



Escuela  
Politécnica  
Superior

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



Máster Universitario en Ingeniería de los  
Materiales, del Agua y del Terreno

## Trabajo Fin de Máster

Autor:

Álvaro Rabat Blázquez

Tutores:

Roberto Tomás Jover

José Luis Pastor Navarro

Septiembre 2016



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



## ÍNDICE

CONTENIDO	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. OBJETIVO.....	4
1.2. ANTECEDENTES.....	5
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	6
2. ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1. LÍMITES DE ATTERBERG.....	7
2.1.1. GENERALIDADES.....	7
2.1.2. UTILIZACIÓN DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG.....	9
2.1.3. PLASTICIDAD Y LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	10
2.1.3.1. LÍMITE DE CONTRACCIÓN O RETRACCIÓN.....	11
2.1.3.2. LÍMITE PLÁSTICO.....	15
2.1.3.3. LÍMITE LÍQUIDO.....	16
2.1.3.4. ÍNDICE DE PLASTICIDAD.....	18
2.1.3.5. ÍNDICE DE LIQUIDEZ O FLUIDEZ.....	19
2.1.3.6. CARTA DE PLASTICIDAD.....	20
2.1.4. CORRELACIONES ENTRE LA PLASTICIDAD Y OTRAS PROPIEDADES DEL SUELO.....	21
2.1.4.1. IMPORTANCIA DE LA PLASTICIDAD.....	21
2.1.4.2. LIMITACIONES.....	23
2.1.4.3. CORRELACIONES.....	23
2.1.5. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	30



2.1.5.1.	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS).....	31
2.1.5.2.	SISTEMA AASHTO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	37
2.2.	ENSAYOS PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO.....	40
2.2.1.	UTILIZACIÓN DE LA CUCHARA DE CASAGRANDE.....	41
2.2.1.1.	ANTECEDENTES.....	41
2.2.1.2.	NORMA UNE 103-103-94.....	44
2.2.1.2.1.	OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	44
2.2.1.2.2.	APARATOS Y MATERIAL NECESARIO.....	44
2.2.1.2.3.	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	47
2.2.1.2.4.	PROCEDIMIENTO OPERATORIO.....	49
2.2.1.2.5.	RESULTADOS.....	51
2.2.1.3.	NORMATIVA EN OTROS PAÍSES.....	51
2.2.1.4.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU UTILIZACIÓN.....	52
2.2.2.	UTILIZACIÓN DEL PENETRÓMETRO CÓNICO.....	53
2.2.2.1.	ANTECEDENTES.....	53
2.2.2.2.	NORMA BS 1377:1990.....	55
2.2.2.2.1.	OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	55
2.2.2.2.2.	APARATOS Y MATERIAL NECESARIO.....	55
2.2.2.2.3.	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	56
2.2.2.2.4.	PROCEDIMIENTO OPERATORIO.....	57
2.2.2.2.5.	RESULTADOS.....	58
2.2.2.2.6.	MÉTODO PUNTUAL CON EL PENETRÓMETRO CÓNICO.....	58
2.2.2.3.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU UTILIZACIÓN.....	59



2.2.3. ESTUDIOS COMPARATIVOS PREVIOS ENTRE AMBOS ENSAYOS.....	59
3. SUELOS ENSAYADOS Y METODOLOGÍA UTILIZADA.....	65
3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	65
3.2. PREPARACIÓN PREVIA DE LAS MUESTRAS.....	67
3.3. GRANULOMETRÍA.....	68
3.4. LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	69
3.4.1. LÍMITE LÍQUIDO CON EL PENETRÓMETRO CÓNICO.....	69
3.4.2. LÍMITE LÍQUIDO CON LA CUCHARA DE CASAGRANDE.....	72
3.4.3. LÍMITE PLÁSTICO.....	74
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	76
4.2. LÍMITES DE CONSISTENCIA DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	78
4.3. CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	81
4.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL LÍMITE LÍQUIDO POR AMBOS MÉTODOS.....	83
4.4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	85
4.4.2. PROPUESTA DE NUEVAS FÓRMULAS DE CORRELACIÓN.....	90
5. CONCLUSIONES.....	91
6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	92
7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	93
8. ANEJO 1: ACTAS DE LOS ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LAS MUESTRAS CON EL PENETRÓMETRO CÓNICO.....	98



## 1. INTRODUCCIÓN

Los Límites de Atterberg son un campo en el que todavía queda mucho por estudiar a pesar de las investigaciones realizadas hasta la fecha y de su utilidad y amplio uso para la clasificación y la determinación de las propiedades de los suelos. En los últimos años se han planteado varias hipótesis para mejorar los ensayos tradicionales y facilitar el trabajo de laborantes, así como para tener una mayor garantía de los resultados obtenidos.

Actualmente, en España, la determinación del límite líquido de un suelo se realiza a través del método de la cuchara de Casagrande. Este método se rige por la Norma UNE 103-103-94, siendo su utilización una práctica común en todos los laboratorios de mecánica de suelos. Uno de los principales inconvenientes para su determinación es la gran influencia que tiene el operador sobre los resultados obtenidos, ya que la variación en el ritmo de golpeo, la forma de la hendidura realizada o la visualización de cuando se cierra la misma hace variar considerablemente los resultados obtenidos.

Sin embargo existe otro procedimiento alternativo para determinar el límite líquido, denominado método del penetrómetro cónico, cuyo uso está respaldado por la norma británica BS 1377:1990 y que se utiliza como método alternativo en algunos países. Sin embargo, el empleo de este método no se ha difundido ni estudiado en España, no habiéndose validado su posible aplicación a suelos de nuestro país.

Para lograr la difusión de este método alternativo se necesita verificar la validez del mismo en los suelos de nuestro entorno. Básicamente este trabajo tiene esta finalidad, además de otros propósitos como dar a conocer dicho método y proporcionar información sobre las diferencias que existen entre dicho método y el tradicional.

### 1.1. OBJETIVO

El objetivo principal del presente trabajo consiste en determinar la aplicabilidad del penetrómetro cónico definido en la norma británica BS 1377:1990 para calcular el límite líquido en suelos de baja y media plasticidad.

Básicamente se plantea realizar una comparación de metodologías de determinación del límite líquido entre el método de Casagrande (Norma UNE 103-103-94) y el método del penetrómetro



cónico (Norma BS 1377:1990), poniendo énfasis en el segundo método para comprobar el grado de confiabilidad del mismo en los suelos de baja y media plasticidad mediante la comparación de los resultados obtenidos por ambos procedimientos.

Por tanto el alcance del trabajo implica la realización de ensayos de determinación del límite líquido mediante el penetrómetro cónico y la cuchara de Casagrande, llevar a cabo un análisis de las condiciones o factores de influencia de ambos métodos mediante una revisión bibliográfica y verificar, a través de los resultados obtenidos en laboratorio, si es posible la utilización del penetrómetro cónico en suelos de baja y media plasticidad como alternativa a la cuchara de Casagrande.

