

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO PARA UN SUELO
CAOLÍN AMARILLO USANDO EL PENETRÓMETRO DE CONO DE CAÍDA
CON DIFERENTES MODELOS DE CONO.**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

ELABORADO POR:
JHONATAN LEAL BARRETO CODIGO: 504687
ANGIE JULIETH GÁMEZ CODIGO: 504686

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2017

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO PARA UN SUELO
CAOLÍN AMARILLO USANDO EL PENETRÓMETRO DE CONO DE CAÍDA
CON DIFERENTES MODELOS DE CONO.**

**ELABORADOPOR:
JHONATAN LEAL BARRETO CODIGO: 504687
ANGIE JULIETH GÁMEZ CODIGO: 504686**

**Trabajo de grado para
optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director PhD. JUAN
CARLOS RUGE
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
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:

El trabajo de grado titulado “**Determinación del límite líquido y plástico para un suelo caolín amarillo usando el penetrómetro de cono de caída con diferentes modelos de cono**”. Presentado por los estudiantes Angie Julieth Gámez Morales y Jhonatan Leal Barreto, en cumplimiento del requisito para optar al título de pregrado “Ingeniería civil” fue aprobada por el director.

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, Noviembre 10 del 2017

DEDICATORIA

Primeramente, agradecemos a Dios la oportunidad que nos dio de capacitarnos, de aprender y aplicar lo aprendido.

Agradecemos también a la UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA, por hacernos parte de esta universidad, abriendo las puertas y permitiéndonos adquirir cada día más conocimiento, así como los docentes que fueron parte de este camino.

Gracias a la colaboración, dirección y guía de nuestro asesor Juan Carlos Ruge, se pudo llegar a un resultado final, siguiendo sus indicaciones y brindándonos la información adecuada para la elaboración de la investigación tecnológica realizada.

Nuestro agradecimiento también es para nuestros padres y familia, quienes con su paciencia y liderazgo, nos dieron de las mejores herramientas para seguir semestre a semestre luchando por alcanzar la carrera profesional.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	5
GLOSARIO.....	14
RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. GENERALIDADES	17
1.1. ANTECEDENTES	17
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.2.1. Descripción del problema.....	20
1.2.2. Formulación del problema.....	21
1.2.3. Problemática del material.....	22
1.3. OBJETIVOS	22
1.3.1. Objetivo general.....	22
1.3.2. Objetivos específicos.....	22
1.4 JUSTIFICACIÓN	23
1.5 DELIMITACION.....	23
1.5.1. Espacio.....	23
1.5.2. Tiempo.....	23
1.5.3. Contenido.....	23
1.5.4. Alcance.....	23
2. MARCO DE REFERENCIA	25
2.1 MARCO TEÓRICO.....	25
2.1.1. Lectura de resultados.....	26
2.1.2. Ventajas y desventajas aparentes.....	26
2.2 MARCO CONCEPTUAL	27
2.2.1. Determinación del Límite líquido	28
2.2.2. Determinación de Límite plástico.....	28
2.2.3. Método penetrómetro de cono para determinar limite líquido.....	28
2.2.4. Método penetrómetro de cono para determinar limite plástico.....	30
2.2.5. Índice de plasticidad.....	32

2.2.6. Material Caolín amarillo	32
2.3 MARCO LEGAL	33
3. METODOLOGÍA.....	34
3.1 TIPO DE ESTUDIO	34
3.2 FUENTES DE INFORMACION	34
3.3 DISEÑO METODOLÓGICO	34
4. MONTAJE DEL ENSAYO	36
4.1. ENSAYO DE CONO PARA DETERMINAR EL LL	36
4.1.1. Descripción.....	36
4.1.2. Material y equipos.	36
4.1.3. Procedimiento.....	47
4.2. ENSAYO DE CONO PARA DETERMINAR EL LP	53
4.2.1. Descripción.....	53
4.2.2. Material y equipos.	54
4.2.3. Procedimiento.....	54
4.3. ENSAYO DE CASAGRANDE PARA DETERMINAR EL LL	55
4.3.1. Descripción.....	55
4.3.2. Material y equipos.	55
4.3.3. Procedimiento.....	58
4.4. ENSAYO PARA DETERMINAR EL LP	59
4.4.1. Descripción.....	59
4.4.2. Material y equipos.	59
4.4.3. Procedimiento.....	59
5 RESULTADOS	61
5.1 RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO CASAGRANDE PARA LL	61
5.2 RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO CONO DE PENETRACIÓN LL ...	63
5.3 COMPARATIVO DETERMINACIÓN DE LIMITE LÍQUIDO	68
5.3.1. Resultados comparativos de Casagrande y cono británico.....	68
5.3.2. Resultados comparativos de Casagrande y cono canadiense.	69
5.3.3. Resultados comparativos de Casagrande y cono colombiano.....	70
5.3.4. Resultados comparativos de Casagrande y cono indio.	71

5.3.5. Resultados comparativos de Casagrande y cono ruso.....	72
5.4 RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO ROLLOS PARA DETERMINAR LP	74
5.5. RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO CONO DE PENETRACIÓN LP – METODO 1	76
5.6. RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO CONO DE PENETRACIÓN LP METODO 2.....	81
5.7. COMPARATIVO DETERMINACIÓN LP – METODO 1 Y MÉTODO DE ROLLOS.....	85
5.7.1. Resultados comparativos de rollos y cono británico (LP Método 1).	85
5.7.2. Resultados comparativos de rollos y cono canadiense (LP Método 1).....	86
5.7.3. Resultados comparativos de rollos y cono colombiano (LP Método 1).....	87
5.7.4. Resultados comparativos de rollos y cono indio (LP Método 1). ...	88
5.7.5. Resultados comparativos de rollos y cono indio (LP Método 1). ...	89
5.7.6. Resultados comparativos de rollos y Cono Británico (LP Método 2).	91
5.7.7. Resultados comparativos de rollos y cono canadiense (LP Método 2).....	92
5.7.8. Resultados comparativos de rollos y cono colombiano (LP Método 2).....	93
5.7.9. Resultados comparativos de rollos y cono indio (LP Método 2). ...	94
5.7.10. Resultados comparativos de rollos y cono ruso (LP Método 2). ...	95
6 ANALISIS DE RESULTADOS.....	96
6.1. ANALISIS DE RESULTADOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO DEL CAOLÍN AMARILLO	96
6.2. ANALISIS DE RESULTADOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR EL LIMITE PLÁSTICO DEL CAOLÍN AMARILLO.....	98
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
7.1 CONCLUSIONES.....	101
7.2 RECOMENDACIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	103

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Relación porcentaje de Humedad y logaritmo de la penetración.....	18
Ilustración 2: Relación logarítmica entre el % de humedad y la penetración Del cono.....	19
Ilustración 3: Método grafico para determinar el LP de los suelos mediante el uso del penetrómetro cónico.	19
Ilustración 4: Relación lineal entre el porcentaje de humedad y la raíz de la penetración.....	20
Ilustración 5: Equipo penetrómetro de cono de caída.....	26
Ilustración 6: Equipo usado penetrómetro cono de caída.....	29
Ilustración 7: Detalles Del equipo penetrómetro de caída.....	29
Ilustración 8: Gráfica método 2 para Límite plástico	31
Ilustración 9: Caolín amarillo en bultos de 25 kg - Procomin.	37
Ilustración 10: Muestra de caolín.	37
Ilustración 11: Conos Rusos y accesorios.	38
Ilustración 12: Conos Rusos y recipiente.....	38
Ilustración 13: Conos Canadienses y accesorios.....	39
Ilustración 14: Conos Canadienses armados para uso.....	39
Ilustración 15: Conos Colombianos y accesorios.....	40
Ilustración 16: Conos Colombianos armados para uso.....	40
Ilustración 17: Conos Británicos y accesorios.....	41
Ilustración 18: Conos Británicos armados para uso.....	41
Ilustración 19: Conos Indios y accesorios.....	42
Ilustración 20: Conos Indios armados para uso.....	42
Ilustración 21: Equipo de penetrómetro desarmado.	43
Ilustración 22: Regleta para lectura de penetración.....	43
Ilustración 23: Accesorio para eje del cono.	44
Ilustración 24: Equipo Penetrómetro de cono de caída.	44
Ilustración 25: Pieza de vidrio esmerilado plano de 40 cm x 40 cm.....	45
Ilustración 26: Espátulas.....	45
Ilustración 27: Recipientes metálicos.....	45
Ilustración 28: Balanza Digital de 3000 g.....	46
Ilustración 29: Pie de rey Digital de 300 mm.....	46
Ilustración 30: Horno eléctrico.....	47
Ilustración 31: Preparación muestra de Caolín.	48
Ilustración 32: Mezcla homogénea de la muestra.....	48
Ilustración 33: Ingreso del material al recipiente de ensayo.	49
Ilustración 34: Montaje del equipo.	50

Ilustración 35: Verificación de medidas del equipo.	50
Ilustración 36: Primera penetración con el equipo, cono Británico.....	51
Ilustración 37: Pesaje de la muestra para contenido de humedad.....	51
Ilustración 38: Segunda lectura de penetración.	52
Ilustración 39: Registro de lecturas de penetración.	52
Ilustración 40: Muestras almacenadas en horno a temperatura controlada.....	53
Ilustración 41: Dimensiones y características del aparato.	56
Ilustración 42: Aparato límite líquido.	56
Ilustración 43: Medidas del Ranurador.	57
Ilustración 44: Ranurador.....	57
Ilustración 45: Grafica de LL Ensayo No 1 - Método Casagrande	62
Ilustración 46: Representación gráfica Ensayo No. 1 Cono Británico.	64
Ilustración 47: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Británico	69
Ilustración 48: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Canadiense.....	70
Ilustración 49: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Colombiano.....	71
Ilustración 50: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Indio.	72
Ilustración 51: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Ruso.	73
Ilustración 52: Gráfica de barras resultados limites plásticos.	76
Ilustración 53: Representación gráfica Ensayo No. 1 Cono Británico.	78
Ilustración 54: Representación gráfica Ensayo No. 1 Cono Británico, Método 2. ..	82
Ilustración 55: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Británico	86
Ilustración 56: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Canadiense.	87
Ilustración 57: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Colombiano.	88
Ilustración 58: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Indio.	89
Ilustración 59: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Ruso.	90
Ilustración 60: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Británico.	91
Ilustración 61: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Canadiense.	92
Ilustración 62: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Colombiano.	93
Ilustración 63: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Indio.	94
Ilustración 64: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Ruso.	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Medidas especificadas del penetrómetro de cono de caída.....	30
Tabla 2: Pesos para realizar ensayo de Límite plástico.....	31
Tabla 3: Datos ensayo No. 1 – Casagrande.....	61
Tabla 4: Resultados de Humedad Ensayo No. 1 – Casagrande.....	62
Tabla 5: Resumen de Resultados LL - Casagrande	62
Tabla 6: Datos ensayo No. 1 Británico –Método de cono.	63
Tabla 7: Resultados de Humedad Ensayo No. 1 Británico– Método de cono.	64
Tabla 8: Resultados cono Británico.....	65
Tabla 9: Resultados cono Canadiense.....	66
Tabla 10: Resultados cono Colombiano.....	66
Tabla 11: Resultados cono Indio.	67
Tabla 12: Resultados cono Ruso.	67
Tabla 13: Resultados de Casagrande y Cono Británico.	68
Tabla 14: Resultados de Casagrande y Cono Canadiense.	69
Tabla 15: Resultados de Casagrande y Cono colombiano.	70
Tabla 16: Resultados de Casagrande y Cono Indio.....	71
Tabla 17: Resultados de Casagrande y Cono Ruso.	72
Tabla 18: Ecuaciones regresión lineales Casagrande vs Conos de penetración.....	74
Tabla 19: Datos ensayo No. 1 – Método de rollos.....	74
Tabla 20: Resultados de Humedad Ensayo No. 1 Método de rollos.	75
Tabla 21: Resumen de Resultados LP – Método de Rollos.....	76
Tabla 22: Datos ensayo No. 1 británico –Método de cono.	77
Tabla 23: Resultados de Humedad Ensayo No. 1 Británico– Método de cono.	77
Tabla 24: Resultados cono británico LP.....	79
Tabla 25: Resultados cono canadiense. LP	79
Tabla 26: Resultados cono colombiano LP.	80
Tabla 27: Resultados cono indio LP.	80
Tabla 28: Resultados cono ruso LP	81
Tabla 29: Ecuaciones lineales Método 2-LP, resultados cono británico.....	83
Tabla 30: Ecuaciones lineales Método 2-LP, resultados cono ruso.	83
Tabla 31: Ecuaciones lineales Método 2, resultados cono canadiense, LP.....	84
Tabla 32: Ecuaciones lineales Método 2, resultados cono Colombiano, LP.....	84
Tabla 33: Ecuaciones lineales Método 2, resultados cono indio, LP.....	85
Tabla 34: Resultados de método de rollos y Cono Británico.	85
Tabla 35: Resultados de método de rollos y Cono Canadiense.	86
Tabla 36: Resultados de método de rollos y Cono Colombiano.	87
Tabla 37: Resultados de método de rollos y Cono Indio.	88
Tabla 38: Resultados de método de rollos y Cono Ruso.	89
Tabla 39: Resultados de método de rollos y Cono Británico – Segundo Método.	91
Tabla 40: Resultados de método de rollos y Cono Canadiense– Segundo Método.....	92
Tabla 41: Resultados de método de rollos y Cono Colombiano– Segundo Método.....	93

Tabla 42: Resultados de método de rollos y Cono Indio– Segundo Método.	94
Tabla 43: Resultados de método de rollos y Cono Ruso– Segundo Método.....	95
Tabla 44: Valores promedio de LL -Conos de penetración.....	96
Tabla 45: Ecuaciones comparativas y R^2 para LL.	97
Tabla 46: Resultados promedio LP - Cono de penetración Método 1.....	99
Tabla 47: Comparativo de Métodos de LP.....	99
Tabla 48: Resultados promedio LP - Cono de penetración Método 2.....	100
Tabla 49: Comparativo de Rollos - Conos 2 Método.....	100

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Contenido de Humedad.	61
Ecuación 2: Contenido gravimétrico de humedad.....	63
Ecuación 3: Interpolación Lineal.	64
Ecuación 4: Interpolación Lineal.	78
Ecuación 5: Determinación de Límite plástico Feng 2000.	82

GLOSARIO

AGREGADO: Material granular usado en la construcción. El agregado puede ser natural, artificial o reciclado (*Montejo, 2006*)

CONSISTENCIA: La facilidad relativa con la que un suelo puede ser deformado manualmente. *Norma Técnica Colombiana NTC 4630- Primera actualización.*

CONTENIDO DE AGUA (W): Es la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos. *Soil mechanics and foundations- Third Edition- Muni Budhu.*

HUMEDAD: El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso de las partículas sólidas y el peso del agua que guarda, esto se expresa en términos de porcentaje. (*Revista ARQHYS. 2012, 12. Humedad de los suelos. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com. Obtenido 09, 2017, de <http://www.arqhys.com/construccion/suelos-humedad.html>*)

LIMITE PLASTICO: Humedad del suelo que permite rodar cilindros de 3 mm de diámetro sin que se desmoronen. (*Conceptos generales de la mecánica del suelo, Juan Pérez Valcárcel, Catedrático de Estructuras, E.T.S.A. de La Coruña*)

LIMITE LIQUIDO: Humedad del suelo que hace que se unan los bordes de la muestra tras 25 golpes en la cuchara de Casagrande. (*Conceptos generales de la mecánica del suelo, Juan Pérez Valcárcel, Catedrático de Estructuras, E.T.S.A. de La Coruña*)

PLASTICIDAD: Al perder agua, el suelo pierde su fluidez, pero continúa deformándose plásticamente; dado que pierde su forma, sin agrietarse. (*Duque Escobar, Gonzalo and Escobar Potes, Carlos Enrique (2016) Geomecánica. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Manizales, Colombia*)

SUELO: Desde el punto de vista de la ingeniería, suelo es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas. (*Gómez Carranza Roberto: Técnica Básica de la Construcción (Infraestructura)*)

SUELO PLÁSTICO: Suelo que presenta un comportamiento plástico en un rango definido de contenido gravimétrico de humedad y que mantiene su forma al secarse. *Norma Técnica Colombiana NTC 4630- Primera actualización.*

RESUMEN

El trabajo de investigación presenta los análisis realizados al material caolín amarillo, mostrando la correlación que hay entre los ensayos de laboratorio tradicionales y el ensayo con el penetrómetro de cono de caída, con el fin de que este ensayo pueda ser complementario al método de Casagrande, para la determinación de los límites plásticos y límites líquidos del material analizado.

Para esto se adquirieron muestras comerciales y se investigaron las características físicas que contiene el caolín y qué funcionalidad tiene para los procesos constructivos del país, esto permitió establecer parámetros a analizar y que condiciones normalmente presenta para los procesos, en los cuales se utiliza tanto industrialmente como en procesos de construcción. Las muestras se analizaron bajo condiciones de laboratorio, en donde los escenarios del lugar cuentan con control de temperatura y humedad relativa constante, lo que permitió tener resultados con condiciones idóneas y con menor margen de error.

Se realizaron ensayos de laboratorio con el material en mención, ejecutando los ensayos tradicionales y los sugeridos, usando los accesorios complementarios del equipo, los cuales cuentan con unos pesos y características determinadas por cada país, permitiendo definir criterios de similitud respecto a los resultados y la utilidad que se le puede dar para procesos constructivos en nuestras ciudades. Esto tuvo como finalidad establecer la correlación entre los métodos tradicionales y el penetrómetro de cono de caída, entregando ecuaciones lineales acorde al instrumento utilizado, generando observaciones y recomendaciones para la implementación del mismo.

Finalmente se entregan resultados y procedimientos definidos para la ejecución de los ensayos, realizando los análisis pertinentes de forma individual, por método y por comparación, precisando las linealidades más viables para poder dar sistemas de aceptación de los materiales constructivos.

Palabras clave: Caolín, Humedad, Límite líquido, Límite plástico.

INTRODUCCIÓN

Colombia presenta un crecimiento exponencial en la industria de la construcción, lo cual es evidenciado a través del progreso constructivo de las principales ciudades, el aumento de proyectos de viviendas para la demanda actual y el desarrollo de las obras 4G¹. Esta necesidad abre las puertas para investigar nuevos procesos implementados en diferentes países, que suministran información para la toma de decisiones en los proyectos de Ingeniería Civil.

En la ejecución de los proyectos de ingeniería, la preparación del terreno es una fase crítica y de gran importancia. La calidad del terreno se controla siguiendo unos parámetros de clasificación, como lo son los límites de consistencia ² que permiten conocer las características físicas de los suelos, además de orientar sobre qué procesos constructivos son más convenientes de realizar.

Actualmente se cuenta con metodologías de ensayos establecidas en algunas normas colombianas para la determinación del límite líquido usando un equipo de operación manual, inventado por el señor Arthur Casagrande ³ y los límites plásticos que permiten determinar el estado plástico del material. Teniendo en cuenta los métodos de ensayo actualmente implementados en el país, se puede observar que no se han determinado nuevas técnicas para mitigar el margen de error de los resultados, haciendo uso de equipos que permitan obtener mayor confiabilidad en el análisis de las muestras.

El penetrómetro de cono de caída es un dispositivo mecánico⁴, que permite realizar el análisis de la muestra del suelo haciendo una penetración con conos de diferentes diámetros y pesos, siendo un método con un menor margen de error en su ejecución, permitiendo mejorar los procesos de control de calidad de los materiales estudiados.

La presente investigación muestra los resultados del método penetrómetro de cono de caída, el cual consiste en un macro proyecto que, en conjunto con otros grupos de investigación se analizaron diferentes tipos de materiales para determinar los límites líquidos y plásticos de cada uno de ellos. El material que se estudió fue el caolín amarillo.

¹ **ANIF. 2017.** [En línea] Marzo de 2017. http://www.anif.co/sites/default/files/investigaciones/anif-cci-4gfinan1114_1.pdf

² **Bora., Binu Sharma and Padma K. 2003.** Plastic Limit, Liquid Limit and Undrained Shear Strength of Soil Reappraisal. J. Geotech. Geoenviron. 2003. págs. 774-777. Vol. 129.

³ **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2017.** [En línea] Abril de 2017. <http://www.ejge.com/People/Casagrande/Casagrande.htm>.

⁴ **R., Belviso, y otros. 1985.** Use of the cone penetrometer to determinate consistency limits. 1985. págs. 21-22. Vol. 5.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

A continuación, se mencionan estudios realizados por varios autores donde se presenta un breve resumen enfocado a nuestro proyecto:

AGUS SETYO MUNTOHAR AND ROSLAN HASHIM (2002).⁵

En la introducción de la lectura se mencionan problemas o situaciones que se tienen cuando se realiza el ensayo de límites de plasticidad ⁶por el método de rollos, ya que intervienen varios factores como el error humano el cual no permite tener una secuencia de resultados entre varios operarios. Luego plantea la posibilidad de penetrar el material para determinar el límite plástico basado en investigaciones anteriores.

En el escrito “Determinación del límite plástico usando el penetrómetro de cono” se determinan criterios referentes de cómo realizar pruebas teniendo como guía las medidas usadas en la normativa británica, variando los porcentajes de humedad y profundidad desde penetración al material. Dentro de los procesos realizados se tiene como característica influenciada, el mezclado de los suelos en las instalaciones del laboratorio controlando las condiciones y realizando mejoras en las características del material.

En los estudios realizados se observó una relación no lineal que hay entre el contenido de humedad y la penetración, expresándolo en una gráfica realizada por Harrison, quien maneja una relación bilineal entre el índice de liquidez y la penetración, ajustando una curva aproximada en vez de la relación bilineal. Se puede determinar que el límite plástico corresponde a una penetración de 2.2 mm, dato ligeramente superior al propuesto en la investigación de Harrison.

