.62	263.18	274.35	283.63
Limite líquido	270			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 22. Ensayo N°4 LL cono británico



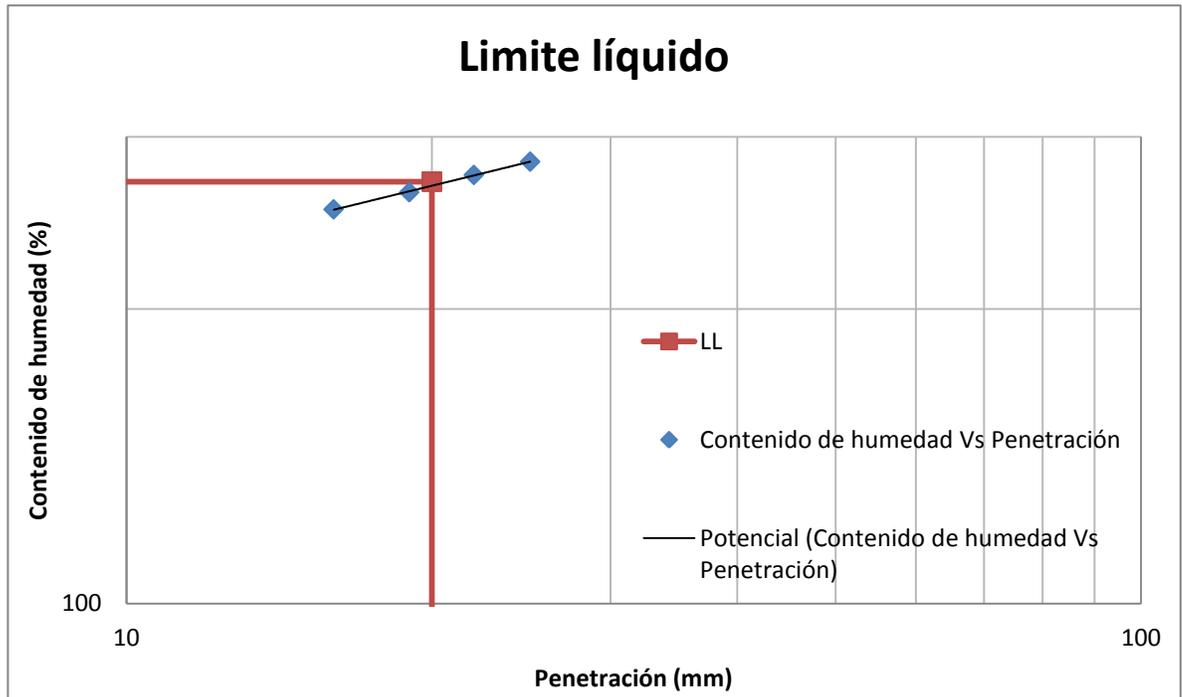
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 27. Ensayo N°5 LL cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	1	10	20	3
Peso recipiente (gr)	13.90	13.57	14.01	13.71
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.76	30.83	31.49	30.87
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.96	18.32	18.68	18.19
Contenido de humedad (%)	252.96	263.37	274.30	283.04
Limite líquido	270			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 23. Ensayo N°5 LL cono británico



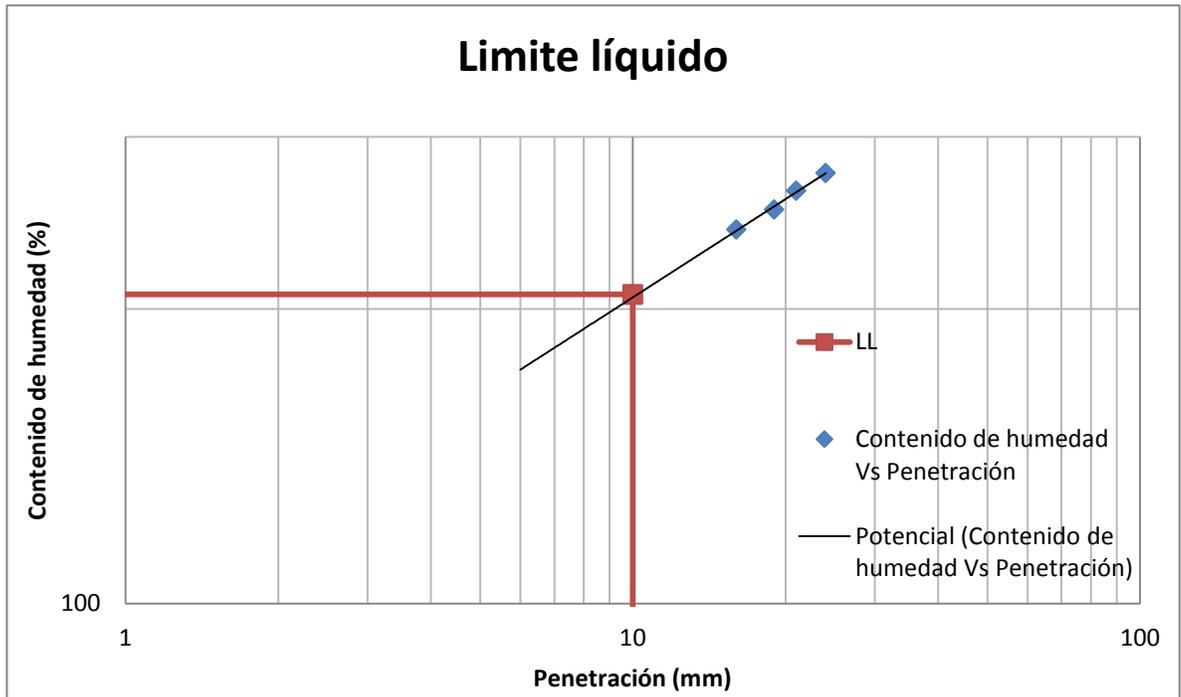
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 28. Ensayo N°1 LL cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	21	24
Recipiente N°	14	20	4	15
Peso recipiente (gr)	13.68	13.95	12.22	14
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.47	31.63	32.95	30.45
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.6	18.96	17.91	18.38
Contenido de humedad (%)	241.26	252.89	264.32	275.57
Limite líquido	207			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 24. Ensayo N°1 LL cono ruso



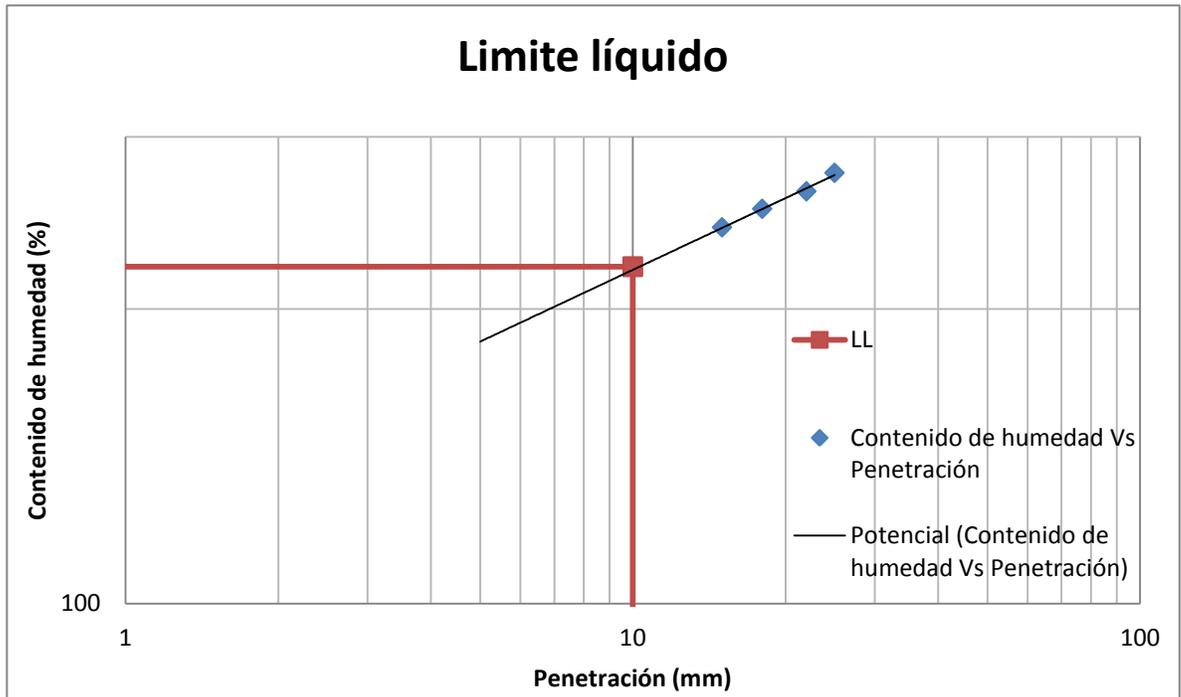
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 29. Ensayo N°2 LL cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	22	25
Recipiente N°	16	6	17	12
Peso recipiente (gr)	13.83	13.86	13.90	13.6
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.16	31.49	32.17	33.21
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.89	18.85	18.92	18.82
Contenido de humedad (%)	242.49	253.31	263.94	275.67
Limite líquido	221			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 25. Ensayo N°2 LL cono ruso



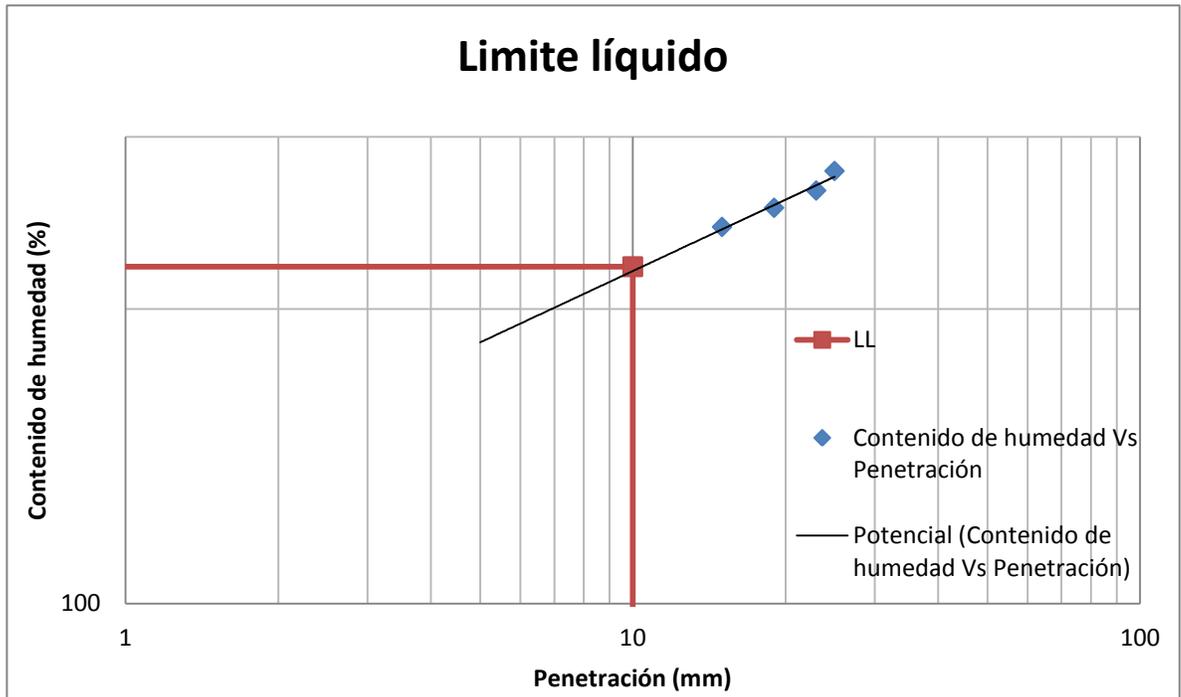
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 30. Ensayo N°3 LL cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	23	25
Recipiente N°	10	2	9	24
Peso recipiente (gr)	14.07	15.58	13.77	13.87
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	34.05	33.77	32.10	33.58
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.9	20.72	18.8	19.1
Contenido de humedad (%)	242.71	253.89	264.41	276.86
Limite líquido	221			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 26. Ensayo N°3 LL cono ruso



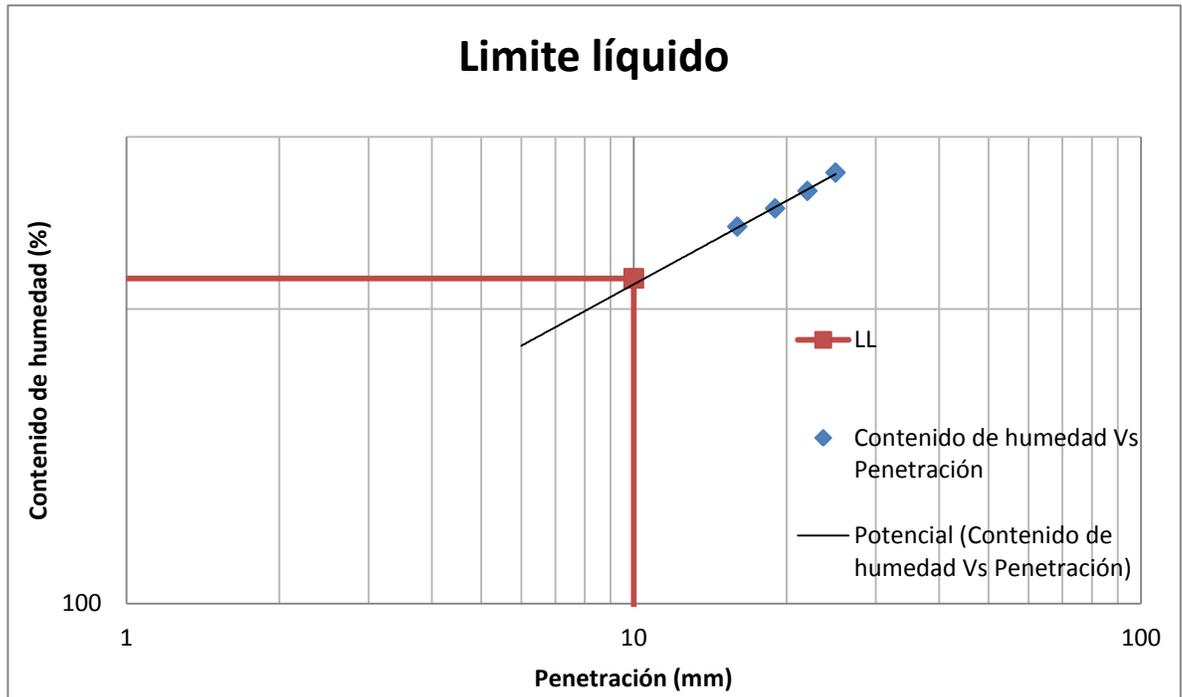
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 31. Ensayo N°4 LL cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	7	1	8	18
Peso recipiente (gr)	14.18	13.95	13.67	13.64
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	35.20	34.81	33.30	31.38
Peso recipiente + suelo seco (gr)	20.31	19.85	19.06	18.36
Contenido de humedad (%)	242.90	253.56	264.19	275.85
Limite líquido	215			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 27. Ensayo N°4 LL cono ruso



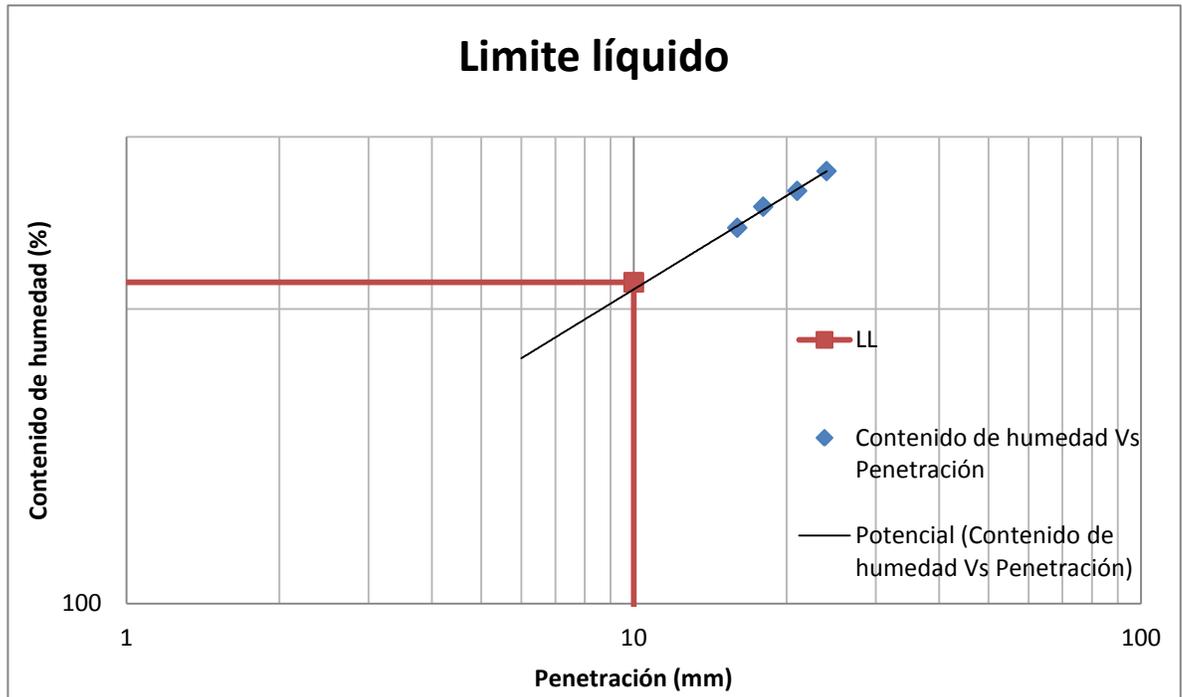
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 32. Ensayo N°5 LL cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	24
Recipiente N°	19	11	13	3
Peso recipiente (gr)	14.88	13.63	14.04	12.86
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.65	32.74	33.89	35.62
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.78	19.02	19.49	18.9
Contenido de humedad (%)	242.24	254.55	264.22	276.82
Limite líquido	213			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 28. Ensayo N°5 LL cono ruso



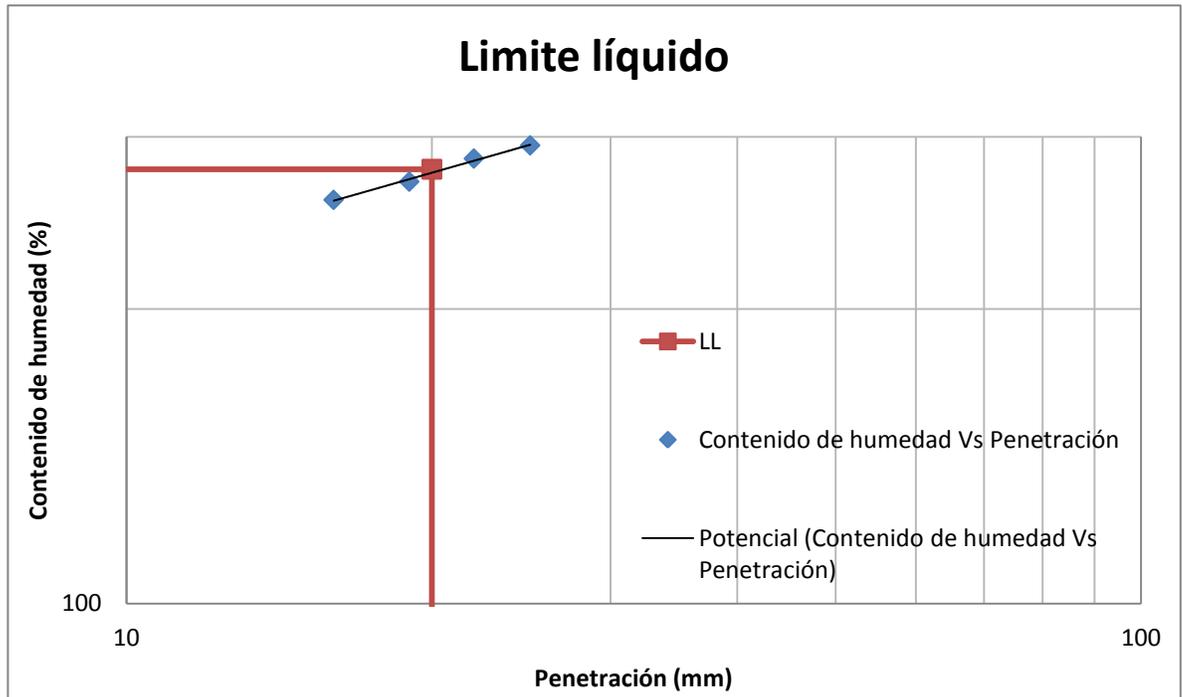
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 33. Ensayo N°1 LL cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	15	16	1	10
Peso recipiente (gr)	13.96	13.67	13.95	14.07
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.10	32.43	32.05	33.42
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.46	18.74	18.65	18.98
Contenido de humedad (%)	258.67	270.02	285.11	294.09
Limite líquido	278			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 29. Ensayo N°1 LL cono canadiense



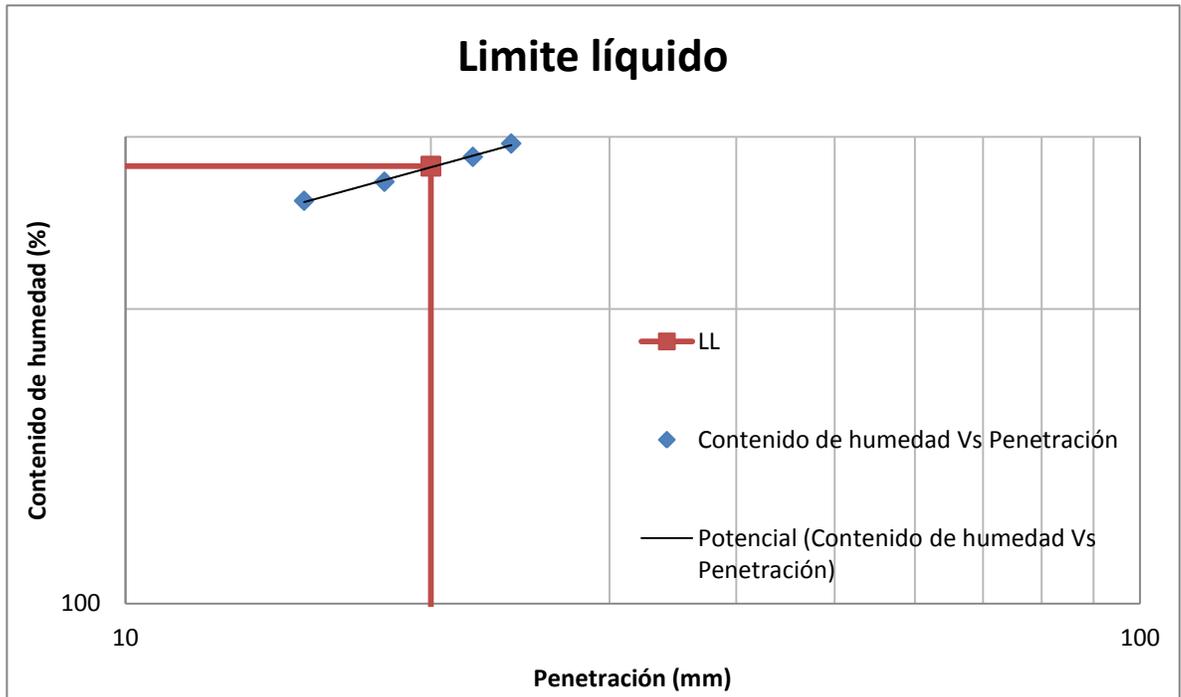
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 34. Ensayo N°2 LL cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	22	24
Recipiente N°	18	4	8	3
Peso recipiente (gr)	13.67	12.22	13.67	12.89
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	32.40	33.75	34.18	31.63
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.9	18.04	18.98	17.63
Contenido de humedad (%)	258.13	269.93	286.25	295.36
Limite líquido	280			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 30. Ensayo N°2 LL cono canadiense



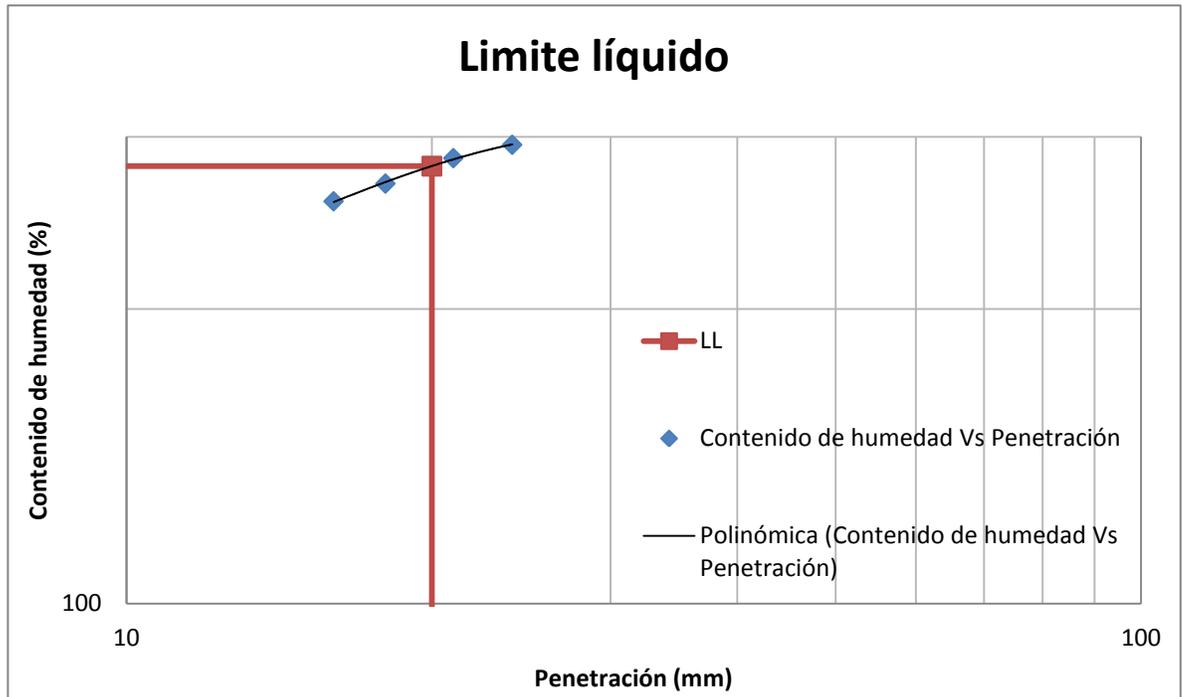
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 35. Ensayo N°3 LL cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	24
Recipiente N°	14	19	11	20
Peso recipiente (gr)	13.68	14.88	13.63	13.95
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.82	32.95	31.28	32.61
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.75	19.78	18.21	18.68
Contenido de humedad (%)	257.79	268.78	285.37	294.50
Limite líquido	280			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 31. Ensayo N°3 LL cono canadiense



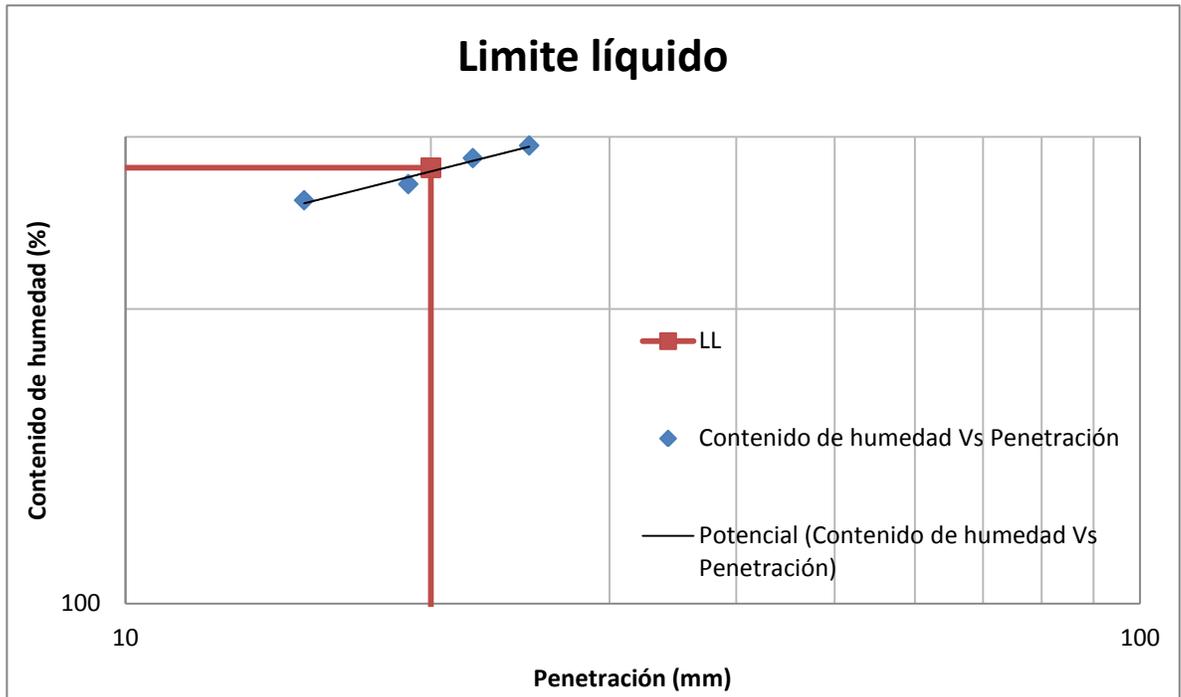
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 36. Ensayo N°4 LL cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	22	25
Recipiente N°	13	7	9	6
Peso recipiente (gr)	14.04	14.18	13.77	13.86
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.17	32.75	34.12	33.6
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.54	19.22	19.05	18.87
Contenido de humedad (%)	258.44	268.45	285.42	294.01
Limite líquido	279			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 32. Ensayo N°4 LL cono canadiense



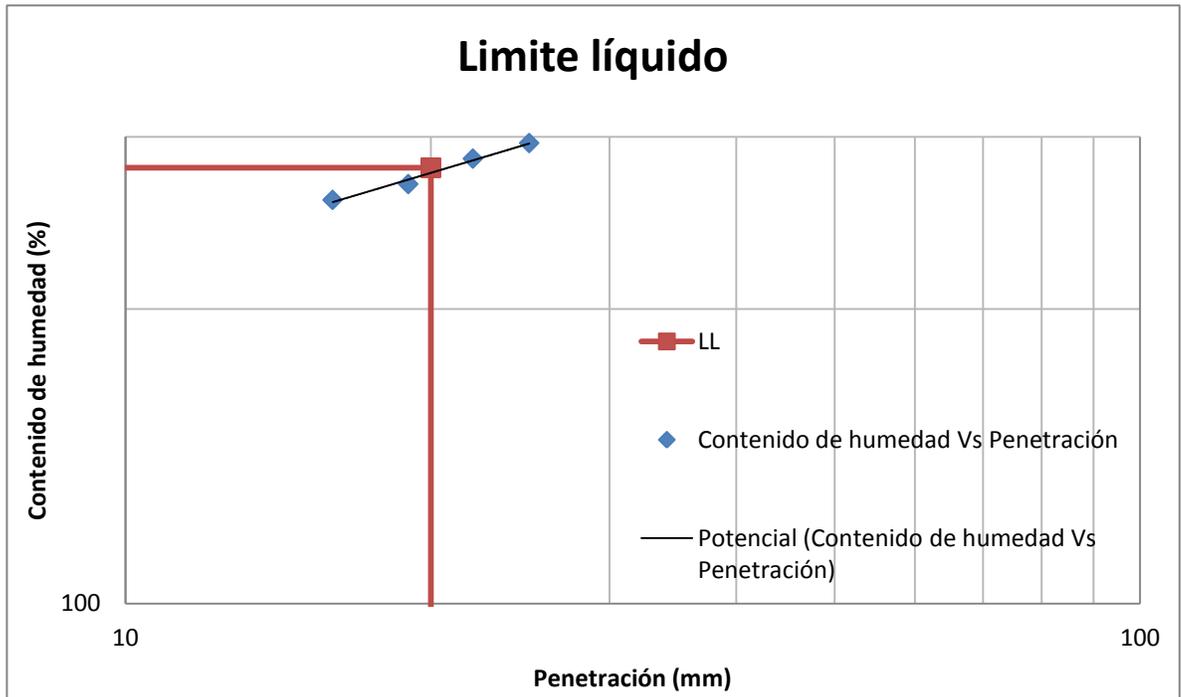
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 37. Ensayo N°5 LL cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	2	12	17	19
Peso recipiente (gr)	15.58	13.62	13.90	14.88
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	34.84	33.26	32.46	34.19
Peso recipiente + suelo seco (gr)	20.95	18.95	18.72	19.76
Contenido de humedad (%)	258.66	268.48	285.06	295.70
Limite líquido	279			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 33. Ensayo N°5 LL cono canadiense



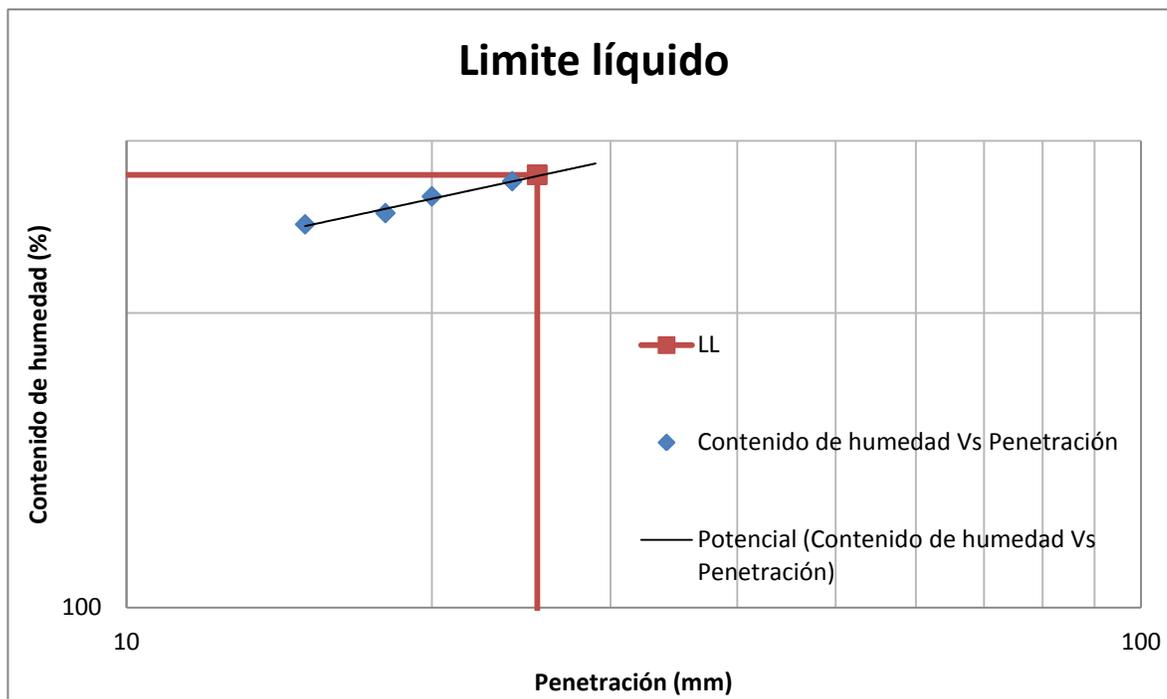
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 38. Ensayo N°1 LL cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	20	24
Recipiente N°	2	4	5	7
Peso recipiente (gr)	15.57	12.21	11.33	14.16
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.85	31.49	32.29	34.07
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.98	17.67	17.1	19.5
Contenido de humedad (%)	246.49	253.11	263.26	272.85
Limite líquido	277			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 34. Ensayo N°1 LL cono indio



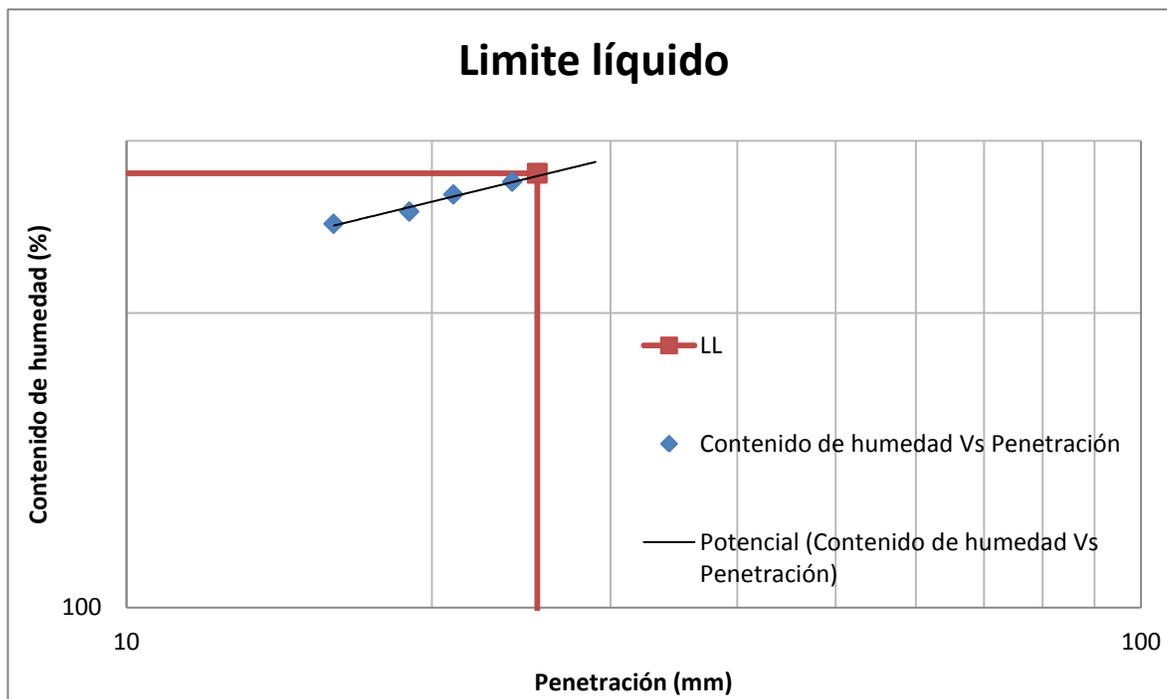
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 39. Ensayo N°2 LL cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	21	24
Recipiente N°	3	1	8	10
Peso recipiente (gr)	12.86	13.94	13.67	14.07
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	33.15	30.19	31.42	32.25
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.71	18.53	18.54	18.95
Contenido de humedad (%)	246.84	254.03	264.48	272.54
Limite líquido	278			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 35. Ensayo N°2 LL cono indio



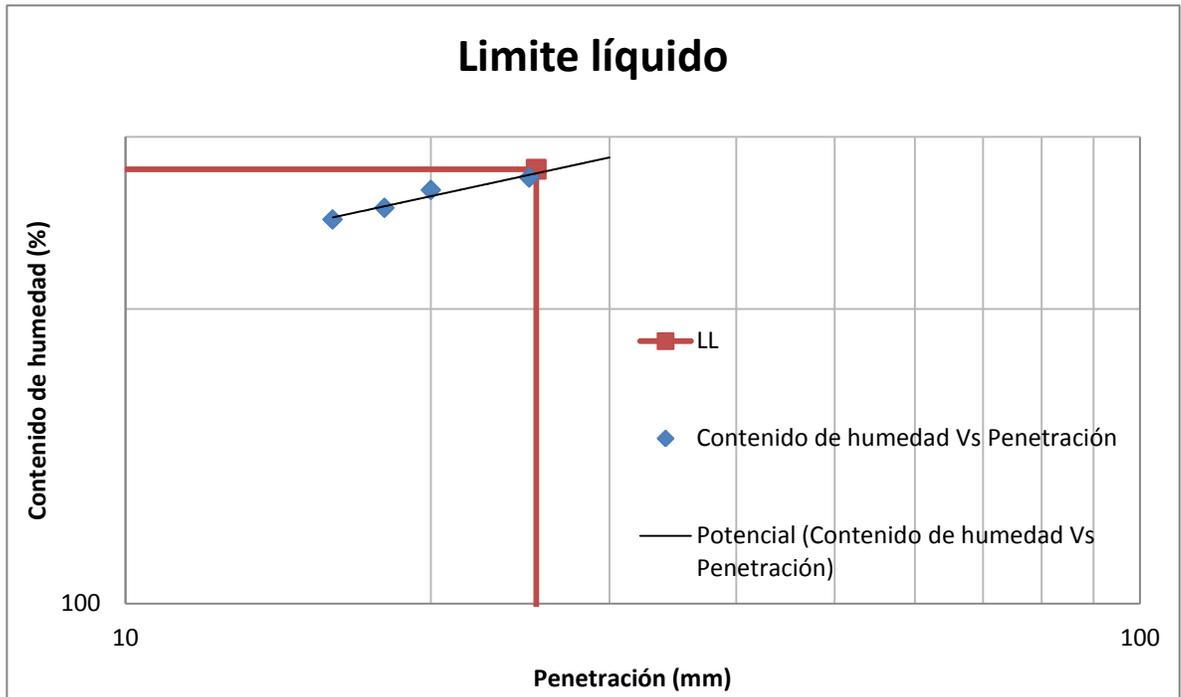
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 40. Ensayo N°3 LL cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	20	25
Recipiente N°	9	11	14	16
Peso recipiente (gr)	13.77	13.63	13.68	13.83
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	33.48	32.81	33.05	33.84
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.45	19.05	18.99	19.2
Contenido de humedad (%)	247.01	253.87	264.78	272.63
Limite líquido	278			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 36. Ensayo N°3 LL cono indio



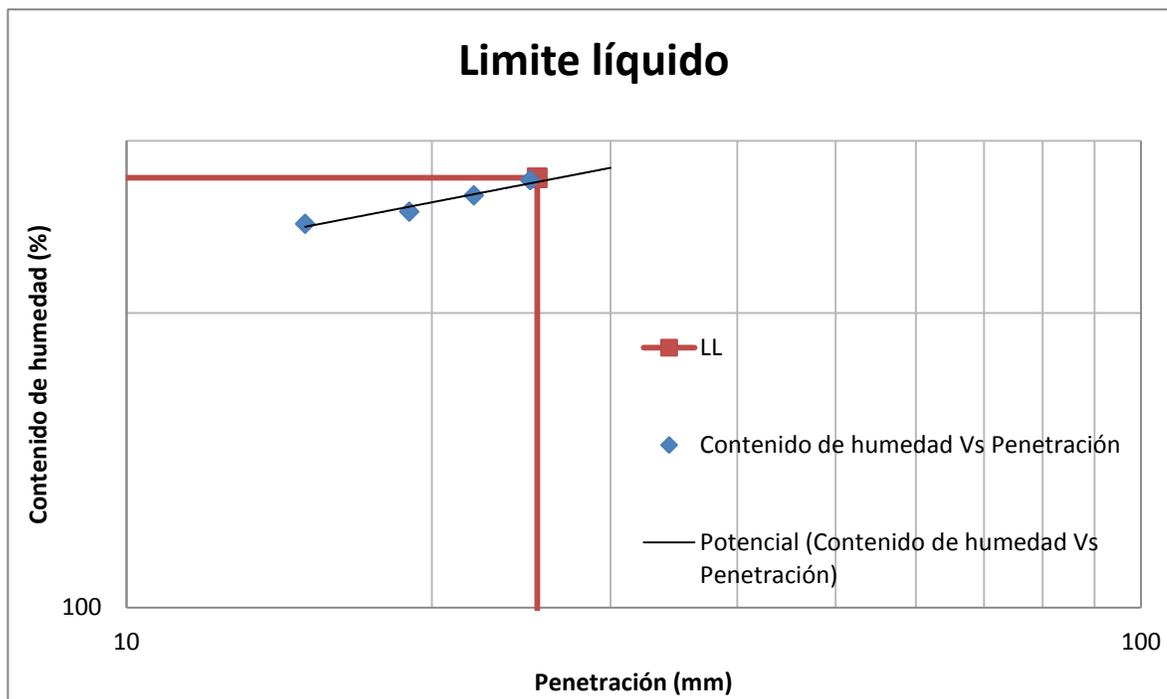
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 41. Ensayo N°4 LL cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	22	25
Recipiente N°	15	6	12	13
Peso recipiente (gr)	12.83	13.87	13.62	14.04
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	32.91	32.17	33.49	33.8
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.62	19.04	19.08	19.33
Contenido de humedad (%)	246.80	253.97	263.92	273.53
Limite líquido	275			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 37. Ensayo N°4 LL cono indio



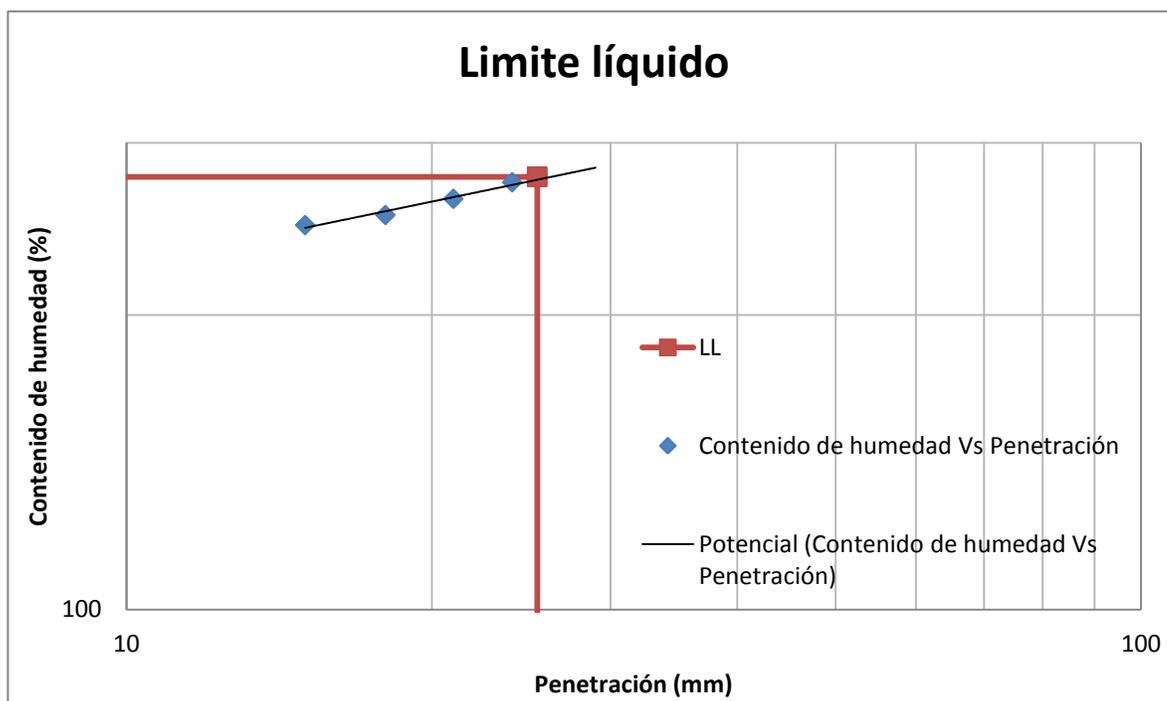
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 42. Ensayo N°5 LL cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	21	24
Recipiente N°	18	19	20	17
Peso recipiente (gr)	13.67	14.01	13.95	13.9
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.58	30.75	31.63	32.31
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.54	18.75	18.82	18.83
Contenido de humedad (%)	247.23	253.16	263.04	273.43
Limite líquido	277			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 38. Ensayo N°5 LL cono indio



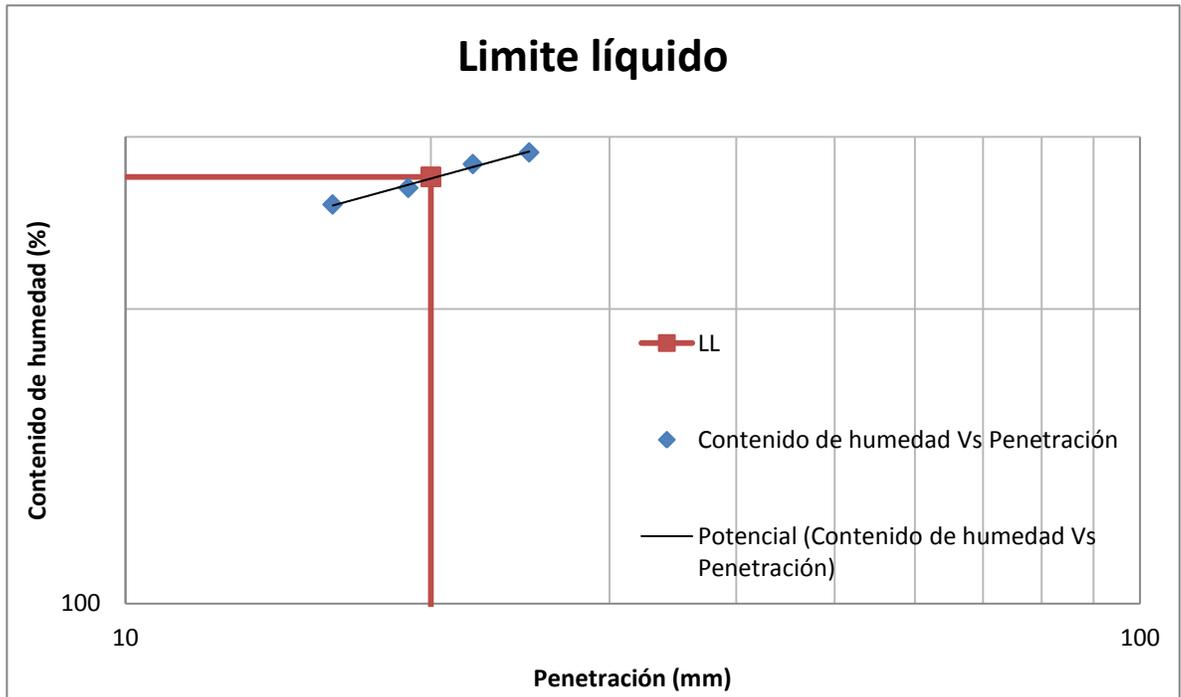
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 43. Ensayo N°1 LL cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	18	4	3	8
Peso recipiente (gr)	13.67	12.22	12.89	13.67
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	27.30	27.12	27.27	32.51
Peso recipiente + suelo seco (gr)	17.5	16.29	16.66	18.51
Contenido de humedad (%)	255.87	266.09	281.43	289.26
Limite líquido	273			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 39. Ensayo N°1 LL cono colombiano



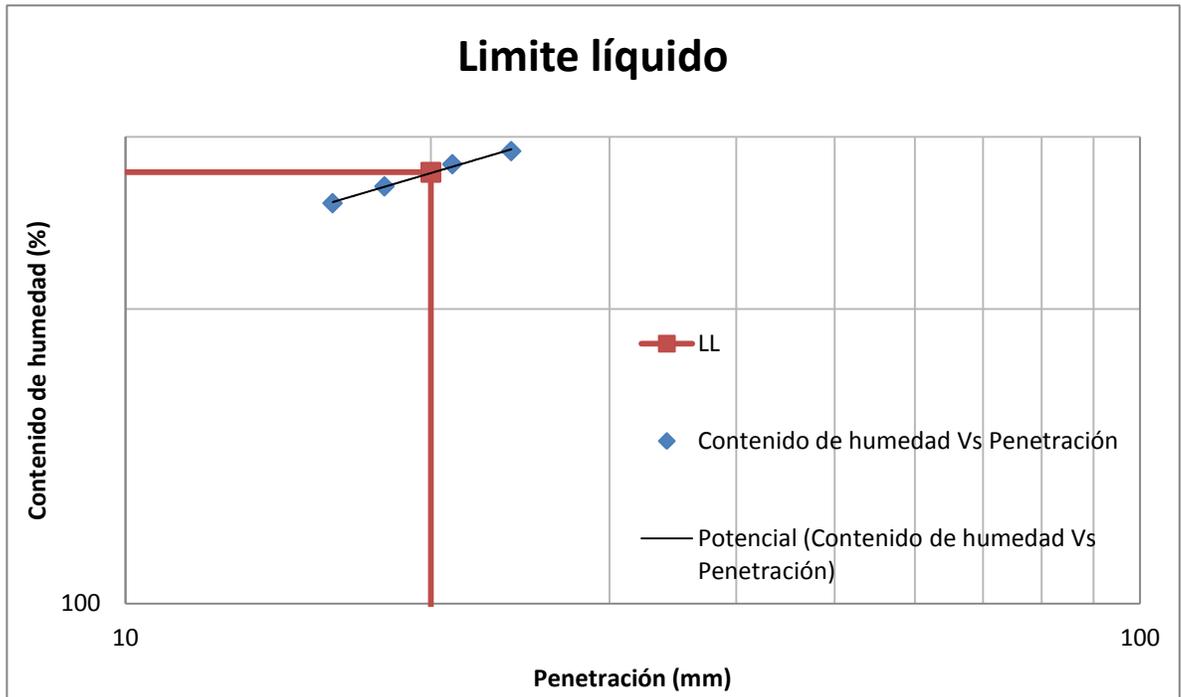
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 44. Ensayo N°2 LL cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	24
Recipiente N°	20	13	11	7
Peso recipiente (gr)	13.95	14.04	13.63	14.18
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	36.17	30.85	32.43	31.58
Peso recipiente + suelo seco (gr)	20.18	18.62	18.56	18.64
Contenido de humedad (%)	256.66	267.03	281.34	290.13
Limite líquido	276			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 40. Ensayo N°2 LL cono colombiano