## 1.2. ANTECEDENTES

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

Casagrande (1932) se dio cuenta de que por la forma en que fue definido el ensayo, se tendrían resultados variables según el operador, por lo que estandarizó el método diseñando un artilugio en el que la muestra de suelo se colocaba en una cuchara de bronce que golpeaba cayendo desde una altura de 1 cm sobre una base dura. A la muestra se le hacía un surco con un acanalador normalizado y el límite líquido se definió como el contenido de humedad a la que el surco se cerraba en una longitud de 13 mm al ser golpeada la cuchara 25 veces. Esto dio origen al famoso ensayo de la cuchara de Casagrande, el cual ha permanecido en el tiempo sin prácticamente variación alguna y que fue adoptado por muchos países como método de referencia, entre ellos España, que lo recogió en la Norma UNE 103-103-94.

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

Ante esta situación varios investigadores han utilizado el penetrómetro cónico en sus



investigaciones por considerarlo más fiable: Sowers (1959) utilizó el cono de Georgia para determinar el límite líquido; Littleton y Farnilo (1977) y posteriormente Landris T. Lee y Reed B. Freeman (2009) utilizaron dos conos de diferente peso para definir el índice plástico; Belviso et al. (1985), tomando como base los resultados de los ensayos de límite líquido con el penetrómetro cónico y las características de la recta de flujo, obtuvieron el índice plástico; Jefferson y Foss Roger (1997) lo utilizaron para estudiar la relación entre el límite líquido y la sensibilidad a la temperatura de las arcillas; etc.

Además algunos investigadores han intentado establecer correlaciones entre los valores de límite líquido obtenidos con la cuchara de Casagrande y con penetrómetros cónicos, si bien el diseño y las características de dichos penetrómetros en ocasiones no estaban normalizados, variando considerablemente de unos estudios a otros. A este respecto destacan las investigaciones realizadas por Karlsoon (1961, 1977), Sherwood y Ryley (1970), Wires (1984), Belviso et al (1985), Wasti y Bezirci (1886), Dragoni et al (2008), Ozer (2009), Fojtová et al (2009), Grønbech et al (2011), Di Matteo (2012) o Spagnoli (2012), obteniendo la mayoría resultados satisfactorios. La tipología de los suelos utilizados por dichos investigadores para establecer dichas correlaciones ha sido muy variada (desde suelos poco plásticos con límites líquidos cercanos a 20 hasta suelos con límites líquidos muy elevados cercanos a los 340).

Particularmente en este estudio se va utilizar el penetrómetro cónico y la metodología que aparece en la Norma BS 1377:1990, intentando correlacionar los resultados obtenidos por este método con los obtenidos por el método tradicional de la cuchara de Casagrande, definido en la Norma UNE 103-103-94. Con ello se pretende verificar la bondad del penetrómetro y su aplicabilidad a los suelos españoles de baja y media plasticidad.

### **1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA**

El trabajo se compone de este primer capítulo introductorio en el que se explica el objetivo que se pretende conseguir con la investigación y se realiza una breve descripción de los antecedentes de utilización del penetrómetro cónico para la determinación del límite líquido de los suelos.

En el segundo capítulo se repasa el estado del arte, explicándose diversos conceptos que se han empleado para la realización del estudio. Concretamente, se realiza una explicación de los límites de Atterberg y del concepto de plasticidad en suelos, haciendo hincapié en la importancia del conocimiento de la misma para saber el comportamiento del suelo, debido a la existencia de múltiples correlaciones en ésta y otras múltiples propiedades. También en este



capítulo se hace un estudio comparativo entre los dos procedimientos existentes para la determinación del límite líquido, identificando en base a bibliografía y a las normas que rigen dichos ensayos los puntos fuertes y débiles de ambos. Por otra parte se recogen los resultados más relevantes de estudios previos comparativos entre dichos ensayos y las correlaciones obtenidas entre ambos métodos.

En el tercer capítulo se realiza una descripción de los suelos ensayados y de la metodología empleada para ello, indicándose la procedencia, como se ha llevado a cabo la preparación de las muestras y los ensayos a los que se han sometido con el fin de clasificar y caracterizar las muestras (granulometría y límites de consistencia).

En el cuarto capítulo se muestran y discuten los resultados obtenidos en la investigación. Básicamente se presentan los resultados obtenidos en los análisis granulométricos y los límites de Atterberg, y consecuentemente, la clasificación resultante de las muestras ensayadas. Por otra parte en dicho capítulo se hace una comparativa entre los resultados de límite líquido obtenido por los dos procedimientos (penetrómetro cónico y cuchara de Casagrande), haciendo un análisis estadístico de los resultados y estudiando la aplicabilidad del penetrómetro, finalizando con la propuesta de ecuaciones de correlación entre ambos métodos para suelos españoles.

Finalmente en el quinto capítulo se establecen las conclusiones de la investigación y en el sexto se proponen nuevas líneas de investigación a desarrollar.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. LÍMITES DE ATTERBERG**

#### **2.1.1. GENERALIDADES**

Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia, se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan.

En los suelos finos, principalmente en las arcillas que se encuentran en estado seco, si se observa el estado del suelo, veremos que tiene una textura áspera y presenta una elevada resistencia a la rotura, partiendo cuando se rompe el suelo en fragmentos igualmente frágiles y de similar dureza.



Si al suelo se le agrega agua poco a poco veremos que ésta se mezcla con los sólidos. Aumentando la humedad, el suelo sigue en estado sólido pero su resistencia disminuye y en algún momento se vuelve plástico, esto es fácilmente moldeable con una textura jabonosa. Si se añade todavía más agua al suelo llega un punto en el que el suelo deja de ser plástico y se convierte en un fluido viscoso, conocido como lodo, de muy baja resistencia. Finalmente si el aumento de agua se lleva a su máximo, la masa pasa a un estado completamente líquido sin resistencia.

Si ahora analizamos el proceso inverso, al disminuir el contenido de humedad pasando por los estados antes descritos, llegaremos al momento en el cual el suelo presenta alta resistencia; continuando con la disminución de agua, se notará claramente que el suelo comienza a contraerse, deteniéndose este proceso en el punto en el cual su contenido de humedad es solamente el agua adsorbida y de constitución molecular (Juárez Badillo, 2005).

Así, un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso (véase Figura 1). En el estado sólido el suelo es resistente y tiende a romperse antes de deformarse. En el estado semisólido el suelo puede deformarse pero aparecen fracturas. En el estado plástico el suelo puede deformarse sin romperse, y en el estado líquido el suelo es fácilmente deformable, como un fluido viscoso, al tener muy poca resistencia (Matías Sánchez, 2010).

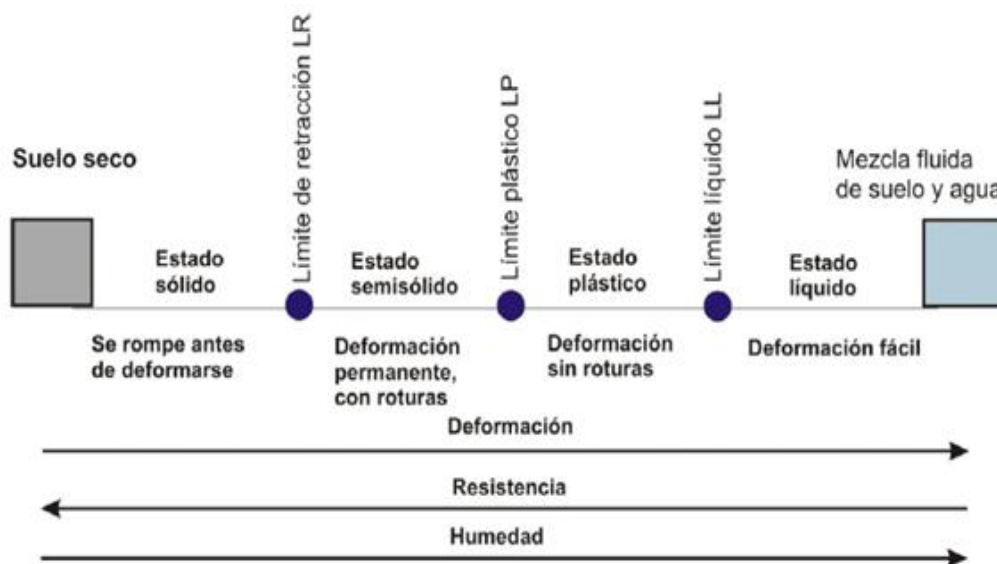


Figura 1. Esquema de los límites de Atterberg (Matías Sánchez, 2010).

El contenido de agua con que se produce el cambio entre estados varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades para el cual el



suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad). Se trata de la propiedad que presentan los suelos hasta cierto límite.

Los límites de Atterberg son, por tanto, los valores de humedad que delimitan los diferentes estados de consistencia de los suelos, utilizándose para la identificación y clasificación de los mismos.

### **2.1.2. UTILIZACIÓN DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG**

En la actualidad, los límites de Atterberg son las determinaciones que con más asiduidad se practican en los laboratorios de mecánica del suelo. Su utilidad deriva de que, gracias a la experiencia acumulada en miles de determinaciones, es suficiente conocer sus valores para poderse dar una idea bastante clara del tipo de suelo y sus propiedades. Como, por otra parte, se trata de determinaciones relativamente sencillas y rápidas, permiten una identificación de los suelos y la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos más complicados.

Los límites de Atterberg pertenecen, junto al análisis granulométrico, al tipo de ensayos de identificación. Pero, si el análisis granulométrico nos permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, los límites de Atterberg nos indican su calidad, completando así el conocimiento del suelo. Frecuentemente se utilizan los límites directamente en las especificaciones para controlar los suelos a utilizar en terraplenes.

El índice de plasticidad, que indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica, y el índice de liquidez, que indica la proximidad del suelo natural al límite líquido, son características especialmente útiles del suelo derivadas del conocimiento de los límites de Atterberg.

Debe tenerse en cuenta, no obstante, que todos los límites e índices, a excepción del límite de retracción, se determinan en suelos que han sido amasados para formar una mezcla uniforme suelo-agua. Este proceso de amasado conduce al ablandamiento de la masa como consecuencia de la destrucción del ordenamiento de las moléculas bipolares de agua, a la reorientación de las láminas de arcilla y a la ruptura de la estructura que el suelo adquiere durante su formación por sedimentación o consolidación. Al cesar el proceso de amasado, las láminas de arcilla vuelven a orientarse y las moléculas de agua adquieren ligazón, pero la estructura del suelo no vuelve a ser la misma. Por tanto, habrá que señalar que los límites no dan indicación alguna sobre la



estructura del suelo o de los enlaces residuales entre partículas que pudieran haberse desarrollado en el terreno natural (Jiménez Salas, 1975).

### 2.1.3. PLASTICIDAD Y LÍMITES DE CONSISTENCIA

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

Al tratar de definir en términos simples la plasticidad de un suelo, no resulta suficiente decir que un suelo plástico puede deformarse y remodelarse sin agrietamiento, pues una arena fina y húmeda tiene estas características cuando la deformación se produce lentamente y sin embargo no es plástica. Entre el comportamiento de la arcilla y el de la arena hay una importante diferencia, mientras que el volumen de la arena varía, el volumen de la arcillas se mantiene constante, además la arena se desmorona si se la somete a deformaciones rápidas.

En mecánica de suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas sin rebote elástico, sin variación volumétrica y sin desmoronarse o agrietarse (Juárez Badillo, 2005).

Los límites establecidos por Atterberg para diferenciar los distintos estados de consistencia se deben obtener a partir de la fracción que pasa por el tamiz N° 40, descartando la porción retenida.

La frontera entre el estado sólido y semisólido se llama límite de contracción o de retracción y se define como la humedad presente al haber añadido agua suficiente para llenar todos los huecos de una pastilla de suelo seca. Se trata de la humedad máxima de un suelo para la cual una pérdida de humedad no causa disminución de volumen del mismo (véase Figura 2). La frontera entre los estados semisólido y plástico se llama límite plástico, y se obtiene midiendo el contenido de humedad del suelo cuando comienzan a agrietarse pequeños cilindros de suelo de 3 mm de diámetro. A la frontera entre el estado plástico y líquido se le llama límite líquido y se determina colocando el suelo en un aparato normalizado y midiendo la humedad que contiene cuando con 25 golpes se cierra una ranura de 13 mm de longitud ejecutada en la muestra.

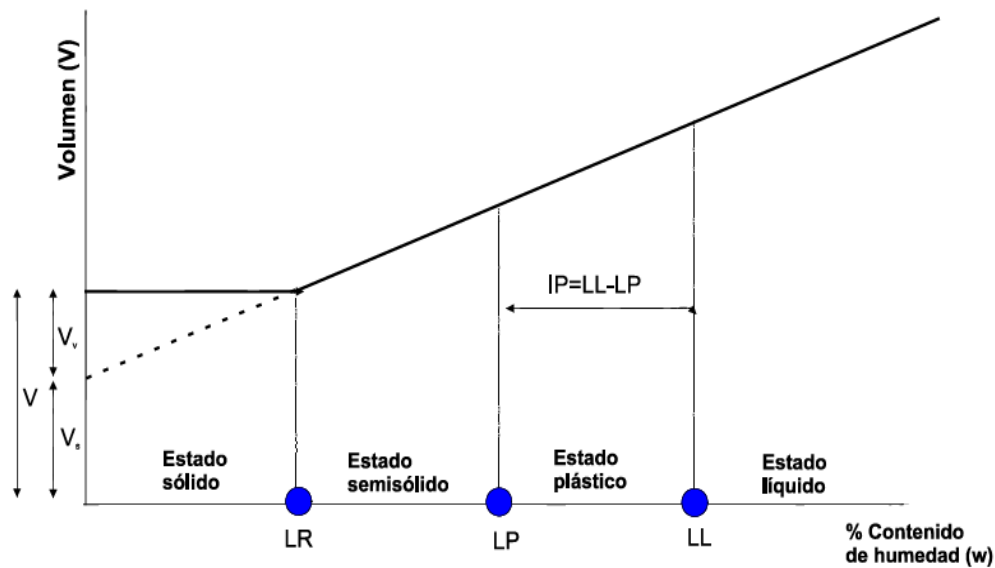


Figura 2. Variación del volumen del suelo con la humedad (Matías Sánchez, 2010).

### 2.1.3.1. LÍMITE DE CONTRACCIÓN O RETRACCIÓN

El límite de contracción (LC) o retracción es la barrera entre el estado semisólido y sólido y se puede definir como la humedad máxima de un suelo para la cual una reducción de la humedad no produce una disminución de volumen del suelo.

El método original de Atterberg para la determinación del límite de contracción consistía en la realización de mediciones frecuentes de la longitud y peso de un mismo prisma de suelo hasta que no se observara ninguna disminución de la longitud.

Teniendo en cuenta que la gran mayoría de suelos no presentan prácticamente disminución de volumen durante el proceso de secado por debajo del límite de contracción, Terzaghi sugirió un método más simple de determinación, que esencialmente, consiste en medir el peso y el volumen de una muestra de suelo totalmente seca; en tal momento, puede decirse que el límite de contracción sería la humedad de la muestra seca si tuviese sus vacíos llenos de agua. (Jiménez Salas, 1975). De esta idea y teniendo en cuenta la Figura 3, puede deducirse:

$$LC(\%) = \frac{\left(\frac{V_m - \frac{W_s}{S_s \cdot \gamma_w}}{W_s}\right) \cdot \gamma_w}{W_s} * 100 = \left(\frac{V_m \cdot \gamma_w}{W_s} - \frac{1}{S_s}\right) * 100 \quad (1)$$

Expresión en la cual algunos de los términos se definen en la Figura 3, LC es el límite de contracción, \$S\_s\$ es el peso específico relativo de la fase sólida, \$\gamma\_w\$ es el peso específico del agua

( $1,00 \text{ g/cm}^3$  en condiciones normales). Si  $S_m$  es el peso específico relativo de la masa de suelo, la expresión anterior puede quedar como:

$$LC(\%) = \left( \frac{1}{S_m} - \frac{1}{S_s} \right) * 100 \quad (2)$$

Nótese que  $W_m = W_s$ , dado que la muestra está totalmente seca. La aplicación de la fórmula anterior requiere de la determinación del volumen de la muestra seca del suelo. Terzaghi desarrolló un método para ello, que desde entonces ha permanecido como clásico en todos los laboratorios.

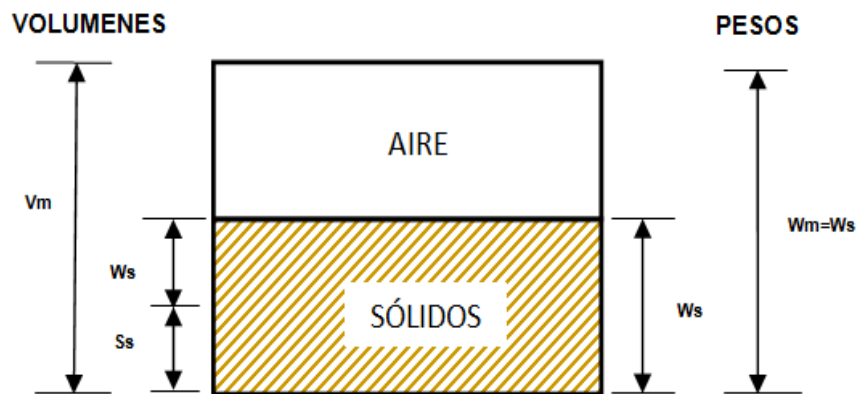


Figura 3. Esquema aclaratorio de la determinación del límite de contracción.  
(Elaboración propia).

Un recipiente de vidrio (o lucita) como se detalla en la Figura 4 se llena de mercurio hasta derramarse y se enrasa cuidadosamente, cubriéndolo con una placa del mismo material, provisto de tres patas. A continuación se coloca el recipiente en otro mayor; la muestra seca se deposita sobre la superficie del mercurio y se sumerge presionándola con las patas de la placa, hasta que dicha placa vuelve a quedar bien ajustada sobre el recipiente de vidrio, las patas impiden que la placa se ladee, manteniéndola sumergida.

La cantidad de mercurio desplazado se recoge en el recipiente mostrado y se pesa, calculando así su volumen si se conoce el peso específico del mercurio, que para fines prácticos puede tomarse como  $13,56 \text{ g/cm}^3$ .

En la determinación del límite de contracción según Terzaghi, es preciso determinar el peso específico relativo de los sólidos de la muestra por medio de una prueba independiente.

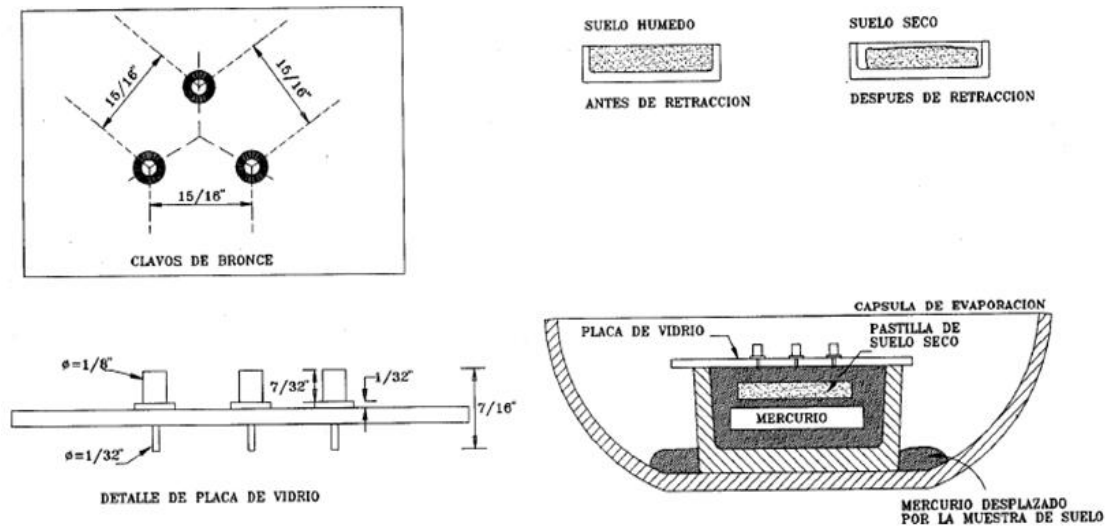


Figura 4. Detalle del dispositivo usado para la determinación del límite de contracción.

(Adaptado Jiménez Salas, 1975).

La Public Road Administration de los EEUU ha desarrollado otro método para la determinación del límite de contracción de suelos, con el cual no se requiere contar con el peso específico relativo de los sólidos  $S_s$ . (Crespo Villalaz, 2007).

Según este procedimiento, el suelo se remoldea hasta una consistencia cercana al límite líquido, añadiendo agua si es preciso; con este suelo se llena una cápsula de volumen conocido. La superficie del suelo se alisa perfectamente con una espátula y se protege con una placa de vidrio; pesada la muestra se seca en un horno, hasta obtener peso constante, que se anota. El volumen de la muestra, ya seca, se determina con el método del mercurio antes descrito. Se conocen así las siguientes cantidades:

$V_1$ =Volumen de la muestra húmeda, igual al volumen de la cápsula.

$W_1$ =Peso de la muestra húmeda.

$V_2$ =Volumen de la muestra seca.

$W_3$ =Peso de la muestra seca.

En la Figura 5 se han dibujado las cantidades anteriores con pesos como abscisas y volúmenes como ordenadas: las escalas tienen el mismo módulo, de modo que el segmento que representa 1 g. en una es igual al que representa 1 cm<sup>3</sup> en la otra; así, la relación de disminución de peso al perderse agua durante el secado, respecto a la correspondiente pérdida de volumen es una recta con 45° de inclinación, para humedades superiores al límite de contracción.

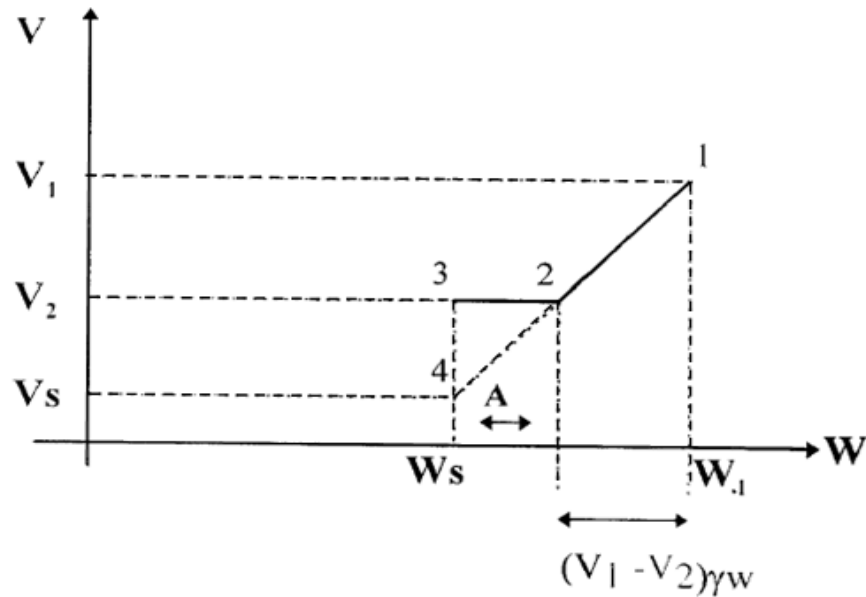


Figura 5. Esquema que ilustra el procedimiento de cálculo del límite de contracción, según el método de la Public Road Administration (PRA). (Adaptado Crespo Villalaz, 2007).

En la Figura 5 el número 2 representa el límite de contracción del suelo, obtenido secándolo desde las condiciones iniciales 1. Al proseguir el secado hasta el secado total, ya no hay prácticamente variación volumétrica. En realidad, la curva de secado no presenta un quiebro brusco en 2, sino una transición gradual; además, en suelos muy plásticos, es frecuente que el tramo 2-3 muestre una ligera contracción adicional, mientras que en suelos de muy baja plasticidad suele observarse una pequeña expansión.

De la Figura 5 puede obtenerse el límite de contracción aplicando la definición de contenido de humedad:

$$LC(\%) = 100 * \frac{A}{W_S} = 100 * \frac{W_1 - W_S - (V_1 - V_2) * \gamma_w}{W_S} \quad (3)$$

En este método no es necesario conocer el peso específico de los sólidos del suelo, e inclusive, puede determinarse a partir de las cantidades medidas. Debe, sin embargo, hacerse notar que la determinación del peso específico relativo por este método no es suficientemente precisa a causa de las burbujas de aire que inevitablemente contiene la muestra húmeda al ser colocada en la cápsula de secado.

La prueba para obtener el límite de contracción es difícil de llevar a cabo y sus resultados pueden variar de acuerdo con el método de prueba usado, y algunas veces incluso depende del contenido de humedad inicial de la muestra (Crespo Villalaz, 2007).

### 2.1.3.2. LÍMITE PLÁSTICO

El límite plástico (LP) se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el que los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico, representando el punto en el cuál el suelo empieza a perder su cohesión por falta de humedad.

El ensayo se realiza con la fracción de suelo que pasa por el tamiz número 40. Para determinar el límite plástico, generalmente se hace uso del material que, mezclado con agua, ha sobrado de la prueba del límite líquido y al cual se le evapora humedad por mezclado hasta tener una mezcla plástica que sea moldeable, formando una bola con el suelo sin que se resquebraje.

A continuación se toman unos 8 g de este suelo, se forma con él una especie de elipsoide, y se rueda entre la palma de la mano y una superficie lisa que no absorba mucha humedad, hasta llegar a un diámetro de 3 mm. Si al llegar a este diámetro no se ha cuarteado el cilindro de modo que quede dividido en trozos de unos 6 mm de longitud como media se vuelve a formar el elipsoide, y a rodar hasta llegar a este tipo de resquebrajamiento (Jiménez Salas, 1975).

Según las normas UNE 103-104-93 y NLT-106/98, el suelo se encontrará en su límite plástico cuando se cuarteo al llegar precisamente a los 3 mm (véase Figura 6). Según la norma ASTM 424-59 no importa que el cilindro se resquebraje antes, con tal de que anteriormente haya llegado al menos una vez a los 3 mm sin resquebrajarse.

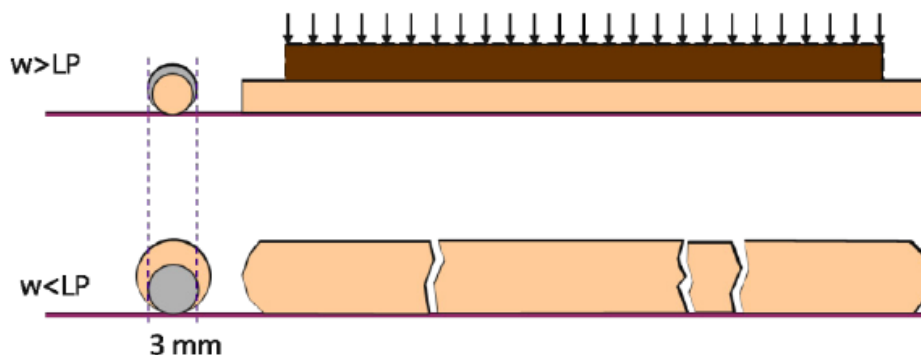


Figura 6. Límite plástico, humedad por debajo de la que no es posible hacer bastoncillos de 3 mm de diámetro. (Matías Sánchez, 2010).

En cualquier caso se continúa el procedimiento hasta reunir unos 10 g de suelo, se coloca en un pesafiltros tarado y se determina su humedad. El proceso se repite otra vez, y si la diferencia es grande se halla la media y se da este valor como resultado.





Por tanto para el cálculo del límite plástico se emplea la siguiente fórmula:

$$LP = \frac{P_H - P_S}{P_S} * 100 = \frac{P_W}{P_S} * 100 \quad (4)$$

en la que:

LP = Humedad correspondiente al límite plástico en %.

P<sub>H</sub> = Peso de los bastoncillos húmedos en g.

P<sub>S</sub> = Peso de los bastoncillos secos en g.

P<sub>W</sub> = Peso del agua contenida en los bastoncillos en g.

Investigaciones realizadas demuestran que los resultados se repiten muy bien para un mismo operador, con tal de que éste posea un mínimo de experiencia. La principal fuente de incertidumbre radica en las diferencias obtenidas por distintos operadores, pues en la apreciación del punto crítico suele haber diferencias entre ellos (Ballard y Weeks, 1963). Esto se evitaría siguiendo estrictamente las indicaciones enunciadas.

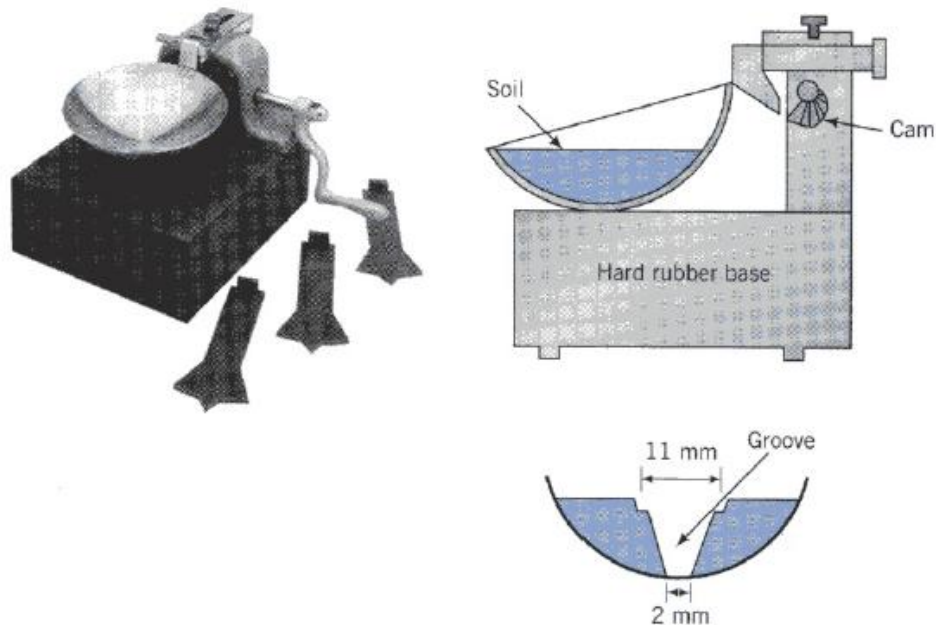
El secado previo en estufa o al aire también puede cambiar (en general disminuir) el límite plástico de un suelo con materia orgánica (Müller-Vonmoos, 1965), pero este cambio es poco importante.

### 2.1.3.3. LÍMITE LÍQUIDO

El límite líquido (LL) se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De acuerdo con esta definición, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, pero definida, y según Atterberg es de 25 g/cm<sup>2</sup>. La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula (Crespo Villalaz, 2007).

Para la determinación del límite líquido se ha utilizado tradicionalmente un aparato conocido con el nombre de “cuchara o copa de Casagrande” (véase Figura 7). El procedimiento comienza por amasar, con agua destilada, una muestra de suelo seco que pasen por el tamiz n° 40 de la ASTM.; el operador trata de añadir la cantidad de agua necesaria para acercarse lo más posible al límite líquido. La masa se coloca con una espátula en la cuchara de modo que ocupe la parte inferior de ella. Se abre un surco con un acanalador y se comienza a dar vueltas a la manivela, a razón de dos por segundo, con lo cual, por medio de una excéntrica, se levanta la cuchara y se deja caer desde una altura de un centímetro. Se prosigue hasta que las paredes del surco se unan

por su fondo en una longitud de unos 13 mm. Si esto ocurre después de dar exactamente 25 vueltas a la manivela, el suelo tiene el contenido de humedad correspondiente al límite líquido.



*Figura 7. Esquema de la cuchara de Casagrande utilizada para la determinación del límite líquido (Matías Sánchez, 2010).*

Sin embargo, lo normal será que la cantidad de agua no sea precisamente la del límite líquido y, por lo tanto, el surco no se cerrará a los 25 golpes, sino antes o después de ellos. Si el número de golpes está comprendido entre 10 y 40 se toma una muestra del suelo de la parte en que se han juntado los bordes, y se determina su humedad.

A continuación se repite el ensayo añadiendo más agua, o extendiendo la pasta para que se seque o amasando, con vistas a obtener otro punto al lado opuesto de los 25 golpes que el primero. Los resultados de estos dos ensayos se dibujan en una doble escala logarítmica en la que figure en abscisas el número de golpes y en ordenadas la humedad. Para determinar el límite líquido se traza la recta de pendiente 0.117 que equidiste de los dos puntos anteriores (ésta es la recta de pendiente dada que mejor se adapta a estos dos puntos). La humedad del punto de corte de esta recta con la ordenada correspondiente a los 25 golpes nos dará el límite líquido (Jiménez Salas, 1975).

Como vemos, el ensayo del límite líquido es realmente un ensayo de corte dinámico. Debido a los inconvenientes de los ensayos dinámicos el propio Casagrande (1958) propuso sustituirlo por uno estático. El ensayo ha de ser simple, para que pueda competir con la cuchara.

El método alternativo que más se ha estudiado es el ensayo del cono (véase Figura 8). La punta del cono penetra en el suelo empujada por un peso y para evitar efectos dinámicos se frena la caída, de modo que el peso total no actúe sobre la punta hasta pasando un tiempo desde el comienzo del ensayo. Naturalmente, cuanto mayor sea el contenido de humedad del suelo más se introducirá la punta en él. El límite líquido será la humedad correspondiente a una profundidad de penetración determinada en función del cono que se utilice, que se obtendría tras la realización de un ajuste de varias parejas profundidad de penetración-humedad.

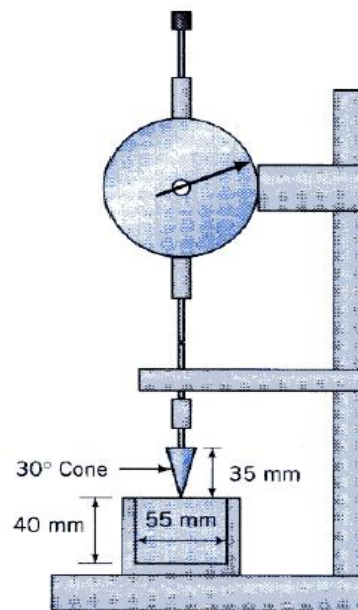


Figura 8. Esquema del dispositivo del penetrómetro cónico para la determinación del límite líquido (Matías Sánchez, 2010).

En este trabajo se va estudiar precisamente la viabilidad del uso del cono que propone la norma británica BS 1377:1990 para obtener el límite líquido (el cuál sería la humedad que correspondería a una penetración de 20 mm) en los suelos de baja y media plasticidad de España, en la base a una comparativa con el método tradicional de la cuchara de Casagrande.

Una discusión más profunda de dichos métodos se realiza en el apartado 2.2 del presente trabajo.

#### 2.1.3.4. ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Atterberg encontró que la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, denominado índice de plasticidad (IP), representaba una medida satisfactoria del grado de plasticidad de un suelo, indicando el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico tal



como lo definen los ensayos.

Índice de plasticidad:

$$IP = LL - LP \quad (5)$$

Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo; sin embargo, el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. Así a las arenas limpias se les atribuye un índice de plasticidad nulo, aunque en realidad su valor no se puede determinar con exactitud.

Acorde al valor del índice de plasticidad Atterberg distinguió los siguientes materiales:

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

#### 2.1.3.5. ÍNDICE DE LIQUIDEZ O FLUIDEZ

En los suelos cohesivos, el índice de liquidez (IL) definido como la posición numérica de la humedad,  $w$ , respecto a los límites líquido y plástico es, evidentemente, una medida aproximada de la resistencia.

Índice de liquidez:

$$IL = \frac{w - LP}{IP} \quad (6)$$

De acuerdo con esta definición, un índice de fluidez de cero corresponde a la humedad del límite plástico, y de uno a la del límite líquido.

El índice de liquidez es indicativo de la historia de esfuerzos a los que ha estado sometido el suelo. Si el valor está cercano a cero, se considera que el suelo está preconsolidado, y si está cercano a uno entonces se le considera como normalmente consolidado. Por otra parte si el índice de liquidez es menor a cero el suelo es muy colapsable y si es mayor a uno es expansivo.

### 2.1.3.6. CARTA DE PLASTICIDAD

Con sólo los valores de límite líquido e índice de plasticidad de un suelo es posible, en muchos casos, formar un juicio sobre el tipo al que pertenece su fracción fina. Para ello, uno de los procedimientos más sencillos es hacer uso del gráfico de plasticidad de Casagrande (Carta de Plasticidad), representado en la Figura 9.

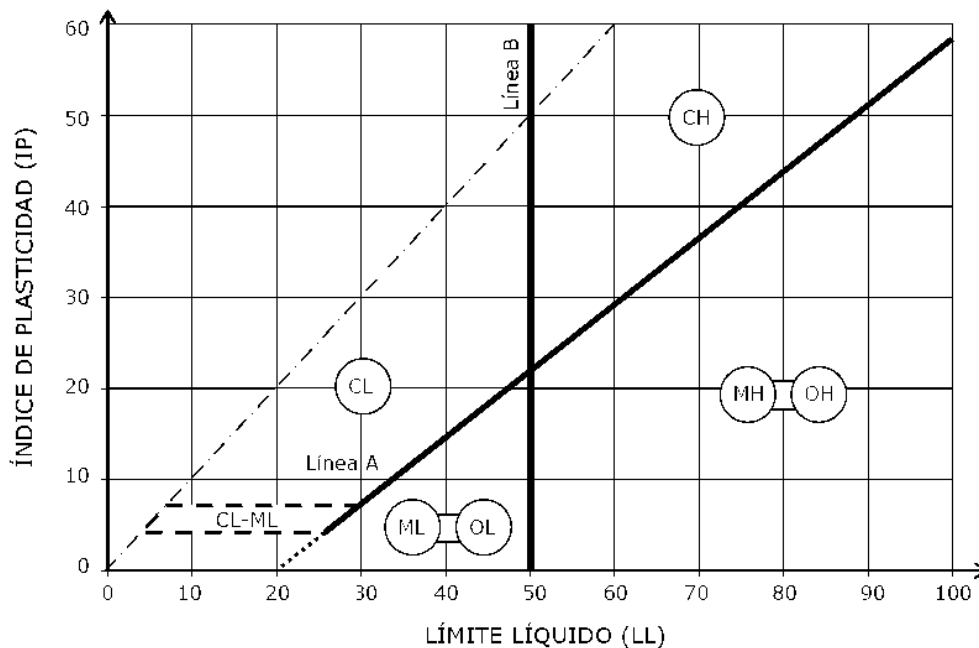


Figura 9. Carta de plasticidad para suelos cohesivos. (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000).

En este gráfico, las abscisas representan el límite líquido y las ordenadas el índice de plasticidad.

El gráfico está dividido en cuatro partes por una recta vertical correspondiente a un límite líquido de 50 (línea B), y por una recta inclinada (Línea A) definida por la ecuación:

$$IP = 0,73 * (LL - 20) \quad (7)$$

salvo en la parte inferior, donde la línea A se convierte en una banda horizontal que se extiende entre los índices de plasticidad 4 y 7.

La línea A es un límite establecido empíricamente que separa las arcillas inorgánicas CL y CH (C inicial de *clay*, arcilla en inglés), que generalmente queda en su parte superior, de los limos inorgánicos ML y MH (M inicial de *mo*, palabra sueca), los suelos con materia orgánica



coloidal (OL y OH), y algunos otros suelos, que generalmente quedan por debajo de la línea A.

La letra H (inicial de *high*, alto en inglés) se emplea cuando el límite líquido es mayor de 50, y la letra L (inicial de *low*, bajo en inglés) cuando es menor de 50.

En la zona rayada con IP entre 4 y 7 se superponen los suelos arcillosos y limosos, por lo que se emplea la doble nomenclatura CL-ML.

Además de los suelos enumerados, las tierras de diatomeas y micáceas suelen corresponder al grupo MH, pero a veces pertenecen al ML.

Una característica interesante que se ha descubierto mediante el empleo del gráfico de plasticidad de Casagrande es que los puntos que representan suelos afines (por ejemplo una serie de muestras de aluviones de la misma época geológica, aunque sean de composición granulométrica muy distinta) definen una línea recta aproximadamente paralela a la línea A.

Además Casagrande indica que todos los suelos que él ha encontrado están situados por debajo de la línea U de ecuación:

$$IP = 0.9 * (LL - 8) \quad (8)$$

Al disminuir el tamaño de las partículas de una determinada especie mineralógica aumentan el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad (Grim, 1962).

#### **2.1.4. CORRELACIONES ENTRE LA PLASTICIDAD Y OTRAS PROPIEDADES DEL SUELO**

##### **2.1.4.1. IMPORTANCIA DE LA PLASTICIDAD**

El límite líquido debe ser el contenido de humedad en el cual el suelo presente un esfuerzo de corte igual a cero. De todos modos de la manera en que están estandarizados los ensayos para determinar el límite líquido, se nota que el suelo presenta un esfuerzo de corte pequeño. Como consecuencia de esto, se llegó a determinar que el esfuerzo de corte para todos los suelos en el límite líquido es similar, y éste se encuentra entre 1-2 KN/m<sup>2</sup>. El procedimiento de enrollado del suelo usado para determinar el límite plástico, se puede considerar como un mecanismo de medida de la tenacidad, que se la puede relacionar con el esfuerzo de corte, a pesar de no existir



una analogía lógica para su mecanismo de rotura. Se ha observado por un sinnúmero de autores que todos los suelos que se encuentran en el límite plástico presentan cifras similares en el esfuerzo de corte, obteniendo valores entre 100 y 200 KN/m<sup>2</sup>.

Así, los límites de consistencia son una medida del esfuerzo de corte del suelo. En el laboratorio se puede notar que el esfuerzo de corte de suelos remoldeados, cambia de manera significativa debido a la plasticidad, de 1 KN/m<sup>2</sup> en el límite líquido hasta 100 KN/m<sup>2</sup> en el límite plástico. Por tanto el índice de plástico, es la cantidad de agua necesaria para variar el esfuerzo de corte aproximadamente 100 veces, dentro de su rango de plasticidad. Para una muestra de suelo cuyo contenido de humedad se encuentre dentro de su rango plástico, se espera obtener un esfuerzo de corte dentro de los extremos mencionados, y es razonable pensar que el esfuerzo de corte esté relacionado con su contenido de humedad. Además, asumiendo que el patrón de cambio entre el esfuerzo de corte y el contenido de humedad es similar para todos los suelos a lo largo de su rango plástico, se podría entonces obtener el esfuerzo de corte de las arcillas conociendo su contenido de humedad así como sus límites plástico y líquido (Juárez Badillo, 2005).

La plasticidad en las arcillas depende en gran medida del comportamiento electroquímico de los minerales arcillosos, suelos que no poseen minerales arcillosos no presentan plasticidad, pasando así del estado líquido al estado semisólido al reducir su contenido de humedad. Los límites de Atterberg nos indican ambos parámetros, la cantidad de minerales arcillosos presentes en el suelo así como el tipo de minerales presentes.

La relación entre el índice plástico y la cantidad de material inferior a 2 μm nos indica la plasticidad de la porción exclusiva de arcilla, conocida como actividad. Una alta actividad es asociada con aquellos minerales que pueden adsorber grandes cantidades de agua. La inserción de estas grandes cantidades de agua de manera química en la red mineralógica causa un incremento de volumen de los minerales arcillosos por lo tanto el suelo se hincha. La actividad es una medida de cuan propensa a hincharse es una arcilla en presencia del agua. De una manera poco precisa el límite líquido está relacionado con propiedades de hinchamiento y contracción.

La plasticidad refleja la relación entre minerales arcillosos, limos y arenas de un suelo, esto es la proporción de minerales arcillosos presentes en los suelos finos. Cada partícula sean limos, arcillas, o arenas tienen ángulos característicos de fricción, sus proporciones relativas dentro del suelo determinan el ángulo de fricción interna  $\phi_r$  (y por tanto el ángulo de resistencia efectiva  $\phi'$ ) de los suelos arcillosos. Por esto pueden existir correlaciones entre  $\phi_r$ ,  $\phi'$  y el índice de plasticidad (Juárez Badillo, 2005).

### 2.1.4.2. LIMITACIONES

Tanto la granulometría como los límites de Atterberg están relacionados con una amplia gama de propiedades de los suelos. Debido a que dichas relaciones han sido demostradas como ciertas, nos dan una amplia justificación de su uso en los sistemas de clasificación de suelos. De todos modos, los límites de Atterberg no permiten buenas predicciones para ciertas propiedades ingenieriles y ciertas limitaciones deben ser consideradas. Los ensayos de límites se realizan con la porción de suelo inferior a 425  $\mu\text{m}$ , y el grado en el cual estas propiedades reflejan las propiedades del suelo dependerá en gran medida de la porción de material grueso presente y de su correcta granulometría.

Otra limitación es que los ensayos se realizan sobre suelos remoldeados y las correlaciones por lo general no son válidas para suelos inalterados a menos que las propiedades del suelo no cambien en gran medida durante el remoldeo, este el caso de muchas arcillas normalmente consolidadas, pero las características de arcillas sobreconsolidadas, arcillas sensitivas y suelos cementantes, difieren de aquellas predichas por las pruebas de límites.

### 2.1.4.3. CORRELACIONES

La primera correlación que se puede mencionar es la existente entre el límite líquido y el límite de contracción. Existe un método gráfico que consiste en unir mediante una línea recta el punto que representa al suelo en la carta de plasticidad con el punto de intersección de las líneas A y U de la misma. El punto de corte de dicha línea recta con el eje de abscisas (LL) se corresponde justamente con el límite de contracción (véase Figura 10).

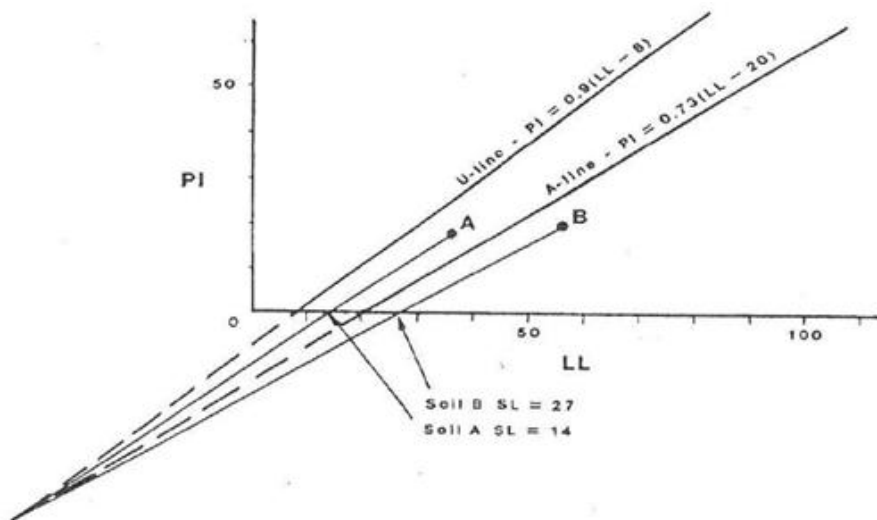


Figura 10. