

DISEÑO, ENSAMBLE Y CALIBRACION DE EQUIPO PARA LA OBTENCION DEL LIMITE LÍQUIDO Y PLASTICO MEDIANTE EL PENETROMETRO DE CONO MODIFICADO PARA LA NORMA BS-1377-2/1990

María Camila Rodríguez, Luis Benavides, Diego Gil
Universidad Piloto de Colombia
Bogotá, Colombia
Camilacarvajal09@hotmail.com

RESUMEN

El presente artículo se enfoca en el ensamble y calibración del penetrómetro de cono modificado, en justificar y aclarar la efectividad de este ensayo para así complementar el de Casagrande para halla los límites de Atterberg basándose en los posibles métodos alternos que se podrían usar para determinar el limite líquido y limite plástico de un suelo. Para esto se recolectaron muestras de suelo de caolín y arcilla, tratando de tener una muestra representativa de estos, para ensayarlos por los métodos tradicionales. Para obtener los límites de Atterberg es necesario hacer dos ensayos distintos uno para determinar el límite líquido y otro para obtener el limite plástico. Se quiere demostrar que empleando dos conos de diferente peso y con base en los resultados de los ensayos de límite líquido con el penetrómetro de cono se puede obtener el límite líquido y el índice de plasticidad en un solo ensayo. Esta forma de obtener los límites de Atterberg, reduce el tiempo de ejecución de los ensayos porque siendo el cono un ensayo estático en el que el operador tiene menor influencia, los resultados son más repetibles. En la elaboración del ensayo del límite líquido y el límite plástico por el penetrómetro de cono mediante la norma BS-1377-2/1990 se usara los suelos ya mencionados, en donde se considera la consistencia de un suelo que disminuirá o aumentara dependiendo de la cantidad de su componente líquido, una vez disminuida la humedad en el suelo arcilloso líquido, pasara a estado plástico. Además debido a la sensibilidad en la técnica por parte del operador al realizar el proceso para la obtención del límite líquido por el método de Casagrande y la cantidad de errores en la ejecución, mediante varios sondeos se probara que hacer los ensayos de limite líquido y limite plástico por el método del penetrómetro de cono es la mejor opción.

Palabras Clave: Penetrómetro De Cono – Índice De Plasticidad – Límite Líquido – Límite Plástico.

ABSTRACT

This article focuses primarily on the assembly and calibration of the penetrometer modified cone, to justify and clarify the effectiveness of this test in order to complement the Casagrande to found the Atterberg limits based on possible alternative methods that could be used to determine the liquid limit and plastic limit of a soil. For this soil samples were collected kaolin and clay, trying to have a representative sample of these, to test them by traditional methods. For Atterberg limits it is necessary to make two separate tests one to determine the liquid limit and one for the plastic limit. It wants to show that using two cones of different weight and based on the results of tests of liquid limit with cone penetrometer can obtain the liquid limit and the plasticity index in a single assay. This way to get Atterberg limits, reduces the runtime of the tests because the cone being a static test in which the operator has less influence, the results

are more repeatable. In developing the test liquid limit and plastic limit by cone penetrometer by BS-1377-2 / 1990 standard the aforementioned soil was used, where it is considered the consistency of a soil it will decrease or increase depending on the amount of the liquid component, decreased once the liquid moisture in clayey soil, happen to plastic state. Furthermore due to the sensitivity in operator technique to perform the assay of obtaining liquid limit by the method of assay Casagrande and the number of errors in execution, through various tests it was proven to do testing liquid limit and limit the plastic cone penetrometer method is the best choice.

Keywords: Penetrometer – Plastic Index - Limit Liquid - Plastic Limit.

INTRODUCCION

El límite líquido de un suelo puede ser determinado usando el penetrómetro de cono o el aparato de Casagrande (BS 1377:1990). Uno de los cambios principales introducidos en 1975 a la norma estándar británica BS 1377 que dice que el método preferido para hallar el límite líquido se realizaba con el penetrómetro de cono, provocando así que en 1990 se determinara en la norma estándar británica el penetrómetro de cono como la mejor alternativa. (BS 1377:1990).

El penetrómetro de cono se considera como el método más satisfactorio porque es un ensayo estático donde interactúan las fuerzas de corte del suelo, mientras que el ensayo de Casagrande introduce efectos dinámicos. (Harrison J.A 1988).

El ensayo de límite plástico confía totalmente en la habilidad del operador, y es subjetiva y completamente tentativa en sus resultados, por esta razón la norma estándar británica define un procedimiento estricto, bajándole veracidad y confiabilidad a este método, y a su vez al procedimiento de Casagrande para determinar el límite líquido debido a que depende totalmente del operador. (Harrison J.A 1988).

El rango de errores en los resultados reportados para el ensayo de Casagrande es bastante amplio, debido a que la mayoría de errores se presenta por la técnica usada por el operador.

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos fino; hay dos formas de obtener los límites, con la copa de

Casagrande y el Penetrómetro de cono los cuales serán empleados en este proyecto.

Una alternativa para determinar el límite líquido es usando el método del “Penetrómetro de Cono” que ya ha sido adoptado por algunos países como China, India, Brasil, Francia y los Estados Unidos. La norma británica (BS) en específico la (BS 1377-2) para ingeniería civil y las normas de Quebec (BNQ) 2501-092 incluyen la prueba de caída de cono (penetrómetro de cono) como el preferido.

La poca preferencia de los usuarios al usar los métodos convencionales para determinar los límites líquidos utilizando el aparato de Casagrande y el límite plástico haciendo rodar el material formando una masa elipsoidal del suelo han dado lugar a la investigación de la caída de cono mediante el penetrómetro. El uso del penetrómetro de cono para determinar el límite líquido durante varios años ha podido ser adoptada por diferentes países. Pero la propuesta para determinar el límite plástico mediante el penetrómetro de cono partiendo de un criterio de resistencia es bastante reciente, por eso se hará un estudio comparativo y crítico donde se usara el mismo aparato (Penetrómetro De Cono) pero con conos de diferentes pesos para la obtención de los límites de consistencia.

1. MATERIALES Y METODOS

Los estudios se realizaron en muestras de suelo extraídas a las fueras de Bogotá, de estas muestras se tomaron 30 especímenes de arcilla y 30 especímenes de caolín para hallar su límite líquido, límite plástico e índice

de plasticidad mediante los ensayos de penetrómetro de cono y el aparato de Casagrande.