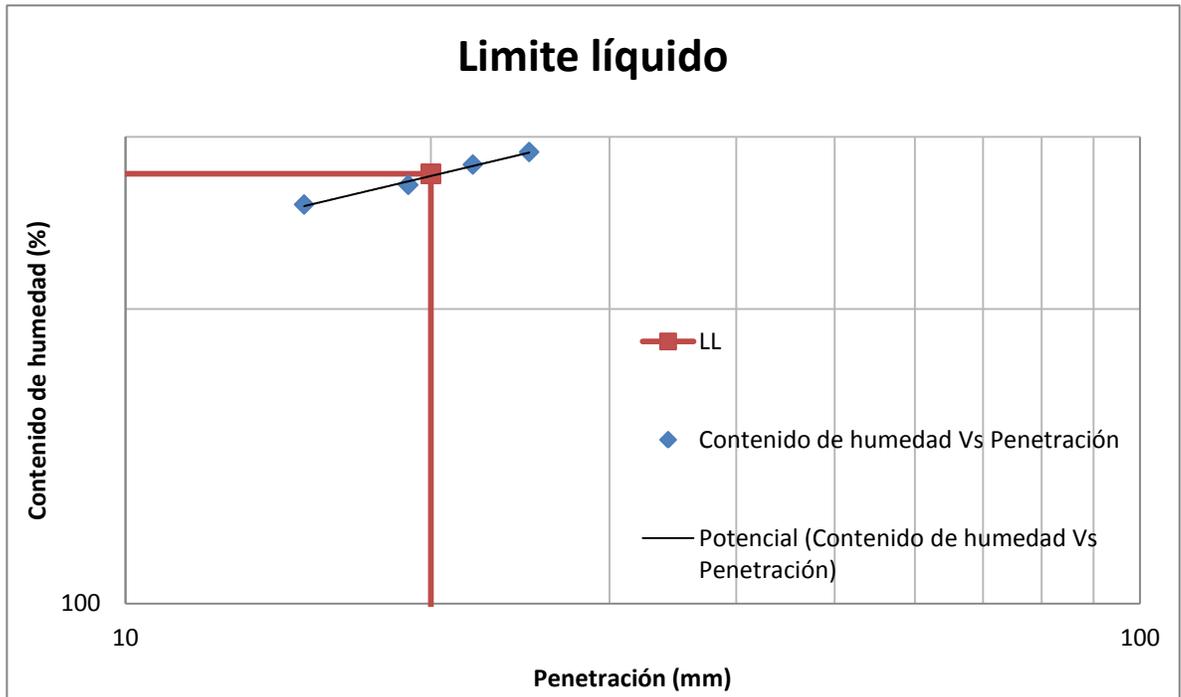
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 45. Ensayo N°3 LL cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	22	25
Recipiente N°	18	14	5	17
Peso recipiente (gr)	13.67	13.68	13.67	13.9
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	34.95	35.61	34.44	32.87
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.65	19.64	19.12	18.77
Contenido de humedad (%)	255.85	267.95	281.10	289.53
Limite líquido	275			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 41. Ensayo N°3 LL cono colombiano



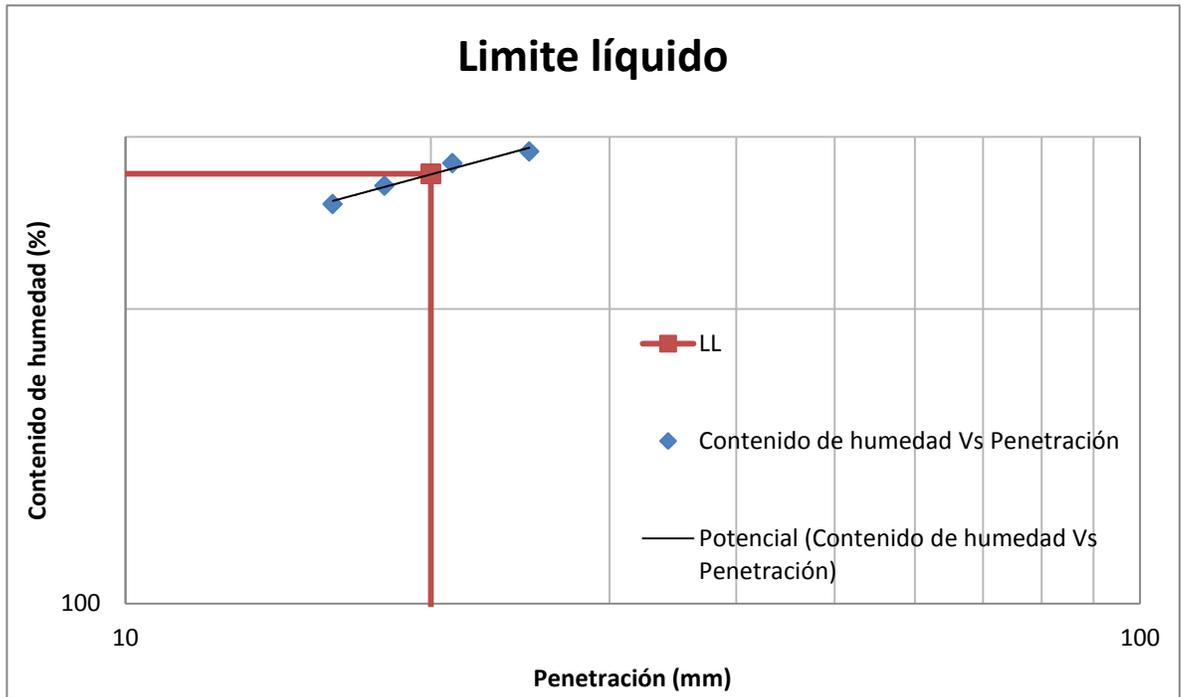
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 46. Ensayo N°4 LL cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	25
Recipiente N°	18	14	5	17
Peso recipiente (gr)	13.77	13.95	14.07	13.86
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	33.18	34.05	35.16	34.33
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.22	19.42	19.59	19.11
Contenido de humedad (%)	256.15	267.46	282.07	289.90
Limite líquido	275			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 42. Ensayo N°4 LL cono colombiano



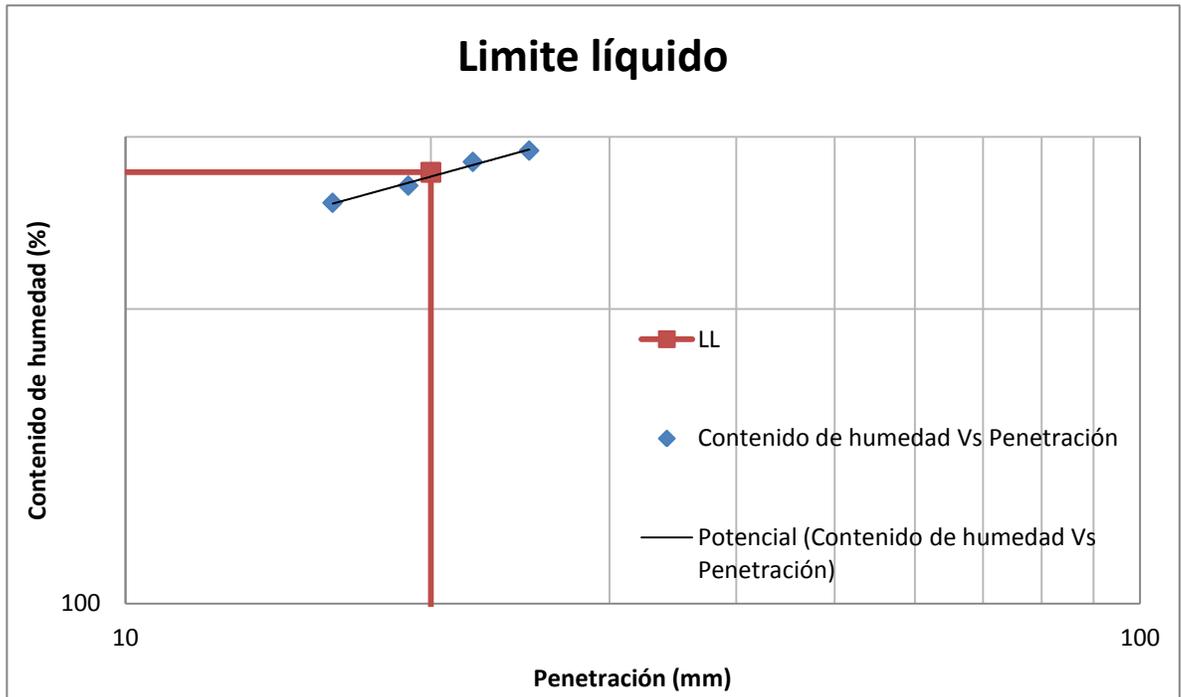
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 47. Ensayo N°5 LL cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	8	2	12	15
Peso recipiente (gr)	13.67	15.58	13.62	12.83
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	32.05	31.42	36.17	35.83
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.82	19.89	19.51	18.72
Contenido de humedad (%)	256.89	267.52	282.85	290.49
Limite líquido	276			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 43. Ensayo N°5 LL cono colombiano



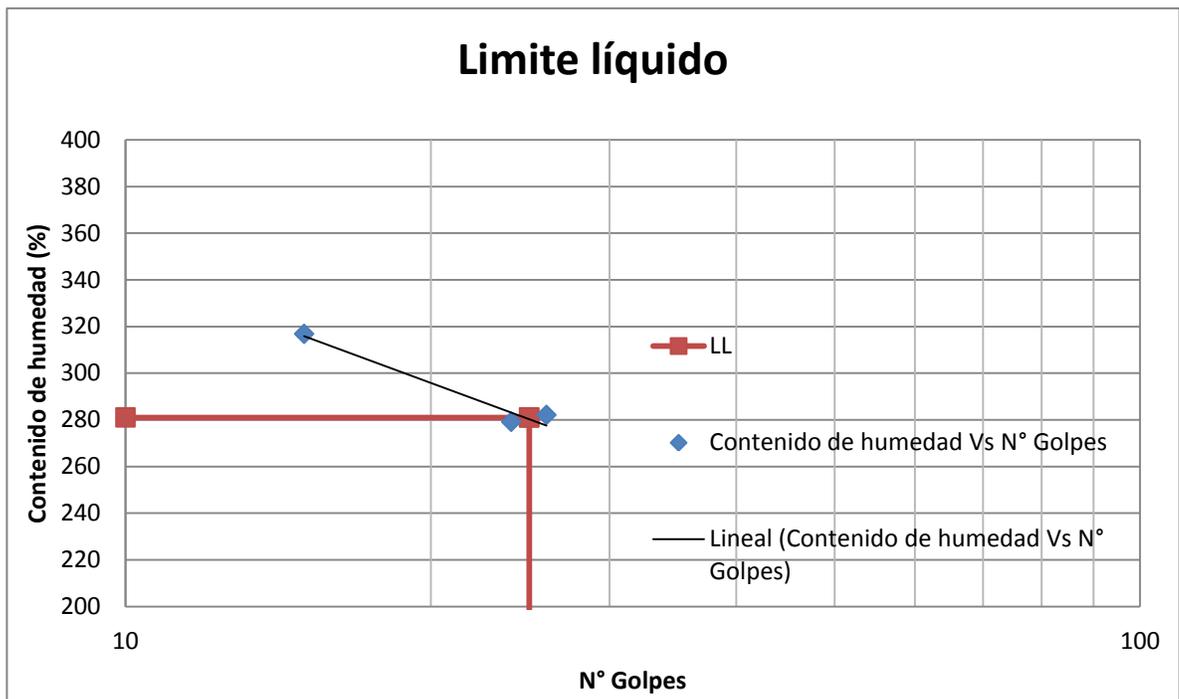
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 48. Ensayo N°2 LL copa de Casagrande

Humedad			
N° golpes	15-20	20-30	25-35
Peso recipiente (gr)	10.48	10.41	10.56
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	15.19	18.03	14.61
Peso recipiente + suelo seco (gr)	11.61	12.42	11.62
Contenido de humedad (%)	316.81	279.10	282.08
N° golpes	15	24	26
LL	281.00		

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 44. Ensayo N°2 LL copa de Casagrande



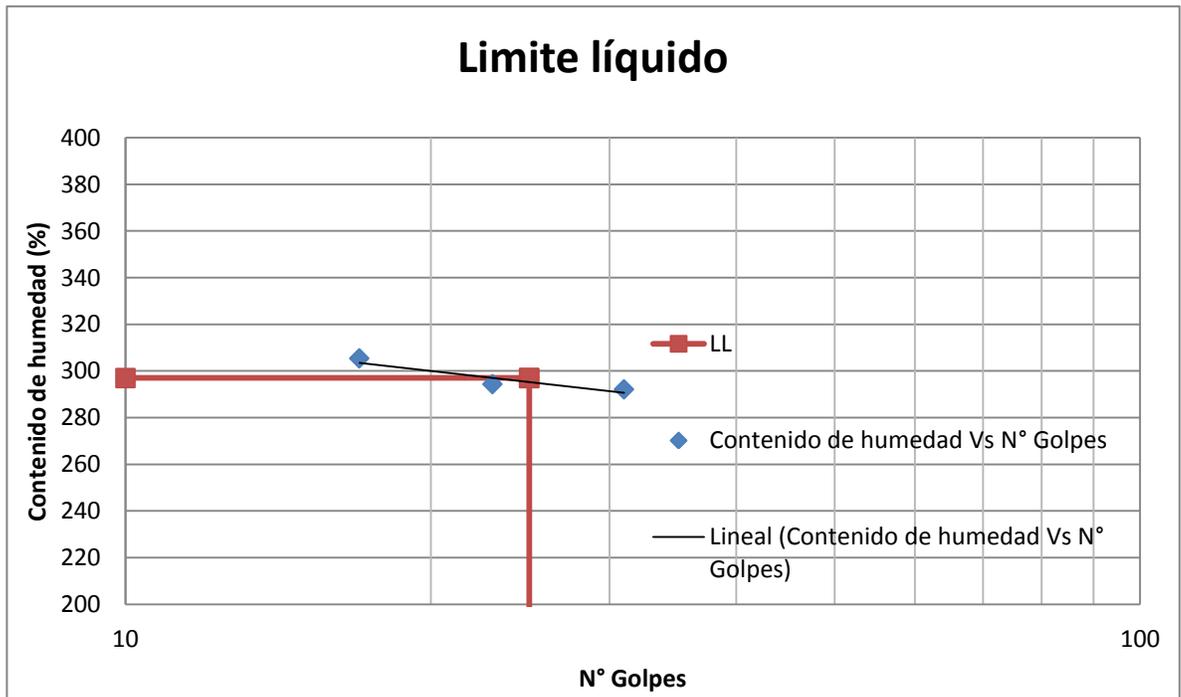
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 49. Ensayo N°3 LL copa de Casagrande

Humedad			
N° golpes	15-20	20-30	25-35
Peso recipiente (gr)	8.38	8.26	7.16
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	17.30	20.25	18.18
Peso recipiente + suelo seco (gr)	10.58	11.30	9.97
Contenido de humedad (%)	305.45	294.41	292.17
N° golpes	17	23	31
LL	297.00		

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 45. Ensayo N°3 LL copa de Casagrande



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

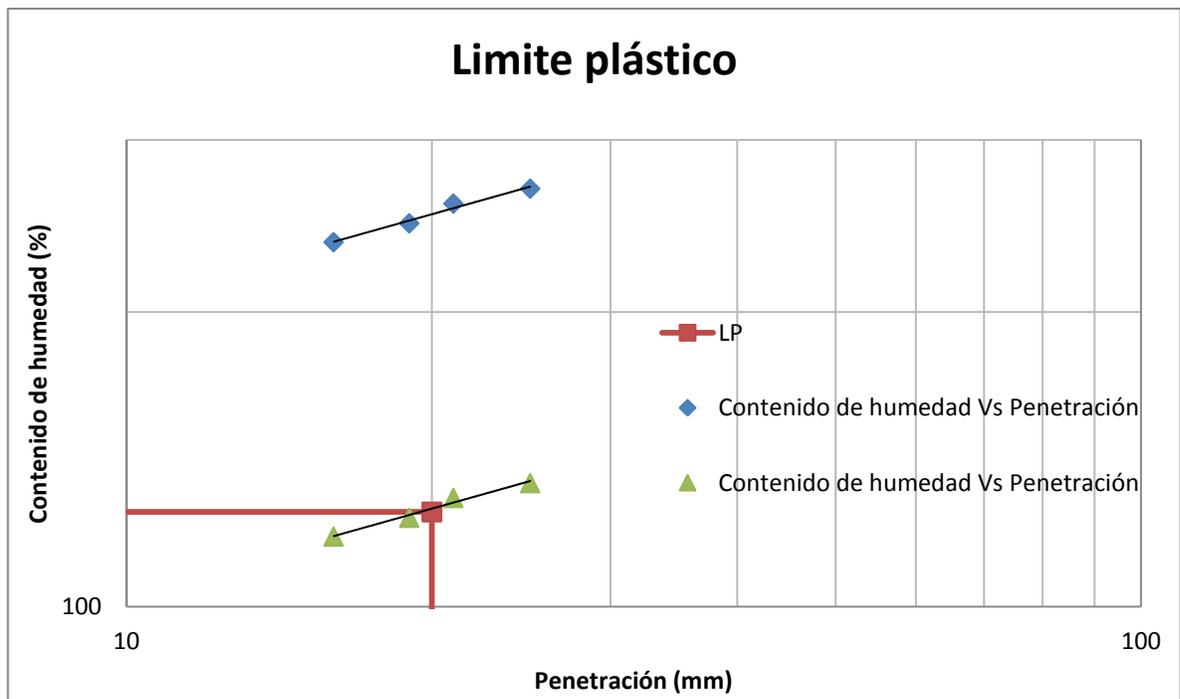
Anexo 2. Resultados limite plástico

Tabla 50. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	21	25
Recipiente N°	14	33	32	35
Peso recipiente (gr)	13.68	13.50	13.48	11.36
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.45	31.87	31.90	30.18
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.97	18.8	18.62	16.48
Contenido de humedad (%)	235.92	246.60	258.37	267.58
Contenido de humedad (%)	117.96	123.30	129.18	133.79
Limite plástico (%)	125			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 46. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono británico



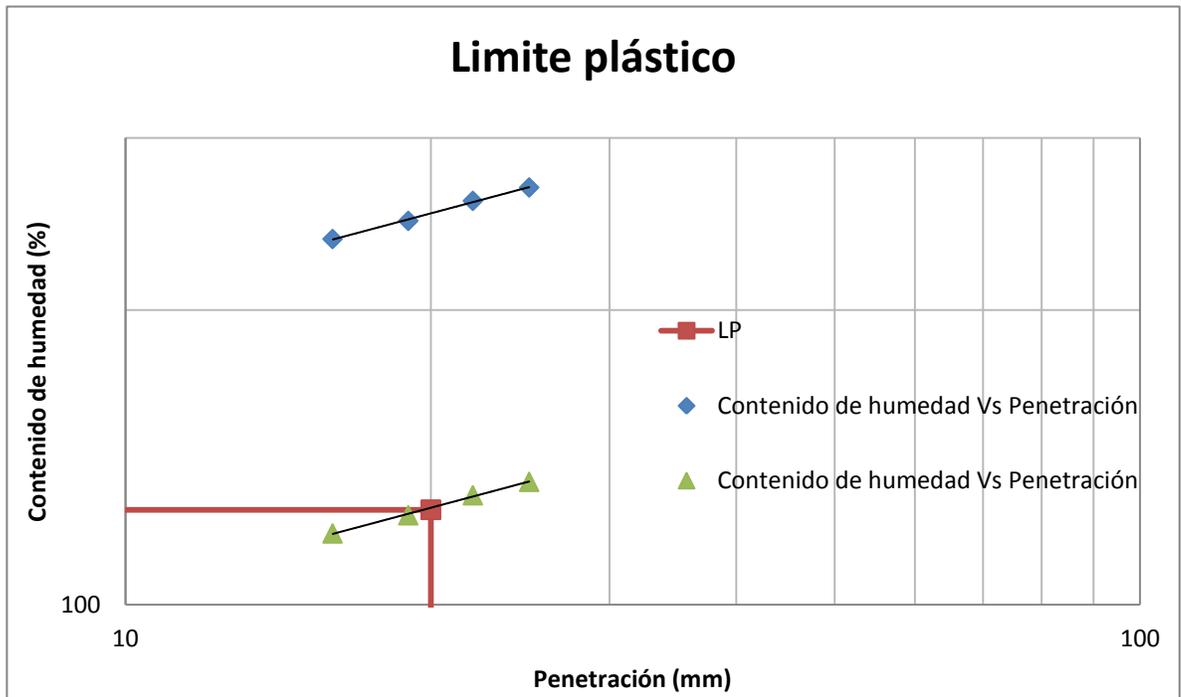
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 51. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	21	22	23	24
Peso recipiente (gr)	14.08	13.51	13.64	13.84
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	32.25	33.07	33.19	34.32
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.48	19.15	19.09	19.42
Contenido de humedad (%)	236.48	246.81	258.72	267.03
Contenido de humedad (%)	118.24	123.40	129.36	133.51
Limite plástico (%)	125			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 47. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono británico



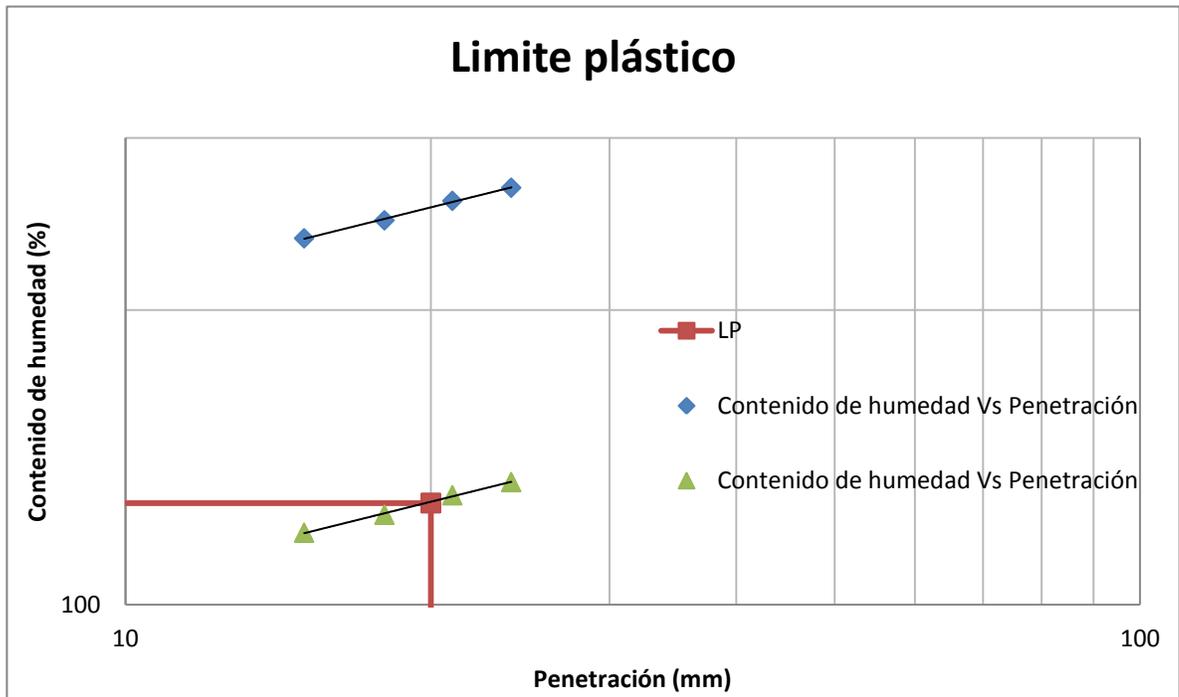
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 52. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	21	24
Recipiente N°	25	26	3	27
Peso recipiente (gr)	13.64	13.80	13.68	13.87
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	38.20	33.10	34.63	32.25
Peso recipiente + suelo seco (gr)	20.93	19.36	19.52	18.88
Contenido de humedad (%)	236.90	247.12	258.73	266.87
Contenido de humedad (%)	118.45	123.56	129.37	133.43
Limite plástico (%)	127			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 48. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono británico