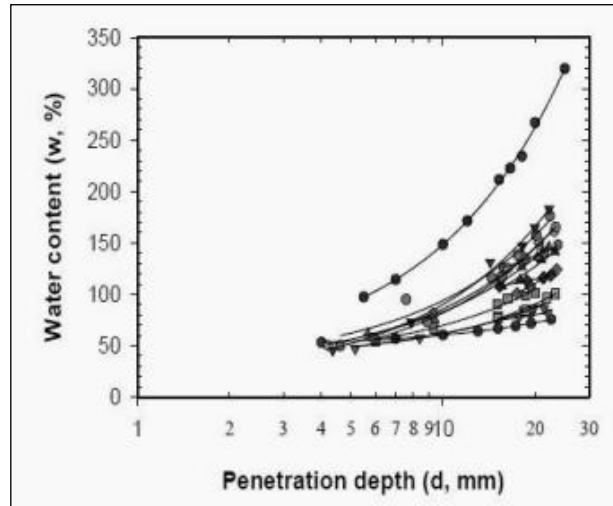
Para conseguir el límite plástico se ejecutaron por lo menos cuatro penetraciones distintas distribuidas entre 4 y 25 mm, con un contenido de humedad se procede a graficar la relación entre el logaritmo de la penetración y el porcentaje de humedad, luego de obtener la curva para cada muestra se extrapola dicha curva hasta una penetración de 2.2 mm obteniendo la humedad respectiva. En esta investigación se muestran tres tipos de límite plástico, el mencionado anteriormente, el obtenido mediante la norma del rollo y el propuesto por Harrison.

A continuación, se presenta la Ilustración 1 referente a los resultados obtenidos y su relación no lineal entre el porcentaje de humedad y la penetración.

⁵ Hashim, Agus Setyo Muntohar and Roslan. 2002. Determinación del límite plástico usando el penetrómetro de cono. 2002.

⁶ S.K, Haigh. 2013. The plastic limit of clays. [En línea] 2013. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.11.P.123>.

Ilustración 1: Relación porcentaje de Humedad y logaritmo de la penetración.



Fuente: Muntohar A .S. and Hashim R. (2002). Determination of Plastic Limits of Soils Using Cone Penetrometer: reappraisal.

Al finalizar el análisis se muestra una buena similitud entre el límite plástico determinado por el método de rollos y el propuesto con el equipo penetrómetro de cono de caída.

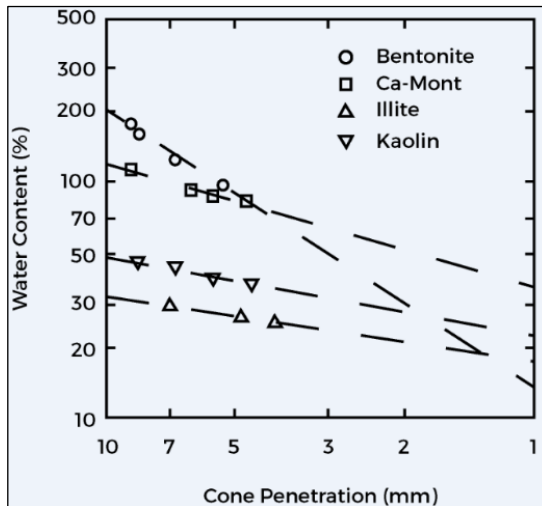
TAO WEI FENG (2004).⁷

En el texto mencionado hacen referencia a los usos que le pueden dar al equipo, historia del equipo y que problemáticas se han planteado en el uso o implementación del mismo. El texto se titula “Uso de una pequeña capsula y el penetrómetro de cono para determinar el limite plástico”, el cual establece que las medidas de la capsula a usar son menores a las usadas en la norma británica, pero con las características semejantes. Adicional a las características del equipo, se resume el procedimiento del ensayo realizando penetraciones en escala descendente, es decir de mayor proporción a menor proporción.

La parte más relevante de la investigación es la explicación del modelo matemático donde se registran datos obtenidos con diferentes condiciones del equipo y de la muestra, teniendo relación entre el logaritmo de la penetración y el logaritmo del porcentaje de humedad. Esto se evidenciar en la Ilustración 2 y 3.

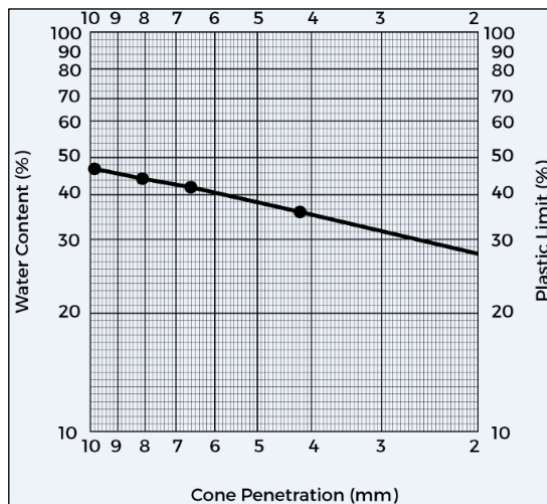
⁷ Feng, Tao Wei. 2004. Uso de una pequeña capsula y el penetrómetro de cono para determinar el limite plástico. 2004.

Ilustración 2: Relación logarítmica entre el % de humedad y la penetración Del cono.



Fuente: Feng T. W. (2004) Using a Small Ring and a Fall Cone to Determinate the Plastic Limit.

Ilustración 3: Método gráfico para determinar el LP de los suelos mediante el uso del penetrómetro cónico.



Fuente: Feng T. W. (2004) Using a Small Ring and a Fall Cone to Determinate the Plastic Limit.

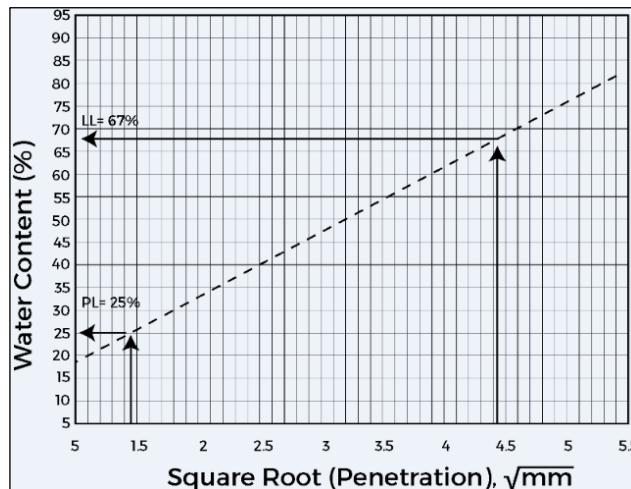
Terminando la investigación se pudo concluir que el equipo genera resultados óptimos, ya que determinan resultados lineales con una precisión mayor a los métodos tradicionales (Tao Wei Feng 2004).

LANDRIS T LEE JR. AND REED B. FREEMAN (2009).⁸

Se describe de forma parecida a las referencias anteriores, haciendo un breve resumen del proceso y estudios postulados en el título del documento “Penetrómetro de cono de doble peso para determinar de manera simultánea el LL y LP”.

El aspecto técnico del documento relaciona información realizada de 11 suelos diferentes con plasticidades diferentes, donde se efectuaron pruebas con el cono cumpliendo con ciertas medidas y condiciones. Los resultados obtenidos son coherentes con los realizados en los métodos tradicionales, pero muestra grandes beneficios, como resultados en menor tiempo de ejecución siendo ejecutado con mayor rapidez según los tiempos registrados en los análisis realizados. *Landris T Lee jr. and Reed b. Freeman 2009*). A continuación, se evidencia la Ilustración 4 de resultados obtenidos en los análisis realizados en el estudio anterior, mostrando los resultados gráficos del mismo y como se determinan los valores registrados tanto para el LL como para el LP.

Ilustración 4: Relación lineal entre el porcentaje de humedad y la raíz de la penetración.



Fuente: Landris T. Lee Jr. and Reed. B. Freeman. Dual weight Fall Cone Method for Simultaneous Liquid and Plastic Limit Determination.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. Descripción del problema. El desarrollo social, cultural y económico de nuestro país, obliga al gobierno a realizar inversiones en el sector de la infraestructura nacional, dándole importancia a la calidad de vida de las personas

⁸ Freeman, Landris t Lee jr. and Reed B. 2009. Penetrómetro de cono de doble peso para determinar de manera simultánea el LL y LP. 2009.

y mayor capacidad de comercio. Esta necesidad surge a causa de que en lo que se refiere a materia de infraestructura de transporte, Colombia es uno de los países más atrasados en Latinoamérica. De acuerdo con el informe de Fedesarrollo⁹, para reducir el atraso, la inversión en transporte no urbano, de aquí al año 2020, debe ser de \$20 billones anuales, que corresponden a un 3,1 del PIB. De esta cifra, un 20% debería ser enfocado en disminuir los problemas existentes y el 80% para responder al incremento esperado con el tráfico de vehículos. Por ello es importante ver nuevas alternativas como lo son la concepción de nuevas vías, la ampliación de vías ya existentes, o la construcción de vías proyectadas con anterioridad, pero no ejecutadas, buscando así generar alta calidad en los proyectos a un costo no muy alto.

La mecánica de los suelos ha establecido unos parámetros de clasificación, los cuales permiten entender y determinar ciertos criterios constructivos respecto a la composición física del suelo, teniendo en cuenta que los métodos implementados en la ingeniería geotécnica, son empíricos, estos requieren de un buen criterio y una buena metodología de aceptación. En los últimos años se han realizado numerosas investigaciones¹⁰ con la finalidad de establecer metodologías que le permitan al ingeniero civil implantar diagnósticos técnicos¹¹, para la construcción de obras civiles sobre suelos arcillosos, siguiendo las recomendaciones dadas por especialistas en geotecnia o laboratorios de control de calidad.

El límite líquido propuesto por Atterberg y mejorado por Casagrande¹² (1932) ha sido usado ampliamente en la clasificación de suelos¹³. Sin embargo, tiene muchas limitaciones. Un método alternativo propuesto, es el método del penetrómetro de Cono, este proporciona facilidad al realizar el ensayo y al hacerlo repetitivamente este no genera grandes errores¹⁴.

1.2.2. Formulación del problema. Teniendo en cuenta la importancia del estudio del suelo, estas entidades carecen de espacios de investigación que permitan la inclusión de nuevos procesos, mejorando los mecanismos y mitigando errores en los datos obtenidos por los factores influyentes en la ejecución del ensayo.

Por lo mencionado anteriormente, con el desarrollo de este proyecto se busca mostrar una nueva alternativa, que se ha estudiado en otros países, para el control de calidad los materiales arcillosos, realizando un nuevo procedimiento que

⁹ Fedesarrollo. Informe- Tendencia Económica. Informe Mensual de Fedesarrollo. No. 125. [En línea] <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/2948x>

¹⁰ Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Informes de la construcción. [En línea] <http://Informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>.

¹¹ Ricardo, Salvador y Carlos., Montero Juan. 2001. Manual de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos. 2001.

¹² Gitte Lyng Grønbech- Benjaminn Nordahl Nielsen & Lars Bo Ibsen Department of Civil Engineering – Aalborg University, Aalborg, Denmark. 2011. Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of casagrande and fall cone apparatus. 2011.

¹³ A. Sridharan and K. Prakash, Can Geotech J. Canada. 1998. Limid liquits and fall cones. 1998.

¹⁴ A.Mohajerani BE, ME, PhD,SMIEA ust. A suggested calibration for the cone penetrometer liquid limit.

permita tener una mayor precisión en el resultado, reduciendo la necesidad de la manipulación humana por el uso de equipos mecánicos.

Al implementar este método para el análisis de los límites de consistencia, es importante tener en cuenta que este tipo de ensayos y pruebas deben tener ciertos tipos de procedimientos en la calibración, interpretación y usos en sus resultados.

Finalmente se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible analizar y determinar los límites plásticos y líquidos de los suelos arcillosos, siguiendo otro procedimiento como es el de penetrómetro de caída mejorando la precisión y validez del resultado?

1.2.3. Problemática del material. La determinación de la producción mundial de caolín lavado o refinado sigue generando problema, ya que son numerosos los países que no indican si sus cifras de extracción corresponden a material bruto o procesado, o bien explicitan que son brutas, pero no aclaran, en su caso, la cuantía del lavado. El caolín bruto o crudo puede ser objeto de transacción comercial a una planta de lavado (indígena o foránea) de otra compañía, pero lo más general es que sea consumido tal cual, debiendo ser considerado entonces como una arcilla caolinita (equivalente, quizá, a las ball clay anglosajonas) y no como caolín propiamente dicho.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general.

Determinar los límites plásticos y líquidos del suelo caolín amarillo, usando el equipo penetrómetro de cono de caída para establecer una similitud entre los resultados obtenidos en los métodos tradicionales y el nuevo proceso a implementar.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Realizar ensayos de laboratorio que permitan establecer la relación que hay, entre los resultados por el método Casagrande y el penetrómetro de caída libre.
- Implementar un método en nuestro país que permita la obtención de los límites líquidos y límites plásticos de un material cohesivo, teniendo la certeza de los resultados obtenidos.
- Proponer una nueva alternativa a los laboratorios, que faciliten la obtención de los límites líquidos y plástico de un material arcilloso.
- Identificar las problemáticas que se tienen en los ensayos tradicionales,

permitiendo mitigar los errores en la ejecución de los nuevos métodos a postular.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los ensayos de laboratorio que establecen los límites plástico y líquido presentan corta variedad en las técnicas de ejecución, a pesar de su gran utilidad en la determinación de las características y esfuerzos del suelo. Con la implementación de este nuevo método de ensayo, se tiene planteado mejorar la precisión del resultado, reduciendo los posibles factores nocivos que generar un margen de error considerable en los métodos actuales. Dentro de estos factores se presenta el error humano el cual, no permite establecer una linealidad en los resultados al ser un proceso manual siendo muy influenciado en el resultado final del ensayo.

Por estas razones y con la innovación del equipo penetrómetro cono de caída¹⁵, se busca mitigar tiempos de ejecución, linealidad en los resultados y esfuerzo del personal de laboratorio, reduciendo los costos de producción tanto en la obra, como en el laboratorio. Al finalizar los estudios, se podrá suministrar una comparación apropiada entre los métodos tradicionales y la implementación de este nuevo método.

1.5 DELIMITACION

1.5.1. Espacio. La mayor limitación que se encontró a lo largo de la ejecución de los ensayos, fue la disponibilidad del laboratorio, ya que los horarios disponibles en la Universidad únicamente eran en el día, sin embargo se buscaron espacios y tiempos para elaborarlos.

1.5.2. Tiempo. Para realizar cada uno de los ensayos era necesario contar con el tiempo adecuado y así cumplir con la normatividad, esta indica que el secado en el horno es de 24 horas (\pm) 4 horas, por lo tanto se debe controlar la temperatura y que se cumpla con los tiempos estimados. Para estos controles se necesita la revisión continua y el registro de los resultados, pesando los materiales y encontrando la diferencia.

1.5.3. Contenido. Para la propuesta es necesario dejar claro que la limitación principal fue la variedad de materiales que maneja el país, donde fue obligatorio realizar un estudio más preciso para poder determinar si el método a implantar es útil y referente en la construcción, esto con intención de poder ser tenido en cuenta por un ente normativo como Icontec o Invias.

1.5.4. Alcance. Según lo planteado dentro de la investigación se estipuló un trabajo de cinco (05) meses, a partir de la aceptación de la propuesta, donde se

¹⁵ Luna, Andrés Sebastián Cevallos. 2012. Determinación del límite líquido y plástico de los suelos mediante el uso del Penetrómetro Cónico. 2012.

realizaron visitas a zonas potenciales del material a estudiar. Estos estudios son netamente académicos donde se registran resultados y posibles sugerencias para el uso del método dentro de la normativa y los laboratorios que controlan los procesos de calidad de una obra.

Este proyecto busca como resultado conocer y desarrollar un método nuevo y útil, no desarrollado aún en Colombia y así determinar los límites de una manera más precisa.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO

De acuerdo a estudios realizados¹⁶, el interés inicial que se presenta es mirar los diversos modos en que un suelo fino interactúa con el contenido de humedad desarrollando del concepto de consistencia del suelo y condiciones características de cada uno. En gran medida a través del trabajo de los señores Albert Atterberg y Arthur Casagrande, los límites de Atterberg y los índices relacionados se han convertido en características básicas y considerables en el estudio de partículas del suelo. Esto ha generado una correlación con propiedades físicas de los agregados especialmente los materiales finos, generando hinchamiento, contracción, compresibilidad, permeabilidad y resistencia al corte.

Teniendo en cuenta el estudio realizado por la Universidad de Alicante – España¹⁷ en Septiembre del 2016, se hace referencia que a través de la historia se han desarrollado diferentes tipos de conos que permiten determinar el límite líquido, basado en características propias en cada país de las dimensiones del cono y pesos del mismo.

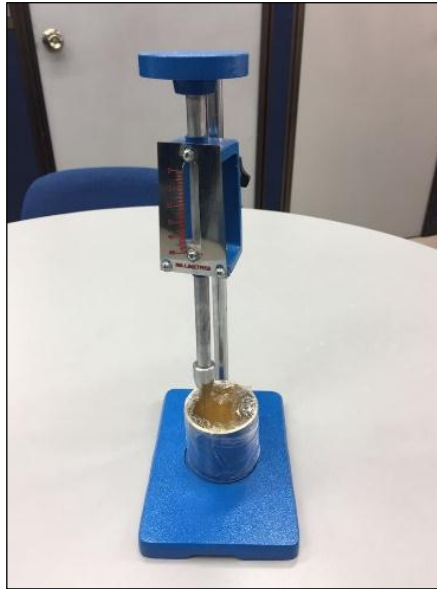
El primer ensayo fue normalizado por Vasilev en el año 1949 donde el aparato utilizado fue nombrado “Cono Ruso”, donde la humedad correspondiente a la penetración de 10 mm indicaba el límite líquido. Luego en el año 1951 el Instituto Tecnológico de Georgia creó otra clase de cono denominado “Cono de Georgia”, con este cono se implementó un proceso que permitía tener una correlación entre este método y los convencionales. En el año 1953 el Indian Central Road Research Institute, propuso un ensayo más simplificado denominado “Cono Hindú”, el cual obtenía el límite líquido con penetración de una pulgada.

El equipo del penetrómetro cónico fue empleado bajo la norma británica BS 1377:1990 (Ilustración 5), el cual cumple con unas características y mediciones fijas. Estas medidas permitieron realizar equipos con medidas fijas, cambiando las características del cono, usando diferentes puntas para determinar lecturas en diferentes humedades del material.

¹⁶ **Journal of Engineering and Development. March 2008.** A Proposed Approach for Plastic Limit Determination Using the Drop-Cone Penetrometer Device. March 2008. págs. ISSN 1813-7822. Vol. 1.

¹⁷ **Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. (09-2016).** Aplicabilidad del Penetrómetro Cónico en la determinación de límites. (09-2016).

Ilustración 5: Equipo penetrómetro de cono de caída.



Fuente: Autor.

La muestra a estudiar es preparada bajo unos lineamientos que permitan la consistencia del resultado en diferentes condiciones de humedad y controlando las condiciones ambientales (Humedad relativa y temperatura), adicional que se hace referencia en el mezclado y cuidado en el tiempo de preparación. (Álvaro Rabat Blázquez – 2016)

2.1.1. Lectura de resultados. La obtención del límite líquido se realiza por medio de un gráfico es cual muestra una escala lineal de penetración en mm (eje de abscisas) y el porcentaje de humedad % en (eje de ordenadas). Se traza la línea que tome más puntos y se mira la lectura referente a la penetración de 20 mm. Se hace relación con la humedad para el límite líquido encontrado. (Álvaro Rabat Blázquez – 2016).

2.1.2. Ventajas y desventajas aparentes. Entre las principales ventajas de la utilización del penetrómetro cónico tenemos.

Ventajas:

- Los resultados que se obtienen tienen una menor variabilidad referente a los ensayos tradicionales.
- La rapidez en la ejecución del ensayo permite un mayor desempeño por operario, teniendo la posibilidad de realizar más ensayos con menos cantidad de personal.

Desventajas:

- Se determina más costosa la ejecución del ensayo.

Dentro de las conclusiones se ha descubierto que el procedimiento ejecutado es válido, ya que la correlación que hay entre los resultados fue óptima, para los estudios de suelos realizados en el país mencionado.

De acuerdo con lo mencionado por Koumoto & Houlsby (2001)¹⁸, la prueba del cono de caída se desarrolló originalmente en Escandinavia para la estimación de la resistencia al corte de los suelos arcillosos sensibles. El desarrollo de nuevas técnicas numéricas para resolver grandes deformaciones asociadas con fenómenos de penetración de conos permitió estudiar el proceso de la prueba del cono de caída.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Los límites de consistencia son criterios importantes para la clasificación de los suelos, permitiendo separar según la fracción y el contenido de Límite líquido e Índice de plasticidad la separación de agregados finos y gruesos. El límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos son utilizados también extensivamente en forma individual o colectiva con otras propiedades del suelo, para correlacionarlas con propiedades tales como compresibilidad, permeabilidad, características de compactación, potencial de expansión y resistencia al corte¹⁹.

La determinación de la consistencia del suelo es uno de los métodos de prueba más aplicados en la mecánica del suelo. Los límites de Atterberg, o límites de consistencia²⁰, se utilizan para medir la plasticidad de un suelo, asimismo proporcionan información considerable sobre los comportamientos de los suelos en estado saturado. Estos límites, establecidos por Albert Atterberg en 1911, miden la plasticidad del suelo a través de las humedades que separan los tres estados (sólido, plástico y viscoso).

Estas humedades son el Límite líquido, definido como la humedad con la que una cierta huella en el suelo se cierra con una energía determinada, y el Límite plástico, definido como la humedad con la que al intentar moldear unos cilindros delgados de suelo, estos se agrietan. Con estos límites, líquido y plástico, se pueden establecer unos índices muy útiles para la caracterización de los suelos como el Índice de plasticidad y el Índice de fluidez.