El límite líquido es el contenido de humedad determinado de manera empírica en el cual el suelo pasa de un estado líquido a un estado plástico. Este método es ampliamente usado en Inglaterra y Asia, el ensayo está nombrado en la norma (Británica BS 1377-2:1990)

Finalizando esta investigación lograremos complementar los estudios ya realizados sobre el penetrómetro de cono, se dará a conocer esta nueva técnica de ensayo para diferentes suelos, y las ventajas para la determinación de los límites de Atterberg.

1.1 Procedimiento

Para la elaboración de los laboratorios se realizaron 2 pruebas convencionales (I.N.V.E-125 ASTM D 4318) para la determinación del límite líquido de los suelos y (I.N.V.E-126 ASTM D 4318) para la determinación del límite plástico comparándolas con el ensayo de penetrómetro de cono (BS-1377-2/1990) para la determinación de límite líquido y plástico por un solo método.

1.1.1 I.N.V.E-125 ASTM D 4318

El aparato de Casagrande que se utilizó para la elaboración de los ensayos tenía una base dura lo cual da valores menores que utilizando la base blanda. Se tomaron muestras de aproximadamente 100 gr que pasan por el tamiz No 40, se colocó una de las muestras en una vasija y se le agregó 20 ml de agua destilada, se amasa con la espátula de manera repetitiva y se le fue adicionando agua en incrementos de 1 a 3 ml hasta que se consiguió una pasta uniforme de consistencia dura. (Norma ASTM 4318-05 I.N.V.E 125).



Fig. 1- Mezcla de la muestra a estudiar
Fuente de elaboración propia

Se coloca una cantidad de muestra adecuada en la copa de Casagrande y se deja una profundidad de 10 mm en su máximo espesor, se divide el suelo con el ranurador en la línea central de modo que se forme una ranura limpia y de dimensiones apropiadas.



Fig. 2 - Copa de Casagrande con material a estudiar. Fig. 3 - Copa de Casagrande y ranurador



Fig. 4 - Copa de Casagrande, división Fig. 5 - Muestra de cómo debe quedar del suelo en 2 mitades por el ranurador
Fuente de elaboración propia

Se levanta y golpea la copa girando la manija hasta que las 2 mitades de la muestra se unan en el fondo de la ranura. Se sacó una muestra aproximadamente del tamaño de la espátula, tomado de ambas mitades y en ángulo recto incluyendo la ranura y lo colocamos en un recipiente.



Fig. 6 - Se gira manilla del aparato Fig. 7 - Se detiene cuando las 2 mitades de Casagrande se unen



Fig. 8 - Muestra que se toma para la culminación del laboratorio
Fuente de elaboración propia

Se pesó y anotó el valor. Se colocó la muestra extraída dentro del horno hasta tener una masa constante, se vuelve a pesar y se anotan los datos.

1.1.2 I.N.V.E-126 ASTM D 4318

Para hallar el límite plástico se tomaron 20gr de las muestras que paso por el tamiz No 40, se amasa con agua destila hasta que se pudo formar una esfera con el material.



Fig. 9 – Mezcla para laboratorio límite plástico Fig. 10 – Material mezclado en totalidad



Fig. 11 – Muestra amasada para forma esfera con material Fuente de elaboración propia

Se toma una parte de la muestra y se forma una masa elipsoidal de diámetro de 3mm, se rueda la muestra tomada entre la palma de la mano o los dedos y una superficie plana, formando así un rollo uniforme en toda su longitud.



Fig. 12 –Masa elipsoidal de 3mm de diámetro Fig. 13 – División de la masa en partes Fuente de elaboración propia

Cuando el rollo de 3 mm se divide en 6 u 8 trozos, se juntan los trozos se amasan y se repite el procedimiento anterior las veces que sea necesario hasta que el rollo de 3mm de diámetro se cuarte y desmorone.

1.1.3 BS-1377-2/1990

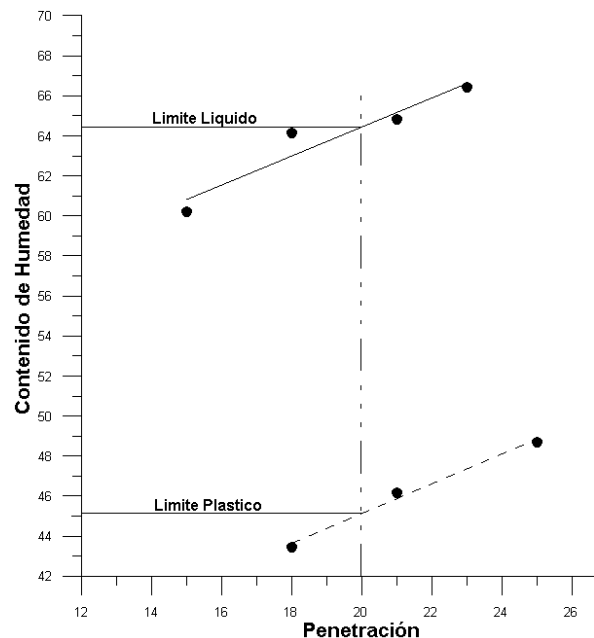
El procedimiento del penetrometro de cono nos dice que el suelo está en su límite líquido cuando un cono de 80gr de masa y ángulo de 30°, cae durante 5 segundos y penetra 20 mm de suelo (Mohammed Hussein 2008).



Fig. 14 – Penetrometro de cono Fuente Elaboración propia

El penetrometro de cono es uno de los métodos más usados en Inglaterra, y de los menos usados y estudiados en América Latina (Prakash K 2006), lo que se quiere lograr con esta investigación es el apoyo por medio de la cantidad de ensayos realizados y en los resultados para así dejar un precedente y apoyar el resto de investigaciones y demostrar que el penetrómetro de cono es una buena alternativa para hallar los límites de consistencia.

La popularidad del penetrometro de cono ha incrementa como método para determinar el límite líquido, tomando en cuenta que el penetrometro es aplicable para muestras tanto inalteradas como remoldeadas mientras que el método de Casagrande solo se aplica para muestras remoldeadas.



Gráfica. 1 – Contenido de humedad frente a penetración tanto de límite líquido como límite plástico del Penetrometro de cono Fuente Elaboración propia

Según la Grafica 1 se puede observar que la separación vertical en términos de contenido de agua, w , es lineal en el límite plástico y el límite líquido, por lo que podemos proponer que el método del penetrometro de cono es un método confiable para determinar el límite plástico. El procedimiento usando el penetrometro de cono que ofrezca valores simultáneos de LL y LP tendría menor influencia de juicio del operador y sería más eficiente (económicamente) que los dos procedimientos separados. (Cevallos 2012).

1.2 Materiales

1.2.1 Caolín

El caolín a utilizar para este análisis es de consistencia suelta, color amarillo, seco, y de alta plasticidad.

1.2.2 Arcilla

La arcilla a utilizar para este análisis fue tomada de Cajicá con una profundidad de 2.00 m / 2.50 m, esta arcilla es limosa de color gris, consistencia blanda, alta plasticidad y húmeda.

1.3 Otros Ensayos

1.3.1 Hidrometría

Para la elaboración de este ensayo se utilizaron las normas INV-E y ASTM. (INV-E-124-13 y ASTM D 422)



Fig. 15, 16 – Elaboración de laboratorio de hidrometría
Fuente de elaboración propia

1.3.2 Gravedad Especifica

Para la elaboración de este ensayo se utilizaron las normas INV-E y ASTM. (INV-E-128 y ASTM C 127)

GS ARCILLA: 2,61

GS CAOLIN: 2,65



Fig. 17, 18 – Elaboración de laboratorio de gravedad específica
Fuente de elaboración propia

1.4 Estudios Realizados

En los Estados Unidos, la copa de Casagrande (Norma ASTM D4318-10) es el principal medio para la medición de dos de los límites de consistencia (límite líquido, LL; límite plástico, PL). Aunque estos procedimientos tienen los beneficios de un significativo registro histórico de uso, que puede ser difícil para los nuevos usuarios realizar correctamente (Bowles 1992).

Por otra parte, la repetitividad del ensayo puede ser un problema. Los resultados de un informe en el Reino Unido demuestra que la extensión de los límites líquidos ($LL_{max} - LL_{min}/LL_{promedio}$) por medio de la copa de Casagrande de tres suelos a través de múltiples laboratorios pueden variar de 30% - 45%.

Estas cuestiones son potencialmente exacerbadas por los efectos de la copa de Casagrande en las mediciones (por ejemplo, la tasa de rugosidad y dureza pueden variar con el uso), por la dinámica la naturaleza de la prueba, por ejemplo, los suelos de baja plasticidad pueden licuarse en la taza en lugar de fluir plásticamente. Aunque esta prueba tiene una larga historia de uso exitoso, sus resultados no son perfectos. (J. David Frost 2001).

La prueba del penetrómetro de cono proporciona un medio alternativo para medir el LL y LP de los suelos y ya se refiere por algunos investigadores. La caída de cono se beneficia de una base teóricamente firme, un mayor grado de independencia del operador, y la capacidad de medir tanto LL y LP (o, índice de plasticidad, IP) con un único dispositivo. Además, el penetrómetro de cono también puede ser usado para determinar la resistencia al corte no drenado en un

contenido de agua determinado, y la viscosidad de las arcillas, todas simultáneamente con los límites de Atterberg. En un solo laboratorio. (Sherwood y Ryley 1970).

Estudio de múltiples usuarios, encontró que ocho de los usuarios que determinaron el LL de tres suelos, obtuvieron que la propagación de la Copa Casagrande oscilara entre 5% - 23% pero solo del 3% - 11% para el cono de caída.

Sin embargo, el cono de caída tiene varios inconvenientes: (1) la prueba de caída de cono no siempre se traduce en el mismo límite líquido como una prueba en copa de Casagrande para el mismo material; sin embargo, los límites líquidos medidos son uniformemente inconsistentes (Littleton y Farmilo 1977; Wasti 1987); la inversión económica en el aparato es más para una prueba de caída de cono que una prueba de Casagrande; y la rugosidad superficial y la punta del cono puede también afectar la penetración de cono (Hasbo 1957; Housby 1982), por lo tanto el desgaste de la maquina sigue siendo un problema.

El uso de una prueba de caída de cono para determinar la viscosidad de los suelos arcillosos con un índice de liquidez de menos de uno. La herramienta convencional para determinar la viscosidad de los suelos de arcilla en un viscosímetro. Pero, los viscosímetros son apropiados solo para determinar la viscosidad de los suelos para contenidos de agua mayores que el límite líquido.

Los resultados del estudio muestran que la prueba de caída de cono es adecuada para determinar la viscosidad de corte de los suelos arcillosos. Excelentes correlaciones (coeficientes de regresión $>0,95$) se encontraron entre la profundidad final de penetración y la profundidad de equilibrio dinámico, y entre el índice de liquidez y la viscosidad.

Los eventos naturales tales como deslizamientos de tierra y avalanchas de lodo y geotécnica aplicaciones tales como pilotes y

penetrometro de cono, es un gran problema de deformación que implican flujos de suelos. Para evitar dichos problemas se requiere información sobre las propiedades del suelo después de la falla. Una de estas propiedades es la viscosidad. El conocimiento de la viscosidad nos permite estudiar las características de flujo y la respuesta de la fluencia de los suelos.

Mahajan y Budhu (2009) hicieron un ensayo del cono que lo hace como una herramienta practica para determinar la viscosidad de arcillas en un LL de menos uno. Sin embargo, se ha llevado a cabo una única serie de pruebas de caída del cono en caolín para determinar su viscosidad. Así, la validez del uso de las pruebas de caída del cono como una herramienta practica para determinar la viscosidad de las acillas para $LL < 1$ es desconocida. El propósito de este trabajo es evaluar la eficacia de la caída del cono de forma rutinaria para determinar la viscosidad de las arcillas para $LL < 1.5$.

Koumoto y Housby (2001) realizaron un estudio teórico de la prueba de la caída del cono con especial énfasis en los efectos de rugosidad del cono, la geometría del cono, la velocidad de deformación, y el suelo alrededor del cono en la resistencia del no drenaje al corte. Esto se puede explicar por la modificación del factor de la caída de cono.

Mahajan y Budhun (2009) asume que el estado post-crítico de un suelo puede ser tratado como si el suelo fuera de un fluido visco-plástico. Suponiendo que la resistencia no drenada al corte por encima de las cizalladura estática, la fuerza se debe a la resistencia viscosa, también mostraron que es posible deducir la viscosidad del suelo de la prueba de la caída de cono. Además, analizan la influencia de la elección de un modelo de flujo viscoso para interpretar los resultados de las pruebas de la caída del cono y determinar la viscosidad. Ellos están de acuerdo con Locat y Demers (1988) que el modelo de flujo viscoso propuesto por Casson (1959), llamado líquido Casson, es una buena opción para capturar la viscosa respuesta de arcillas insensibles. El procedimiento

realizado en este estudio es similar al convencional de la prueba de caída de cono descrito por Hansbo (1957; y Wood(1978); Wood(1985), y Mahajan y Budhu (2009).

Feng (2000; 2001) hizo una contribución importante para el método de la caída de cono en la cual se basa en una relación lineal entre el logaritmo de cono de penetración contra el logaritmo de contenido de agua en el intervalo del límite líquido y límite plástico, la pendiente de la curva de flujo, que se denota como m , se define entonces como:

$$m = \frac{\Delta \log w}{\Delta \log d}$$

Como la profundidad de penetración en el LL, es 20 mm y la profundidad de penetración en el LP, es de 2 mm, se puede calcular que:

$$m = \log \frac{LL}{LP}$$

Por lo tanto el índice de plasticidad IP, puede calcularse de la siguiente formula:

$$IP = LL (1 - 10^m)$$

Donde se muestra que el índice de plasticidad es una función tanto de límite líquido y la pendiente de la curva de flujo.

2. Análisis y Resultados

Al proponer un nuevo método para determinar los límites de consistencia de los suelos, según la referencia e investigaciones analizadas, se incentiva a proponer la aplicación del ensayo del penetrómetro de cono utilizado en Europa pero ahora usando suelos de nuestro país.

Ensayo de Casagrande					
	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO	
	35	26	17	PRUEBA 1	PRUEBA 2
NUMERO DE GOLPES					
RECIPIENTE	11	21,00	78	72	10
PESO RECIPIENTE	16,01	16,55	14,88	15,26	15,06
PESO RECIPIENTE + SUELO HUMEDO	39,25	40,33	40,88	25,14	23,99
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	31,66	32,32	31,66	23,21	22,19
CONTENIDO DE HUMEDAD	48,50	50,79	54,95	24,28	25,25

Tabla 1 Datos Obtenidos para Limite Liquido por el método de Casagrande.

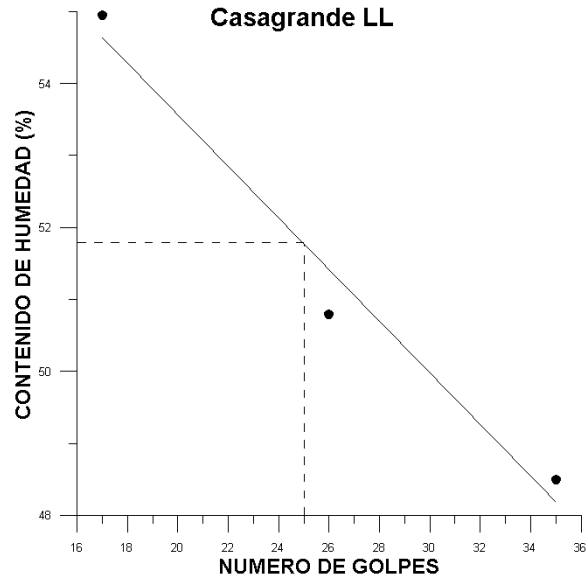
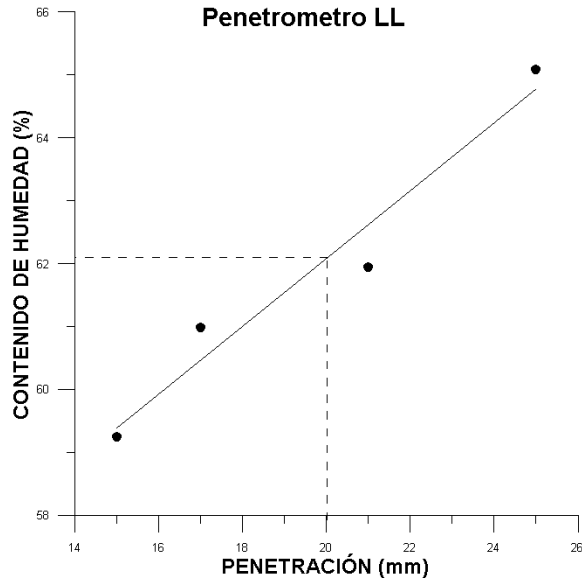


Fig. 2 – Gráfica para hallar el límite líquido mediante el método de Casagrande (Contenido de humedad frente a Penetración)
Fuente Elaboración propia

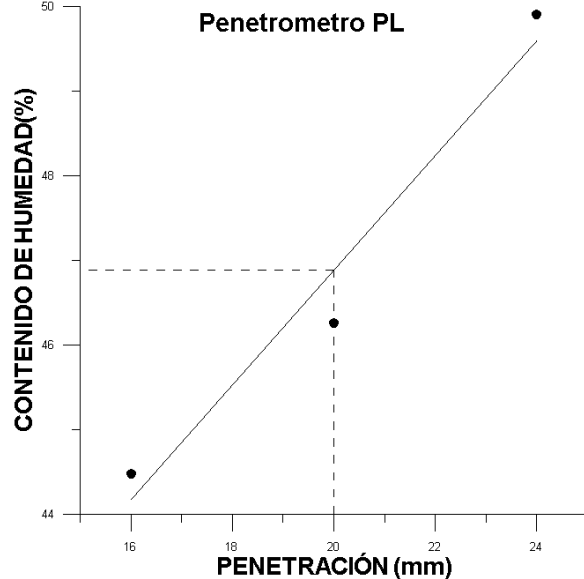
En este ensayo por el método de Casagrande podemos evidenciar la manera de hallar el límite líquido por este método, donde tenemos una línea de tendencia y se hace el corte en 25 golpes como indica la norma reflejando el punto en el eje Y lo que nos indicara el contenido de humedad óptimo para la muestra; de igual manera vemos los datos para la calcular el limite plástico en el cual tomamos los 2 datos del contenido de humedad los sumamos y dividimos en dos y de esta manera obtenemos tanto limite líquido y limite plástico de manera convencional, demostrando que en estos 2 ensayos el operador tiene mucha influencia y hay que confiar totalmente en su habilidad.