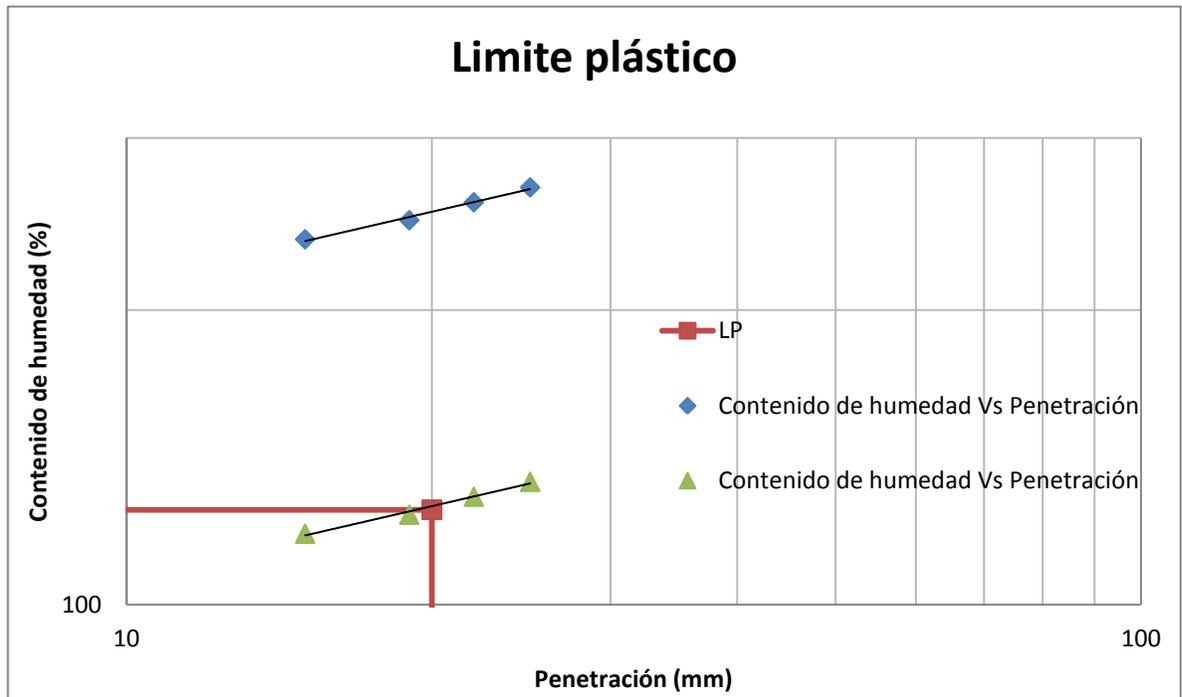
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 53. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono británico

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	22	25
Recipiente N°	29	30	31	34
Peso recipiente (gr)	13.72	13.07	12.21	12.23
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.47	30.81	31.82	33.3
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.7	18.18	17.69	17.97
Contenido de humedad (%)	236.35	247.16	257.85	267.07
Contenido de humedad (%)	118.17	123.58	128.92	133.54
Limite plástico (%)	125			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 49. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono británico



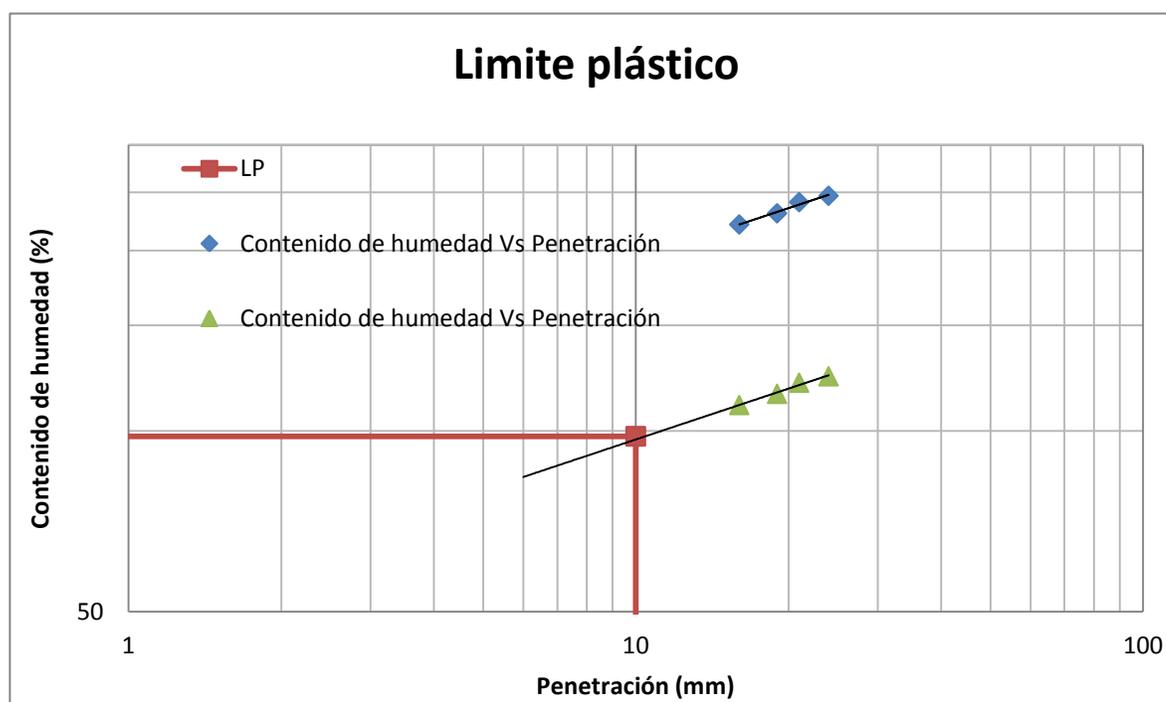
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 54. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	21	24
Recipiente N°	18	16	19	17
Peso recipiente (gr)	13.64	13.83	14.88	13.9
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	29.63	28.45	30.15	31.07
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.62	18.25	19.36	18.85
Contenido de humedad (%)	221.08	230.77	240.85	246.87
Contenido de humedad (%)	110.54	115.38	120.42	123.43
Limite plástico (%)	98			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 50. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono ruso



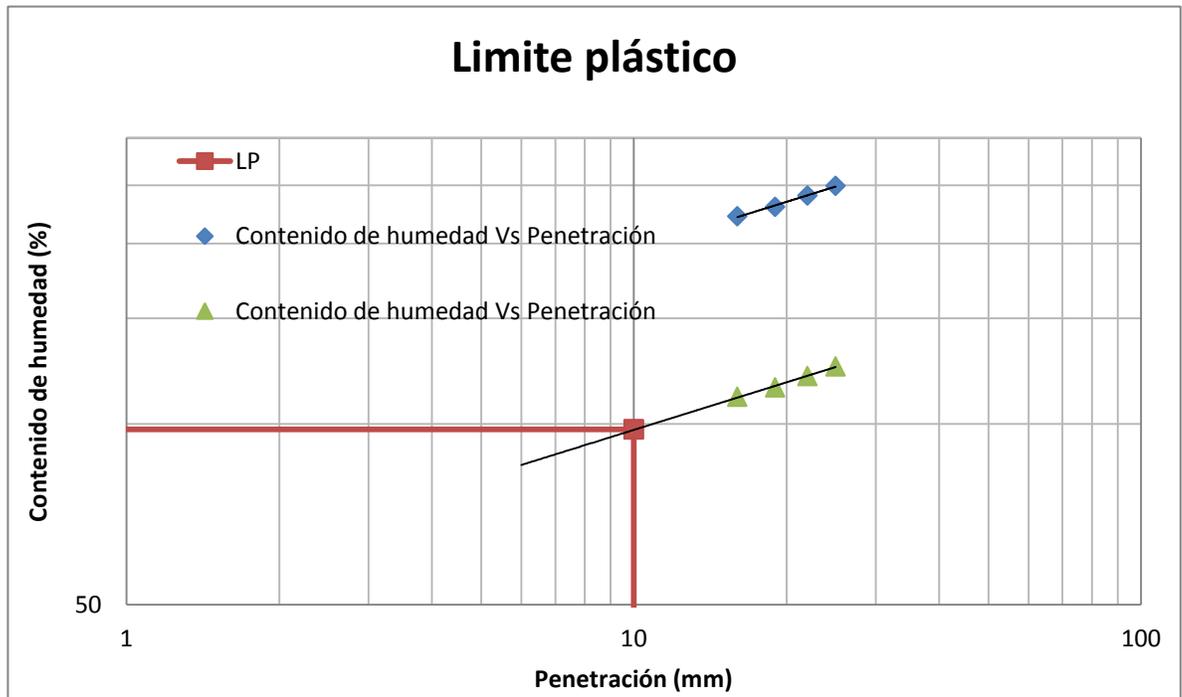
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 55. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	14	33	32	35
Peso recipiente (gr)	13.68	13.50	13.48	11.36
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.11	31.27	32.04	30.87
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.78	18.88	18.93	16.94
Contenido de humedad (%)	222.16	230.30	240.55	249.64
Contenido de humedad (%)	111.08	115.15	120.28	124.82
Limite plástico (%)	98			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 51. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono ruso



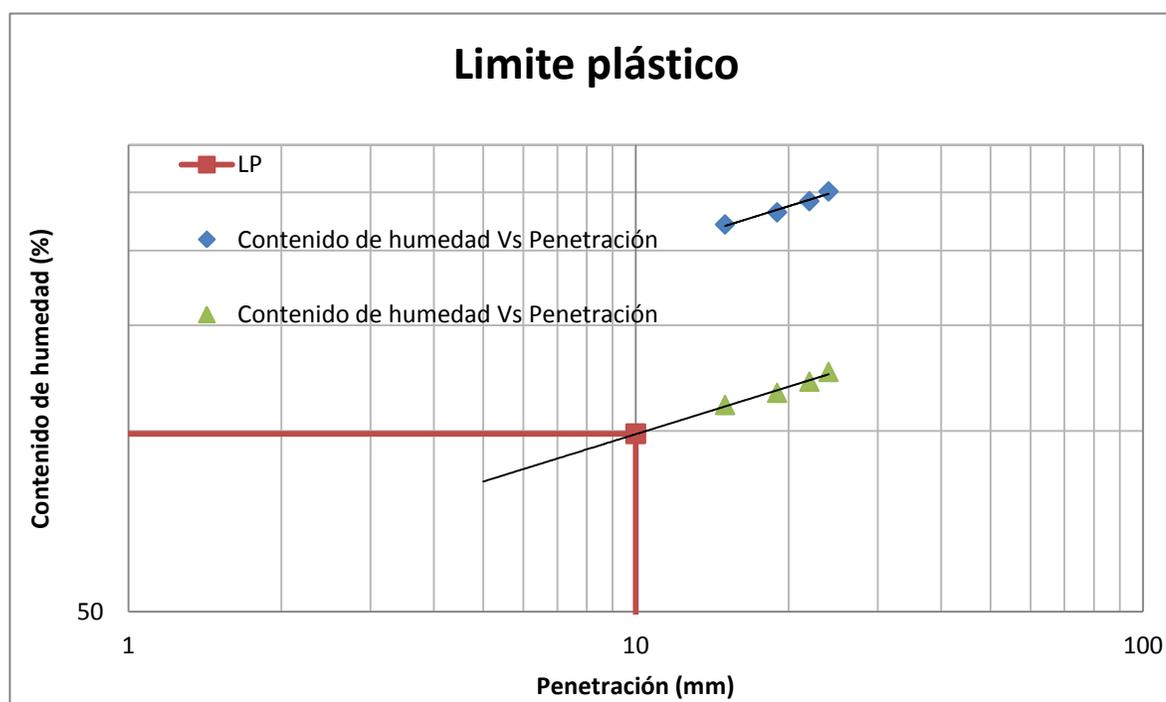
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 56. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	22	24
Recipiente N°	28	27	25	26
Peso recipiente (gr)	13.94	13.87	13.64	13.8
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.06	29.89	29.74	29.07
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.96	18.7	18.35	18.15
Contenido de humedad (%)	221.12	231.68	241.83	251.03
Contenido de humedad (%)	110.56	115.84	120.91	125.52
Limite plástico (%)	99			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 52. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono ruso



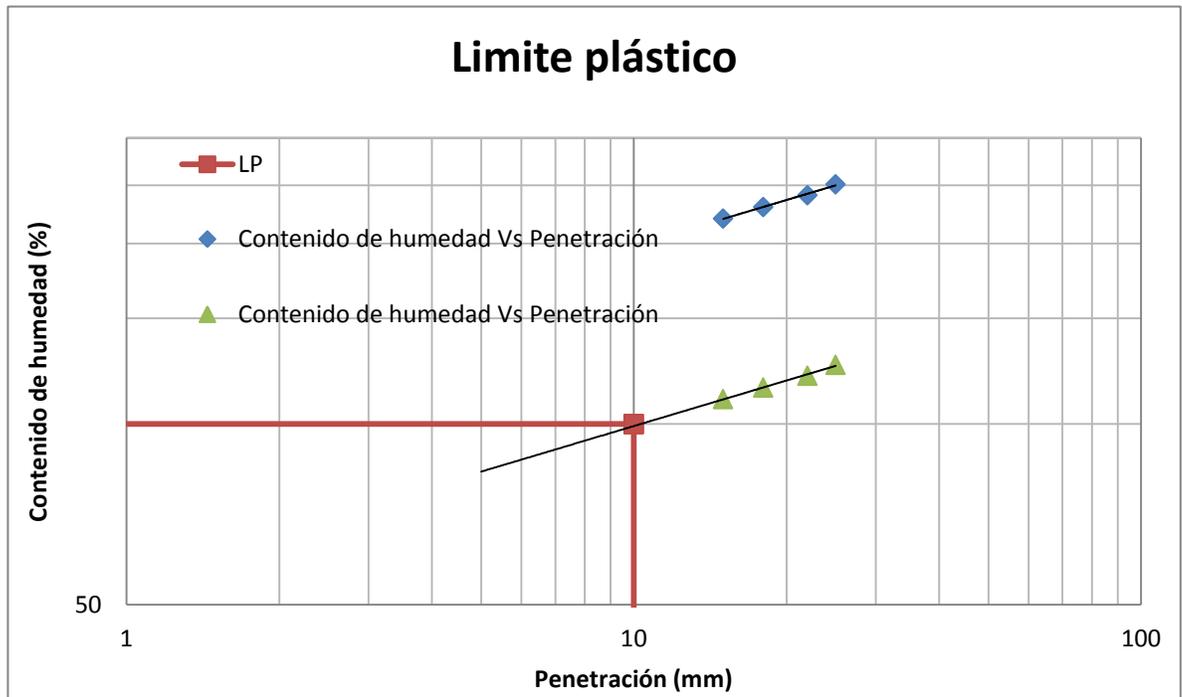
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 57. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	22	25
Recipiente N°	34	31	29	30
Peso recipiente (gr)	12.23	12.21	13.72	13.07
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.60	31.92	31.41	30.17
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.28	18.18	18.91	17.94
Contenido de humedad (%)	220.17	230.15	240.85	251.13
Contenido de humedad (%)	110.08	115.08	120.42	125.56
Limite plástico (%)	100			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 53. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono ruso



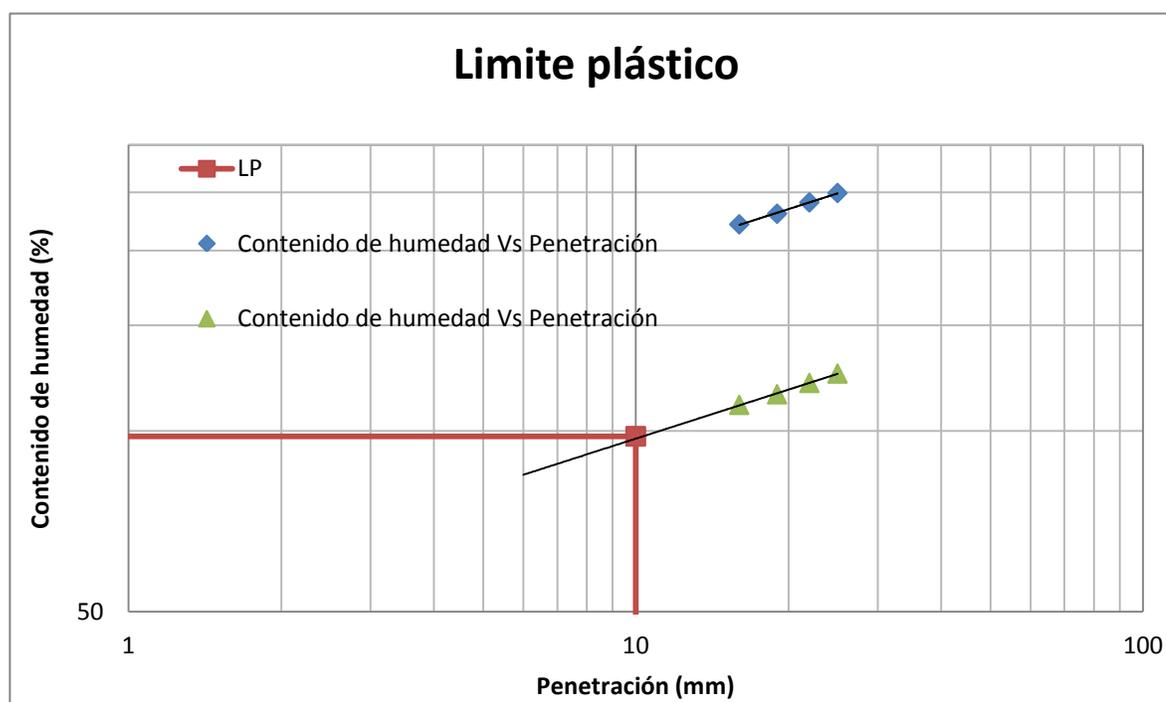
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 58. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono ruso

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	24	22	23	21
Peso recipiente (gr)	13.84	13.51	13.64	14.08
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.80	30.46	30.98	31.8
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.12	18.64	18.73	19.15
Contenido de humedad (%)	221.21	230.41	240.67	249.51
Contenido de humedad (%)	110.61	115.20	120.33	124.75
Limite plástico (%)	98			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 54. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono ruso



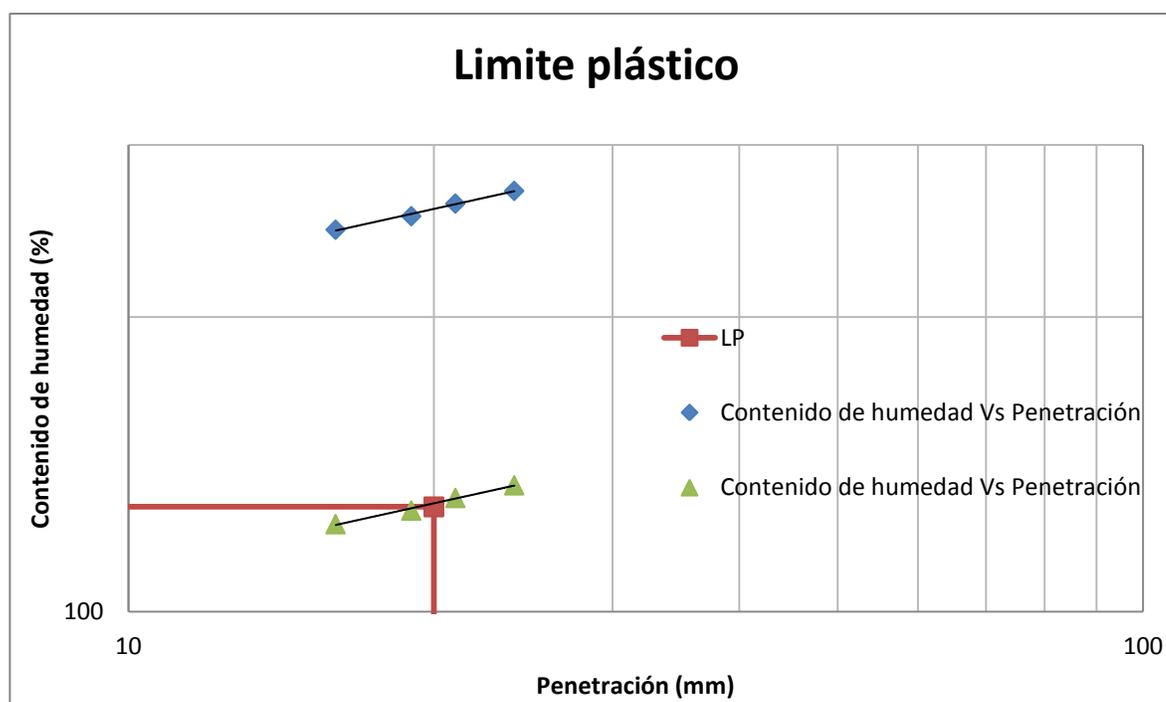
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 59. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	21	24
Recipiente N°	28	27	26	25
Peso recipiente (gr)	13.94	13.87	13.80	13.64
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.40	31.77	32.16	33.4
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.7	18.93	18.88	18.99
Contenido de humedad (%)	245.80	253.75	261.42	269.35
Contenido de humedad (%)	122.90	126.88	130.71	134.67
Limite plástico (%)	128			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 55. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono canadiense



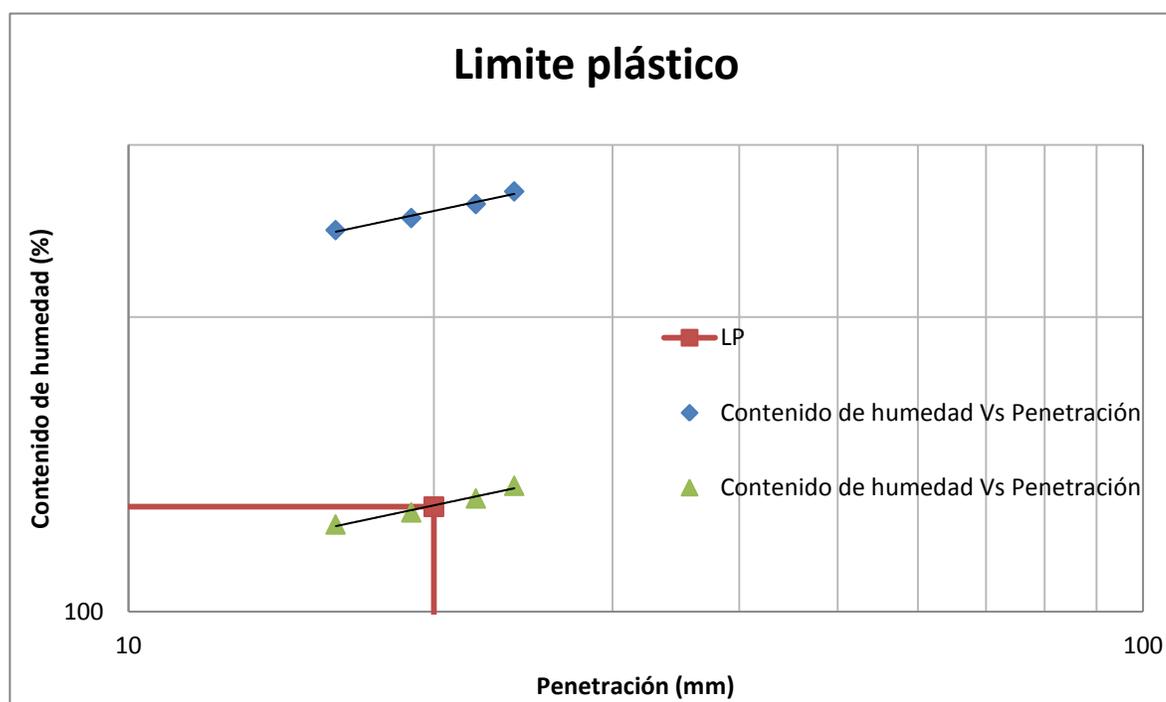
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 60. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	24
Recipiente N°	34	31	30	29
Peso recipiente (gr)	12.23	12.21	13.07	13.72
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	35.07	34.46	30.87	30.95
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.84	18.52	18	18.39
Contenido de humedad (%)	245.54	252.61	261.05	268.95
Contenido de humedad (%)	122.77	126.31	130.53	134.48
Limite plástico (%)	128			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 56. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono canadiense



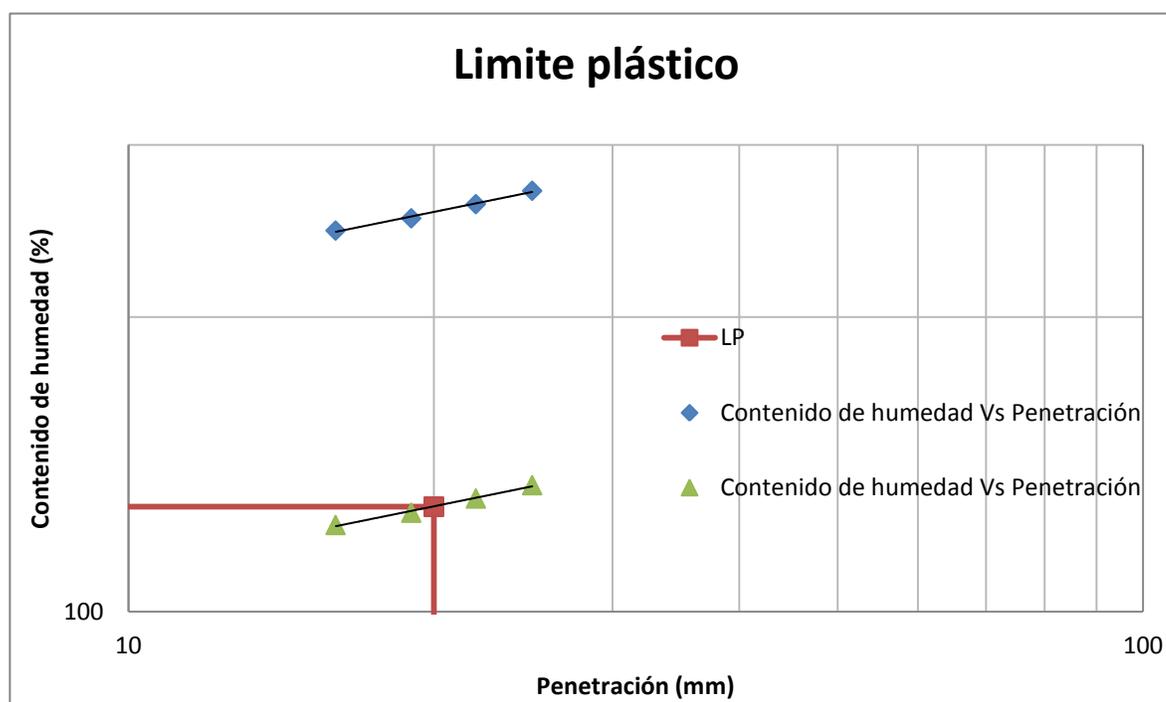
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 61. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	21	35	17	19
Peso recipiente (gr)	14.08	11.36	13.90	14.88
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.17	31.52	33.25	33.2
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.03	17.08	19.26	19.84
Contenido de humedad (%)	245.25	252.45	261.01	269.35
Contenido de humedad (%)	122.63	126.22	130.50	134.68
Limite plástico (%)	128			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 57. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono canadiense