¹⁸ A.Mohajerani BE, ME, PhD, SMIEA ust. A suggested calibration for the cone penetrometer liquid limi.

¹⁹ ICONTEC. 1999. NTC 4630 (ASTM D 4318) Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. . 1999.

²⁰ Manual de laboratorio para determinación de límites de Atterberg. [En línea] http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/limites.pdf.. Recuperado de.

Según lo establecido en la NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 4630²¹, especificaciones y procedimientos investigativos se encuentra una descripción puntual de cada uno de los ensayos y que permite estudiar cada uno de ellos, a continuación se define lo más relevante en cada método y que equipos son usados para la ejecución del ensayo.

2.2.1. Determinación del Límite líquido. Teniendo en cuenta lo mencionado en la NTC 4630 y la Norma INV E 125-13, donde se especifica el procedimiento actual reglamentado, El límite líquido se establece a partir de un aparato, que contiene en una taza de bronce semiesférica, que se lanza repetidamente sobre una base de caucho duro desde una altura de 10 mm mediante un mecanismo de accionamiento por leva. El señor Arthur Casagrande (1932) desarrolló este aparato.

2.2.2. Determinación de Límite plástico. Para la determinación del límite plástico²² se tiene como referencia la Inv. E 126-13 la cual expresa, que se establece 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 el rollo o los rollos se desboronan y no pueden ser amasados nuevamente y vueltos a enrollar. El contenido gravimétrico de agua en esta condición se reporta como el límite plástico. Este proceso cuenta con unas medidas fijas las cuales son requisitos para la linealidad de los ensayos.

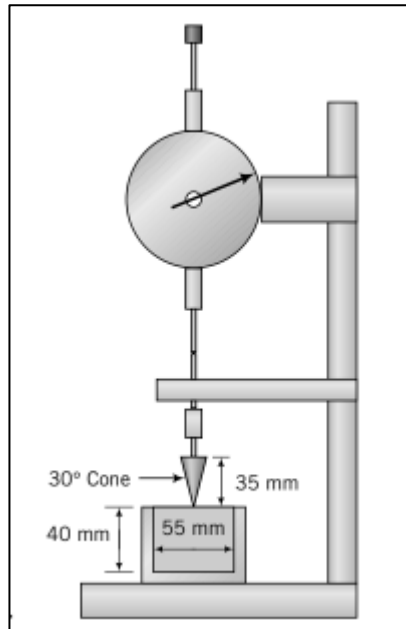
2.2.3. Método penetrómetro de cono para determinar limite líquido. Esta prueba es muy popular en Europa y Asia, donde se menciona que este método permite tener de forma más precisa los resultados de Limite líquido (Ilustración 6).

El límite líquido es determinado sobre un espécimen procesado para remover cualquier material retenido en el tamiz No. 40 (0.425 mm) y mezclado con agua. Una porción del espécimen 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, el cono debe caer libremente durante un período de 5 segundos. La determinación de límite líquido requiere tres o más ensayos sobre un intervalo de contenido gravimétrico de humedad que incluya el necesario para conseguir una penetración de 20mm. Con los datos del ensayo se prepara una gráfica, o se calcula una función, entre la penetración y el contenido gravimétrico de humedad correspondiente, a partir de la cual se determina el límite líquido por interpolación.

²¹**ICONTEC.** Método de ensayo para la determinación del límite líquido del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. [En línea] <https://tienda.icontec.org/producto/impreso-ntc-4630-metodo-de-ensayo-para-la-determinacion-del-limite-liquido-del-limite-plastico-y-del-indice-de-plasticidad-de-los-suelos-cohesivos/?v=42983b05e2f2..>

²²**ICONTEC. 1999.** NTC 4630 (ASTM D 4318) Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. . 1999.

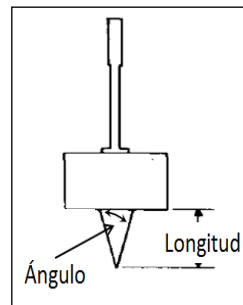
Ilustración 6: Equipo usado penetrómetro cono de caída.



Fuente: Muni Budhu (2012), Soil Mechanics and Foundations (3 ed).

Al tener las medidas iniciales del equipo ya definidas, los cambios se generan conforme a las investigaciones realizadas en cada país, variando las medidas de los conos (Ilustración 7) que penetran la muestra y el recipiente en donde se almacena la misma para de esta forma determinar acorde a las características de los materiales de cada país, la mejor relación entre este nuevo método y los métodos ya establecidos y normalizados.

Ilustración 7: Detalles Del equipo penetrómetro de caída.



Fuente: Liquid and Plastic Limits as Determined from the fall cone and the Casagrande Methods.

A continuación, en la Tabla 1 se muestran las medidas ya establecidas en los países mencionados, donde se determinan las características que tienen el recipiente y los conos para la ejecución del Límite líquido y plástico.

Tabla 1: Medidas especificadas del penetrómetro de cono de caída.

Cono	Angulo	Peso para LL	Peso para LP	Longitud	Diámetro recipiente muestra	Profundidad recipiente muestra	Penetración para el LL
Ruso	30°	76 g	228 g	25 mm	37 mm	20 mm	10 mm
Indio	31°	148 g	444 g	30,48 mm	50 mm	50 mm	25 mm
USA	30°	75 g	225 g	25,4 mm	40 mm	20 mm	10 mm
Colombia	45°	75 g	225 g	No específica (la que mejor se adapte)	55 mm	40 mm	20 mm
Canadá	60°	60 g	180 g	No específica (la que mejor se adapte)	55 mm	40 mm	20 mm

Fuente: Liquid and Plastic Limits as Determined from the fall cone and the Casagrande Methods.

2.2.4. Método penetrómetro de cono para determinar limite plástico.

2.2.4.1. Método para determinar limite plástico No. 1. Este método cubre la determinación del límite plástico de una manera menos dependiente del operador, propone un valor de comparación frente a los ensayos normados que se usan de forma tradicional. El ensayo consiste en hacer penetrar un cono de mayor masa y un ángulo definido en cada país (Tabla No 2), dentro de una masa de suelo contenida en una cápsula cuyas medidas son las mismas para el Limite líquido 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.

Se aconseja tomar una porción de suelo utilizada en la determinación del límite líquido. El secado se realiza mediante normativas internacionales. Por ejemplo se permite el secado al ambiente, el cual puede acelerarse exponiendo al suelo a una corriente de aire, o mediante papel periódico. El ensayo se debe hacer comenzando por muestras de suelo poco húmedas, continuar el ensayo agregando agua a la muestra con el fin de aumentar su contenido de agua. Si durante el proceso de ensayo se debe dejar la muestra por un tiempo prolongado o durante los intervalos de ensayo, hay que mantener la humedad de la misma.

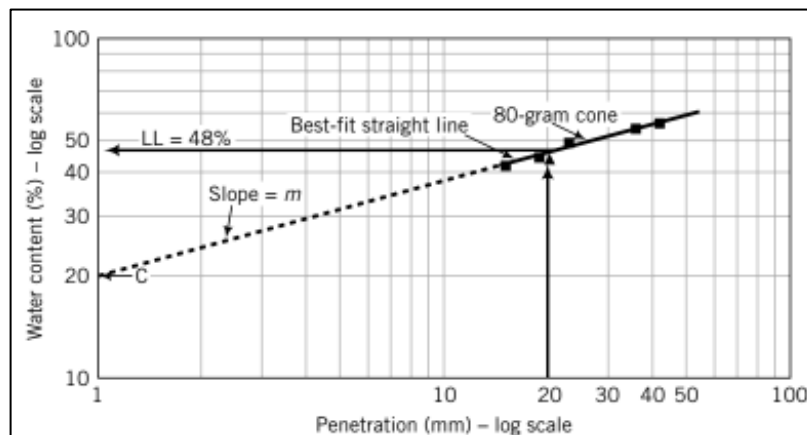
Tabla 2: Pesos para realizar ensayo de Límite plástico

Cono	Angulo	Peso para LL	Peso para LP	Longitud	Diámetro recipiente muestra	Profundidad recipiente muestra	Penetración para el LL
Ruso	30°	76 g	228 g	25 mm	37 mm	20 mm	10 mm
Indio	31°	148 g	444 g	30,48 mm	50 mm	50 mm	25 mm
USA	30°	75 g	225 g	25,4 mm	40 mm	20 mm	10 mm
Colombia	45°	75 g	225 g	No específica (la que mejor se adapte)	55 mm	40 mm	20 mm
Canadá	60°	60 g	180 g	No específica (la que mejor se adapte)	55 mm	40 mm	20 mm

Fuente: Liquid and Plastic Limits as Determined from the fall cone and the Casagrande Methods.

2.2.4.2. Método para determinar limite plástico No. 2. El límite de plástico se encuentra teniendo los mismos valores registrados para obtener el límite líquido, y se proyecta la mejor recta hacia atrás para transponer el eje de contenido de humedad a una profundidad de penetración de 1 mm. El contenido de agua a esta profundidad de penetración (1 mm) es denominado como C. El límite plástico se da como $(Feng, 2000)^{23}$ donde m es la pendiente de la recta de mejor ajuste (Ilustración 8). Se usa una hoja de cálculo, para obtener C y m a partir de una función de línea de tendencia de potencia que proporciona la ecuación de mejor ajuste.

Ilustración 8: Gráfica método 2 para Límite plástico



Fuente: Muni Budhu (2012), Soil Mechanics and Foundations (3 ed).

²³ Budhu, Muni. 2012. Soil Mechanics and Foundations (3 Ed). 2012.

2.2.5. Índice de plasticidad. El Índice de plasticidad²⁴ según lo mencionado en la Norma Invias E 126-13 numeral 9. Cálculos, este valor se determina con la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Si el límite líquido o el límite plástico no se pueden determinar, o si el límite plástico es igual o mayor que el límite líquido, se informará que el suelo no es plástico.

Este parámetro es un valor muy importante para la clasificación del material, ya que es considerado como valor en especificaciones de construcción.

2.2.6. Material Caolín amarillo. Con respecto al material a utilizar tenemos que El caolín²⁵ es una arcilla, blanca o amarilla, en el caso de esta investigación, procede de la descomposición de rocas feldespáticas y puede venir mezclada con cuarzo, feldespato y minerales ferruginosos.

Los Caolines son rocas formadas fundamentalmente por minerales del grupo del Caolín como son la caolinita, dickita, nacrita y halloysita, acompañados por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales pesados. Para su utilización en algunas de sus aplicaciones, deben ser refinados y procesados, para aumentar su blancura, pureza u otras características comerciales importantes.

El caolín amarillo, comercializa su arena silíceo fundamentalmente para estos prefabricados de hormigón. Además, la arena silíceo de Caolina presenta muy buenas propiedades como material de construcción drenante y filtrante. Son arcillas primarias (aunque también existen caolín secundario) que se han formado por la meteorización in situ del feldespato. Sus partículas son de gran tamaño y por ello resulta menos plástico en comparación con otras arcillas. Están corrientemente mezclado con fragmentos de roca de feldespato y cuarzo por ello se hace necesario utilizar algún método para su purificación. Se trata de una arcilla altamente refractaria, con un punto de fusión por encima de los 1.800°C.

En la práctica, raramente se utiliza el caolín por su alto grado de refractariedad y su poca plasticidad, por ello se añaden a él otros materiales, aunque se debe decir que no todos los caolines son iguales en color, plasticidad. En general su grado de contracción es bajo debido al grosor de sus granos y tiene poca resistencia en seco.

²⁴ **INVIAS. 2013.** INV E-126:13 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

²⁵ **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 2011.** Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. 2011.

2.3 MARCO LEGAL

Normativa	Titulo	Alcance
NTC 4630 DE 0467/12	Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos.	Esta norma establece los métodos de ensayo para determinar el límite líquido por el método Casagrande y el método penetrómetro de cono o vassilief; el límite plástico, el índice de plasticidad y el límite de Contracción de los suelos sometidos a ensayo.
BS 1377:1990	Métodos de prueba para suelos con fines de ingeniería civil. Requisitos generales y preparación de muestras	Esta norma abarca la calibración y verificación de equipos de prueba, la preparación de muestras perturbadas para pruebas, la evaluación de la agrupación de suelos, la masa de suelo requerida para la prueba, la determinación del contenido de humedad, el secado del suelo, el procesamiento mecánico y la preparación de muestras para las pruebas de clasificación.
INV E 125-2013	Determinación del límite líquido de los suelos.	Tiene como objeto determinar los límites líquidos de los suelos, empleando alguno de los dos métodos tanto para la preparación de la muestra como para la ejecución del ensayo. Estos criterios son determinados por el cliente.
INV E 126-2013	Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos	Esta norma de ensayo se refiere a la determinación del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos.

3. METODOLOGÍA

3.1 TIPO DE ESTUDIO

Relación que hay entre los métodos presentes para la determinación de los límites líquidos y límites plásticos del caolín amarillo y el penetrómetro de cono de caída.

Teniendo en cuenta los cinco tipos de conos (cono Británico, cono Indio, cono Ruso, Cono Colombiano y cono Canadiense), que se implementaron para realizar el análisis, se establecieron ecuaciones lineales para cada método, haciendo una relación con los resultados registrados por los métodos tradicionales, logrando una línea de tendencia con buenos resultados ya que se registraron valores mayores al 0.95 en todos los ensayos.

Para la determinación del segundo método de Límites plásticos, se realizó una ecuación potencial respecto a los valores encontrados inicialmente en el procedimiento de Límites Líquido por penetrómetro cono de caída, logrando de esta forma tener los valores relación para el material estudiado.

3.2 FUENTES DE INFORMACION

Los resultados registrados son propios a los ensayos realizados en el laboratorio de la universidad Católica de Colombia , utilizando los equipos del laboratorio y el penetrómetro cono de caída comprado para la ejecución del proyecto de grado, siguiendo los procedimientos mencionados en estudios documentados anteriormente respecto al comportamiento de los suelos conforme al uso de los conos de cada país.

Los principales documentos usados como fuentes de información, fueron escritos de trabajos realizados por universidades con anterioridad, libros que estudian la mecánica de los suelos, normas implantadas en otros países que ya cuentan con el uso reglamentado del equipo y artículos de investigación que muestran el interés en tener un método adicional para la determinación de los límites de consistencia.

3.3 DISEÑO METODOLÓGICO

Para la ejecución del proyecto de investigación, se manejó una metodología teórico-práctica, donde inicialmente se realizó una inversión de tiempo para la revisión de la información existente, lo que permitió establecer las pautas de trabajo y cronograma a ejecutar. Siguiendo las necesidades que se presentaron para el proyecto de grado, se desarrollaron 4 fases donde se agruparon las partes más relevantes de la investigación de la siguiente manera:

- Fase I: Recolección de información e investigación referente a estudios realizados con el método propuesto y que mejoras presentaba respecto a los métodos convencionales. Basándose en la información recogida se establecieron los aspectos positivos y negativos del método, definiendo qué criterios eran los más considerables a analizar y de qué forma se podría analizar la información enfocándola al beneficio de las características y métodos usados en el país.
- Fase II: Se realizó la compra del equipo necesario para los ensayos propuestos, haciendo una importación del mismo y solicitando la elaboración de los conos a personal competente notificando las medidas y características necesarias para los análisis posteriores. Adicional a la compra del equipo se recopiló muestras representativas del material designado para el estudio (Caolín amarillo), obteniendo ejemplares que se comercializaban en Colombia con la intención de tener las características más cercanas a la realidad.
- Fase III: Ejecución de los ensayos de laboratorio, siguiendo los lineamientos estipulados en las normas NTC 4630, INV E 125-13, INV E 126-13 y documentos investigativos, logrando determinar los valores de límite líquido y límite plástico con valores relativamente lineales para cada uno de los cinco conos implementados para la investigación. En total se ejecutaron 55 ensayos con el Caolín amarillo, 25 ensayos para determinar el límite líquido por penetrómetro cono de caída, 25 ensayos para determinar los límites plásticos por penetrómetro cono de caída y 5 ensayos para tener los límites líquidos por el método tradicional.
- Fase IV: Se plasmó un comparativo entre los métodos estudiados, determinando las ecuaciones lineales y la viabilidad en su aplicación. Para esto se realizaron gráficas logarítmicas y aritméticas consiguiendo de esta forma las ecuaciones necesarias para la correlación planteada en el proyecto y las conclusiones respectivas.

4. MONTAJE DEL ENSAYO

4.1. ENSAYO DE CONO PARA DETERMINAR EL LL

4.1.1. Descripción. Para estudiar los ensayos de Penetrómetro de cono de caída, se utilizaron 5 tipos diferentes de cabezas cónicas (Cono Canadiense, Cono Británico, Cono Ruso, Cono Colombiano y Cono Indio), las cuales tienen características físicas diferentes cambiando su peso, ángulo de cabeza y dimensiones del recipiente para almacenar la muestra, con el fin de obtener resultados apropiados de cada uno y así compararlos con el método tradicional Casagrande, estableciendo fórmulas de correlación entre los métodos. Inicialmente se debe acondicionar la muestra a analizar agregándole agua para ir aumentando progresivamente la humedad del mismo hasta conseguir penetrar 20 mm la muestra durante 5 segundos.

El ensayo consiste en hacer penetrar un cono con una masa determinada y un ángulo determinado, en un suelo almacenado en un recipiente con medidas definidas en cada país. Se ubica en la parte superior del recipiente el cono dejándolo caer por gravedad durante 5 segundos, tomando la lectura que registra acorde al contenido de agua del material. Este procedimiento se realiza en varios contenidos de humedad logrando tener lecturas entre el rango de 15 mm y 30 mm para de esta forma tener una tendencia lineal del ensayo. Esta lectura es registrada en milímetros

Cada tipo de cono al tener características diferentes, genera una lectura acorde a la humedad que tenga el material que se le va adicionando, determinando de esta forma una gráfica lineal que nos permita determinar el porcentaje de humedad del material a una penetración de 20 mm.

4.1.2. Material y equipos. Para el desarrollo del ensayo, fue necesario contar con varios equipos, herramientas menores y el material correspondiente, cumpliendo con las características requeridas por los mismos según lo establecido en las normas. A continuación se describen lo expuesto anteriormente.

4.1.2.1. Caolín amarillo. El material que se estudió fue el caolín amarillo, material importante en la construcción y que se ha investigado para hacer su uso más adecuado y útil. Dicho material es sometido a cargas y a ciertas preparaciones con el fin de obtener los resultados esperados.

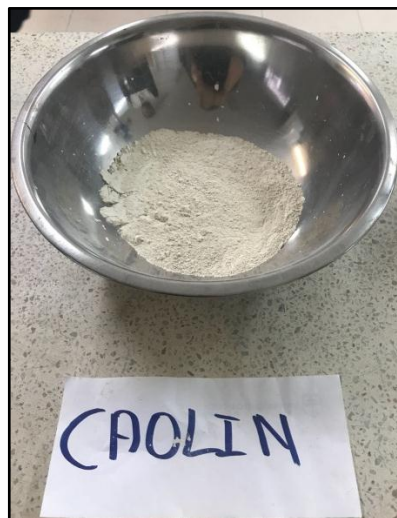
Ilustración 9: Caolín amarillo en bultos de 25 kg - Procomin.



Fuente: Autor.

De acuerdo a la descripción suministrada por el proveedor²⁶, el caolín (Ilustración 9) es un producto compuesto de especies arcillosas que dan cierta plasticidad, son generalmente grasas y contiene un porcentaje de áridos para darle más cuerpo al estuco. Es procesado al calor para quitarle el agua libre y garantizar un grado mínimo de humedad e impalpable para que no raye al estucar y presente superficies lisas y tersas Su aspecto visual se puede evidenciar en la Ilustración 10, donde se tiene preparada para la ejecución de ensayos.

Ilustración 10: Muestra de caolín.



Fuente: Autor.

²⁶ **DUROCOLOR.** Ficha técnica del producto Caolín Procomin (Bulto). [En línea] <http://www.durocolor.com/productos/talcos-yesos-caolines/caol%C3%ADn-procomin-bulto-detalle.html>.

4.1.2.2. Cabezas cónicas. Para lograr realizar los ensayos fue importante que a través de las diferentes cabezas cónicas se tuviera en cuenta los rangos y diferencias, para así poder compararlas y usar adecuadamente los accesorios necesarios para cada método a analizar. Para tener certeza de la información, cada uno de los accesorios requeridos fue medido y pesado en el laboratorio para validar lo requerido por las especificaciones iniciales.

➤ Cono Ruso.

Las características físicas del cono (Ilustración 11) para la determinación de los Límites líquidos son: Ángulo: 30 grados, peso de 76 gramos, longitud de 25 mm.

Ilustración 11: Conos Rusos y accesorios.



Fuente: Autor.

Las características físicas del recipiente (Ilustración 12) para la determinación de los Límites líquidos son: Diámetro de 37 mm y profundidad de 20 mm.

Ilustración 12: Conos Rusos y recipiente.



Fuente: Autor.

➤ Cono Canadiense.

Las características físicas del cono (Ilustración 13) para la determinación de los Límites líquidos son: Ángulo: 60 grados, peso de 60 gramos, longitud sin especificación. Para lograr el peso requerido, los conos cuentan con un accesorio adicional el cual se evidencia en la Ilustración 16 con un empaque metálico.

Ilustración 13: Conos Canadienses y accesorios.



Fuente: Autor.

Las características físicas del recipiente (Ilustración 14) para la determinación de los Límites líquidos son: Diámetro de 55 mm y profundidad de 40 mm. Sin registro fotográfico del recipiente.

Ilustración 14: Conos Canadienses armados para uso.



Fuente: Autor.

➤ Cono Colombiano.

Las características físicas del cono (Ilustración 15) para la determinación de los Límites líquidos son: Ángulo: 45 grados, peso de 75 gramos, longitud sin especificación.

Ilustración 15: Conos Colombianos y accesorios.



Fuente: Autor.

Las características físicas del recipiente (Ilustración 16) para la determinación de los Límites líquidos son: Diámetro de 55 mm y profundidad de 40 mm. Sin registro fotográfico del recipiente.

Ilustración 16: Conos Colombianos armados para uso.



Fuente: Autor.

➤ Cono Británico.

Las características físicas del cono (Ilustración 17) para la determinación de los Límites líquidos son: Ángulo: 30 grados, peso de 80 gramos, longitud 35 mm.

Ilustración 17: Conos Británicos y accesorios.



Fuente: Autor

Las características físicas del recipiente (Ilustración 18) para la determinación de los Límites líquidos son: Diámetro de 55 mm y profundidad de 40 mm.

Ilustración 18: Conos Británicos armados para uso.



Fuente: Autor

Para control de los equipos, el laboratorista encargado separa los conos con sus respectivos accesorios como se aprecia en la Ilustración 18, evitando de esta forma algún cambio de accesorios o recipiente.

➤ Cono Indio.

Las características físicas del cono (Ilustración 19) para la determinación de los Límites líquidos son: Ángulo: 31 grados, peso de 148 gramos, longitud 30.48 mm.

Ilustración 19: Conos Indios y accesorios.



Fuente: Autor

Las características físicas del recipiente (Ilustración 20) para la determinación de los Límites líquidos son: Diámetro de 50 mm y profundidad de 50 mm.

Ilustración 20: Conos Indios armados para uso.



Fuente: Autor

4.1.2.3. Equipo penetrómetro de cono de Caída. El equipo cuenta con varias piezas (Ilustración 21), las cuales son desarmables según la necesidad, tanto para la ubicación de otro cono, como para la altura del mismo a la hora de iniciar la penetración.

Ilustración 21: Equipo de penetrómetro desarmado.



Fuente: Autor

El equipo cuenta con una base rectangular sólida metálica, con un vástago cilíndrico fijo, el cual es el eje principal del equipo agregándole las piezas respectivas. Adicional cuenta con una regleta en aluminio que se fija al vástago principal para determinar la lectura de la penetración. Esta cuenta con lectura de 1 mm a 50 mm (Ilustración 22).

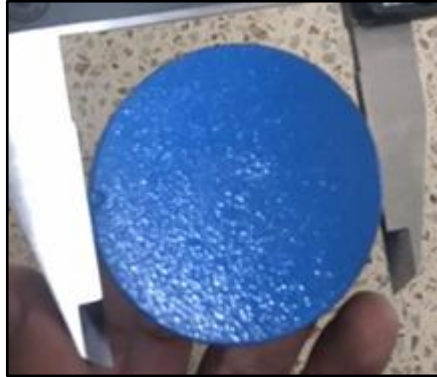
Ilustración 22: Regleta para lectura de penetración.



Fuente: Autor

Se tiene un cabezal (Ilustración 23) redondo en cuenta con un sistema de anclaje en rosca para ubicarse en la parte superior del eje donde se ubica el cono.

Ilustración 23: Accesorio para eje del cono.



Fuente: Autor

Con los accesorios mencionados anteriormente, se arma el equipo como se evidencia en la Ilustración 24, cambiando el tipo de cono y el recipiente de almacenaje de la muestra, según el método que se esté ejecutando.

Ilustración 24: Equipo Penetrómetro de cono de caída.



Fuente: Autor

4.1.2.4. Equipos y herramientas menores.

Ilustración 25: Pieza de vidrio esmerilado plano de 40 cm x 40 cm.



Fuente: Autor

Ilustración 26: Espátulas.



Fuente: Autor

Ilustración 27: Recipientes metálicos.



Fuente: Autor

Ilustración 28: Balanza Digital de 3000 g.



Fuente: Autor

Ilustración 29: Pie de rey Digital de 300 mm



Fuente: Autor

Ilustración 30: Horno eléctrico.



Fuente: Autor

4.1.3. Procedimiento. El procedimiento del ensayo se divide en 9 pasos teniendo en cuenta lo establecido en la NTC 4630²⁷ y los criterios del laboratorista a la hora de realizar el ensayo.

- Paso 1: Se seleccionó una cantidad aproximada de 500 gramos del material (Caolín). Este material fue secado previamente en horno a temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24 ± 4 horas para lograr cumplir con la característica inicial de no tener contenido de humedad. Se humedece la muestra con algún gotero (Ilustración 31) permitiendo realizar la saturación de forma superficial inicialmente. Bajo criterio de experiencia del laboratorista se observa que toda la muestra se encuentra con contenido de humedad tanto en la parte superficial como en la parte interna.

²⁷ **ICONTEC. 1999.** NTC 4630 (ASTM D 4318) Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. . 1999.

Ilustración 31: Preparación muestra de Caolín.



Fuente: Autor

- Paso 2: Al tener la muestra con un contenido de humedad inicial (Humedad que logre una penetración de 15 mm en un tiempo de 5 segundos), se mezcla completamente la muestra con una espátula, con el fin de tener una combinación uniforme y cuidando que no quede aire atrapado en la misma. Se debe tener en cuenta, que la muestra seleccionada debe alcanzar para llenar el recipiente y poder sacar material para la determinación de humedad del punto estudiado.

Ilustración 32: Mezcla homogénea de la muestra.



Fuente: Autor

- Paso 3: Al tener la muestra en condición de húmeda homogénea, se inserta en el recipiente material (Estas medidas son diferentes para cada país), golpeando el recipiente constantemente (Ilustración 33), para que todo el recipiente quede completamente lleno y compacto.

Ilustración 33: Ingreso del material al recipiente de ensayo.



Fuente: Autor

- Paso 4: Se realiza el montaje del cono (Ilustración 34), instalando cada una de las piezas y accesorios. Se tuvo en cuenta los accesorios requeridos por cada método a utilizar. Adicional se revisan las medidas del equipo, accesorios y ubicación completa de las partes, para darle confiabilidad al proceso y trazabilidad en margen de error al mismo (Ilustración 35). Este paso se realizó en el mismo momento de los pasos iniciales para evitar cualquier pérdida de humedad del material.

Ilustración 34: Montaje del equipo.



Fuente: Autor

Ilustración 35: Verificación de medidas del equipo.



Fuente: Autor

- Paso 5: Se ubica el recipiente en la base metálica y con el cono de penetración bloqueado en la parte superior, se baja el conjunto de soporte hasta que la punta del cono apenas toque la superficie del suelo. Se dejó caer el cono esperando un tiempo de 5 segundos para registrar la lectura inicial del ensayo. En la primera penetración con el cono británico, nos dio como resultado 16 mm el cual se encuentra en los registros de laboratorio (ANEXO A).

Ilustración 36: Primera penetración con el equipo, como Británico.



Fuente: Autor

- Paso 6: Se tomó una porción de la muestra ensayada como se evidencia en la Ilustración 37, para determinar su contenido de humedad. Esta muestra se colocó en el horno durante el tiempo estipulado por norma de 24 ± 4 horas. Se registran las lecturas iniciales y finales en el formato de laboratorio (ANEXO A).

Ilustración 37: Pesaje de la muestra para contenido de humedad



Fuente: Autor

- Paso 7: Se repitió los paso 1, 5 y 6 aumentando la cantidad de agua a la muestra inicial para de esta forma lograr obtener un valor más cercano a la penetración de 20 mm.

Ilustración 38: Segunda lectura de penetración.



Fuente: Autor

- Paso 8: Por cada ensayo se tomaron 4 registros de penetración en el rango de 15 mm y 26 mm (Ilustración 38 y 39) el cual registra una huella en la muestra a la hora de terminar la penetración.

Ilustración 39: Registro de lecturas de penetración.



Fuente: Autor

- Paso 9: Se colocaron las muestras en el horno a temperatura de 24 ± 4 horas, para tener las humedades representativas en cada penetración como se evidencia en la Ilustración 40. Estas muestras son marcadas para

lograr tener diferencia entre ellas y no cometer errores en las lecturas finales de humedad.

Se retira la muestra luego de transcurrir el tiempo, pesa nuevamente y la diferencia es el contenido de humedad.

Ilustración 40: Muestras almacenadas en horno a temperatura controlada.



Fuente: Autor

4.2. ENSAYO DE CONO PARA DETERMINAR EL LP

4.2.1. Descripción. Este procedimiento es un método más experimental, usando el mismo equipo, se manejaron 5 tipos diferentes de cabezas cónicas (Cono Canadiense, Cono Británico, Cono Ruso, Cono Colombiano y Cono Indio), las cuales cuentan con un cono de mayor tamaño, aumentando sus medidas y pesos a diferencia de los usados para determinar el límite líquido.

Para realizar el ensayo, se debe disponer de una muestra sin condición de humedad, el cual se le agrega agua para ir aumentando progresivamente la humedad del mismo hasta conseguir penetrar 20 mm. Como característica inicial se debe tener presente que al ser mayor el peso del cono el contenido de humedad debe ser menor al suministrado el los Límites líquidos.

Cada tipo de cono al tener características diferentes, genera una lectura acorde a la humedad que tenga el material que se le va adicionando, determinando de esta forma una gráfica lineal que nos permita determinar el porcentaje de humedad del

material a una penetración de 20 mm, siendo esta lectura el valor del límite plástico del material.

4.2.2. Material y equipos. Para el desarrollo del ensayo se usan los mismos equipos relacionados anteriormente, para determinar el límite líquido, teniendo en cuenta el cambio de las cabezas cónicas teniendo diferentes características físicas aumentando su peso.

- Caolín Amarillo en bultos de 25 kg - Procomin.
- Cabeza cónica cono Ruso: Las características físicas del cono para la determinación de los Límites plásticos son: Ángulo: 30 grados, peso de 228 gramos, longitud de 25 mm (Véase Ilustración 11).
- Cabeza cónica cono Canadiense: Las características físicas del cono para la determinación de los plásticos son: Ángulo: 60 grados, peso de 180 gramos, longitud sin especificación. Para lograr el peso requerido, los conos cuentan con un accesorio adicional el cual se evidencia en la con un empaque metálico. (Véase Ilustración 14).
- Cabeza cónica cono Colombiano: Las características físicas del cono, para la determinación de los Límites plásticos son: Ángulo: 45 grados, peso de 225 gramos, longitud sin especificación. (Véase Ilustración 16).
- Cabeza cónica cono Británico: Las características físicas del cono para la determinación de los Límites plásticos son: Ángulo: 30 grados, peso de 240 gramos, longitud 35 mm. (Véase Ilustración 18).
- Cabeza cónica cono Indio: Las características físicas del cono, para la determinación de los Límites plásticos son: Ángulo: 31 grados, peso de 444 gramos, longitud 30.48 mm. (Véase Ilustración 20).
- Equipo penetrómetro de cono de Caída. (Véase Ilustración 24).
- Pieza de vidrio esmerilado plano de 40 cm x 40 cm. (Véase Ilustración 25).
- Espátulas. (Véase Ilustración 26).
- Recipientes metálicos. (Véase Ilustración 27).
- Balanza Digital de 3000 g. (Véase Ilustración 28).
- Pie de rey Digital de 300 mm. (Véase Ilustración 29).
- Horno eléctrico. (Véase Ilustración 30).

4.2.3. Procedimiento. En el procedimiento del ensayo se tienen los 9 pasos usados en el límite líquido, con el único de cambio que en el paso No. 4 donde se coloca la cabeza cónica con el peso estipulado acorde al método que se esté estudiando.

4.3. ENSAYO DE CASAGRANDE PARA DETERMINAR EL LL

4.3.1. Descripción. Este procedimiento se utiliza para determinar el límite líquido de los suelos. El límite de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. Esencialmente el ensayo de límite líquido es una medida de la resistencia de corte de un suelo blando cuya humedad se acerca al estado líquido.

Para realizar el ensayo, se debe disponer de una muestra sin condición de humedad, que pase por el Tamiz de 0.425 mm (No. 40) de acuerdo con el método descrito en Normas INV E-106-13²⁸ e INV E- 107-13²⁹.

4.3.2. Material y equipos. Para el desarrollo del ensayo Casagrande y de acuerdo a la INV E-125-13³⁰ se debe emplear ciertos equipos y herramientas, quienes serán descritos a continuación.

4.3.2.1. Caolín amarillo. Cómo el proyecto es una comparación de métodos, se utiliza el mismo material descrito en el numeral 4.1.2.1 del presente informe.

4.3.2.2. Aparato del límite líquido, Cazuela Casagrande. Para realizar el ensayo se contó con la cazuela de bronce, la cual está suspendida de un soporte diseñado para controlar su caída sobre la superficie de un bloque de material resiliente, que sirve como base del aparato.

De acuerdo con la Ilustración 41, suministrado de la INV E-125-13³¹, se describe las principales características y dimensiones críticas que debe tener el equipo. Los proveedores suministran equipos con características semejantes, pero con durabilidad acorde al material usado para su construcción (Ilustración 42).

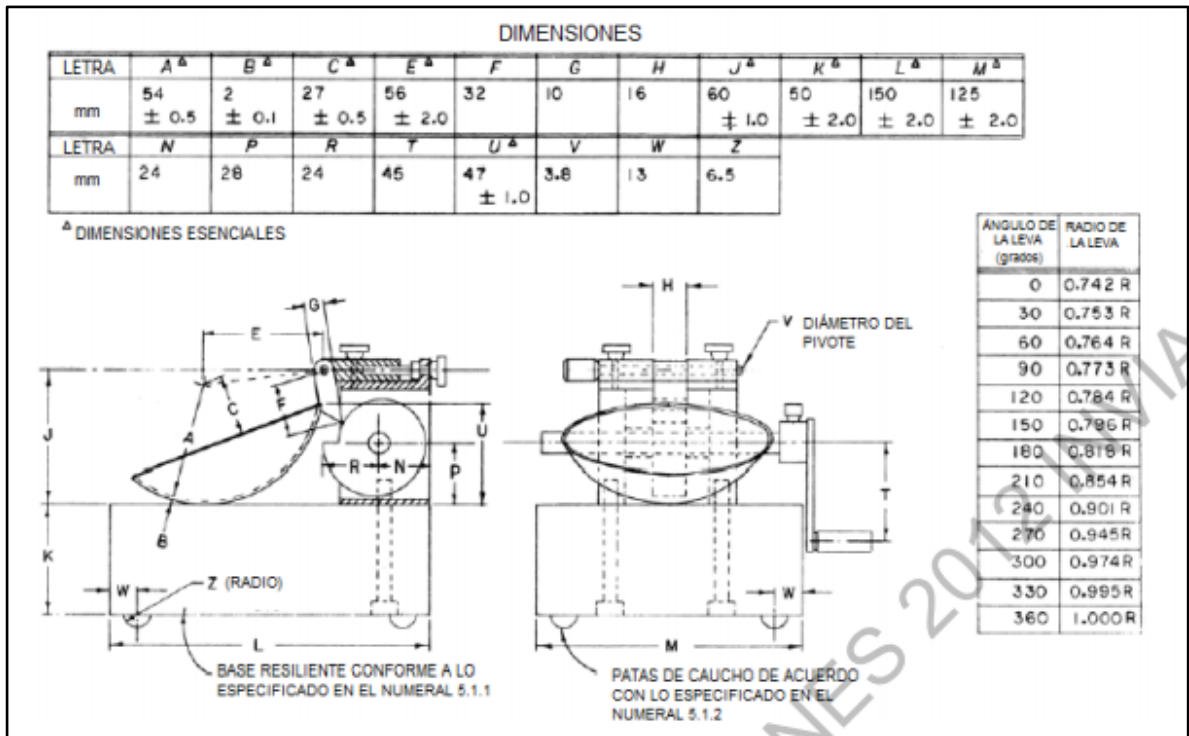
²⁸ **INVIAS. 2013.** INV E-106:13 Preparación de muestras de suelo por vía seca para análisis granulométricos de las constantes físicas. [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

²⁹ **INVIAS. 2013.** INV E-107:13 Preparación de muestras de suelo por vía húmeda para análisis granulométricos de las constantes físicas [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

³⁰ **INVIAS. 2013.** INV E-125:13 Determinación del límite líquido de los suelos [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

³¹ **INVIAS. 2013.** INV E-125:13 Determinación del límite líquido de los suelos [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

Ilustración 41: Dimensiones y características del aparato.



Fuente: Norma INVIAS E- 125-13

Ilustración 42: Aparato límite líquido.

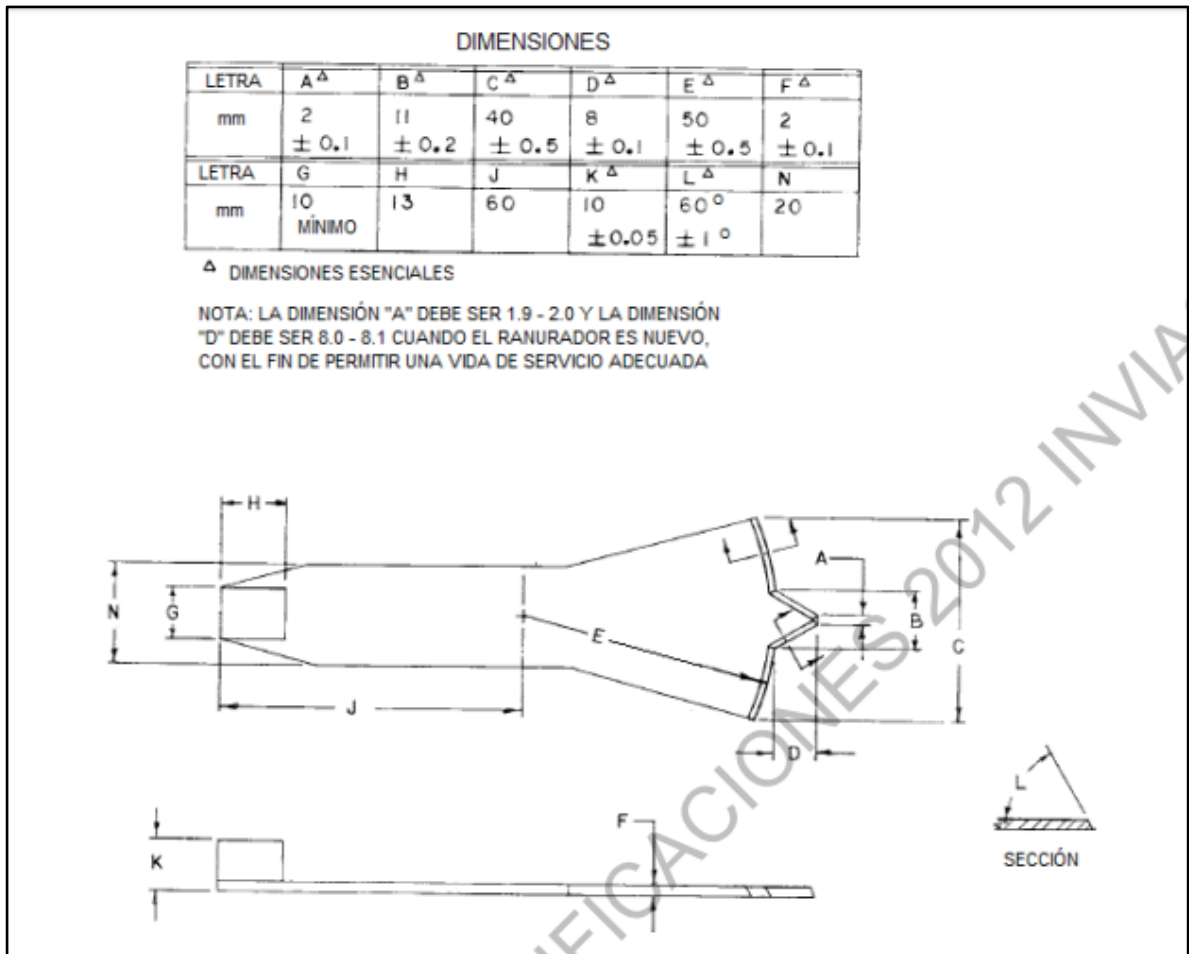


Fuente: Autor

4.3.2.3. Ranurador. Se debe contar con un ranurador curvo (trapezoidal), de plástico o de un metal no corrosivo, de acuerdo a las dimensiones de la Ilustración 43, tomado de la INV E-125-13³². Este ranurador puede tener cualquier diseño, mientras se garanticen las dimensiones esenciales.

³²INVIAS. 2013. INV E-125:13 Determinación del límite líquido de los suelos [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

Ilustración 43: Medidas del Ranurador.



Fuente: Norma INVIAS E- 125-13

Ilustración 44: Ranurador.



Fuente: Autor

4.3.2.4. Equipos y herramientas menores.

- Recipientes metálicos - Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 27, del presente informe.
- Balanza digital de 3000 g- Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 28, del presente informe.
- Espátulas- Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 26, del presente informe.
- Horno eléctrico- Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 30, del presente informe.

4.3.3. Procedimiento. El procedimiento del ensayo se divide en 6 pasos teniendo en cuenta lo establecido en la INV E-125-13³³ y los criterios del laboratorista a la hora de realizar el ensayo.

- Paso 1: Se seleccionó una cantidad aproximada de 150 a 200 gramos del material (Caolín). Se humedeció la muestra con un gotero con el fin de que adquiriera la consistencia necesaria³⁴. Se colocó una cantidad adecuada del suelo dentro de la cazuela, se comprimió y extendió con el fin de dejar una profundidad de 10 mm en el punto de su máximo espesor.
- Paso 2: Con el ranurador se hizo una pasada firme, hundiendo el biselado de este hacia adelante en una línea que iba desde el punto más alto hasta el más bajo del borde de la cazuela.
- Paso 3: A continuación, se levantó y golpeó la cazuela girando la manija a una velocidad de 1.9 a 2.1 revoluciones por segundo, o de acuerdo a la experiencia y criterio del laboratorista. Esto se hizo hasta que las dos mitades de la pasta del suelo se pusieran en contacto de la ranura, con una distancia de 13 mm (1/2")
- Paso 4: Se registró el número de golpes que se hicieron para que cerrara de manera adecuada la ranura. Se tomó una muestra del material y se colocó en un recipiente de masa conocida y se tapó.
- Paso 5: Se repitió varias veces el procedimiento de tal manera que se tuvieran diferentes muestras, esto con el fin de que los golpes para cerrar la ranura oscilaran entre los siguientes intervalos: 25-35, 20-30 y 15-25.
- Paso 6: Se colocaron las muestras en el horno a temperatura de 24 ± 4 horas, a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$), con el fin de obtener las humedades representativas en cada muestra.

³³INVIAS. 2013. INV E-125:13 Determinación del límite líquido de los suelos [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

³⁴Tomás, R., Cano, M., García-Barba, J., Santamarta, J.C., Hernández, L.E., Rodríguez, J.A., Zamora, R. 2013. Prácticas de Ingeniería del Terreno. 2013.

4.4. ENSAYO PARA DETERMINAR EL LP

4.4.1. Descripción. Este procedimiento se utiliza para determinar el límite plástico de los suelos. Este ensayo se debe hacer con el mismo material con el que se hizo para determinar el límite líquido. El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua o humedad con la que se pueden formar cilindros de suelo, sin que estos se deformen. Es más conocido como el método de moldeo manual de rollos.

4.4.2. Material y equipos. Para el desarrollo del ensayo de moldeo manual de rollos y de acuerdo a la INV E-126-13³⁵, se debe emplear ciertos equipos y herramientas, quienes serán descritos a continuación.

4.4.2.1. Caolín amarillo. Para continuar con el procedimiento adecuado, se tomó nuevamente el material empleado para determinar el límite líquido, en el Método de Casagrande, explicado en el numeral 4.3 del presente informe.

4.4.2.2. Equipos y herramientas menores.

- Pieza de vidrio esmerilado plano de 40 cm x 40 cm.- Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 25, del presente informe.
- Recipientes metálicos - Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 27, del presente informe.
- Espátulas- Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 26, del presente informe.
- Balanza digital de 3000 g- Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 28, del presente informe.
- Horno eléctrico- Descrito en el numeral 4.1.2.4, Ilustración 30, del presente informe.

4.4.3. Procedimiento. El procedimiento del ensayo se divide en 6 pasos teniendo en cuenta lo establecido en la INV E-126-13³⁶ y los criterios del laboratorista a la hora de realizar el ensayo.

- Paso 1: Se seleccionó una cantidad aproximada de 20 gramos del material preparado para el ensayo del límite líquido (Caolín) ya descrito en el numeral 4.3. Se buscó que el material alcanzara una consistencia que permitiera enrollarlo sin que se pegara a las manos.
- Paso 2: De este material se tomó una porción de 1.5 a 2.0 g, se hizo rodar la masa del suelo en la palma de la mano o los dedos y la placa de vidrio, con la presión que se necesitó para formar un rollo de hasta 3.2 mm (1/8”), en no más de 2 minutos

³⁵INVIAS. 2013. INV E-126:13 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-técnicos1>.

³⁶INVIAS. 2013. INV E-126:13 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-técnicos1>.

- Paso 3: Cuando se llegó a este diámetro, se dividió en varios trozos, se juntaron y comprimieron, de tal manera que se tuviera una masa elipsoidal.
- Paso 4: Se tomaron estas porciones de suelo desmoronado y se colocaron en un recipiente adecuado de masa conocida.
- Paso 5: Se repitió el procedimiento 2 veces hasta obtener un peso de 6 g, es decir, dos muestras de 6 g.
- Paso 6: Se colocaron las muestras en el horno a temperatura de 24 ± 4 horas, a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$), con el fin de obtener las humedades representativas en cada muestra.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO CASAGRANDE PARA LL

Para obtener la correlación entre los métodos, se ejecutaron 5 ensayos con el método tradicional de Casagrande siguiendo los lineamientos estipulados en la Norma Invias E 125-2013, los cuales se presentan como datos representativos de la muestra para el análisis con los métodos alternativos.

Para darle mayor claridad a los datos obtenidos, a continuación como modelo se hace el cálculo de contenido de humedad del ensayo No. 1, para mostrar la ecuación usada (Ecuación 1) y los valores tomados para dicho calculo. Este método de cálculo usado permitió determinar los valores en los 5 ensayos los cuales son registrados en la Tabla No 5.

Ecuación 1: Contenido de Humedad.

$$\text{Contenido de agua} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} \times 100$$
37

Tabla 3: Datos ensayo No. 1 – Casagrande.

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3
GOLPES (No.)	15	25	35
PESO RECIPIENTE (g)	14.07	12.85	13.88
PESO RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (g)	27.49	27.93	30.35
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	23.34	23.09	24.86
MASA DE AGUA (g)	4.15	4.84	5.49

Fuente: Autor.

Para claridad de los resultados registrados, se realiza el cálculo de Punto 1.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{4.15}{23.34 - 14.07} \times 100 = 44.77 \%$$

³⁷ INVIAS. 2013. INV E-125:13 Determinación del límite líquido de los suelos [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

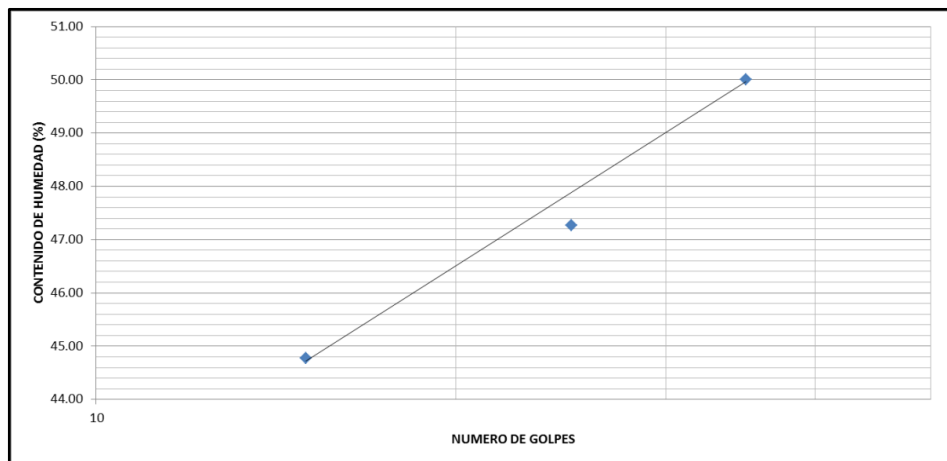
Tabla 4: Resultados de Humedad Ensayo No. 1 – Casagrande.

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3
CONTENIDO DE HUMEDAD %	44.77	47.27	50.00

Fuente: Autor.

Ya teniendo los valores de humedad en los 3 puntos, se realiza una gráfica semi-logarítmica, ubicando el contenido de humedad como ordenada en escala aritmética y el número de golpes como abscisa en escala logarítmica. A continuación, se registran los valores registrados en la gráfica mencionada (Ilustración 45).

Ilustración 45: Grafica de LL Ensayo No 1 - Método Casagrande



Fuente: Autor.

A continuación se reporta los resultados de Límite líquido de los 5 ensayos representativos de la muestra por el método Casagrande. Los registros de laboratorio se evidencian en el Anexo A y los cálculos de los ensayos en el Anexo B.

Tabla 5: Resumen de Resultados LL - Casagrande

ENSAYO No.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES LIQUIDOS INV E 125:2013
1	47.3
2	47.6
3	47.9
4	48.1
5	48.5

Fuente: Autor.

5.2 RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO CONO DE PENETRACIÓN LL

Como primer método de comparación o correlación, se ejecutó 5 procedimientos distintos acorde a las características y condiciones de cada Método. Para cada cabeza cónica en representación del país que lo implementó, se ejecutaron 5 ensayos con intención de tener unos valores representativos al material analizado (Anexo C).

Tabla 6: Datos ensayo No. 1 Británico –Método de cono.

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
PENETRACION (mm)	16	19	22	25
RECIPIENTE No.	12	6	1	15
PESO RECIPIENTE (Tara) (PT) (g)	13.62	13.87	13.94	12.83
PESO RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (P1) (g)	29.89	37.77	41.74	35.18
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (P2) (g)	24.6	29.63	31.98	27.02

Fuente: Autor.

A continuación como modelo se hace el cálculo de contenido de humedad del ensayo No. 1 correspondiente al método Británico, para mostrar la ecuación usada (Ecuación 2) y los valores tomados para dicho cálculo. Este método de cálculo usado permitió determinar los valores en los 5 ensayos los cuales son registrados en la Tabla No 6.

Ecuación 2: Contenido gravimétrico de humedad.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{(P2 - P1)}{(P1 - PT)} \times 100$$

P1 = Peso recipiente + suelo húmedo.
P2 = Peso recipiente + suelo seco.
PT = Peso recipiente.]

Fuente: Autor.

A continuación se muestra el modelo del Punto No. 1, ejecutando el cálculo de humedad de la muestra ensayada (Tabla 7), el cual se realizó con cada punto para tener los puntos representativos para la gráfica comparativa.

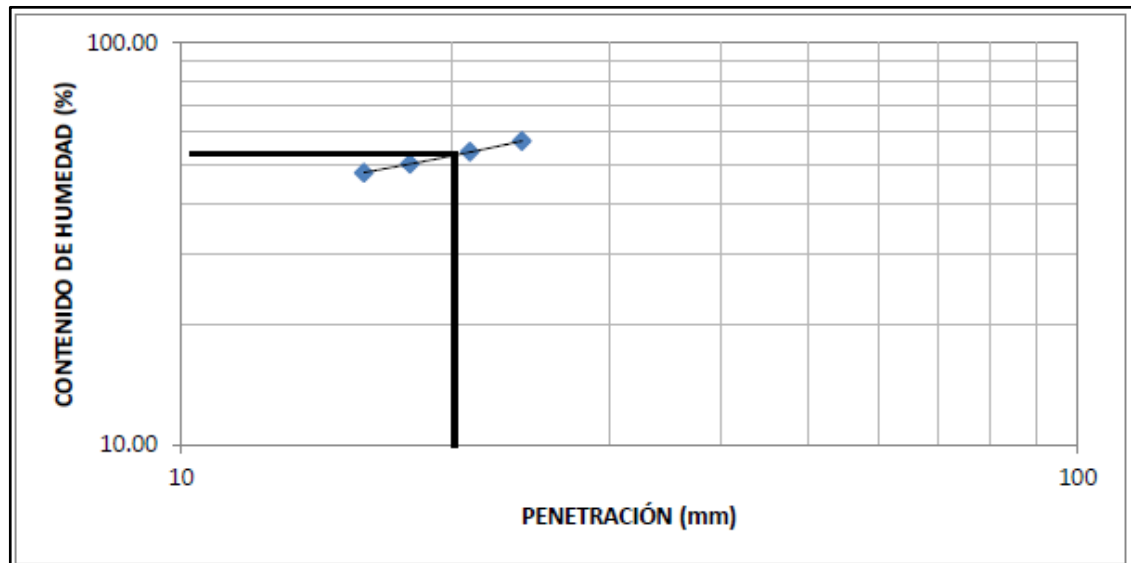
$$\text{Contenido de humedad Punto 1 (\%)} = \frac{(29.89 - 24.6)}{(24.6 - 13.62)} \times 100 = 48.18 \%$$

Tabla 7: Resultados de Humedad Ensayo No. 1 Británico– Método de cono.

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
CONTENIDO DE HUMEDAD %	48.18	51.65	54.10	57.51

Fuente: Autor.

Ilustración 46: Representación gráfica Ensayo No. 1 Cono Británico.



Fuente: Autor.

Según las profundidades registradas en la Tabla No. 1, se toma la lectura de contenido de humedad en la ordenada según Ilustración 46, respecto a la penetración deseada, en el caso de Método Británico la lectura de penetración se realiza a 20 mm (Véase Tabla 1). Al ser valores con poca precisión se ejecuta la fórmula de interpolación lineal para tener mayor precisión a la lectura deseada.

Ecuación 3: Interpolación Lineal.

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

Fuente: Autor.

A continuación se muestra el modelo referente al valor deseado de 20 mm, ejecutando el cálculo de humedad de la muestra ensayada, usando la ecuación 3 de interpolación.

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = \frac{(20 - 18)}{(21 - 18)} * (53.62 - 50.09) + (50.09)$$

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = 52.44.$$

Siguiendo el procedimiento mencionado, a continuación, se relacionan los datos registrados en los conos usados como método comparativo.

Resultados de % de humedad cono Británico a 20 mm de penetración (Véase Tabla 8).

Tabla 8: Resultados cono Británico

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO BRITANICO
1	51.8
2	52.06
3	52.44
4	52.79
5	53.04

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 8) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método británico.

Resultados de % de humedad como canadiense a 20 mm de penetración (Véase Tabla 9).

Tabla 9: Resultados como Canadiense.

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO CANADIENSE
1	54.24
2	54.45
3	54.74
4	55.28
5	55.35

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 9) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método canadiense.

Resultados de % de humedad como Colombiano a 20 mm de penetración (Véase Tabla 10).

Tabla 10: Resultados como Colombiano

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO COLOMBIANO
1	52.46
2	53.13
3	53.5
4	53.5
5	53.55

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 10) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1

al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método colombiano.

Resultados de % de humedad cono Indio a 25.4 mm de penetración (Véase Tabla 11).

Tabla 11: Resultados cono Indio.

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO INDIO
1	48.9
2	49.8
3	50
4	50.2
5	50.5

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 11) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método indio.

Resultados de % de humedad cono Ruso a 10 mm de penetración (Véase Tabla 12).

Tabla 12: Resultados cono Ruso.

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO RUSO
1	32
2	33
3	33
4	34
5	35

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 12) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método ruso.

5.3 COMPARATIVO DETERMINACIÓN DE LIMITE LÍQUIDO

Al tener los valores requeridos de humedad por métodos seleccionados (Casagrande y Penetración de conos de caída), se realiza una gráfica lineal aritmética donde se registran los 5 valores determinados por cada uno. La gráfica tiene el contenido de humedad del cono como ordenada y el contenido de humedad por Casagrande como abscisa. Esto permitió determinar la ecuación lineal entre ambos métodos y que tendencia lineal hay respecto a la similitud de los métodos.

A continuación, se muestran los resultados referentes a la comparación del cono británico y los resultados recibidos Casagrande (Véase Tabla 19), ordenando los valores obtenidos de menos a mayor en orden ascendente.

5.3.1. Resultados comparativos de Casagrande y cono británico.

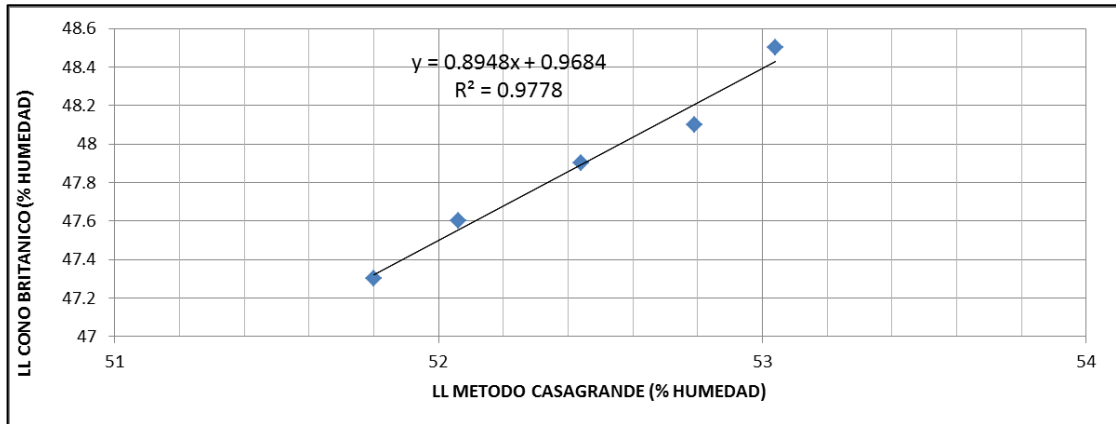
Tabla 13: Resultados de Casagrande y Cono Británico.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES LIQUIDOS INV E 125:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO BRITANICO
47.3	51.8
47.6	52.06
47.9	52.44
48.1	52.79
48.5	53.04

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresa en una gráfica aritmética (Ilustración 47) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento Casagrande (Anexo D).

Ilustración 47: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Británico



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos a los 10 ensayos ejecutados, teniendo un coeficiente de determinación de 0.977 siendo un valor aceptable en la comparación del ensayo.

La ecuación que referencia la correlación entre los métodos se da de la siguiente manera:

$$\text{LL Cono Británico} = 0.8948(\text{LL Casagrande}) + 0.9684.$$

5.3.2. Resultados comparativos de Casagrande y cono canadiense.

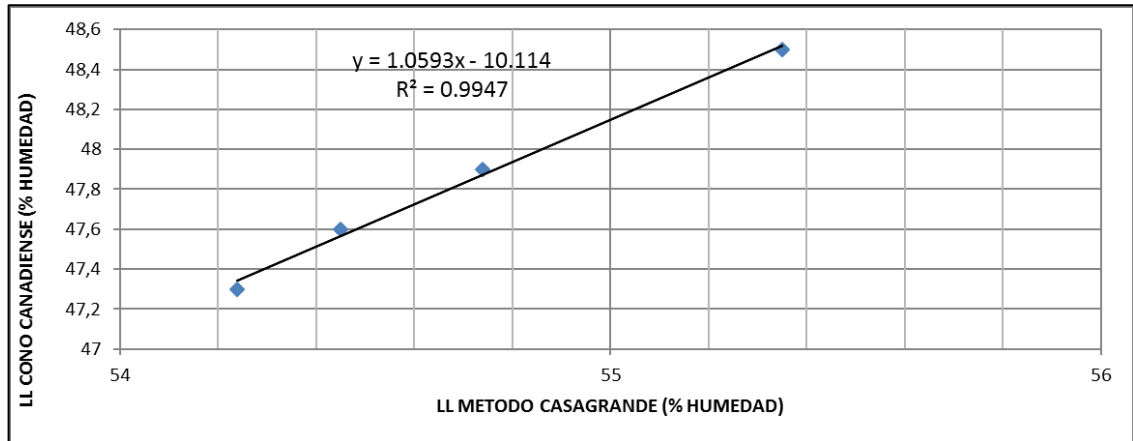
Tabla 14: Resultados de Casagrande y Cono Canadiense.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES LIQUIDOS INV E 125:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO CANADIENSE
47,3	54,24
47,6	54,45
47,9	54,74
48,1	55,28
48,5	55,35

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresa en una gráfica aritmética (Ilustración 48) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento Casagrande.

Ilustración 48: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Canadiense.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 8 ensayos ejecutados, teniendo un coeficiente de determinación de 0.994 siendo un buen valor, con la observación de no tener en cuenta 2 valores por presentar un valor fuera del rango de aceptación.

La ecuación que referencia la correlación entre los métodos se da de la siguiente manera:

$$\text{LL Cono Canadiense} = 1.0593(\text{LL Casagrande}) - 10.11.$$

5.3.3. Resultados comparativos de Casagrande y cono colombiano.

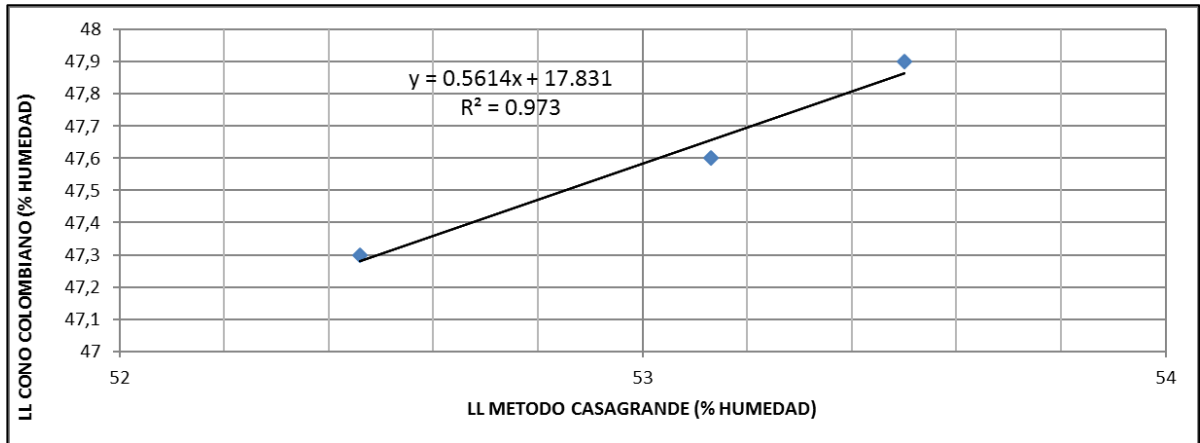
Tabla 15: Resultados de Casagrande y Cono colombiano.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES LIQUIDOS INV E 125:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO COLOMBIANO
47,3	52,46
47,6	53,13
47,9	53,5
48,1	53,5
48,5	53,55

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresa en una gráfica aritmética (Ilustración 49) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento Casagrande.

Ilustración 49: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Colombiano.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 6 ensayos ejecutados, teniendo un coeficiente de determinación de 0.97 pero con la observación de presentar 2 resultados con valores fuera del rango, no generando un coeficiente superior al 0.95.

La ecuación que referencia la correlación entre los métodos se da de la siguiente manera:

$$\text{LL Cono Colombiano} = 0.5614(\text{LL Casagrande}) + 17.831.$$

5.3.4. Resultados comparativos de Casagrande y cono indio.

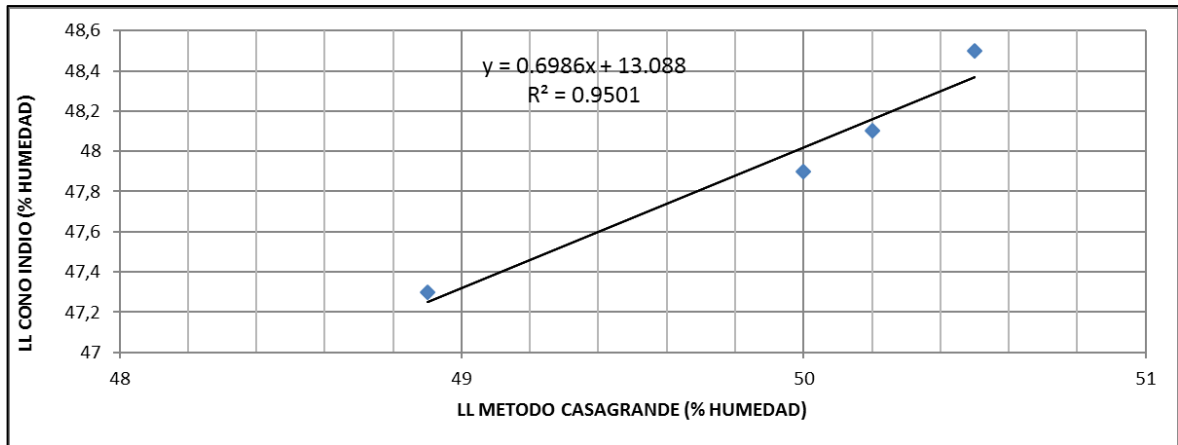
Tabla 16: Resultados de Casagrande y Cono Indio.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES LIQUIDOS INV E 125:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO INDIO
47,3	48,9
47,6	49,8
47,9	50
48,1	50,2
48,5	50,5

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresa en una gráfica aritmética (Ilustración 50) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento Casagrande.

Ilustración 50: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Indio.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 8 ensayos ejecutados, teniendo un coeficiente de determinación de 0.9501 pero con la observación de presentar 1 resultado con valor fuera del rango.

La ecuación que referencia la correlación entre los métodos se da de la siguiente manera:

$$\text{LL Cono Indio} = 0.6986 (\text{LL Casagrande}) + 13.08.$$

5.3.5. Resultados comparativos de Casagrande y cono ruso.

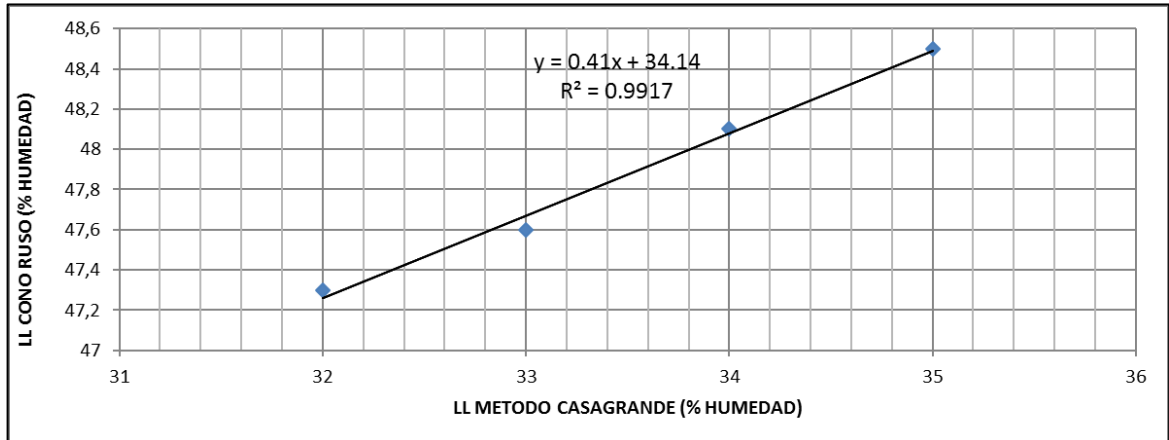
Tabla 17: Resultados de Casagrande y Cono Ruso.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES LIQUIDOS INV E 125:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO RUSO
47,3	32
47,6	33
47,9	33
48,1	34
48,5	35

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresa en una gráfica aritmética (Ilustración 51) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento Casagrande.

Ilustración 51: Gráfica de tendencia lineal Casagrande vs Cono Ruso.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 8 ensayos ejecutados, teniendo un coeficiente de determinación de 0.99 pero con la observación de presentar 1 resultado con valor fuera del rango.

La ecuación que referencia la correlación entre los métodos se da de la siguiente manera:

$$LL \text{ Cono Ruso} = 0.41 (LL \text{ Casagrande}) + 34.14$$

Con el procedimiento mencionado anteriormente, se hizo las comparaciones entre los cinco métodos contemplados (Cono Británico, cono canadiense, cono ruso, cono colombiano y Cono Indio) estableciendo las ecuaciones lineales de cada cono.

Tabla 18: Ecuaciones regresión lineales Casagrande vs Conos de penetración.

COMPARATIVO	ECUACIÓN R. LINEAL
Casagrande - británico	LL Cono Británico=0.8948 (LL Casagrande) + 0.9684.
Casagrande - canadiense	LL Cono Canadiense = 1.0593 (LL Casagrande) – 10.11.
Casagrande - colombiano	LL Cono Colombiano = 0.5614 (LL Casagrande) + 17.831.
Casagrande - indio	LL Cono Indio = 0.6986 (LL Casagrande) + 13.08.
Casagrande - ruso	LL Cono Ruso = 0.41(LL Casagrande) + 34.14

Fuente: Autor.

5.4 RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO ROLLOS PARA DETERMINAR LP

Para obtener la correlación entre los métodos, se ejecutaron 5 ensayos con el método tradicional de rollos siguiendo los lineamientos estipulados en la Norma Invias E 126-2013, los cuales se presentan como datos representativos de la muestra para el análisis con los métodos y cálculos representativos.

Para darle mayor claridad a los datos obtenidos, a continuación, como modelo se hace el cálculo de contenido de humedad del ensayo No. 1, para mostrar la ecuación usada (Ecuación 1) y los valores tomados para dicho calculo. Este método de cálculo usado permitió determinar los valores en los 5 ensayos los cuales son registrados en la Tabla No 23.

Tabla 19: Datos ensayo No. 1 – Método de rollos.

	PUNTO 1	PUNTO 2
RECIPIENTE No.	7	1
PESO RECIPIENTE(g)	14.18	13.95
PESO RECIPIENTE + SH (g)	21.26	20.21
PESO RECIPIENTE + SS (g)	19.84	18.92

Fuente: Autor.

Siguiendo el procedimiento mencionado por la norma, los datos necesarios para el cálculo de contenido de humedad, se registra en la Tabla 19 ejecutando dos ensayos con las mismas características y el mismo material para realizar un promedio entre los valores arrojados.

Ecuación 2: Contenido gravimétrico de humedad.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{(P2 - P1)}{(P1 - PT)} \times 100$$

P1 = Peso recipiente + suelo húmedo.
P2 = Peso recipiente + suelo seco.
PT = Peso recipiente.]

Fuente: Autor.

A continuación, se muestra el modelo del Punto No. 1, ejecutando el cálculo de humedad de la muestra ensayada (Ecuación 2), el cual se realizó con cada punto para tener los valores representativos en promedio de la muestra.

$$\text{Contenido de humedad Punto 1 (\%)} = \frac{(21.26 - 19.84)}{(19.84 - 14.18)} \times 100 = 25.09 \%$$

Tabla 20: Resultados de Humedad Ensayo No. 1 Método de rollos.

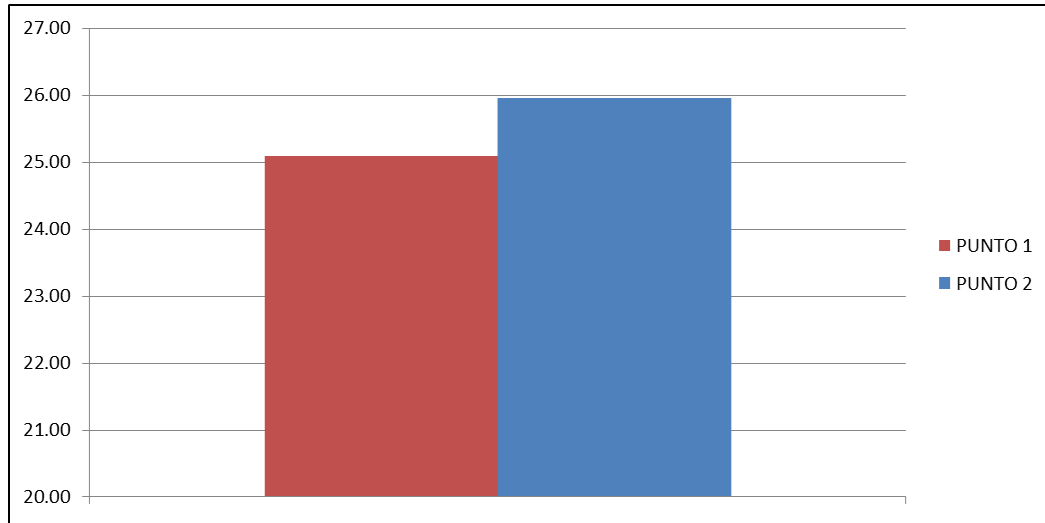
	PUNTO 1	PUNTO 2
CONTENIDO DE HUMEDAD %	25.09	25.96

Fuente: Autor.

Al tener los dos valores de humedad del ensayo (Véase Tabla 22), se realiza el promedio de los mismos, para de esta forma tener el valor del límite plástico en unidades de porcentaje.

Para dar un dato más gráfico en la Ilustración 52 se presenta un método de barras donde se evidencia el valor registrado por ensayo.

Ilustración 52: Gráfica de barras resultados limites plásticos.



Fuente: Autor.

A continuación, se reporta los resultados de Límite plástico de los 5 ensayos representativos de la muestra por el método de rollos de forma ascendente. Los registros de laboratorio se evidencian en el Anexo E y los cálculos de los ensayos en el Anexo F.

Tabla 21: Resumen de Resultados LP – Método de Rollos

ENSAYO No.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013
1	25
2	25.2
3	25.5
4	25.7
5	25.8

Fuente: Autor.

5.5. RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO CONO DE PENETRACIÓN LP – METODO 1

Para la comparación respectiva, se ejecutó 5 procedimientos acorde a las características y condiciones de cada Método (Anexo G). Para cada cabeza se elaboró 5 ensayos con intención de tener unos valores representativos al material analizado.

Tabla 22: Datos ensayo No. 1 británico –Método de cono.

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
PENETRACION (mm)	15	18	21	24
RECIPIENTE No.	35	22	28	16
PESO RECIPIENTE (Tara) (PT)	11.36	13.51	13.94	13.83
PESO RECIPIENTE + SUELO HUMEDO (P1)	30.1	31.04	30.77	30.26
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (P2)	25.12	26.17	25.91	25.32

Fuente: Autor.

El procedimiento de ensayo registra los valores reportados en la Tabla 22 repitiendo el procedimiento durante cuatro diferentes contenidos de humedad.

A continuación, como modelo se hace el cálculo de contenido de humedad del ensayo No. 1 correspondiente al método británico, para mostrar la ecuación usada (Ecuación 2) y los valores tomados para dicho cálculo. Este método de cálculo usado permitió determinar los valores en los 5 ensayos los cuales son registrados en la Tabla No 24.

Ecuación 2: Contenido gravimétrico de humedad.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{(P2 - P1)}{(P1 - PT)} \times 100$$

P1 = Peso recipiente + suelo húmedo.
P2 = Peso recipiente + suelo seco.
PT = Peso recipiente.]

Fuente: Autor.

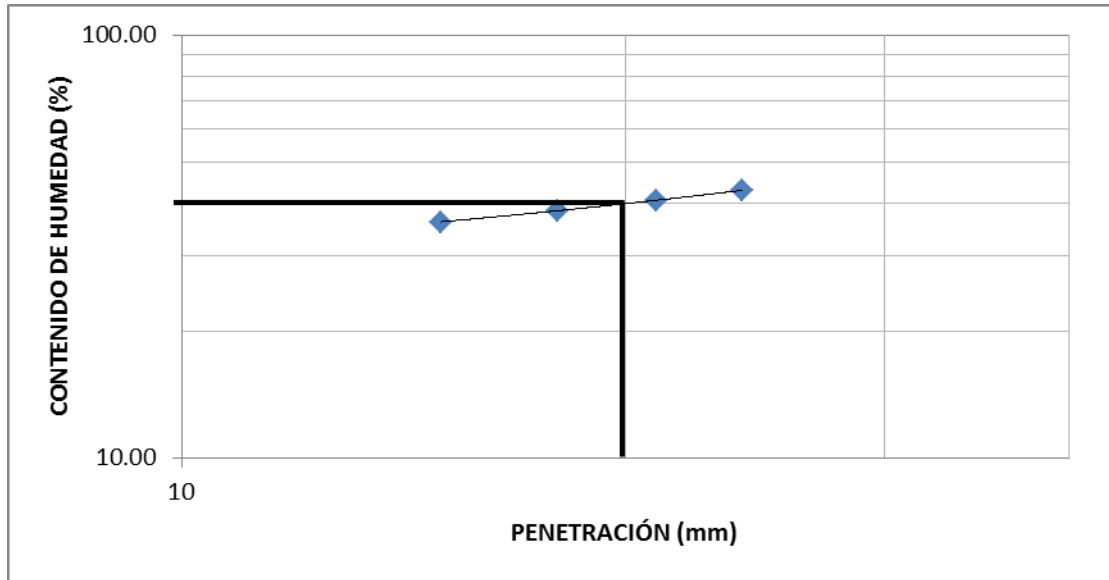
$$\text{Contenido de humedad Punto 1 (\%)} = \frac{(30.1 - 25.12)}{(25.12 - 11.36)} \times 100 = 36.19 \%$$

Tabla 23: Resultados de Humedad Ensayo No. 1 Británico– Método de cono.

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
CONTENIDO DE HUMEDAD %	36.19	38.47	40.60	42.99

Fuente: Autor.

Ilustración 53: Representación gráfica Ensayo No. 1 Cono Británico.



Fuente: Autor.

Según las profundidades registradas en la Tabla No. 1, se toma la lectura de contenido de humedad en la ordenada, respecto a la penetración deseada, en el caso de Método Británico la lectura de penetración se realiza a 20 mm (Ilustración 53). Al ser valores con poca precisión se ejecuta la fórmula de interpolación lineal para tener mayor precisión a la lectura deseada.

Ecuación 4: Interpolación Lineal.

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

Fuente: Autor.

A continuación, se muestra el modelo referente al valor deseado de 20 mm, ejecutando el cálculo de humedad de la muestra ensayada, usando la ecuación 3 de interpolación.

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = \frac{(20 - 18)}{(21 - 18)} * (40.6 - 38.47) + (38.47)$$

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = 39.89$$

Resultados de % de humedad cono británico a 20 mm de penetración (Véase Tabla 24).

Tabla 24: Resultados cono británico LP

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO BRITANICO
1	39.89
2	40.12
3	40.17
4	40.56
5	41.03

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 24) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método británico para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado en la Tabla 1.

Resultados de % de humedad cono canadiense a 20 mm de penetración (Véase Tabla 25).

Tabla 25: Resultados cono canadiense. LP

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO CANADIENSE
1	43.28
2	43.69
3	43.74
4	43.79
5	44.33

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 25) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados

en porcentaje del método canadiense para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado en la Tabla 1.

Resultados de % de humedad cono colombiano a 20 mm de penetración (Véase Tabla 26).

Tabla 26: Resultados cono colombiano LP.

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO COLOMBIANO
1	42.84
2	42.89
3	43.67
4	43.76
5	43.83

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 26) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método colombiano para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado en la Tabla 1.

Resultados de % de humedad cono indio a 25.4 mm de penetración (Véase Tabla 27).

Tabla 27: Resultados cono indio LP.

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO INDIO
1	34.91
2	35.46
3	35.92
4	36.01
5	36.86

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 27) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método indio para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado en la Tabla 1.

Resultados de % de humedad cono ruso a 10 mm de penetración (Véase Tabla 28).

Tabla 28: Resultados cono ruso LP

ENSAYO No.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO RUSO
1	26
2	27
3	27.5
4	27.8
5	28

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 28) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5 y en la columna derecha los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método ruso para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado en la Tabla 1.

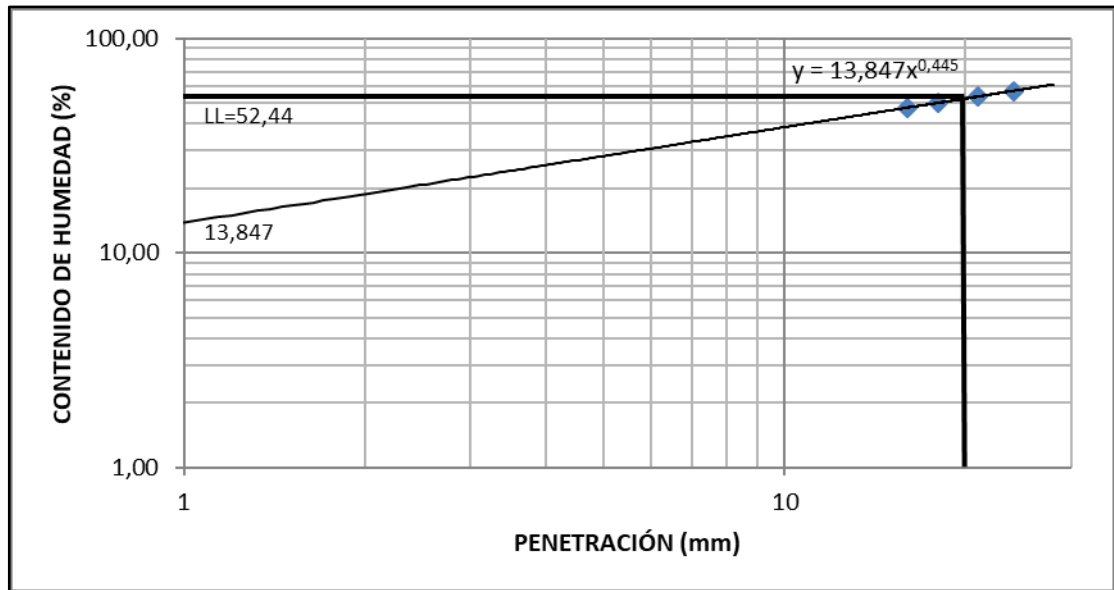
5.6. RESULTADOS DEL CAOLÍN MÉTODO CONO DE PENETRACIÓN LP METODO 2

Para continuar con la investigación y comparación o correlación de datos, realizamos una comparación con el método descrito en el libro Muni Budhu³⁸, se ejecutaron 5 procedimientos distintos acorde a las características y condiciones de cada Método. Para cada cabeza cónica en representación del país que lo implementó, se ejecutaron 5 ensayos con intención de tener unos valores representativos al material analizado.

A continuación, y según las profundidades registradas en la Tabla No. 13, se grafican los resultados, la lectura de contenido de agua en la ordenada, escala logarítmica, vs penetración en la abscisa, escala logarítmica, y la línea recta que mejor se ajuste (línea de estado líquido) se unen los puntos (Ilustración 54).

³⁸ Budhu, Muni. 2012. Soil Mechanics and Foundations (3 Ed). 2012.

Ilustración 54: Representación gráfica Ensayo No. 1 Cono Británico, Método 2.



Fuente: Autor.

Para determinar el límite de plástico, este se encuentra al proyectar la mejor recta hacia atrás para interceptar la ordenada del contenido de humedad y con la siguiente ecuación tomamos los datos de la gráfica.

Ecuación 5: Determinación de Límite plástico Feng 2000.

$$PL = C(2)^m$$

Fuente: Muni Budhu (2012), Soil Mechanics and Foundations (3 ed).

El contenido de agua a esta profundidad de penetración es C. Donde m es la pendiente (tomada como positiva) de la ecuación obtenida a través de la hoja de cálculo. A continuación, se muestra el modelo del Punto No. 1, ejecutando el cálculo del límite plástico de la muestra ensayada.

$$PL = 13.847 (2)^{0.445} = 18.85\%$$

Resultados de LP cono Británico Método 2.

Tabla 29: Ecuaciones lineales Método 2-LP, resultados cono británico.

ENSAYO No.	ECUACIÓN POTENCIAL	LP (%)
1	$y = 13,847x^{0,445}$	18.85
2	$y = 17,402x^{0,37}$	22.49
3	$y = 14,503x^{0,4288}$	19.51
4	$y = 14,171x^{0,439}$	19.21
5	$y = 14,34x^{0,4319}$	19.34

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 29) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5, en la columna central se expresan los valores registrados en las ecuaciones potenciales determinadas para cada ensayo y la columna derecha muestra los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método británico para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado.

Resultados de LL y LP cono Ruso Método 2.

Tabla 30: Ecuaciones lineales Método 2-LP, resultados cono ruso.

ENSAYO No.	ECUACIÓN POTENCIAL	LP (%)
1	$y = 9,4404x^{0,5243}$	9.44
2	$y = 13,117x^{0,4144}$	13.12
3	$y = 10,966x^{0,476}$	10.97
4	$y = 10,605x^{0,488}$	10.61
5	$y = 11,837x^{0,4643}$	11.84

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 30) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5, en la columna central se expresan los valores registrados en las ecuaciones potenciales determinadas para cada ensayo y la columna derecha muestra los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método ruso para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado.

Resultados de LL y LP cono Canadiense Método 2.

Tabla 31: Ecuaciones lineales Método 2, resultados cono canadiense, LP.

ENSAYO No.	ECUACIÓN POTENCIAL	LP (%)
1	$y = 18,589x^{0,3606}$	23.87
2	$y = 21,371x^{0,3191}$	26.66
3	$y = 14,796x^{0,4355}$	20.01
4	$y = 19,734x^{0,3452}$	25.07
5	$y = 16,037x^{0,4091}$	21.29

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 31) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5, en la columna central se expresan los valores registrados en las ecuaciones potenciales determinadas para cada ensayo y la columna derecha muestra los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método ruso para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado.

Resultados de LP cono Colombiano Método 2.

Tabla 32: Ecuaciones lineales Método 2, resultados cono Colombiano, LP.