Ensayo Penetrometro LL				
	HUMEDAD			
	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
PENETRACION	15	17	21	25
RECIPIENTE	8	9	12	14
PESO RECIPIENTE	28,99	24,75	23,19	27,02
PESO RECIPIENTE + SUELO HUMEDO	39,66	40,22	40,21	41,20
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	35,69	34,36	33,70	35,61
CONTENIDO DE HUMEDAD	59,25	60,98	61,94	65,08

Tabla 2. Datos Obtenidos para Limite Liquido por el ensayo del Penetrómetro de Cono



Gráfica. 3 – Grafica para hallar el límite líquido mediante el método de Penetrometro de Cono (Contenido de humedad frente a Penetración)
Fuente de Elaboración propia



Gráfica. 4 – Grafica para hallar el límite plástico mediante el método de Penetrometro de Cono (Contenido de humedad frente a Penetración)
Fuente de elaboración propia

Observando la Gráfica 3 tenemos una línea de tendencia la cual hace corte en 20 mm donde se evidencia la penetración de la muestra, esta se refleja en el eje Y se tiene como resultado el contenido de humedad óptimo para la muestra; para la obtención del límite plástico se realiza el mismo proceso pero variando el cono con el que se hace el ensayo, que en este caso pesa 3 veces más que el usado para el límite líquido.

El extenso uso de los límites de Atterberg, principalmente en la clasificación de los suelos finos, su uso tanto en conjunto como individual nos ayuda a correlacionar el comportamiento ingenieril del mismo junto con otras propiedades como el esfuerzo de corte, comprensibilidad, variación de volumen. (Cevallos S 2012). En este análisis de resultados se evidencia la determinación de las características de las muestras obtenidas mediante los ensayos propuestos, donde se observa las características plásticas y no plásticas de la arcilla de la sabana y el caolín.

ENSAYO PENETRÓMETRO LP			
	HUMEDAD		
	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3
PENETRACION	16	20	24
RECIPIENTE	7	11	33
PESO RECIPIENTE	25,44	25,67	26,06
PESO RECIPIENTE + SUELO HUMEDO	40,22	39,55	40,57
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	35,67	35,16	35,74
CONTENIDO DE HUMEDAD	44,48	46,26	49,90

Tabla 3. Datos Obtenido para hallar el Límite Plástico por medio del Penetrómetro De Cono

Los estudios se realizaron en dos suelos diferentes tomados de la sabana de Bogotá. En la tabla 4 y 5 se observan las propiedades de los suelos evidenciando que las muestras pertenecen al grupo CH, los límites de consistencia obtenidos utilizando el método de Casagrande y el Penetrometro de cono para arcilla y caolín respectivamente. En las Gráficas 5 y 6 se observan los resultados de los estudios realizados en los suelos arcillosos tanto para límite líquido como para límite plástico, de igual manera en las gráficas 7 y 8 los resultados para los suelos de caolín.

PROPIEDADES DE LA ARCILLA ESTUDIADA

Muestra	Clase de suelo unificada	G_s	Límites de consistencia, %					
			Método de Casagrande			Método de Cono		
			LL	PL	IP	LL	PL	IP
1	CH	2,61	59	26,3	32,7	63,608	27,177	36,431
2	CH	2,61	62	29,3	32,7	62,686	22,559	40,128
3	CH	2,61	59	29,1	29,9	67,159	24,990	42,169
4	CH	2,61	53	28,2	24,8	67,728	24,860	42,868
5	CH	2,61	60	29	31	68,28	23,524	44,757
6	CH	2,61	52,8	21,1	31,7	65,694	22,558	43,136
7	CH	2,61	55,3	27,4	27,9	67,033	23,411	43,623
8	CH	2,61	52,6	21,4	31,2	71,803	23,484	48,319
9	CH	2,61	56,3	28	28,3	69,255	23,925	45,330
10	CH	2,61	58	27	31	67,032	22,870	44,162
11	CH	2,61	52	23,2	28,8	63,144	24,801	38,344
12	CH	2,61	58	25,7	32,3	65,853	24,613	41,241
13	CH	2,61	54	24,7	29,3	64,903	24,331	40,572
14	CH	2,61	51,1	25,9	25,2	64,705	23,265	41,440
15	CH	2,61	51,4	25,5	25,9	64,419	24,291	40,129
16	CH	2,61	55,2	23,9	31,3	64,288	23,907	40,382
17	CH	2,61	46,5	24,9	21,6	47,029	30,411	16,618
18	CH	2,61	51,5	25,2	26,3	63,788	23,329	40,459
19	CH	2,61	49,5	23,6	25,9	63,256	23,665	39,592
20	CH	2,61	52,7	23,6	29,1	63,938	24,838	39,101
21	CH	2,61	55,5	23,4	32,1	62,652	24,690	37,963
22	CH	2,61	52,6	24,5	28,1	64,20	23,459	40,741
23	CH	2,61	51,5	24,8	26,7	62,083	23,440	38,643
24	CH	2,61	51,1	25,2	25,9	64,05	24,150	39,901
25	CH	2,61	52	23,7	28,3	66,79	23,702	43,088
26	CH	2,61	51,6	26,2	25,4	67,834	23,312	44,522
27	CH	2,61	51,3	23,8	27,5	64,563	23,853	40,711
28	CH	2,61	51,3	24,7	26,6	62,198	23,930	38,269
29	CH	2,61	51,8	24,7	27,1	64,44	22,564	41,876
30	CH	2,61	51,8	25	26,8	62,059	25,099	36,961

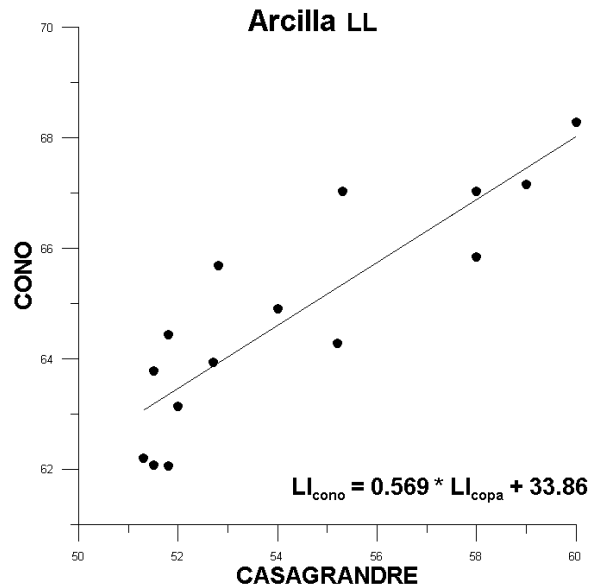
Tabla 4. Propiedades De La Arcilla Común

PROPIEDADES DEL CAOLÍN ESTUDIADO

Muestra	Clase de suelo unificada	G_s	Límites de consistencia, %					
			Método de Casagrande			Método de Cono		
			LL	PL	IP	LL	PL	IP
1	CH	2,65	65,5	29,2	36,3	75,243	27,933	47,311
2	CH	2,65	66,3	31,2	35,1	77,564	28,284	49,280
3	CH	2,65	64	27	37	70,729	26,850	43,879
4	CH	2,65	67,5	30,3	37,2	73,302	28,754	44,549
5	CH	2,65	65,5	27,8	37,7	78,811	25,089	53,722
6	CH	2,65	64,6	28,2	36,4	72,041	28,251	43,790
7	CH	2,65	64,6	26,7	37,9	70,96	23,822	47,139
8	CH	2,65	67	28,2	38,8	73,667	27,337	46,330
9	CH	2,65	66,2	26,5	39,7	71,482	28,090	43,393
10	CH	2,65	69,2	29,9	39,3	73,268	25,103	48,165
11	CH	2,65	60	32,4	27,6	70,282	24,371	45,912
12	CH	2,65	68	30,1	37,9	75,242	25,206	50,036
13	CH	2,65	61,7	27,5	34,2	67,584	27,042	40,542
14	CH	2,65	64	32,1	31,9	68,75	25,647	43,104
15	CH	2,65	62,6	26,9	35,7	69,33	26,243	43,088
16	CH	2,65	68,2	30,8	37,4	70,636	25,201	45,435
17	CH	2,65	64,2	27,8	36,4	70,182	25,311	44,871
18	CH	2,65	64,5	31,3	33,2	69,727	24,654	45,074
19	CH	2,65	65,5	27,7	37,8	76,562	24,768	51,794
20	CH	2,65	67,9	29,8	38,1	73,302	23,943	49,359
21	CH	2,65	61,5	31	30,5	76,879	24,558	52,321
22	CH	2,65	64	30,3	33,7	68,407	26,069	42,339
23	CH	2,65	64	28,8	35,2	71,92	24,614	47,307
24	CH	2,65	66	30,6	35,4	75,978	23,554	52,424
25	CH	2,65	62	27,2	34,8	75,197	23,314	51,883
26	CH	2,65	61	30,9	30,1	73,835	24,796	49,040
27	CH	2,65	57,5	27	30,5	72,832	24,101	48,732
28	CH	2,65	61	29,6	31,4	71,726	25,632	46,094
29	CH	2,65	62,8	30,3	32,5	73,372	26,510	46,862
30	CH	2,65	63,3	29,3	34	71,386	26,252	45,135

Tabla 5. Propiedades De La Caolin Común

Las ecuaciones de la línea de mejor ajuste obtenido mediante análisis de regresión lineal utilizando el método de mínimos cuadrados está dada por:

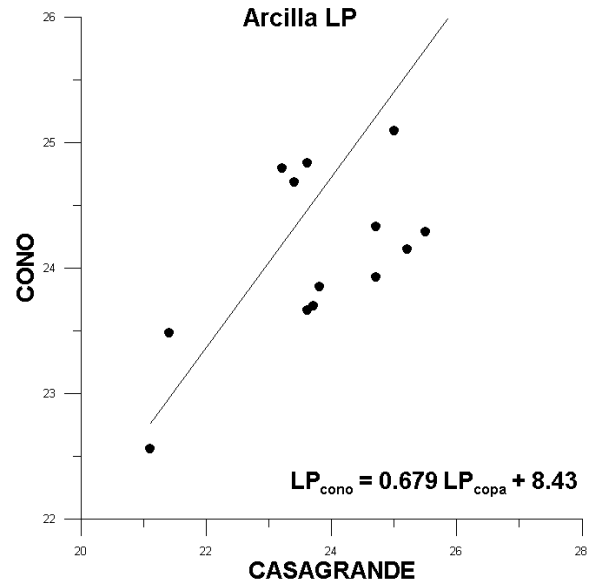


Gráfica. 5 – Relación límite líquido (método del cono) frente al límite líquido (método de Casagrande) para arcillas
Fuente Elaboración propia

En la Grafica 5 se evidencia la correlación que hay en la obtención del límite líquido por el aparato de Casagrande y el penetrómetro de cono obteniendo así una relación lineal que ajusta los dos ensayos, la desviación de la obtención del límite líquido en algunos valores que da más altos se debe a la resistencia de la penetración del cono comparándola con el de Casagrande, todo esto basado en la evidencia experimental.

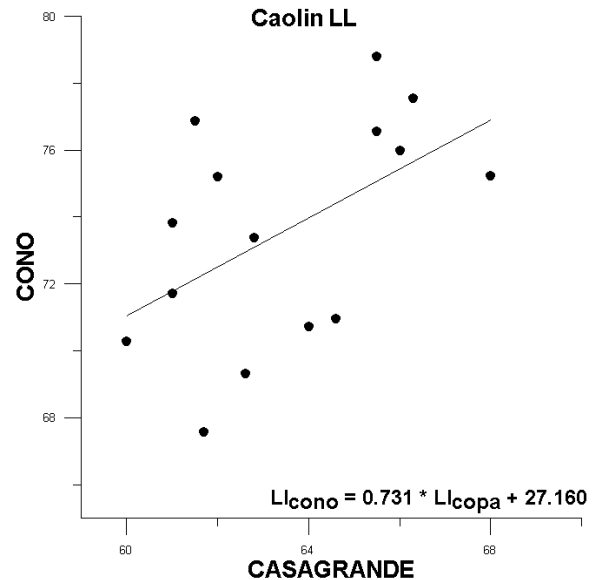
La diferencia de algunos valores del límite líquido entre los dos métodos puede ser también parcialmente relacionada con el comportamiento de la arcilla en los diferentes modos de deformación impuestos por los dos métodos.