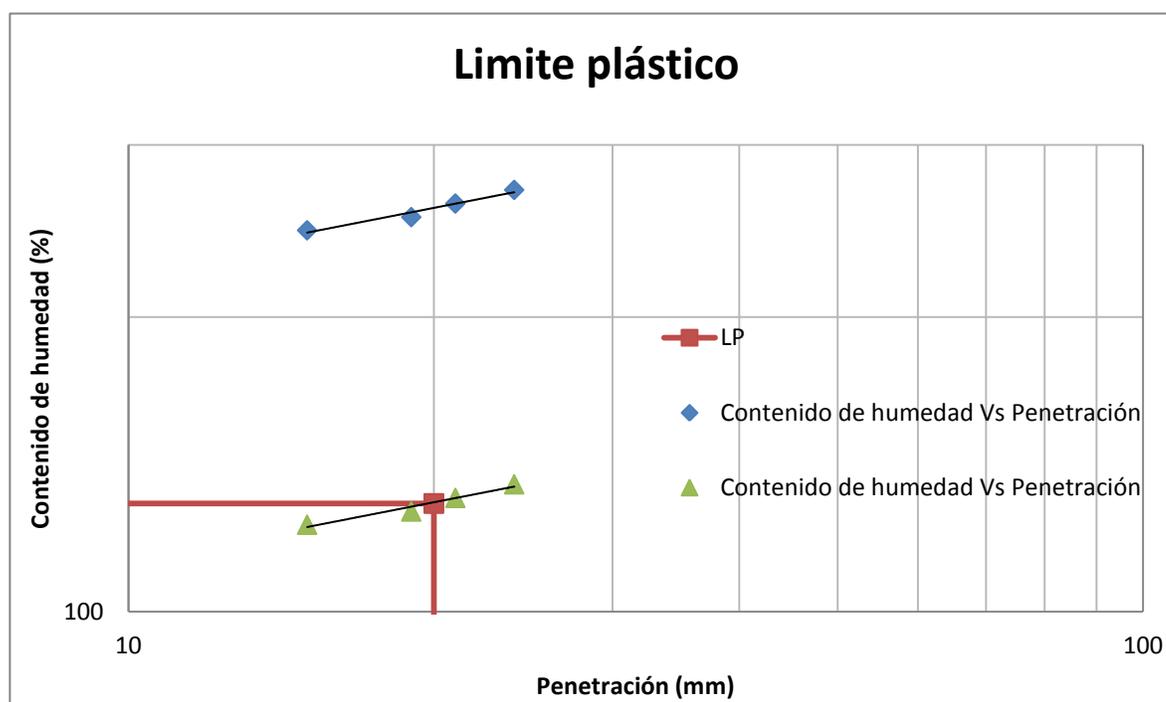
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 62. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	21	24
Recipiente N°	32	22	23	33
Peso recipiente (gr)	13.48	13.51	13.64	13.5
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.75	30.85	30.95	31.44
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.48	18.42	18.43	18.35
Contenido de humedad (%)	245.40	253.16	261.38	269.90
Contenido de humedad (%)	122.70	126.58	130.69	134.95
Limite plástico (%)	129			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 58. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono canadiense



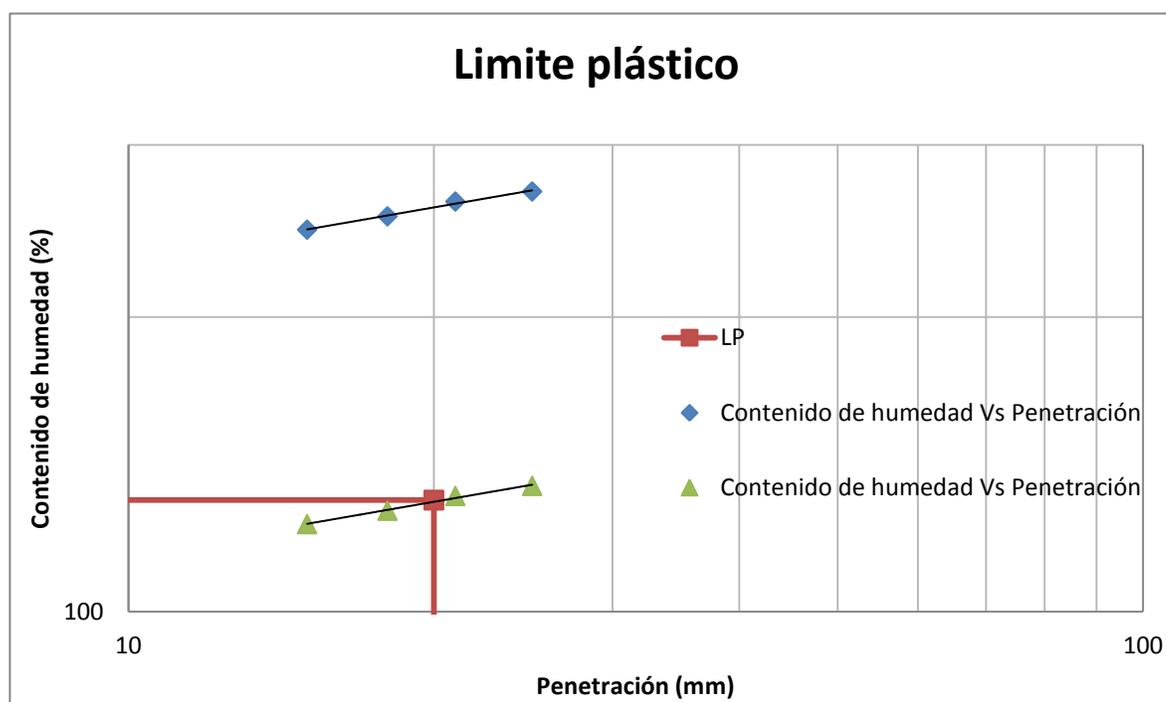
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 63. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono canadiense

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	21	25
Recipiente N°	18	16	14	2
Peso recipiente (gr)	13.64	13.83	13.68	15.58
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	29.58	30.91	30.65	30.41
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.25	18.66	18.36	19.6
Contenido de humedad (%)	245.77	253.62	262.61	268.91
Contenido de humedad (%)	122.89	126.81	131.30	134.45
Limite plástico (%)	130			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 59. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono canadiense



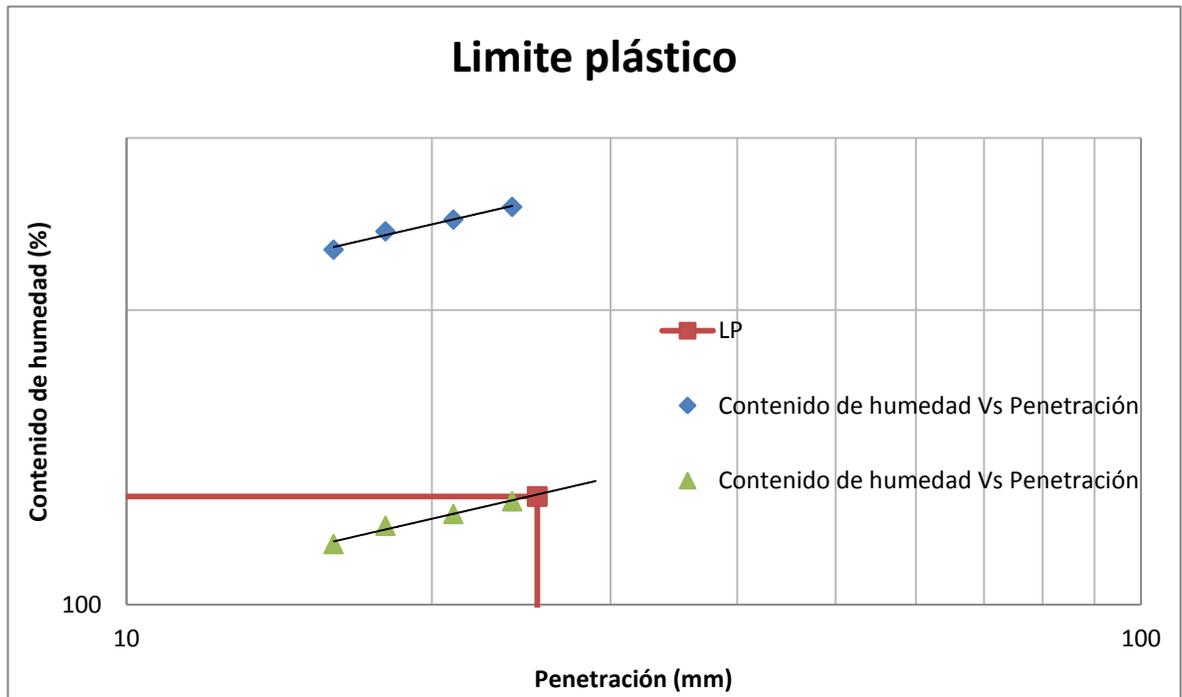
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 64. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	24
Recipiente N°	1	4	2	3
Peso recipiente (gr)	13.95	12.22	15.58	12.86
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	31.11	31.27	32.75	32.46
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.14	17.81	20.52	18.38
Contenido de humedad (%)	230.64	240.79	247.57	255.07
Contenido de humedad (%)	115.32	120.39	123.79	127.54
Limite plástico (%)	129			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 60. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono indio



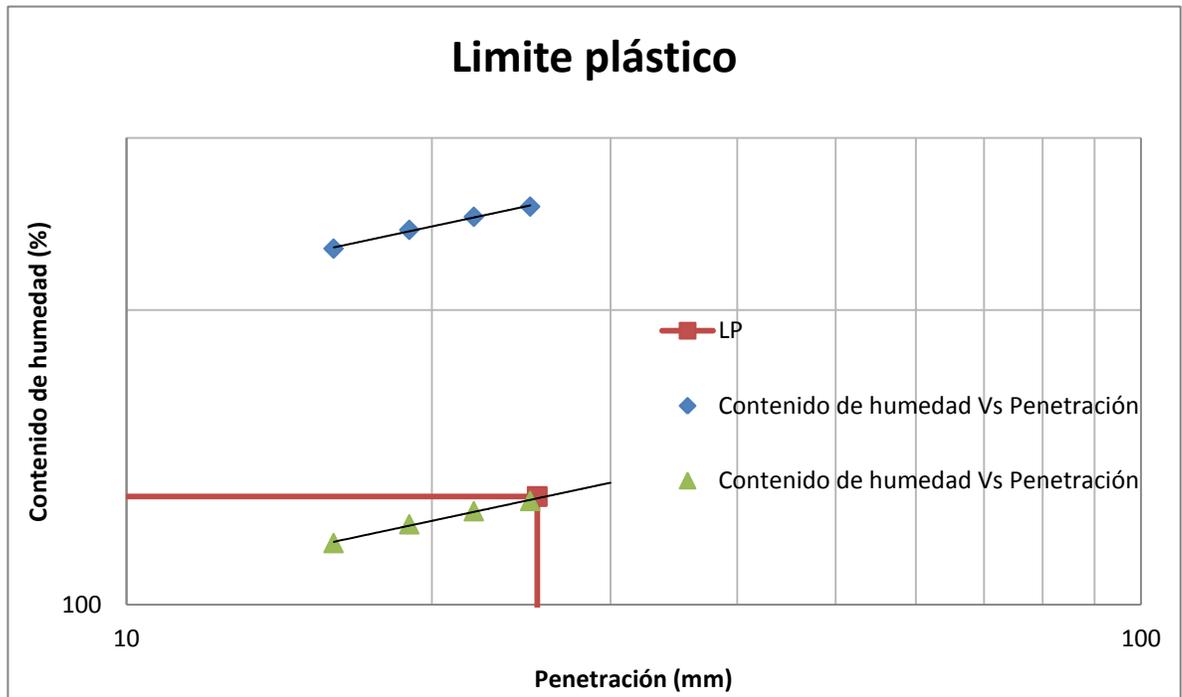
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 65. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	12	15	17	14
Peso recipiente (gr)	13.62	12.83	13.90	13.68
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.81	30.22	31.64	31.87
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.81	17.92	18.98	18.8
Contenido de humedad (%)	231.21	241.65	249.21	255.27
Contenido de humedad (%)	115.61	120.83	124.61	127.64
Limite plástico (%)	129			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 61. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono indio



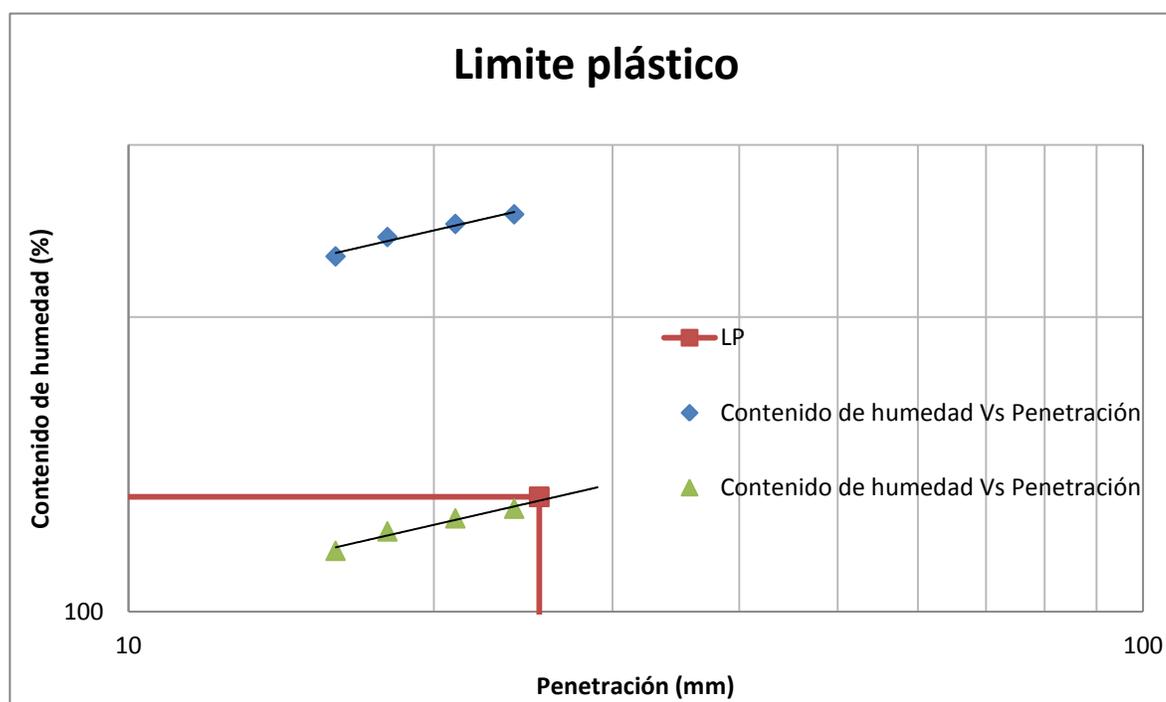
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 66. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	24
Recipiente N°	8	6	9	7
Peso recipiente (gr)	13.67	13.86	13.77	14.18
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.97	30.05	31.47	31.78
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.9	18.6	18.84	19.14
Contenido de humedad (%)	230.78	241.56	249.11	254.84
Contenido de humedad (%)	115.39	120.78	124.56	127.42
Limite plástico (%)	131			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 62. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono indio



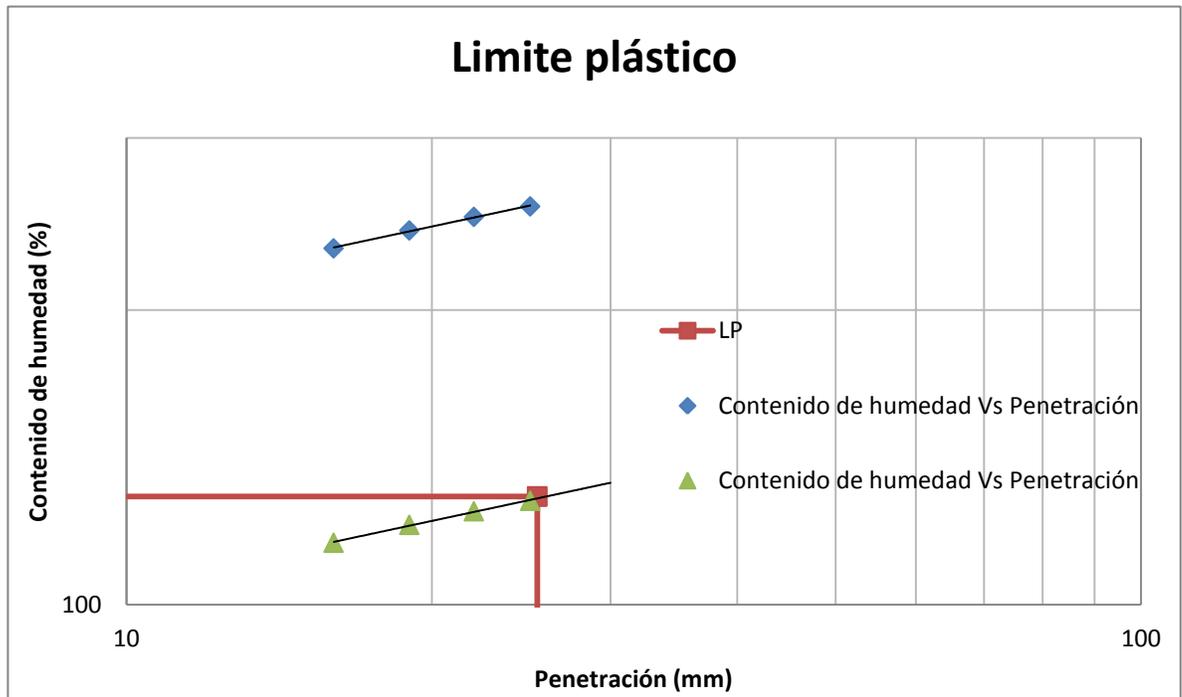
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 67. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	10	13	20	18
Peso recipiente (gr)	14.07	14.04	13.95	13.67
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	34.25	33.70	32.49	30.87
Peso recipiente + suelo seco (gr)	20.16	19.8	19.26	18.51
Contenido de humedad (%)	231.36	241.32	249.15	255.37
Contenido de humedad (%)	115.68	120.66	124.58	127.69
Limite plástico (%)	129			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 63. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono indio



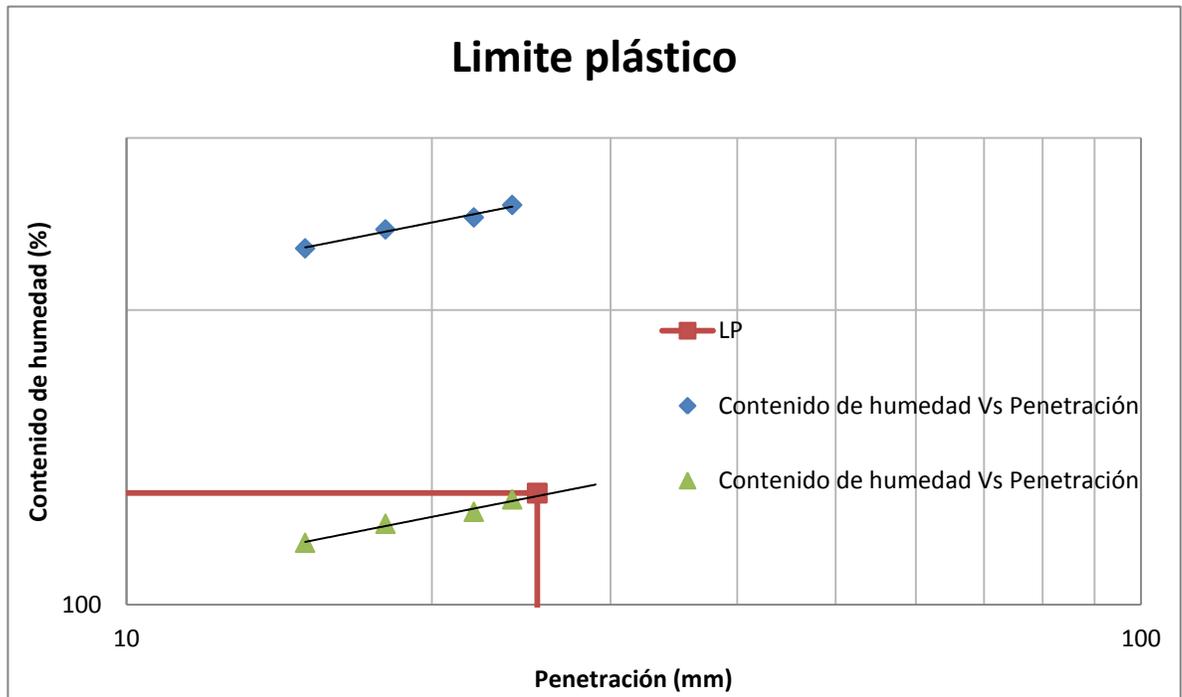
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 68. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono indio

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	22	24
Recipiente N°	34	30	23	25
Peso recipiente (gr)	12.23	13.07	13.64	13.64
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	35.16	34.44	33.21	32.2
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.15	19.32	19.25	18.85
Contenido de humedad (%)	231.36	241.92	248.84	256.24
Contenido de humedad (%)	115.68	120.96	124.42	128.12
Limite plástico (%)	130			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 64. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono indio



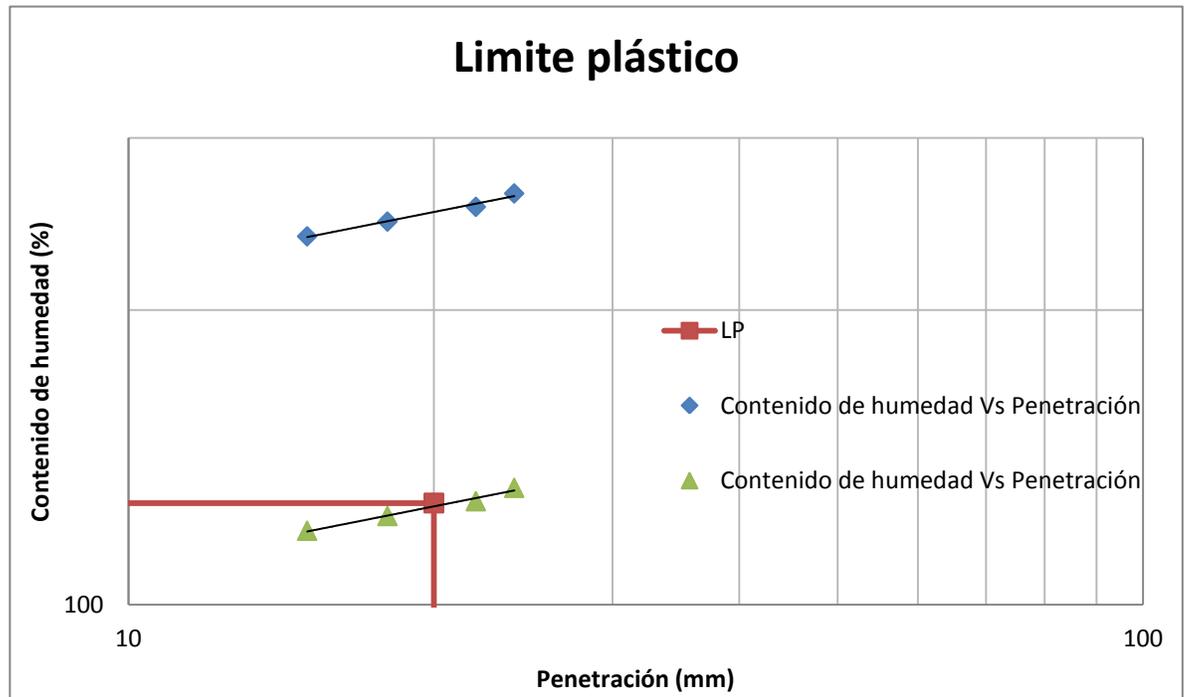
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 69. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	18	22	24
Recipiente N°	17	31	33	30
Peso recipiente (gr)	13.90	12.21	13.50	13.07
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.80	31.47	32.25	32.87
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.9	17.77	18.78	18.52
Contenido de humedad (%)	238.00	246.40	255.11	263.30
Contenido de humedad (%)	119.00	123.20	127.56	131.65
Limite plástico (%)	127			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 65. Ensayo N°1 LP método del doble peso cono colombiano



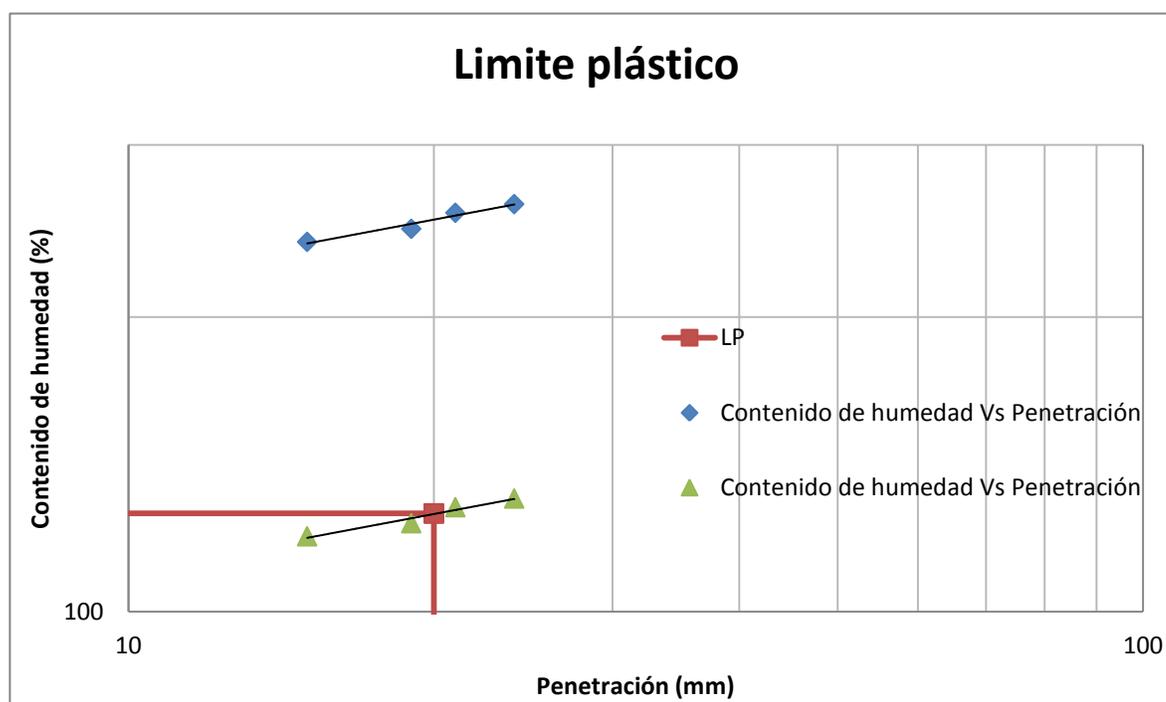
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 70. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	15	19	21	24
Recipiente N°	4	21	29	34
Peso recipiente (gr)	12.22	14.08	13.72	12.23
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	32.21	30.84	31.97	32.05
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.12	18.92	18.85	17.72
Contenido de humedad (%)	238.81	246.28	255.75	261.02
Contenido de humedad (%)	119.41	123.14	127.88	130.51
Limite plástico (%)	126			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 66. Ensayo N°2 LP método del doble peso cono colombiano