ENSAYO No.	ECUACIÓN POTENCIAL	LP (%)
1	$y = 16,433x^{0,3879}$	21.50
2	$y = 14,55x^{0,4352}$	19.67
3	$y = 16,562x^{0,3888}$	21.68
4	$y = 14,984x^{0,4239}$	20.10
5	$y = 17,321x^{0,3737}$	22.44

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 32) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5, en la columna central se expresan los valores registrados en las ecuaciones potenciales determinadas para cada ensayo y la columna derecha muestra los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método colombiano para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado.

Resultados de LL y LP con Indio Método 2.

Tabla 33: Ecuaciones lineales Método 2, resultados con indio, LP.

ENSAYO No.	ECUACIÓN POTENCIAL	LP (%)
1	$y = 9,7331x^{0,4957}$	13.72
2	$y = 9,9553x^{0,4974}$	14.05
3	$y = 10,272x^{0,4904}$	14.43
4	$y = 11,886x^{0,4376}$	16.10
5	$y = 9,2515x^{0,5229}$	13.29

Fuente: Autor.

En el cuadro relación (Véase Tabla 33) se muestra en la columna izquierda la identificación del ensayo, teniendo como nomenclatura los valores numéricos del 1 al 5, en la columna central se expresan los valores registrados en las ecuaciones potenciales determinadas para cada ensayo y la columna derecha muestra los resultados de contenido de humedad expresados en porcentaje del método indio para la determinación del límite plástico usando el peso doble designado.

5.7. COMPARATIVO DETERMINACIÓN LP – METODO 1 Y MÉTODO DE ROLLOS

Con los valores registrados de humedad en los dos métodos a comparar (Penetración de cono de caída y método de rollos), se realiza una gráfica lineal aritmética donde se registran los 5 valores determinados por cada uno. La gráfica tiene el contenido de humedad del cono como ordenada y el contenido de humedad por método de rollos como abscisa. Esto permitió determinar la ecuación lineal entre ambos métodos y que tendencia lineal hay respecto a la similitud de los métodos.

5.7.1. Resultados comparativos de rollos y cono británico (LP Método 1).

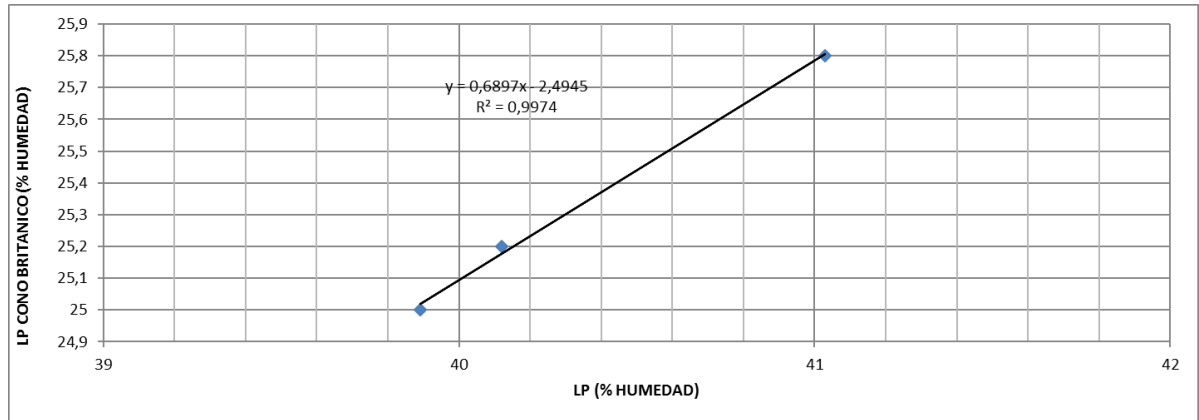
Tabla 34: Resultados de método de rollos y Cono Británico.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO BRITANICO
25	39.89
25.2	40.12
25.5	40.17
25.7	40.56
25.8	41.03

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 34, en una gráfica aritmética (Ilustración 55) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 55: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Británico



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 6 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.99 siendo un valor aceptable en la comparación del ensayo, pero con la observación de tomar solo 3 ensayos representativos por método.

$$\text{LP Cono Británico} = 0.6897 (\text{LP Rollos}) - 2.4945.$$

5.7.2. Resultados comparativos de rollos y cono canadiense (LP Método 1).

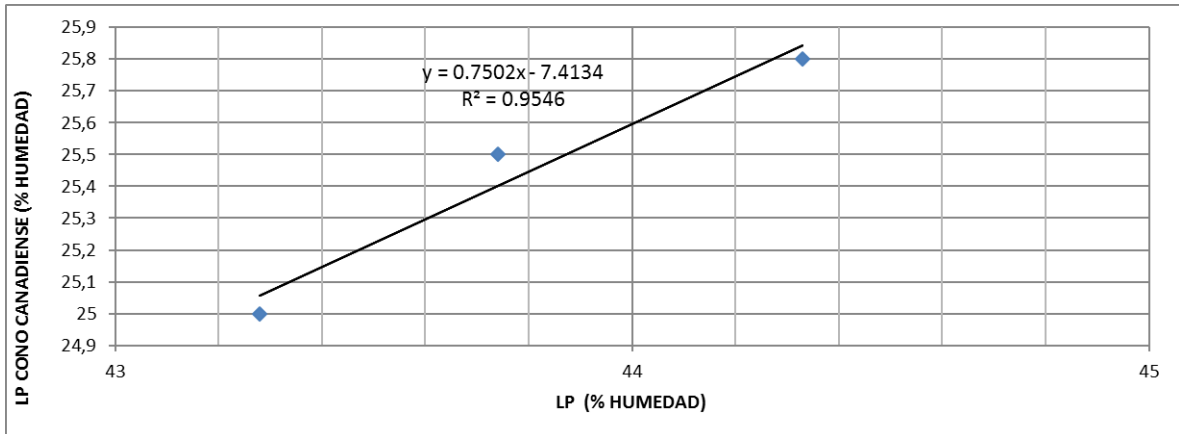
Tabla 35: Resultados de método de rollos y Cono Canadiense.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO CANADIENSE
25	43,28
25,2	43,69
25,5	43,74
25,7	43,79
25,8	44,33

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 35, en una gráfica aritmética (Ilustración 56) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 56: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Canadiense.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 6 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.95 siendo un valor poco confiable en la comparación del ensayo, adicional a que se tomó solo 3 ensayos representativos por método.

$$\text{LP Cono Canadiense} = 0.7502 (\text{LP Rollos}) - 7.4134.$$

5.7.3. Resultados comparativos de rollos y cono colombiano (LP Método 1).

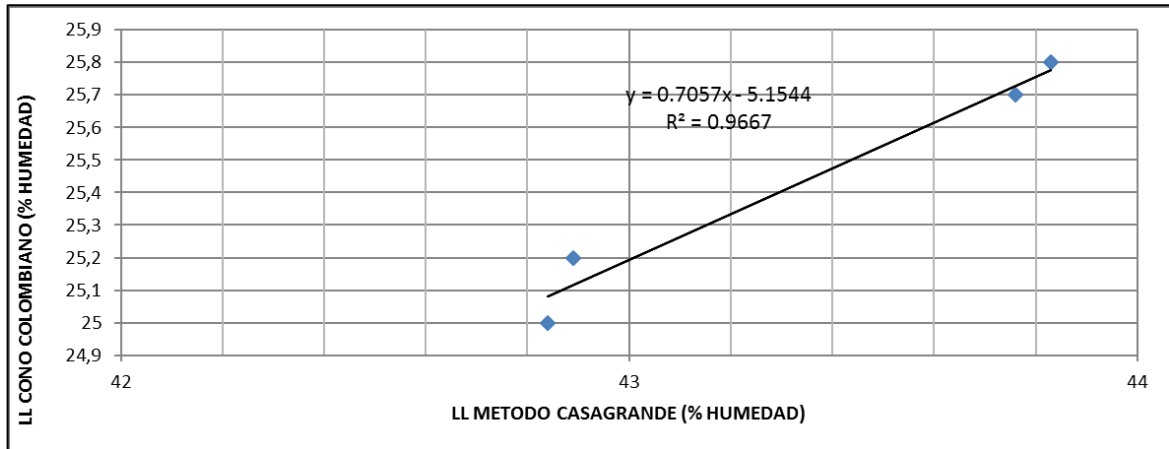
Tabla 36: Resultados de método de rollos y Cono Colombiano.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO COLOMBIANO
25	42,84
25,2	42,89
25,5	43,67
25,7	43,76
25,8	43,83

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 36, en una gráfica aritmética (Ilustración 57) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 57: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Colombiano.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 8 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.966 siendo aceptable en la comparación del ensayo, adicional a que se tomó 4 ensayos representativos por método.

$$LP \text{ Cono Colombiano} = 0.7057 (LP \text{ Rollos}) - 5.1544.$$

5.7.4. Resultados comparativos de rollos y cono indio (LP Método 1).

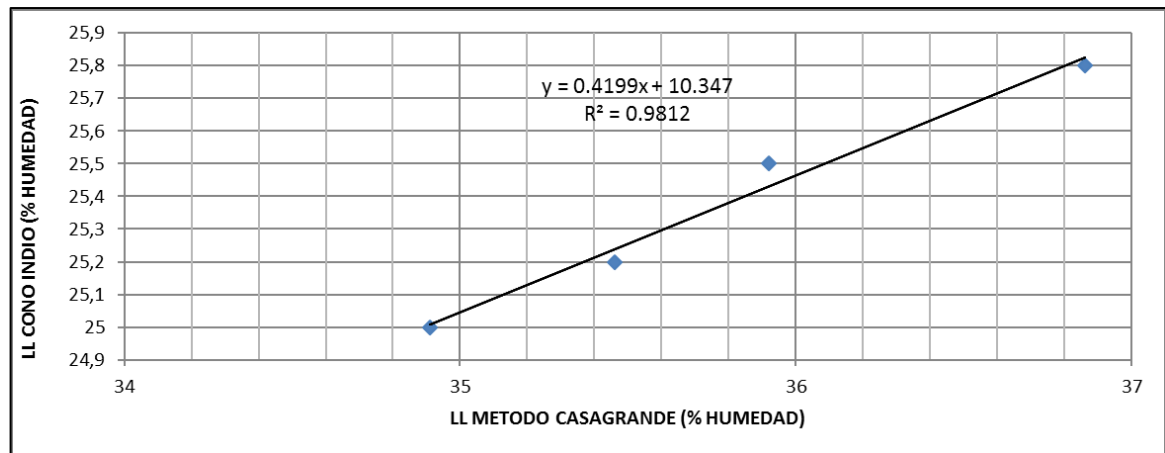
Tabla 37: Resultados de método de rollos y Cono Indio.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO INDIO
25	34,91
25,2	35,46
25,5	35,92
25,7	36,01
25,8	36,86

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 37, en una gráfica aritmética (Ilustración 58) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 58: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Indio.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 8 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.98 siendo aceptable en la comparación del ensayo, adicional a que se tomó 4 ensayos representativos por método.

$$LP \text{ Cono Indio} = 0.4199 (LP \text{ Rollos}) + 10.347.$$

5.7.5. Resultados comparativos de rollos y cono indio (LP Método 1).

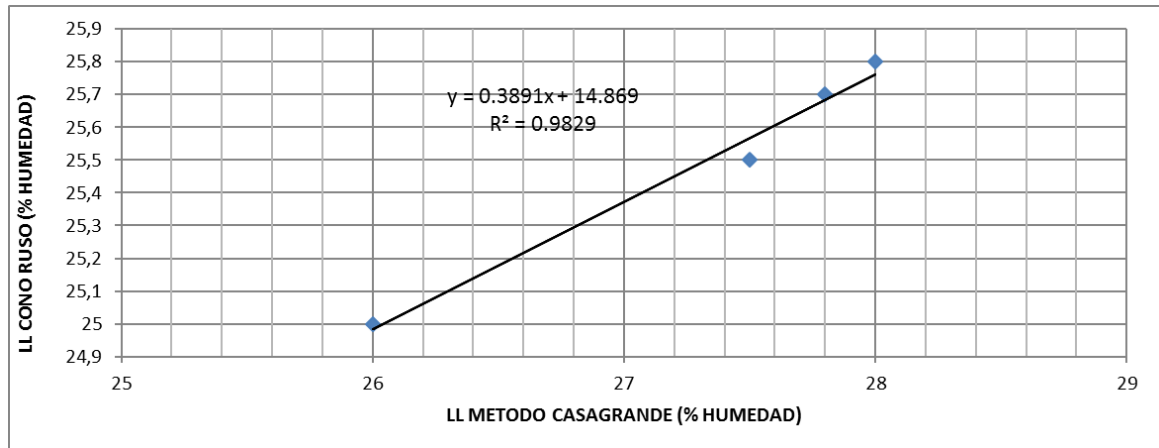
Tabla 38: Resultados de método de rollos y Cono Ruso.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO RUSO
25	26
25,2	27
25,5	27,5
25,7	27,8
25,8	28

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 38, en una gráfica aritmética (Ilustración 59) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 59: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Ruso.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 8 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.98 siendo aceptable en la comparación del ensayo, adicional a que se tomó 4 ensayos representativos por método (Anexo I).

$$LP \text{ Cono Ruso} = 0.389(LP \text{ Rollos}) + 14.869.$$

5.7.6. Resultados comparativos de rollos y Cono Británico (LP Método 2).

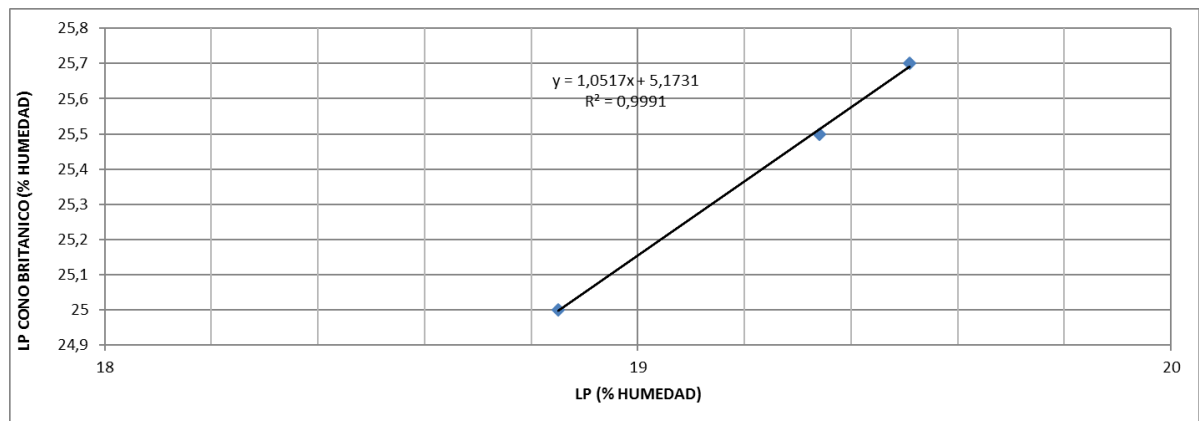
Tabla 39: Resultados de método de rollos y Cono Británico – Segundo Método.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO BRITANICO - SEGUNDO MÉTODO
25	18.85
25,2	19.21
25,5	19.34
25,7	19.51
25,8	22.44

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 39, en una gráfica aritmética (Ilustración 60) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 60: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Británico.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 6 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.999 siendo bajo al tener en cuenta solo 3 de los 5 ensayos realizados, en la comparación del ensayo tradicional.

$$\text{LP Cono Británico} = 1.0517 (\text{LP Rollos}) + 5.1731.$$

5.7.7. Resultados comparativos de rollos y cono canadiense (LP Método 2).

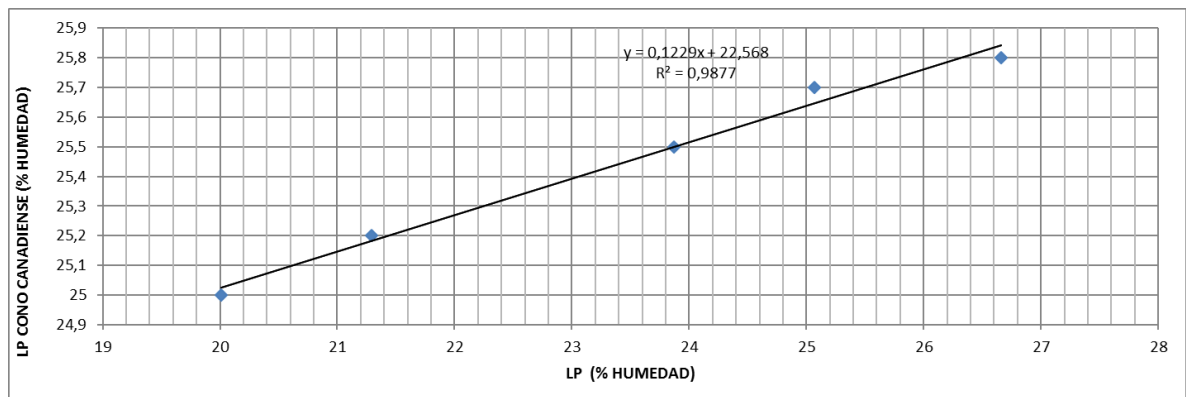
Tabla 40: Resultados de método de rollos y Cono Canadiense– Segundo Método.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO CANADIENSE - SEGUNDO MÉTODO
25	20.01
25,2	21.29
25,5	23.87
25,7	25.07
25,8	26.66

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 40, en una gráfica aritmética (Ilustración 61) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 61: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Canadiense.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 10 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.98 siendo un valor bueno en la comparación con el ensayo tradicional.

$$\text{LP Cono Canadiense} = 0.1229 (\text{LP Rollos}) + 22.568$$

5.7.8. Resultados comparativos de rollos y cono colombiano (LP Método 2).

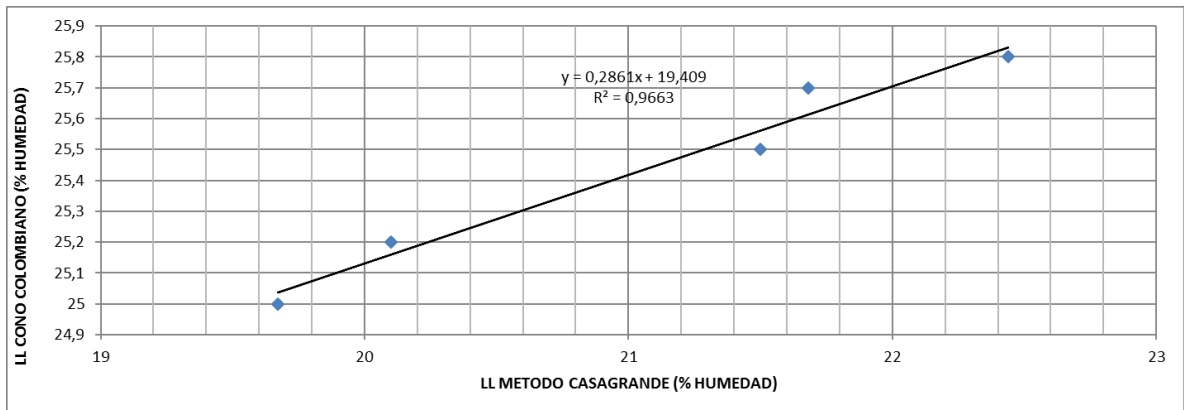
Tabla 41: Resultados de método de rollos y Cono Colombiano– Segundo Método.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO COLOMBIANO
25	19.67
25,2	20.1
25,5	21.5
25,7	21.68
25,8	22.44

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 41, en una gráfica aritmética (Ilustración 62) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 62: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Colombiano.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 10 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.966 siendo un valor bueno en la comparación con el ensayo tradicional.

$$LP \text{ Cono Colombiano} = 0.2861 (LP \text{ Rollos}) + 19.409.$$

5.7.9. Resultados comparativos de rollos y cono indio (LP Método 2).

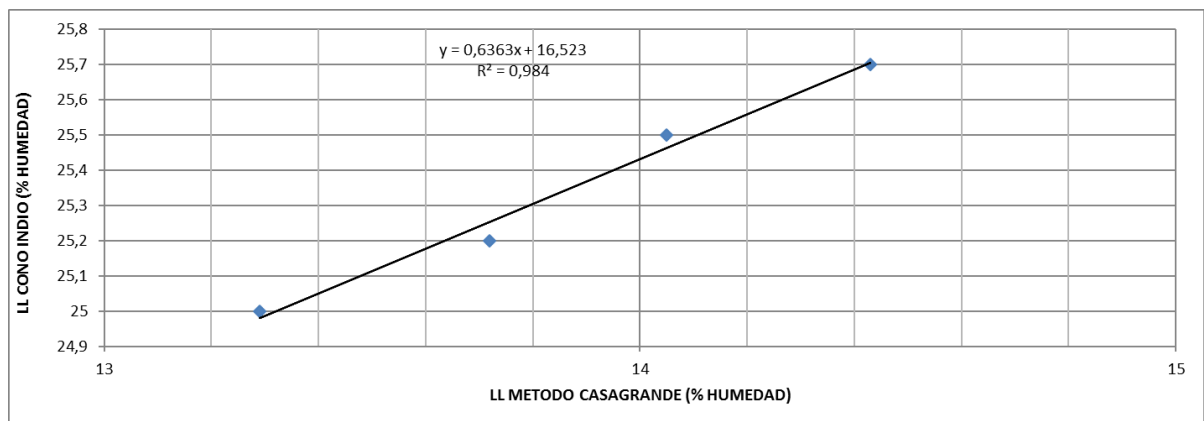
Tabla 42: Resultados de método de rollos y Cono Indio– Segundo Método.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO INDIO
25	13.29
25,2	13.72
25,5	14.05
25,7	14.43
25,8	16.1

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 42, en una gráfica aritmética (Ilustración 63) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos.

Ilustración 63: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Indio.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 10 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.98 siendo un valor muy bueno en la comparación con el ensayo tradicional.

$$LP \text{ Cono Indio} = 0.4199 (LP \text{ Rollos}) + 10.347.$$

5.7.10. Resultados comparativos de rollos y cono ruso (LP Método 2).

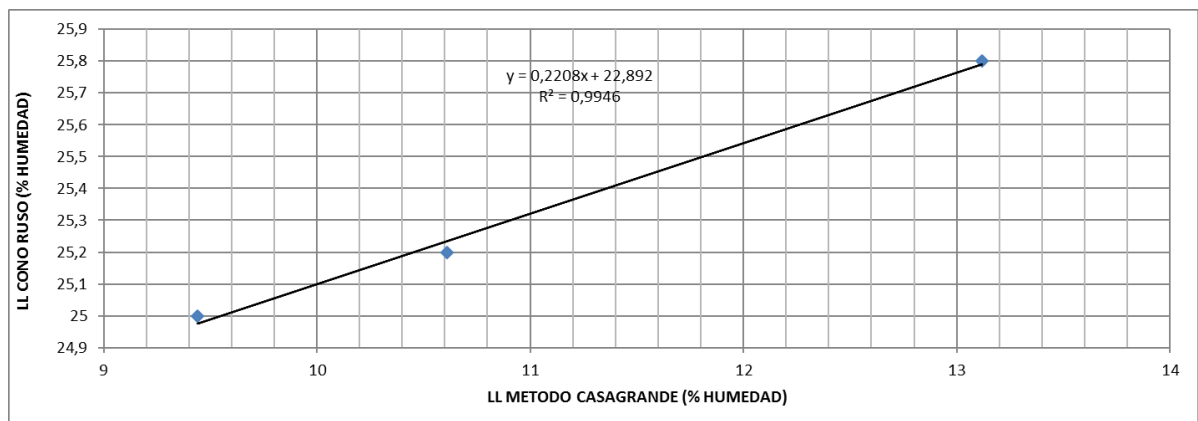
Tabla 43: Resultados de método de rollos y Cono Ruso– Segundo Método.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LIMITES PLÁSTICOS INV E 126:2013	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS CONO RUSO
25	9.44
25,2	10.61
25,5	10.97
25,7	11.84
25,8	13.12

Fuente: Autor.

Esta comparación se ingresan los valores de la Tabla 43, en una gráfica aritmética (Ilustración 63) ingresando en el eje de ordenadas los valores determinados por el método de cono y en el eje de las abscisas los valores conseguidos con el procedimiento de rollos (Anexo J).

Ilustración 64: Gráfica de tendencia lineal Método de rollos vs Cono Ruso.



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la gráfica generada, la ecuación de regresión lineal muestra valores representativos de los 10 ensayos que presentan una linealidad particular que permiten tener un coeficiente de determinación mayor a 0.95. El valor determinado es de 0.994 siendo un valor muy bueno en la comparación con el ensayo tradicional.

$$LP \text{ Cono Ruso} = 0.3891 (LP \text{ Rollos}) + 14.869.$$

6 ANALISIS DE RESULTADOS

Para poder comparar los datos registrados en cada método, es conveniente primero analizar los resultados presentados en las muestras del suelo caolín amarillo de esta investigación, mediante los diferentes métodos propuestos por los autores o normas, así como sus criterios de aceptación para determinar el límite líquido y el límite plástico respectivamente.

Debido a la dificultad, es prudente comenzar por los gráficos que poseen una línea de tendencia y su respectiva ecuación, para de esta forma mirar los resultados al hacer el comparativo y correlación entre los mismos.

6.1. ANALISIS DE RESULTADOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO DEL CAOLÍN AMARILLO

Para realizar el análisis respectivo, se tienen como métodos de estudio los usados en la Normativa Invias E 125:2013³⁹, la cual cuenta como funcionalidad del equipo Casagrande y la norma NTC 4630 046/12 que utiliza el equipo penetrómetro cono de caída, basado en las medidas estandarizadas en la norma británica BS 1377:1990, adicionando las características físicas que se implantaron en cada país para determinar las medidas y pesos representativos.

El resultado del ensayo realizado por Casagrande nos determinó un promedio de Limite liquido de 47.88% teniendo como menor valor el 47.6% y como mayor valor 48.5% generando valores representativos con una diferencia estadística menor al 1%. Estos resultados son estudiados acorde a los cinco ensayos ejecutados como representación de cada muestra.

Al tener cinco tipos de conos, a continuación, en la Tabla 44 se relaciona el valor promedio determinado en cada método utilizado, conforme a los ensayos realizados en representación del método.

Tabla 44: Valores promedio de LL -Conos de penetración

METODO DE CONO	VALOR PROMEDIO LL (%)
Británico	52.46
Canadiense	54.81
Colombiano	53.22
Indio	49.88
Ruso	45.96

Fuente: Autor.

³⁹ INVIAS. 2013. INV E-125:13 Determinación del límite líquido de los suelos [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

Teniendo en cuenta estos valores y haciendo un análisis inicial respecto a la homogeneidad que se consigue con el método de cono, se puede decir que acorde al valor promedio de 51.3% determinado entre los cinco conos, el método británico presenta un valor similar encontrando una diferencia de 1.16%, teniendo como ventaja adicional la normalización del equipo y sus características físicas.

Con los valores y graficas encontradas en ambos métodos, se establecieron correlaciones matemáticas, expresadas en ecuaciones lineales que permitieron estimar, cual método comparativo presenta un coeficiente de determinación (R^2) más cercano a 1, siendo este valor el que presenta mayor precisión y claridad del resultado. En la tabla 45 se relacionan los valores mencionados acorde a las comparaciones ejecutadas.

Tabla 45: Ecuaciones comparativas y R^2 para LL.

COMPARATIVO	ECUACIÓN R. LINEAL	VALOR R^2
Casagrande - británico	LL Cono Británico=0.8948 (LL Casagrande) + 0.9684.	0.9778
Casagrande - canadiense	LL Cono Canadiense = 1.0593 (LL Casagrande) – 10.11.	0.9947
Casagrande - colombiano	LL Cono Colombiano = 0.5614 (LL Casagrande) + 17.831.	0.973
Casagrande - indio	LL Cono Indio = 0.6986 (LL Casagrande) + 13.08.	0.9501
Casagrande - ruso	LL Cono Ruso = 0.41(LL Casagrande) + 34.14	0.9917

Fuente: Autor.

Lo que se buscó con la investigación fue encontrar que método presenta un menor margen de error. Así que, teniendo las ecuaciones de regresión lineal de cada comparativo, se evidencia que los métodos analizados presentan una linealidad buena al mostrar un coeficiente superior a 0.95.

Estudiando numéricamente el valor más cercano a 1, se pudo observar que, con el método canadiense, dio un valor de 0.99, sin embargo, no se logró tener en cuenta los cinco valores registrados en los ensayos por tener una dispersión alta, eliminando dos valores y generando la ecuación con tres. El método que mayor precisión presentó fue el método británico al tener un coeficiente de 0.978 con la totalidad de los ensayos ejecutados y generando un valor de corte en la intersección positiva.

Ante los resultados expuestos en la tabla 44, los métodos ruso e indio al tener lectura de humedad en una penetración diferente, no generan valores similares a los obtenidos por los otros conos, teniendo en cuenta que es el mismo material, en consecuencia no son resultados a tener en cuenta.

En otro análisis planteado más orientado a las condiciones ingenieriles, se puede decir que los valores registrados en los dos métodos son confiables, ya que basado en investigaciones realizadas por Y. Wasti y M.H Bezirci ⁴⁰, si el material analizado se encuentra en el rango de 1% a 100% de limite liquido los métodos estudiados tienden a tener valores con buena precisión y coherencia a la muestra ensayada.

6.2. ANALISIS DE RESULTADOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR EL LIMITE PLÁSTICO DEL CAOLÍN AMARILLO

Con intención de realizar el análisis pertinente, se tienen como método de estudio la Normativa Invias E 126:2013⁴¹, la cual cuenta como funcionalidad en el método de rollos y el equipo penetrómetro cono de caída, implementando sistemas de estudio como Feng 2000 y Freeman 2009⁴² donde usan las medidas estandarizadas del equipo referenciadas en la norma británica BS 1377:1990 y se acoplan unos pesos adicionales al cono, realizando un cálculo respecto a la gráfica generada.

Los resultados de los ensayos realizados por Rollos, nos determinó un promedio de Limite plástico de 25.5% teniendo como menor valor el 25.2% y como mayor valor 25.8%, generando valores representativos con una diferencia estadística menor al 0.6%. Estos resultados son estudiados acorde a los cinco ensayos ejecutados como representación de la muestra analizada.

Teniendo los valores referentes al método tradicional, se ejecutó dos clases de análisis matemáticos. En el método 1 se tiene como análisis el equipo de penetración con un cono de mayor peso, tomando la lectura a la misma penetración requerida para el Limite líquido. Este valor se determinó de forma directa o por interpolación en caso de requerir mayor precisión en el resultado. Para el método 2 se realiza el cálculo teórico, según lo expuesto por el señor Feng usando las gráficas de penetración de cono y la fórmula planteada.

En la tabla 46 se registran los valores determinados por el Método 1, evidenciando el valor promedio determinado de los cinco ensayos ejecutados por cada cono.

⁴⁰ **WASTI, Y. y BEZIRCI, M.H.** Determination of the consistency limits by the fall cone test. [En línea] <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t86-033#.We22GlvWxdh>, 1985, p.6.

⁴¹ **INVIAS. 2013.** INV E-126:13 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

⁴² **Freeman, Landris t Lee jr. and Reed B. 2009.** Penetrómetro de cono de doble peso para determinar de manera simultánea el LL y LP. 2009.

Tabla 46: Resultados promedio LP - Cono de penetración Método 1.

METODO DE CONO	VALOR PROMEDIO LP (%)
Británico	40.35
Canadiense	43.76
Colombiano	43.39
Indio	35.83
Ruso	27.26

Fuente: Autor.

Realizando un contexto a los valores registrados, se evidencia que los métodos rusos e indio al tener características de lectura diferente a lo estipulado en los tres métodos restantes, generan valores de Limite plástico muy dispersos a lo registrado en el promedio de las lecturas a 20 mm, influyendo de forma determinante en el resultado de ensayo y evidenciando que el método expuesto no genera confiabilidad en el resultado.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, entre los métodos británico, canadiense y colombiano se observa una homogeneidad muy alta entre los resultados, generando confiabilidad y aparentemente muestra que la lectura a 20 mm genera una tendencia lineal en los resultados.

A continuación, se relacionan las ecuaciones lineales generadas al comparar cada método con el sistema tradicional.

Tabla 47: Comparativo de Métodos de LP

COMPARATIVO	ECUACIÓN R. LINEAL	VALOR R²
Rollos- británico	LP Cono Británico = $0.6897(LP \text{ Rollos}) - 2.4945$	0.9974
Rollos- canadiense	LP Cono Canadiense = $0.7502(LP \text{ Rollos}) - 7.4134$	0.9546
Rollos- colombiano	LP Cono Colombiano = $0.7057(LP \text{ Rollos}) - 5.1544$	0.9667
Rollos- indio	LP Cono Indio = $0.4199 (LP \text{ Rollos}) + 10.347.$	0.9812
Rollos- ruso	LP Cono Ruso = $0.389(LP \text{ Rollos}) + 14.869$	0.9829

Fuente: Autor.

Se puede concluir en el método 1, que, según los gráficos generados en la correlación de los métodos, (Anexo H) hay una uniformidad bastante buena entre los mismos, mostrando que no se presentó una diferencia en la conclusión del valor a la hora de analizar las muestras; siendo un método confiable para los análisis realizados en la investigación.

Para el método No. 2 se tiene los siguientes valores de límite plástico:

Tabla 48: Resultados promedio LP - Cono de penetración Método 2.

METODO DE CONO	VALOR PROMEDIO LP (%)
Británico	19.88
Canadiense	23.38
Colombiano	21.07
Indio	14.31
Ruso	11.19

Fuente: Autor.

Los ensayos realizados con los conos indio y ruso muestran un contraste considerable con los tres métodos restantes, teniendo una diferencia del 9% entre sus lecturas y dando un margen de resultado de 27%, siendo un valor muy elevado para un análisis de cinco muestras.

Tabla 49: Comparativo de Rollos - Conos 2 Método.

COMPARATIVO	ECUACIÓN R. LINEAL	VALOR R²
Rollos- británico 2° Método	LP Cono Británico = 1.0517(LP Rollos) + 5.1731	0.99
Rollos- canadiense 2° Método	LP Cono Canadiense = 0.1229(LP Rollos) + 22.568	0.987
Rollos- colombiano 2° Método	LP Cono Colombiano = 0.2861 (LP Rollos) + 19.409.	0.966
Rollos- indio 2° Método	LP Cono Indio = 0.4199 (LP Rollos) + 10.347.	0.984
Rollos- ruso 2° Método	LP Cono Ruso = 0.3891 (LP Rollos) + 14.869.	0.994

Fuente: Autor.

Según los valores registrados, las ecuaciones planteadas presentan un coeficiente muy bueno cada uno de ellos, mostrando la eficiencia en el ensayo para generar sistemas de correlación con los métodos tradicionales.

Hay que tener en cuenta que los métodos británico y ruso realizaron la relación con tres valores, ya que inicialmente presentaban una diferencia a las demás lecturas, afectando el ajuste cercano al 1 en el coeficiente.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones dadas en esta investigación se establecen basadas en análisis, gráficas y teorías usadas para el suelo seleccionado. Por lo tanto, solo aplica para el caolín amarillo producto comercial.

7.1 CONCLUSIONES

La propuesta establecida en esta investigación permitió conocer y tener mayor claridad respecto al uso del penetrómetro de cono como ensayo de control de calidad de un material arcilloso, analizando sus propiedades físicas en cuanto a sus estados de consistencia (Limite plástico y limite líquido).

El método de ensayo por penetración, usando cabezas cónicas de diferentes características, es válido para la determinación de los límites de plasticidad y líquidos, ya que presentó una buena correlación entre los resultados obtenidos, mostrando homogeneidad y linealidad entre los valores registrados. Lo mencionado anteriormente no establece que las metodologías tradicionales o normalizadas sean menos confiables, pero si se plantea como una opción adicional para tener datos más precisos y coherentes, siendo criterio de comparación mas no rechazo, si se menciona en otras palabras, esto determina que el método sugerido no debe reemplazar los métodos normalizados, pero si puede ser un ensayo de acompañamiento al valor a conseguir.

En cuanto a la experiencia expuesta en la ejecución de los ensayos, se tiene muy presente la necesidad de tener un personal de laboratorio con suficiente competencia técnica, permitiendo tener una asesoría en la manipulación y consistencia en los valores arrojados, mostrando así una menor variabilidad entre los valores. Es necesario tener presente que para la aceptabilidad de los ensayos se debe tener en cuenta la Tabla 2 de la NTC 4630, donde aclara que la ejecución del ensayo debe ser individual, mostrando un rango de tolerancia para Límites plásticos de 2.6% y para límites líquidos de 2.4%. En los ensayos ejecutados se cumple lo mencionado teniendo una tolerancia de 1.16% como máximo valor.

Teniendo claro que los métodos postulados, son aceptables por la correlación tan similar que se presenta, el método británico presentó una metodología con valores muy lineales, lo que nos permite considerar que puede ser el método a seguir para una futura normalización del método expuesto, ajustando algunos valores acorde a los materiales analizados en nuestro país.

La precisión del resultado es un factor que depende de varios factores, entre los que se encuentra la influencia del operador. En el método de penetrómetro de

cono, se logran disminuir procesos manuales o valores respecto a criterio visual y generar datos exactos a lo reflejado en sus datos de medición.

Es claro que en los métodos tradicionales, el laboratorista no requiere gráficas para determinar los valores, a diferencia de este método donde se requiere adicionalmente ecuaciones de regresión lineal que no se tiene a la mano cuando el personal de laboratorio está ejecutando los ensayos. Desde este punto de vista la practicidad del ensayo pierde valor y genera dependencia a nuevos equipos tecnológicos.

Con lo mencionado anteriormente, se recomienda realizar análisis adicionales a los planteados en este proyecto, aumentando la cobertura de investigación con los suelos más usados en los procesos constructivos del país, permitiendo realizar un análisis más global de la información suministrada dando una difusión al método a implementar.

7.2 RECOMENDACIONES

Durante la ejecución de los ensayos se evidenciaron ciertos procesos los cuales se deben tener cierto cuidado para evitar ejecución errónea y no representativa de las muestras ensayadas.

- Los equipos usados en el laboratorio deben contar con una trazabilidad y control de verificación, calibración y mantenimiento permitiendo tener valores en las magnitudes con tal precisión que los valores registrados estén en incertidumbres mínimas.
- Al estar analizando muestras arcillosas, el contenido de humedad con el que se trabaja la muestra debe tener valores constantes, no permitiendo lapsos grandes de tiempo entre un ensayo y otro, permitiendo afectar directamente la cantidad de agua represada en la muestra, generando un secado rápido ante temperaturas ambientales y humedades relativas del laboratorio.
- Al ser un equipo desarmable las piezas o accesorios del equipo deben ser ajustados y validados en cada montaje de ensayo, permitiendo un control tanto del método a usar, como de la dirección de la penetración.
- En el proceso del ensayo los pasos establecidos en el método definen procesos críticos en el mismo, por ende es necesario tener cierto cuidado tanto en la altura de caída de cono, como la compactación de la muestra en el recipiente. Estos procesos mal ejecutados generan una desviación en el valor final del ensayo que no permiten conseguir valores representativos de la muestra.

BIBLIOGRAFÍA

Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Informes de la construcción. [En línea] <http://Informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>.

Journal of Engineering and Development. March 2008. A Proposed Approach for Plastic Limit Determination Using the Drop-Cone Penetrometer Device. March 2008. págs. ISSN 1813-7822. Vol. 1.

The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2017. [En línea] Abril de 2017. <http://www.ejge.com/People/Casagrande/Casagrande.htm..>

A. Sridharan and K. Prakash, Can Geotech J. Canada. 1998. Liquid limits and fall cones. 1998.

A. Mohajerani BE, ME, PhD, SMIEA ust. A suggested calibration for the cone penetrometer liquid limit.

ANIF. 2017. [En línea] Marzo de 2017. http://www.anif.co/sites/default/files/investigaciones/anif-cci-4gfinan1114_1.pdf.

Bora., Binu Sharma and Padma K. 2003. Plastic Limit, Liquid Limit and Undrained Shear Strength of Soil Reappraisal. J. Geotech. Geoenviron. 2003. págs. 774-777. Vol. 129.

Budhu, Muni. 2012. Soil Mechanics and Foundations (3 Ed). 2012.

DUROCOLOR. Ficha técnica del producto Caolín Procomin (Bulto). [En línea] <http://www.durocolor.com/productos/talcos-yesos-caolines/caol%C3%ADn-procomin-bulto-detalle.html>.

Fedesarrollo. Informe- Tendencia Económica. Informe Mensual de Fedesarrollo. No. 125. [En línea] <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/2948>.

Feng, Tao Wei. 2004. Uso de una pequeña cápsula y el penetrómetro de cono para determinar el límite plástico. 2004.

Freeman, Landris t Lee jr. and Reed B. 2009. Penetrómetro de cono de doble peso para determinar de manera simultánea el LL y LP. 2009.

Gitte Lyng Grønbech- Benjaminn Nordahl Nielsen & Lars Bo Ibsen Department of Civil Engineering – Aalborg University, Aalborg, Denmark. 2011. Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of casagrande and fall cone apparatus. 2011.

Hashim, Agus Setyo Muntohar and Roslan. 2002. Determinación del límite plástico usando el penetrómetro de cono. 2002.

ICONTEC. Método de ensayo para la determinación del límite líquido del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. [En línea] <https://tienda.icontec.org/producto/impreso-ntc-4630-metodo-de-ensayo-para-la-determinacion-del-limite-liquido-del-limite-plastico-y-del-indice-de-plasticidad-de-los-suelos-cohesivos/?v=42983b05e2f2..>

—. **1999.** NTC 4630 (ASTM D 4318) Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. . 1999.

INVIAS. 2013. INV E 125:13 Determinación del límite líquido de los suelos. [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

—. **2013.** INV E-106:13 Preparación de muestras de suelo por vía seca para análisis granulométricos de las constantes físicas. [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>.

—. **2013.** INV E-126:13 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. [En línea] 2013. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1..>

Luna, Andrés Sebastián Cevallos. 2012. Determinación del límite líquido y plástico de los suelos mediante el uso del Penetrómetro Cónico. 2012.

Mohajerani, Abbas. A suggested new calibration for the cone Penetrometer Liquid Limit.

Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. (09-2016). Aplicabilidad del Pentrómetro cónico en la determinación de límites. (09-2016).

Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 2011. Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. 2011.

Ricardo, Salvador y Carlos., Montero Juan. 2001. Manual de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos. 2001.

S.K, Haigh. 2013. The plastic limit of clays. [En línea] 2013. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.11.P.123..>

Tomás, R., Cano, M., García-Barba, J., Santamarta, J.C., Hernández, L.E., Rodríguez, J.A., Zamora, R. 2013. Prácticas de Ingeniería del Terreno. 2013.

WASTI, Y. y BEZIRCI, M.H. Determination of the consistency limits by the fall cone test. [En línea] <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t86-033#.We22GlvWxdh>>,1985, p.6.

ANEXOS

Anexo A - Registros de laboratorio LL.

Anexo B - Hoja de cálculo de LL – Casagrande.

Anexo C - Hoja de cálculo de LL - Conos de penetración.

Anexo D - Análisis comparativo de LL.

Anexo E - Registros de laboratorio LP.

Anexo F - Hoja de cálculo de LP – Rollos.

Anexo G - Hoja de cálculo de LP - Conos de penetración.

Anexo H - Análisis comparativo de LP - 1er método.

Anexo I - Hoja de cálculo de LP - 2do método.

Anexo J - Análisis comparativo de LP - 2do método.