Los valores de límite plástico obtenidos mediante la prueba de Casagrande y el Penetrometro de cono se compara en la figura 6. La ecuación de la línea de mejor ajuste es:



Gráfica. 6 – Relación límite plástico (método del cono) frente al límite plástico (método de Casagrande) para arcillas.
Fuente Elaboración propia

Para el caolín la línea recta ajustada a los datos está dada por:

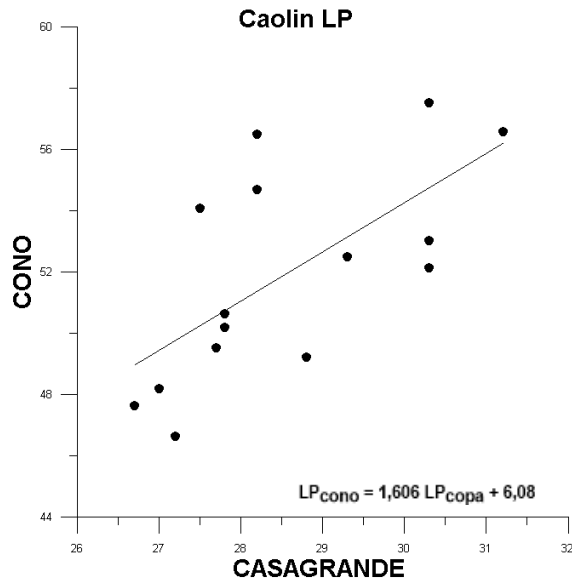


Gráfica 7 – Relación límite líquido (método del cono) frente al límite líquido (método de Casagrande) para arcillas
Fuente Elaboración propia

No se espera que los límites de consistencia que se determinan por dos procedimientos totalmente diferentes, correspondan con precisión, pero la existencia de una buena correlación entre el método de Casagrande y el método del Penetrometro de Cono, es deseable

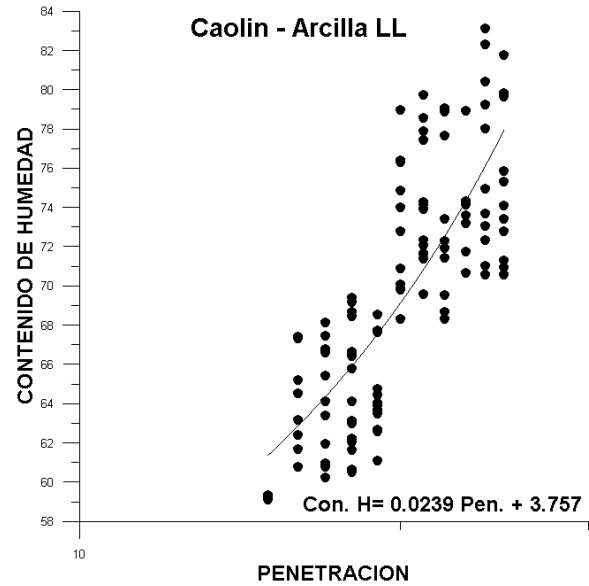
después un punto de vista práctico, y los resultados establecen un muy buen rango en cuanto a la plasticidad de nuestros dos suelos estudiados.

La relación lineal calculada a partir de los resultados de las pruebas, está dada por la ecuación presentada en la Gráfica 8.

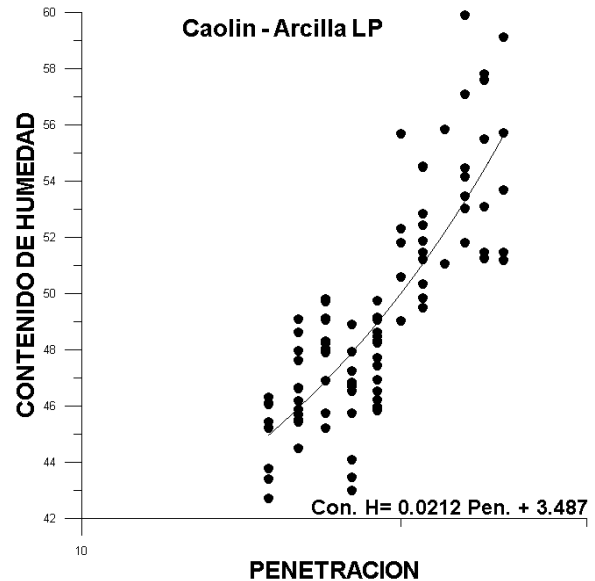


Gráfica. 8 – Relación límite plástico (método del cono) frente al límite plástico (método de Casagrande) para arcillas.
Fuente Elaboración propia

La redefinición de los límites de consistencia sobre la base de un criterio de resistencia y el uso del penetrometro de cono para determinar los límites líquidos y plásticos de los suelos, parece ser un cambio radical pero es una elección muy racional, debido pues aun que podemos obtener ambos límites de consistencia con la misma prueba de caída de cono con el penetrometro.



Gráfica. 9 – Relación exponencial de los límites líquidos de Caolín y Arcilla por el método del cono y el de Casagrande (Contenido de humedad frente a penetración)
Fuente Elaboración propia



Gráfica. 10 – Relación exponencial de los límites plásticos de Caolín y Arcilla por el método del cono y el de Casagrande (Contenido de humedad frente a penetración).
Fuente Elaboración propia

En la tabla 3 se dan varias relaciones entre límite liquido de cono y el límite liquido de Casagrande obtenidos a partir de los resultados de pruebas de otros investigadores en tres de estos estudios y el presente, el tipo de cono y el dispositivo de Casagrande son los mismos.

RELACIÓN ENTRE LIMITE LIQUIDO DETERMINADA POR EL MÉTODO DE CASAGRANDE

FUENTE	TIPO DE CONO	TIPO DE APARATO DE CASAGRANDE	RELACION	Range Of	Números de Prueba
Stefanoff	Rusia	...	$L_{LCONO} = 0.690 L_{LCOPA} + 5.1$	28 a 90	84
Bozinovic 1958, Despues de Sherwood y Ryley	Rusia	...	$L_{LCONO} = 0.833 L_{LCOPA} + 4.42$
Matschak y Reitschel 1965, despues de Sherwood y Ryley	Rusia	...	$L_{LCONO} = 0.833 L_{LCOPA} + 3.08$
Skopek y Ter-Stepanian	Rusia	Base Blanda	$L_{LCONO} = 0.710 L_{LCOPA} + 6.9$	20 a 100	321 Incluye muestras con $W_{LCUP} > 100$
Uppal y Aggarwal	India	Base Dura	$L_{LCONO} = 0.930 L_{LCOPA} + 3.16^b$	20 a 90	
Flaate	India	Base Blanda	$L_{LCONO} = 0.952 L_{LCOPA}$	15 a 90	33
Sowers	Georgia	Base Dura	$L_{LCONO} = 0.797 L_{LCOPA} + 7.5^b$	10 a 130	~20
Sherwood y Ryley	Gran Bretaña	Base Blanda	$L_{LCONO} = 0.909 L_{LCOPA} + 2.73^b$	25 a 90	25
Littleton y Farmilo	Gran Bretaña	Base Blanda	$L_{LCONO} = 0.97 L_{LCOPA} + 1.6$	20 a 100	~15
Budhu	Gran Bretaña	Base Blanda	$L_{LCONO} = 0.935 L_{LCOPA} + 4.02$	29 a 97	17
Belviso	Gran Bretaña	Base Dura	$L_{LCONO} = 0.999 L_{LCOPA} + 4.29^b$	34 a 134	16
Sampson y Netterberg	Gran Bretaña	Base Dura	$L_{LCONO} = 1.01 L_{LCOPA} + 4.2$	20 a 120	123
Wasti Yildiz	Gran Bretaña	Base Dura	$L_{LCONO} = 1.0056 L_{LCOPA} + 4.92$	27 a 110	15
Estudio Actual Arcilla Cajicá	Colombia	Base Dura	$L_{LCONO} = 0.569 L_{LCOPA} + 33.86$	51 a 60	60
Estudio Actual Caolin	Colombia	Base Dura	$L_{LCONO} = 0.731 L_{LCOPA} + 27,16$	60 a 68	60

Tabla 6 Relación entre límite líquido determinada por el método de Casagrande

3. CONCLUSIONES

Mediante el ensayo del penetrometro de cono se obtuvo de manera simultánea el límite líquido y el límite plástico de los suelos. La metodología es análoga a la descrita en la norma británica para determinar el límite líquido.

Esta investigación dio a conocer la utilización del penetrometro de cono en los suelos de Colombia. El método del ensayo de cono es válido en la determinación del límite líquido y el límite plástico, debido a la buena correlación de los resultados obtenidos, Al ser un método válido no significa que esté por encima de la metodología tradicional del límite líquido y el límite plástico, pero sí que se la debería considerar como un método complementario, obteniendo así datos coherentes entre ambos ensayos, por lo tanto no deberá remplazar a los métodos tradicionales sino acompañarlos.

Mediante los estudios ya realizados por diferentes autores en todas las partes del mundo se puede demostrar que este método sirve para hallar límites líquidos y límites plásticos, y obtuvimos resultados coherentes al presentar una baja plasticidad.

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

Claramente se puede observar una gran influencia del operador al realizar el ensayo del rollo, también hay una dependencia del laboratorista al utilizar solamente gráficas para obtener los datos correspondientes al penetrómetro de cono y no una ecuación obtenida de una regresión con base a los datos del laboratorio, este inconveniente no presenta ninguna dificultad gracias a la metodología actual, por consiguiente es muy apropiado la obtención de datos con base a ecuaciones.

Una de las grandes ventajas que se tiene al realizar los dos ensayos de manera simultánea, es poder observar la relación que existe entre los datos obtenidos de los dos ensayos, los cuales pueden ser aprovechados en la obtención de cálculos de otras propiedades de interés para el estudio de suelos.

En cuanto al tiempo que se demora en la realización de ambos ensayos se puede deducir que después de realizar varios ensayos, no existe un gran ahorro en el tiempo.

BIBLIOGRAFIA

1. Juárez Badillo E; Rico Rodríguez A. (2005). **Mecánica de Suelos Tomo 1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos. (3ra Ed.) México: Limusa.**
2. Salvador Ricardo; Montero Juan Carlos. (2001). **Manual de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.**
3. Wood D.M. and Wroth C.P. (1978). **The use of Cone Penetrometer to Determinate the Plastic**
4. **Limit of Soil. Ground Engineering. Vol.11, N°3, pg. 37.**
5. BESOAIN, E., **Mineralogía de arcillas de suelos, IICA, San José, Costa Rica, 1985.**
6. BOWLES, J. E., **Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, McGRAW – HILL, 1981**
7. Muntohar A.S. and Hashim R. (2002). **Determination of Plastic Limits of Soils Using Cone Penetrometer: reappraisal.**
8. Landris T. Lee Jr. and Reed. B. Freeman. (2009). **Dual weight Fall Cone Method for Simultaneous Liquid and Plastic Limit Determination. J. Geotech. Geoenviron. Eng. Vol.135, N° 1, pg. 158-161.**
9. Marion Farmilo, **Some Observations on liquid limit values, (1998), pg. 39 - 40**
10. Agus Setyo Muntohar, Roslan Hashim, **Determination Of Plastic Of Soils Using Cone Penetrometer (2000), pg. 9 – 16.**
11. DeWayne A. Campbell, Jay W. Blackford, **Fall Cone Method Used To Determine The Liquid Limit Of Soil (1984).**
12. Tahar Ayadat, Adel Hanna, **Identification of Collapsible Soil Using the Fall Cone Apparatus, 2005, pg, 2 – 10.**
13. Gokhan Cevikbilen, Muniram Budhu, **Shear Viscosity of Clays in the Fall Cone Test, (2012)**
14. Evans, T. M. and Simpson, D. C., **“Innovative Data Acquisition for the Fall Cone Test in Teaching and Research,” Geotechnical Testing Journal, Vol. 38, No. 3, 2015, pp. 346–354**
15. Feng, T.W., (2000), **Fall-cone penetration and water content relationship of clays, Géotechnique, Vol. 50 No. 2, pp. 181-187.**
16. **British Standard Institution, (1990), Method of test for soils for civil engineering purposes (BS 1377 Part: 2), London.**
17. Farias, M. M. and Llano-Serna, M. A., **“Simple Methodology to Obtain Critical State Parameters of Remolded Clays Under Normally Consolidated Conditions Using the Fall-Cone Test,” Geotechnical Testing Journal, Vol. 39**
18. **ASTM (2000). ASTM D 4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.**