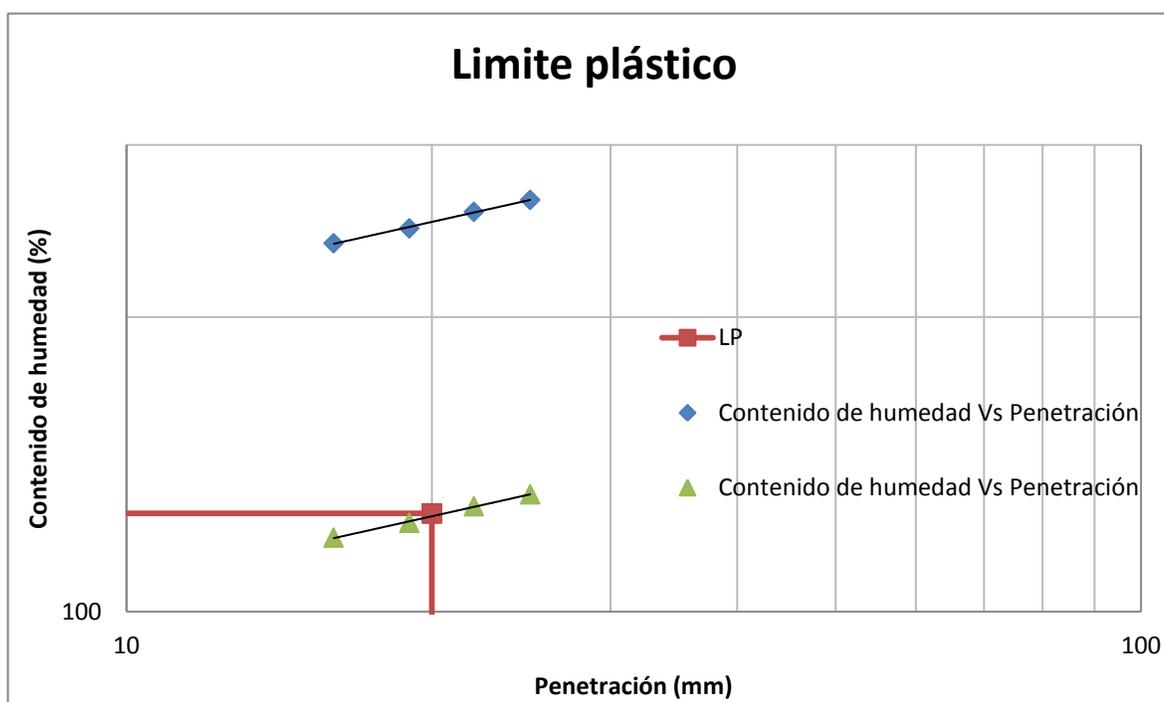
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 71. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	12	24	19	18
Peso recipiente (gr)	13.60	13.84	14.88	13.64
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	32.43	32.90	32.41	32.33
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.17	19.34	19.8	18.78
Contenido de humedad (%)	238.06	246.55	256.30	263.62
Contenido de humedad (%)	119.03	123.27	128.15	131.81
Limite plástico (%)	126			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 67. Ensayo N°3 LP método del doble peso cono colombiano



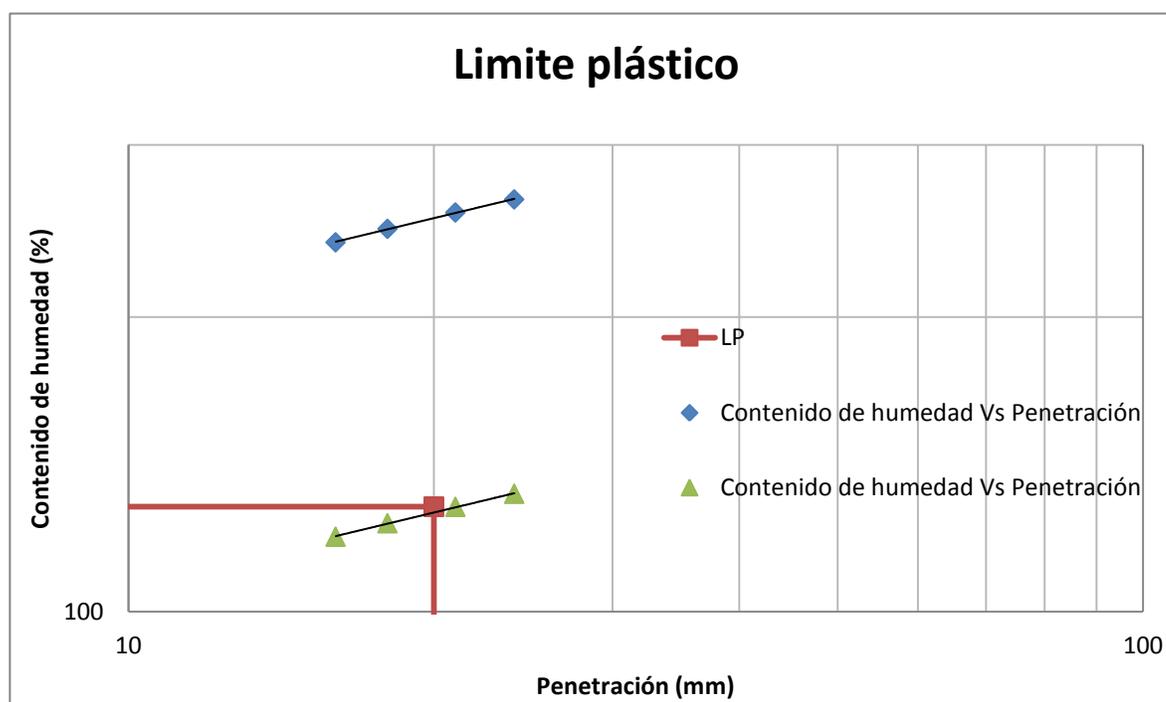
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 72. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	18	21	24
Recipiente N°	27	23	32	26
Peso recipiente (gr)	13.87	13.64	13.48	13.8
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	33.27	32.58	30.85	31.16
Peso recipiente + suelo seco (gr)	19.6	19.11	18.36	18.57
Contenido de humedad (%)	238.57	246.25	255.94	263.94
Contenido de humedad (%)	119.28	123.13	127.97	131.97
Limite plástico (%)	128			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 68. Ensayo N°4 LP método del doble peso cono colombiano



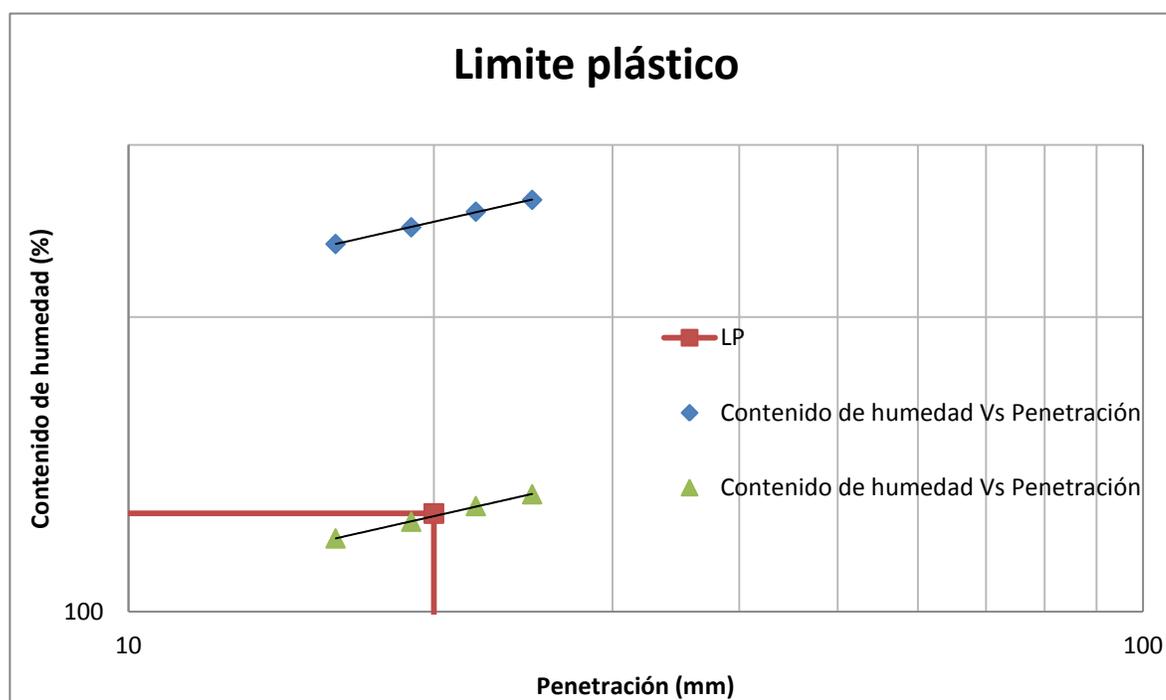
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 73. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono colombiano

Humedad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Penetración (mm)	16	19	22	25
Recipiente N°	25	35	22	28
Peso recipiente (gr)	13.64	11.36	13.51	13.94
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	30.42	30.94	31.83	32.45
Peso recipiente + suelo seco (gr)	18.61	17	18.65	19.03
Contenido de humedad (%)	237.63	247.16	256.42	263.65
Contenido de humedad (%)	118.81	123.58	128.21	131.83
Limite plástico (%)	126			

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 69. Ensayo N°5 LP método del doble peso cono colombiano



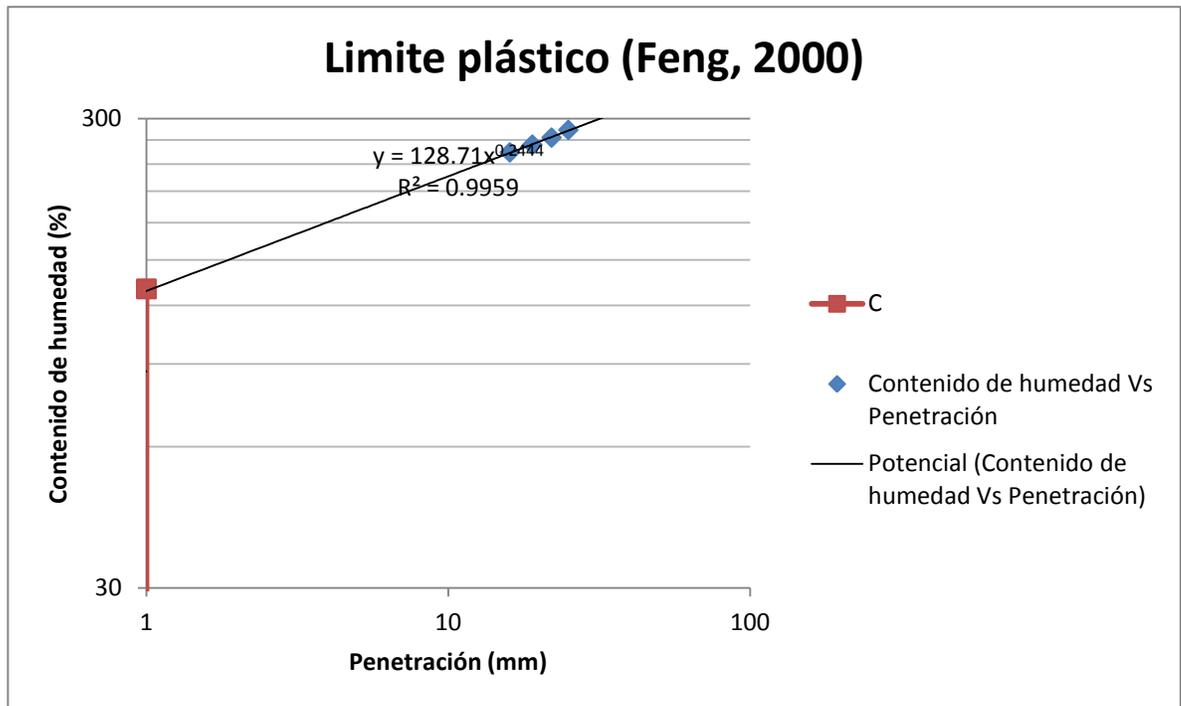
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 74. Ensayo N°2 LP método de Feng cono británico

C	128.71
m	0.2444
LP	152

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 70. Ensayo N°2 LP método de Feng cono británico



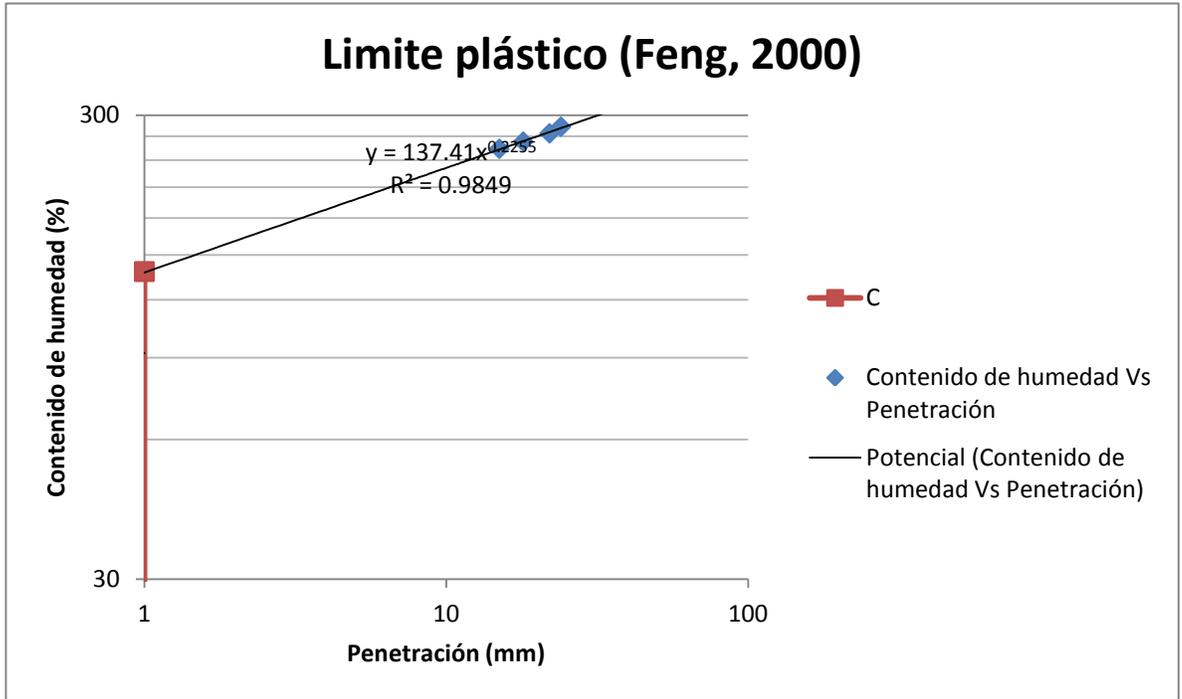
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 75. Ensayo N°3 LP método de Feng cono británico

C	137.41
m	0.2255
LP	161

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 71. Ensayo N°3 LP método de Feng cono británico



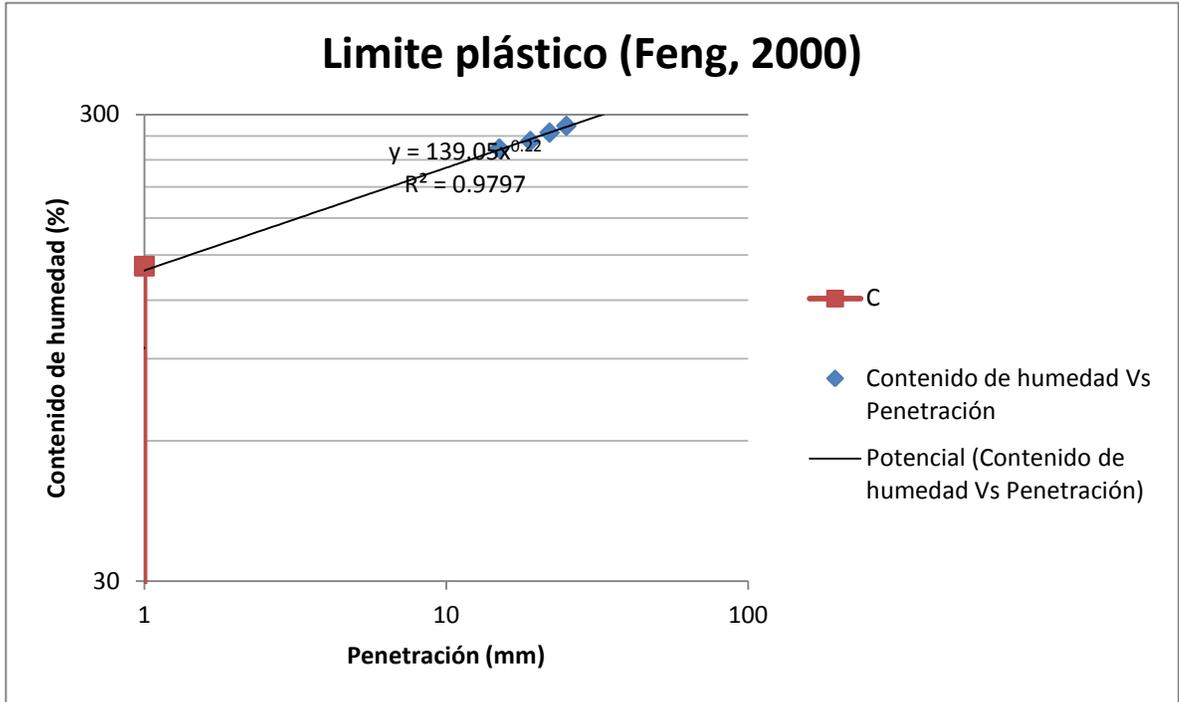
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 76. Ensayo N°4 LP método de Feng cono británico

C	139.05
m	0.22
LP	162

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 72. Ensayo N°4 LP método de Feng cono británico



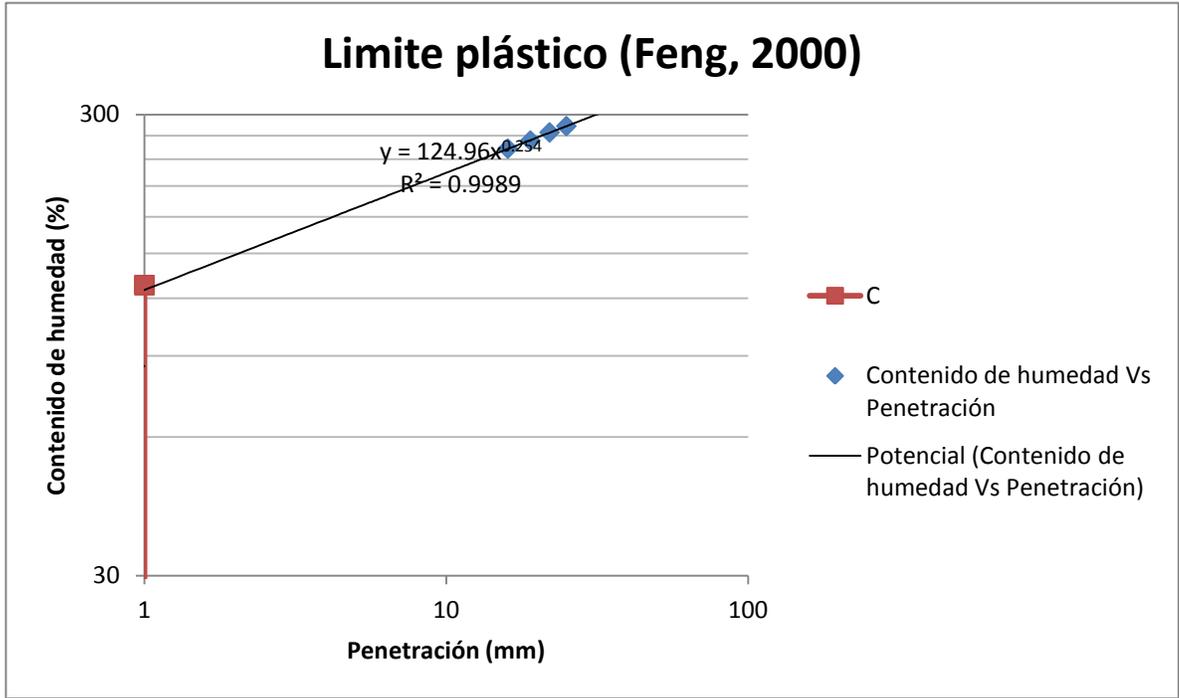
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 77. Ensayo N°5 LP método de Feng cono británico

C	124.96
m	0.254
LP	149

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 73. Ensayo N°5 LP método de Feng cono británico



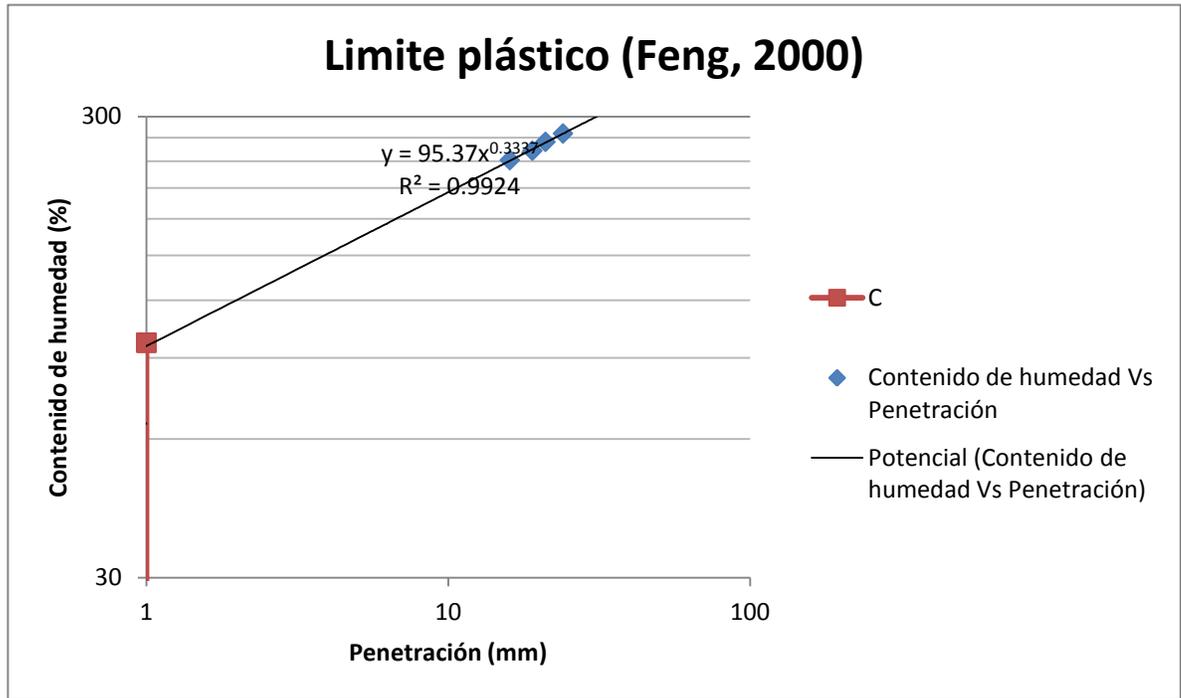
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 78. Ensayo N°1 LP método de Feng cono ruso

C	95.37
m	0.3337
LP	120

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 74. Ensayo N°1 LP método de Feng cono ruso



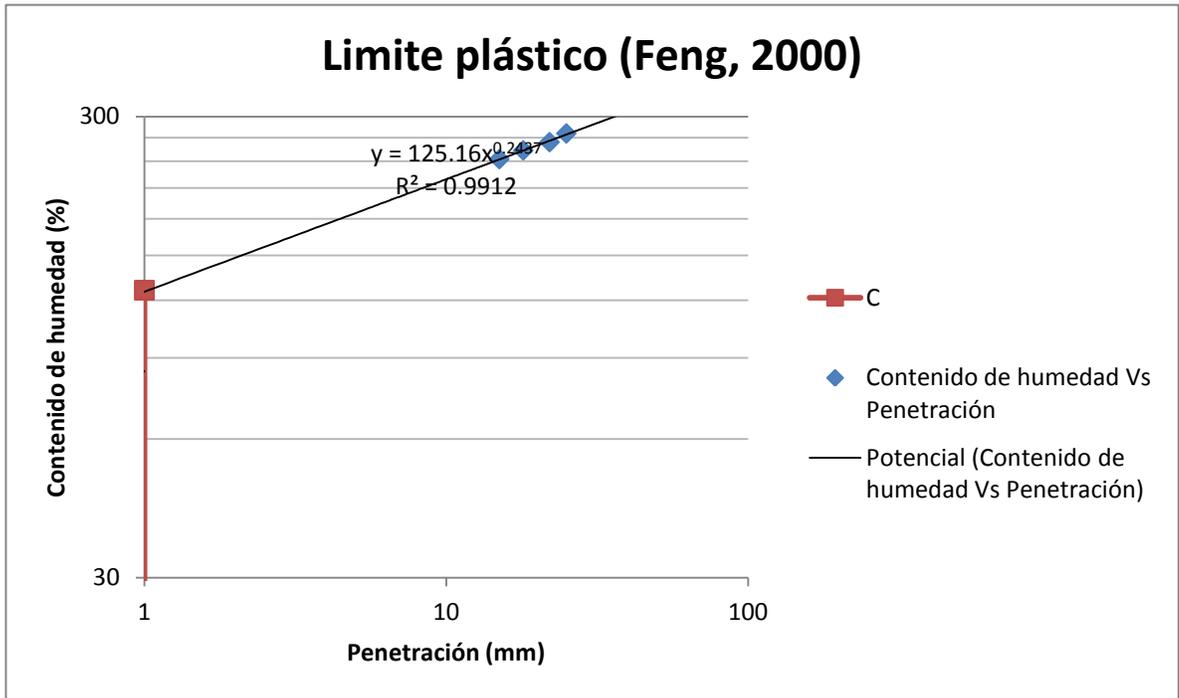
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 79. Ensayo N°2 LP método de Feng cono ruso

C	125.16
m	0.2437
LP	148

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 75. Ensayo N°2 LP método de Feng cono ruso



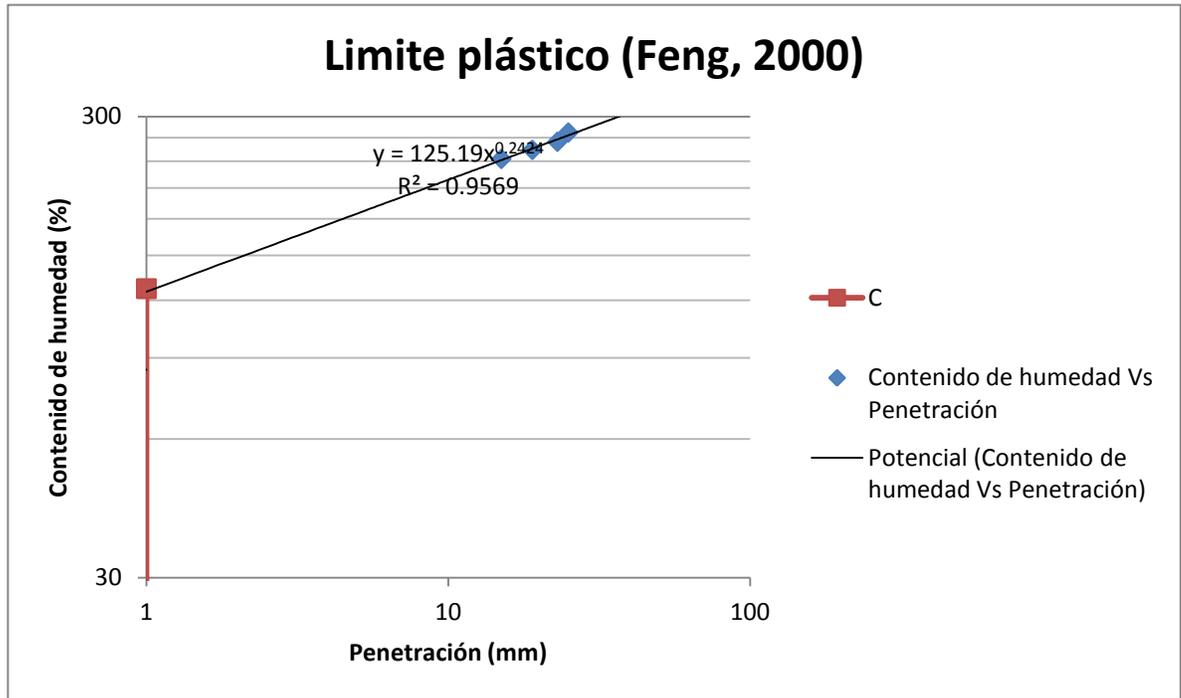
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 80. Ensayo N°3 LP método de Feng cono ruso

C	125.19
m	0.2424
LP	148

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 76. Ensayo N°3 LP método de Feng cono ruso



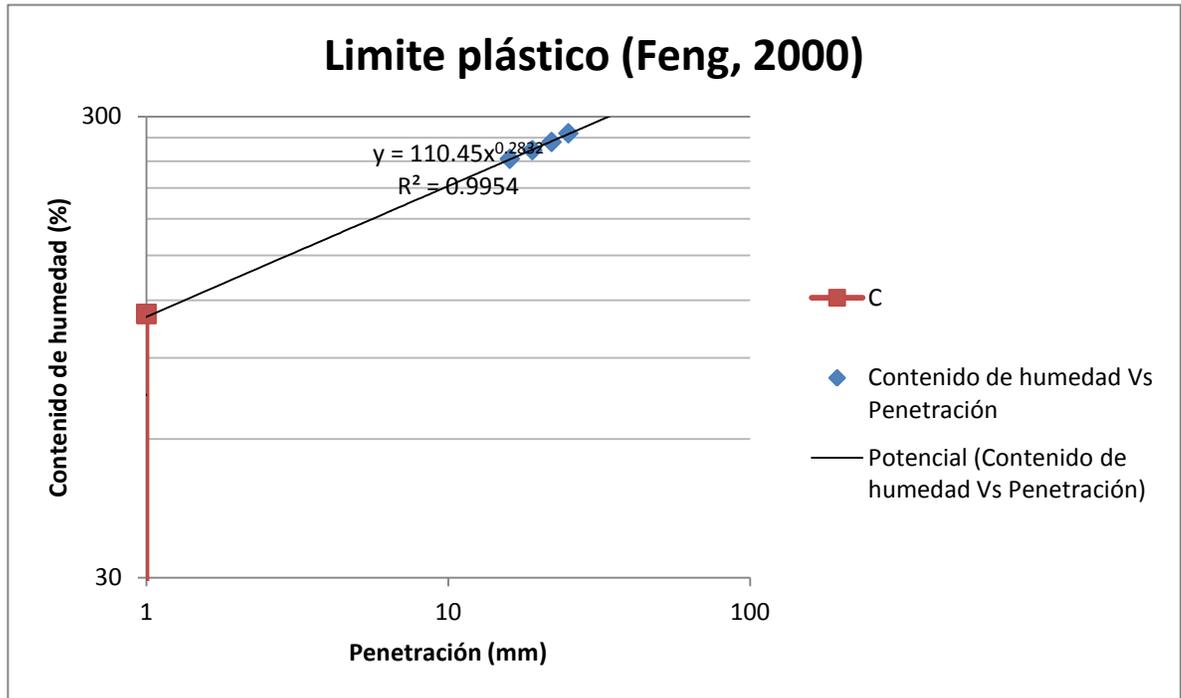
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 81. Ensayo N°4 LP método de Feng cono ruso

C	110.45
m	0.2832
LP	134

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 77. Ensayo N°4 LP método de Feng como ruso



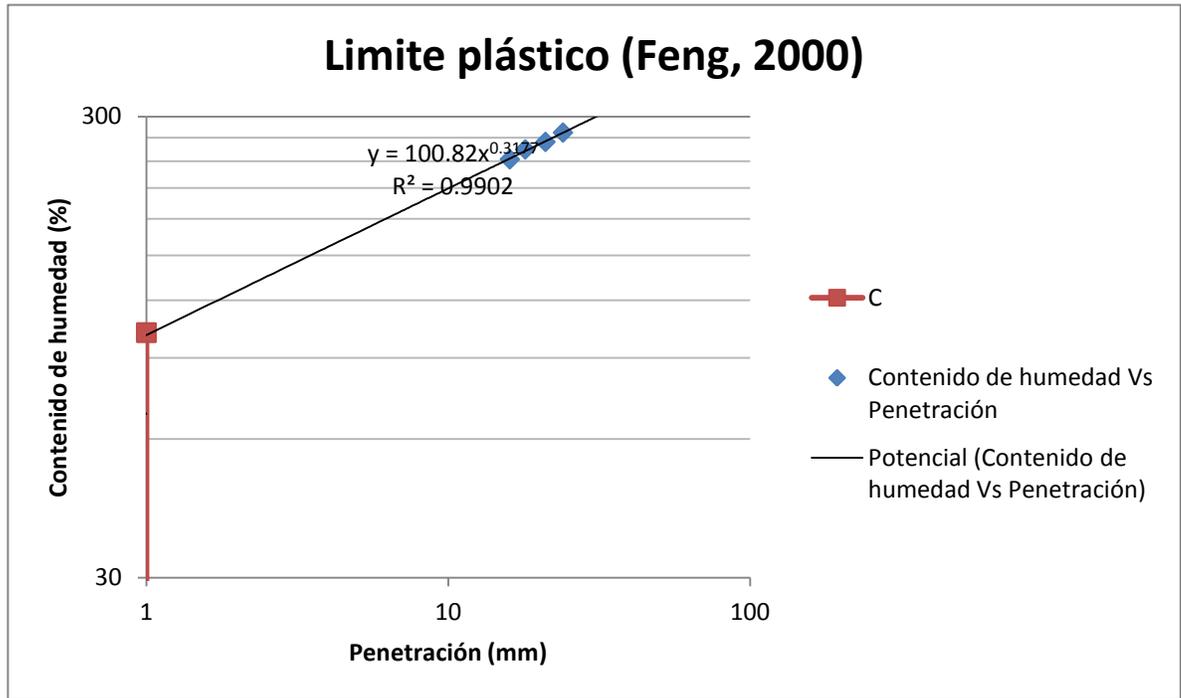
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 82. Ensayo N°5 LP método de Feng como ruso

C	100.82
m	0.3177
LP	126

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 78. Ensayo N°5 LP método de Feng como ruso



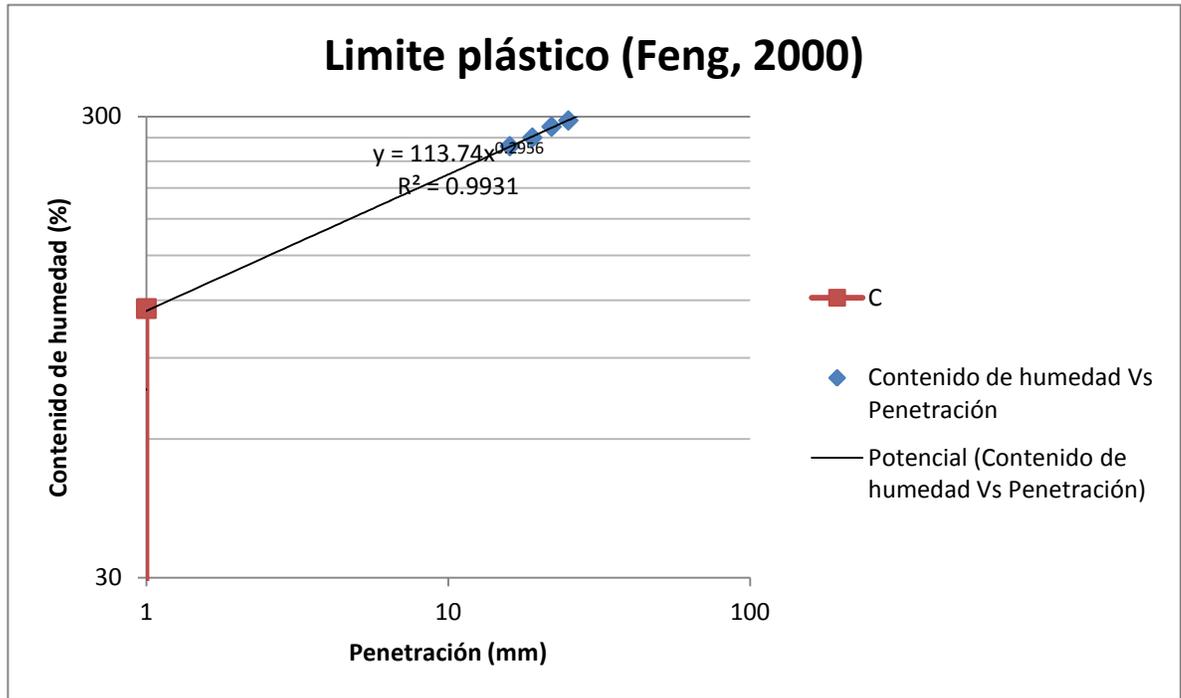
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 83. Ensayo N°1 LP método de Feng como canadiense

C	113.74
m	0.2956
LP	140

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 79. Ensayo N°1 LP método de Feng como canadiense



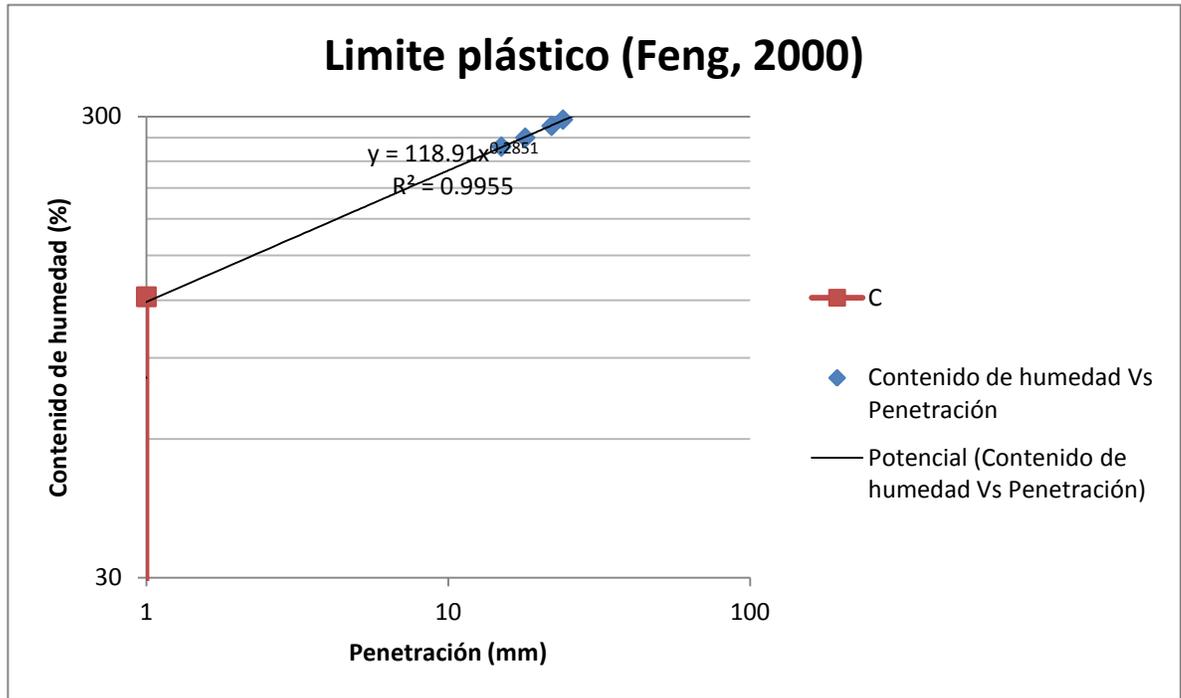
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 84. Ensayo N°2 LP método de Feng como canadiense

C	118.91
m	0.2851
LP	145

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 80. Ensayo N°2 LP método de Feng cono canadiense



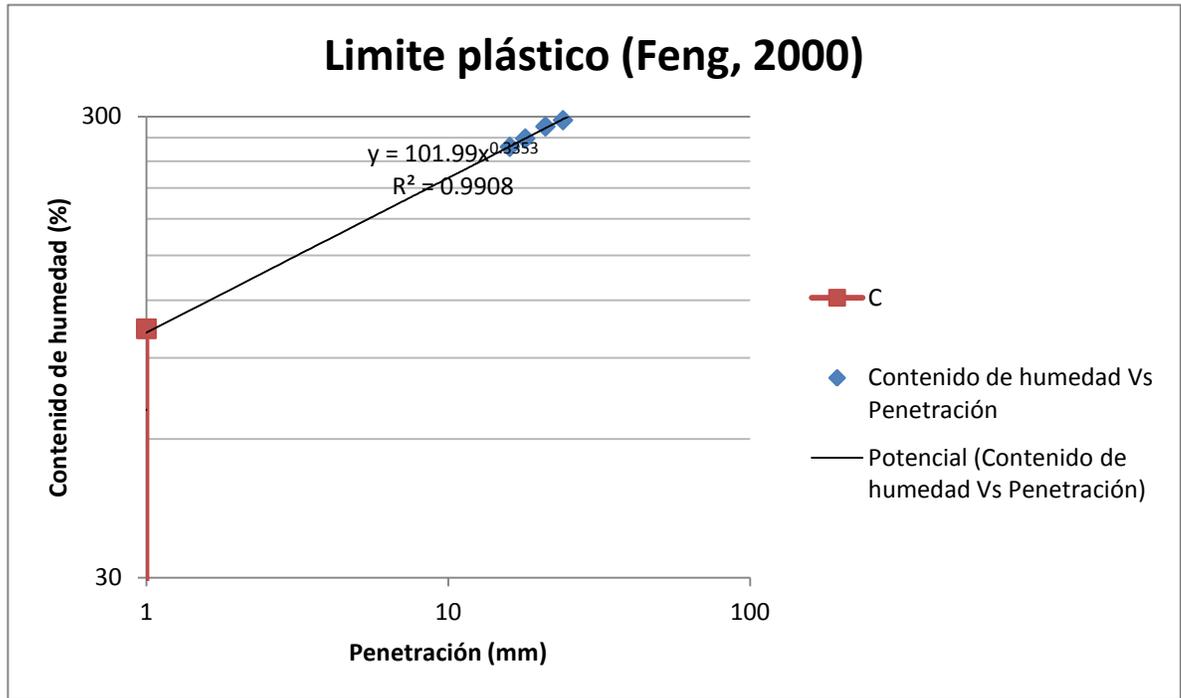
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 85. Ensayo N°3 LP método de Feng cono canadiense

C	101.99
m	0.3353
LP	129

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 81. Ensayo N°3 LP método de Feng cono canadiense



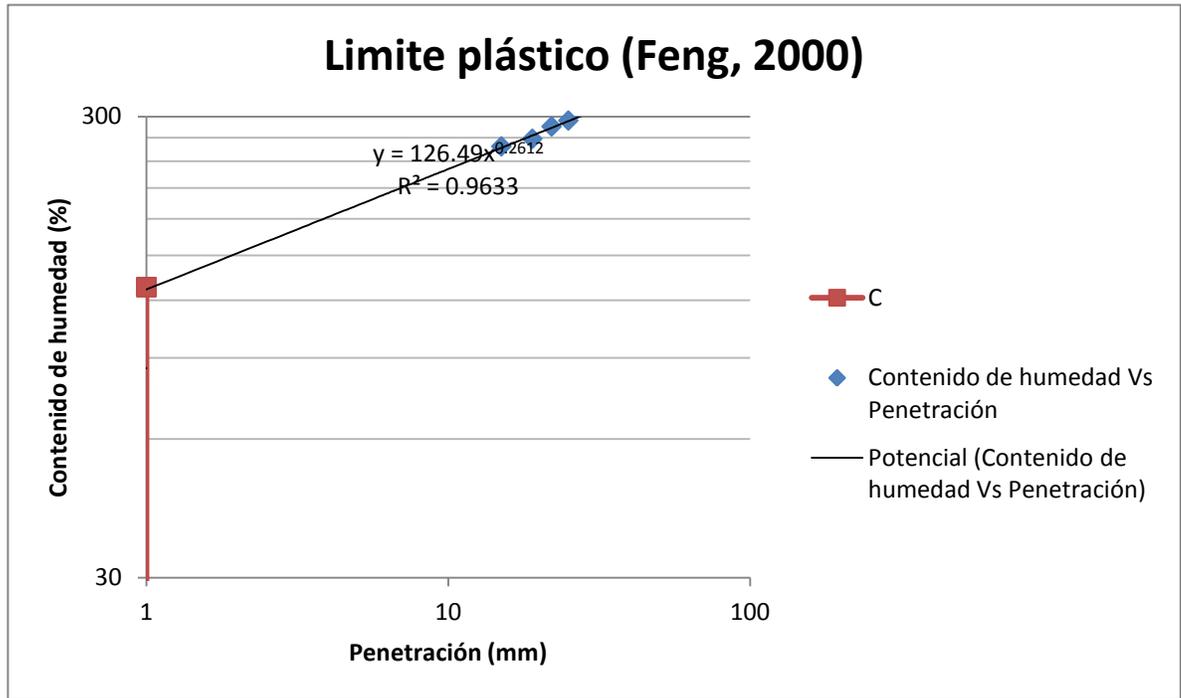
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 86. Ensayo N°4 LP método de Feng cono canadiense

C	126.49
m	0.2612
LP	152

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 82. Ensayo N°4 LP método de Feng cono canadiense



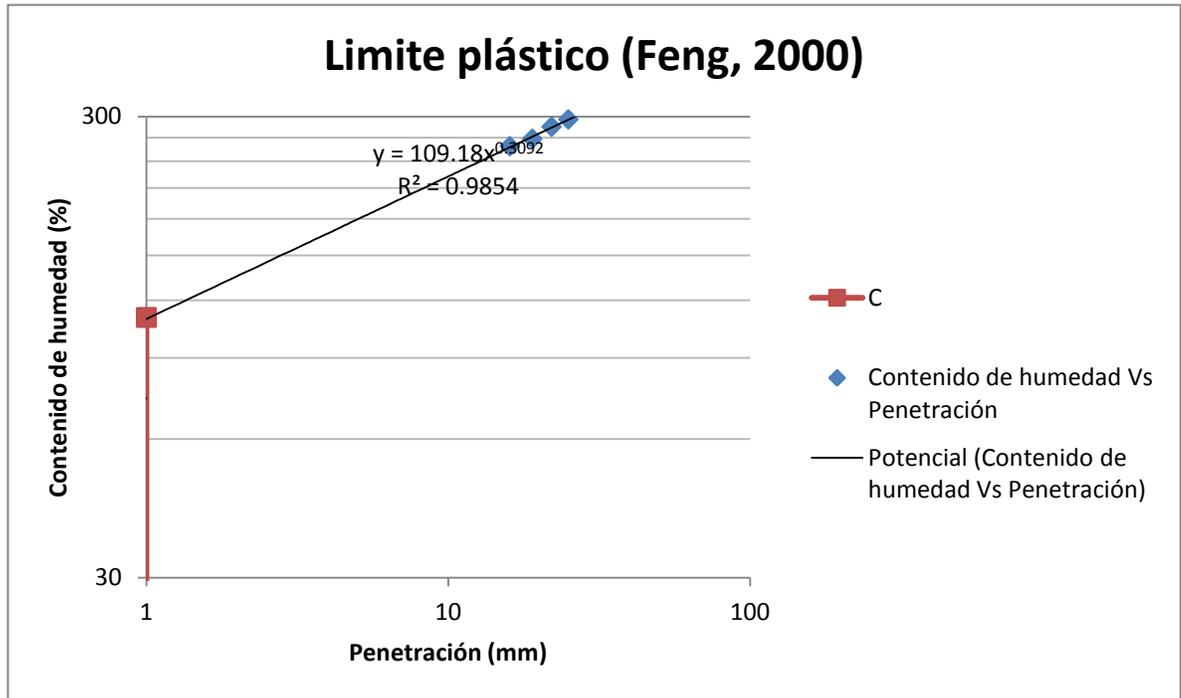
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 87. Ensayo N°5 LP método de Feng cono canadiense

C	109.18
m	0.3092
LP	135

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 83. Ensayo N°5 LP método de Feng como canadiense



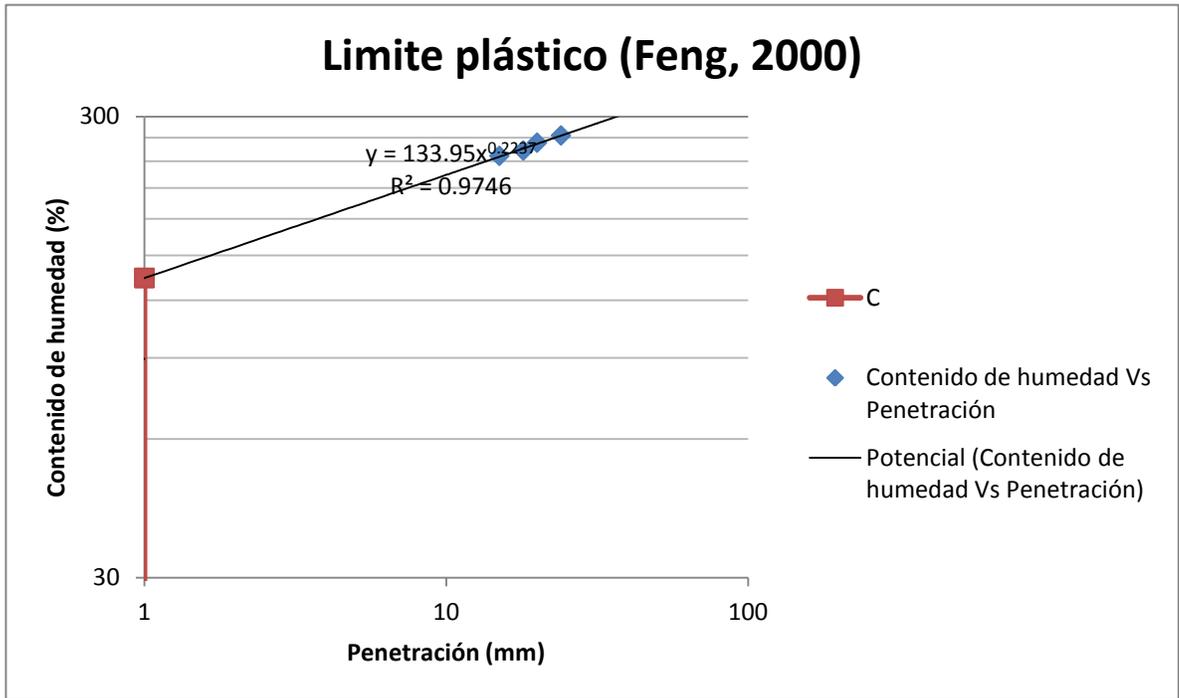
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 88. Ensayo N°1 LP método de Feng como indio

C	133.95
m	0.2237
LP	156

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 84. Ensayo N°1 LP método de Feng como indio



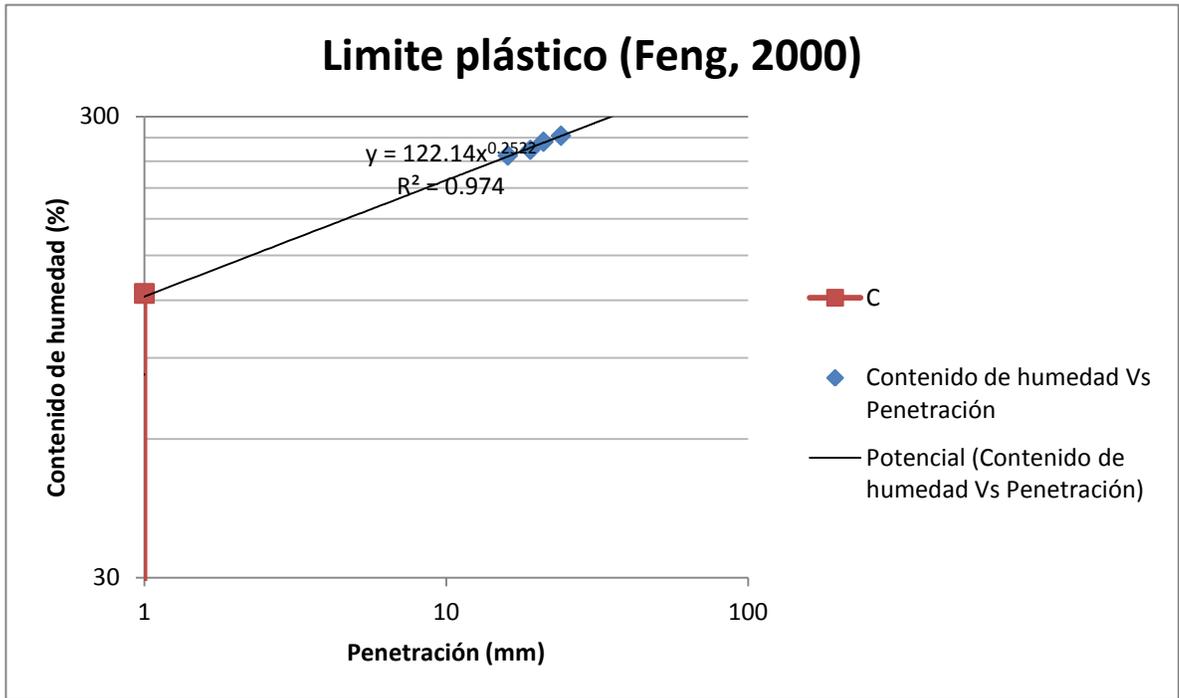
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 89. Ensayo N°2 LP método de Feng como indio

C	122.14
m	0.2522
LP	145

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 85. Ensayo N°2 LP método de Feng como indio



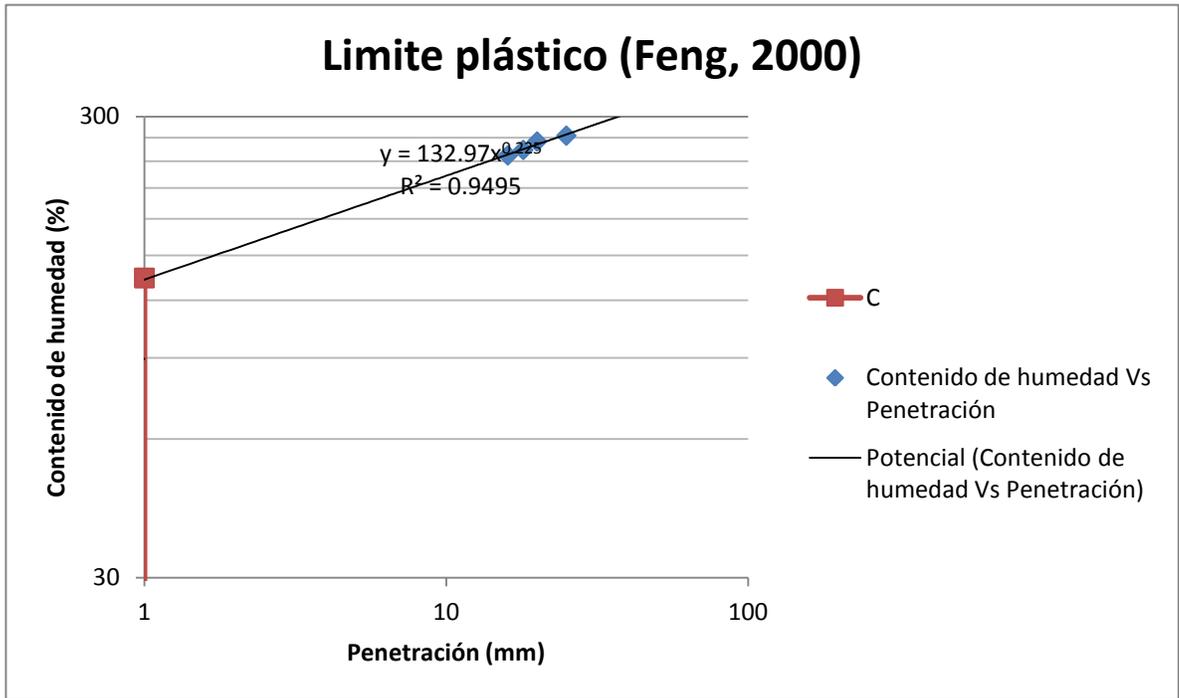
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 90. Ensayo N°3 LP método de Feng como indio

C	132.97
m	0.225
LP	155

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 86. Ensayo N°3 LP método de Feng como indio



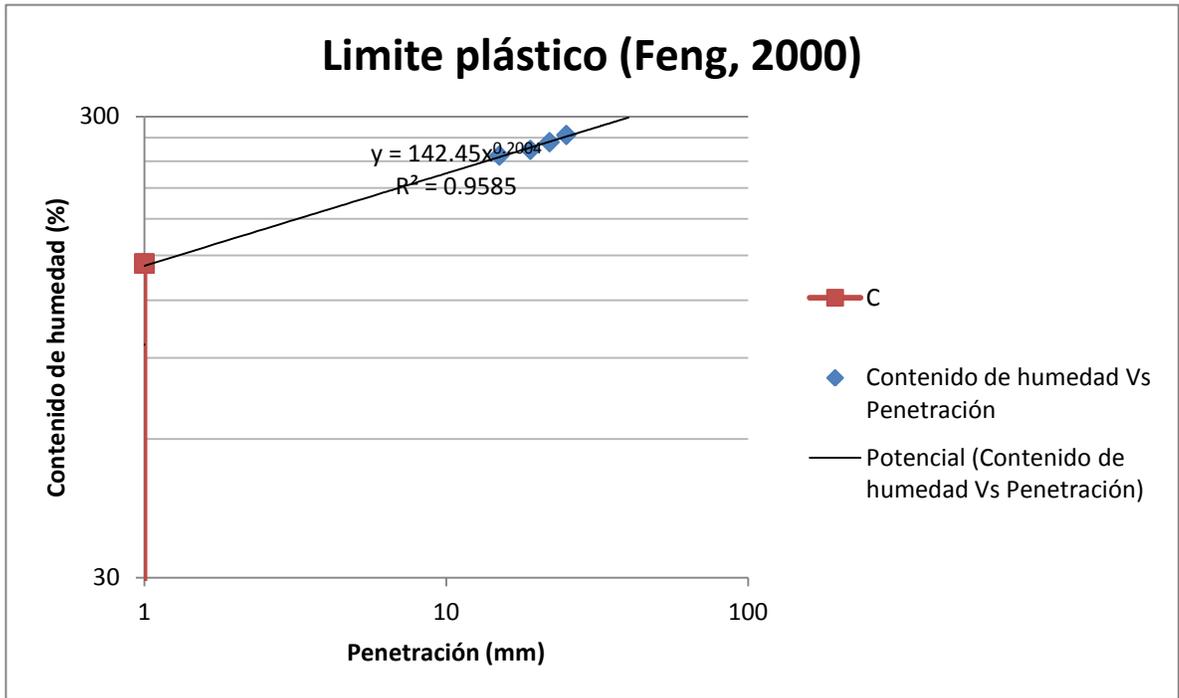
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 91. Ensayo N°4 LP método de Feng como indio

C	142.45
m	0.2004
LP	164

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 87. Ensayo N°4 LP método de Feng como indio



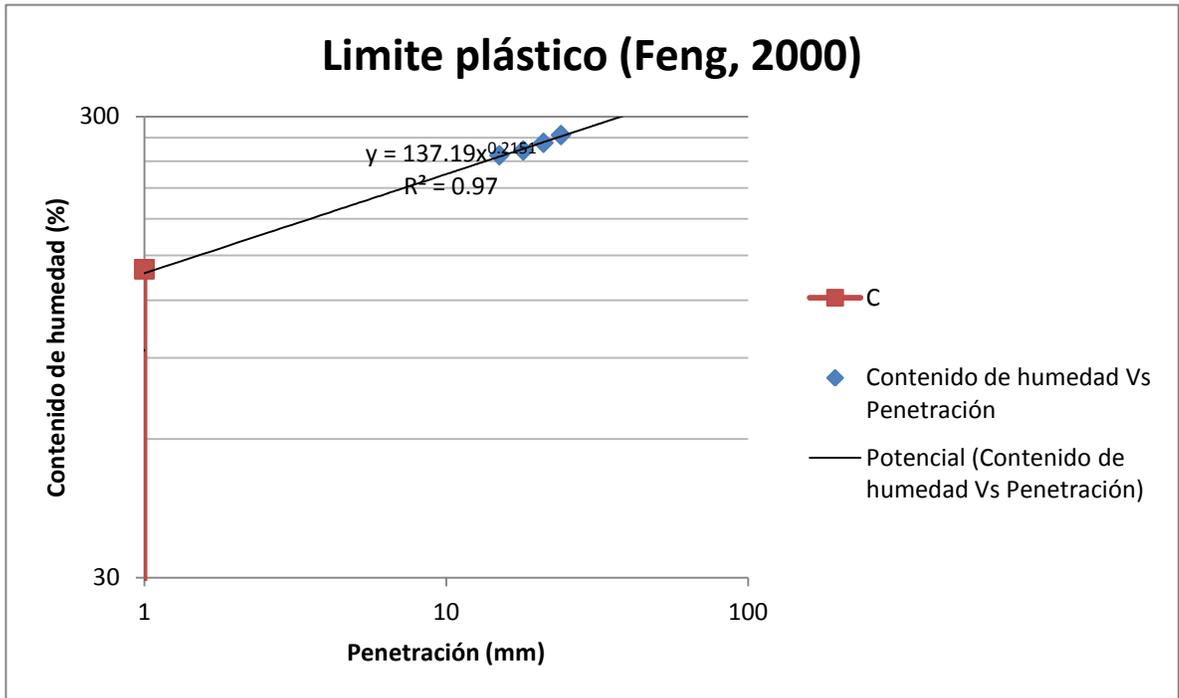
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 92. Ensayo N°5 LP método de Feng como indio

C	137.19
m	0.2151
LP	159

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 88. Ensayo N°5 LP método de Feng como indio



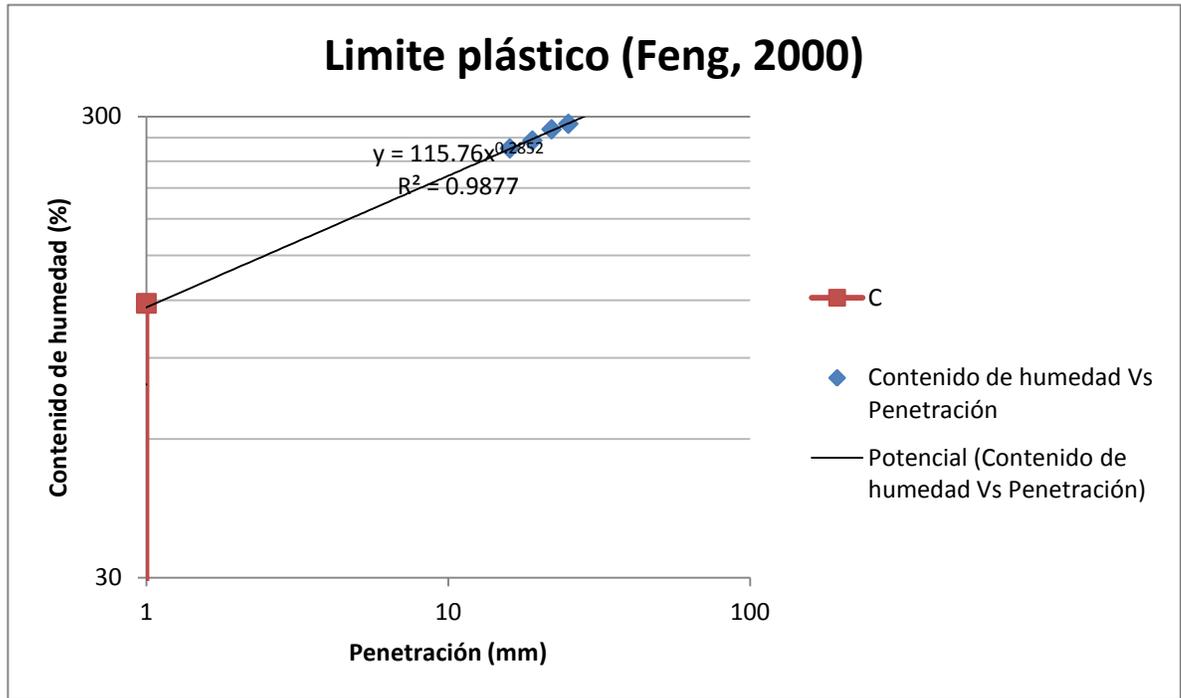
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 93. Ensayo N°1 LP método de Feng como colombiano

C	115.76
m	0.2852
LP	141

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 89. Ensayo N°1 LP método de Feng cono colombiano



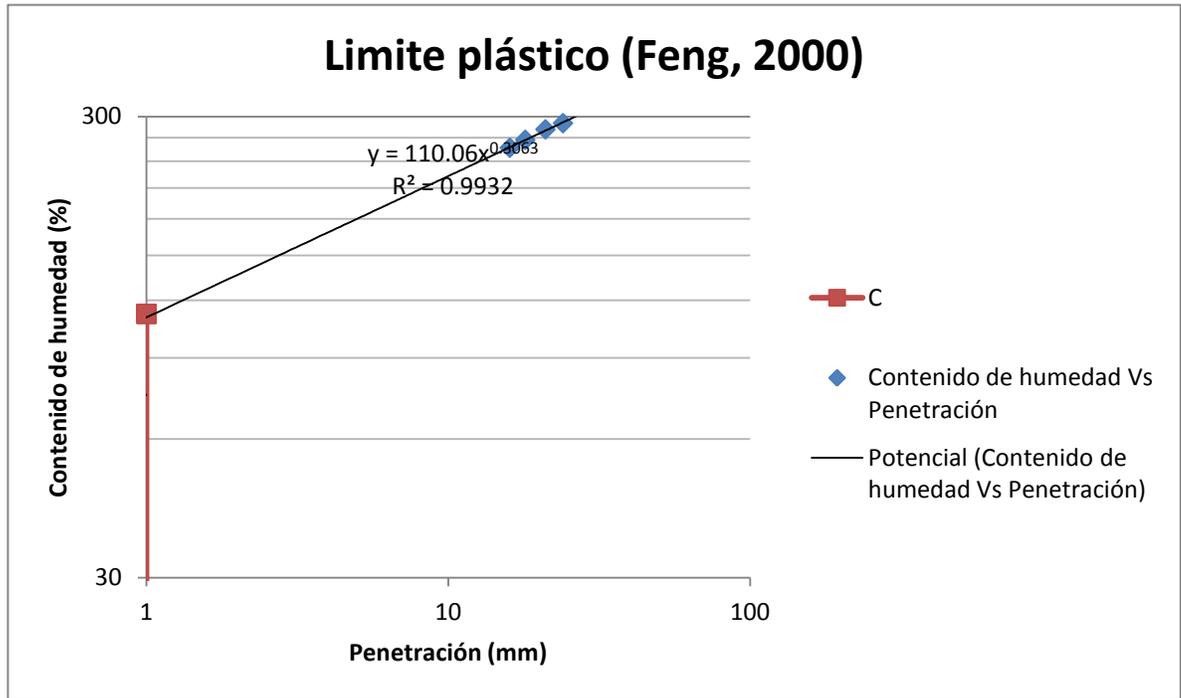
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 94. Ensayo N°2 LP método de Feng cono colombiano

C	110.06
m	0.3063
LP	136

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 90. Ensayo N°2 LP método de Feng cono colombiano



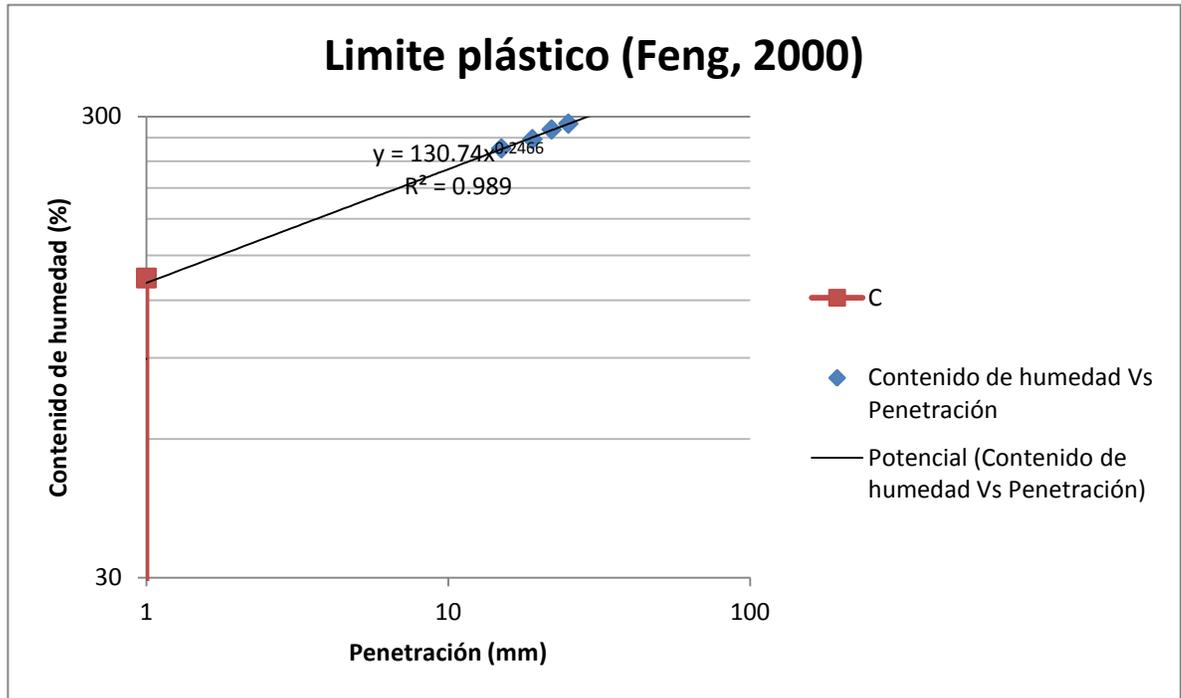
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 95. Ensayo N°3 LP método de Feng cono colombiano

C	130.74
m	0.2466
LP	155

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 91. Ensayo N°3 LP método de Feng cono colombiano



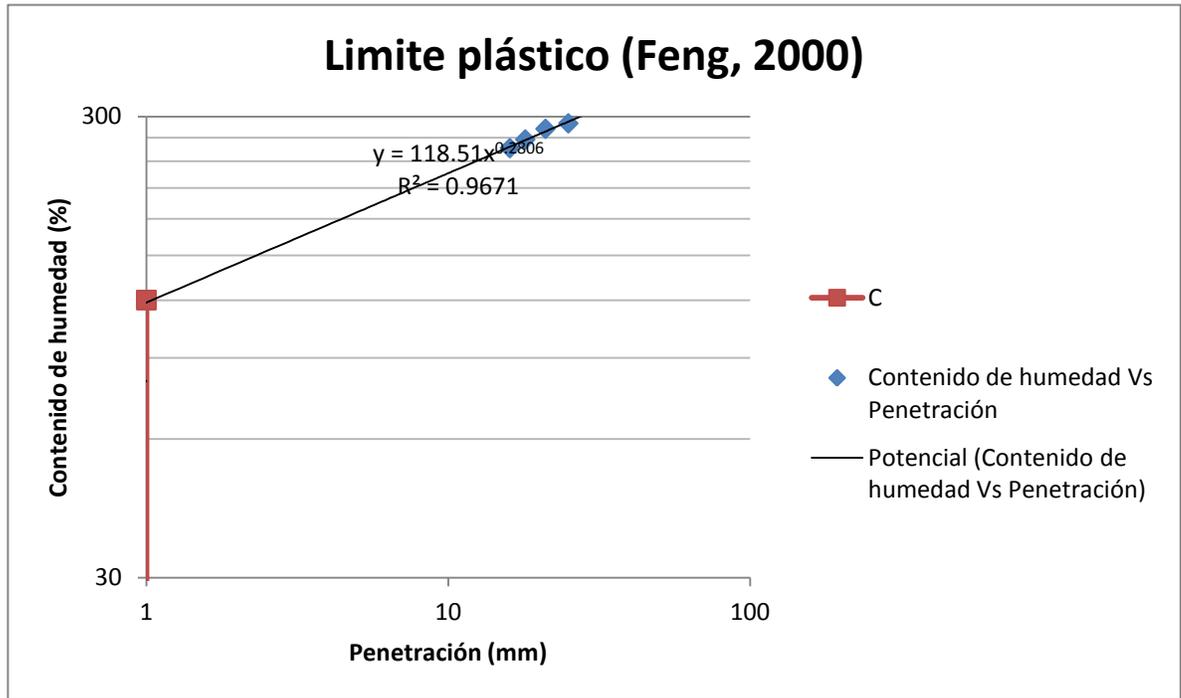
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 96. Ensayo N°4 LP método de Feng cono colombiano

C	118.51
m	0.2806
LP	144

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 92. Ensayo N°4 LP método de Feng cono colombiano



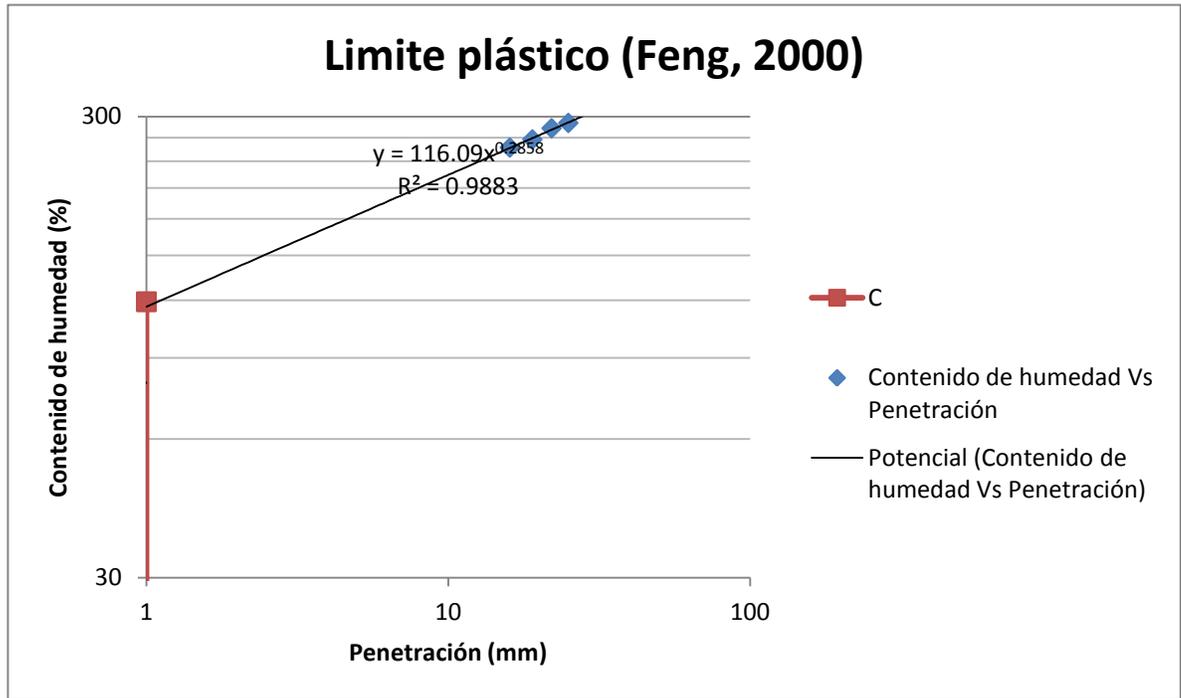
Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 97. Ensayo N°5 LP método de Feng cono colombiano

C	116.09
m	0.2858
LP	142

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Grafica 93. Ensayo N°5 LP método de Feng cono colombiano



Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 98. Ensayo N°2 LP método rollos de material

Humedad	
Peso recipiente (gr)	8.14
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	14.85
Peso recipiente + suelo seco (gr)	12.08
Contenido de humedad LP (%)	70

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 99. Ensayo N°3 LP método rollos de material

Humedad	
Peso recipiente (gr)	8.39
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	14.69
Peso recipiente + suelo seco (gr)	12.03
Contenido de humedad LP (%)	73

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 100. Ensayo N°4 LP método rollos de material

Humedad	
Peso recipiente (gr)	8.22
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	14.46
Peso recipiente + suelo seco (gr)	11.74
Contenido de humedad LP (%)	77

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Tabla 101. Ensayo N°5 LP método rollos de material

Humedad	
Peso recipiente (gr)	8.24
Peso recipiente + suelo húmedo (gr)	14.37
Peso recipiente + suelo seco (gr)	11.58
Contenido de humedad LP (%)	84

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)

Anexo 3. Medidas de los conos de penetración y los recipientes

Cono	Angulo (grados)	Peso cono para LL (gramos)	Peso cono para LP (gramos)	Longitud (milímetros)	Diámetro recipiente muestra (milímetros)	Profundidad recipiente muestra (milímetros)	Lectura (milímetros)
Británico	30	80	240	35	55	40	20
Ruso	30	76	228	25	37	20	10
Canadiense	60	60	180	No especifica (la que mejor se adapte)	55	40	20
Indio	31	148	444	30.48	50	50	25.4
Colombiano	45	75	225	No especifica (la que mejor se adapte)	55	40	20

Fuente: (Duarte & Rojas, 2017)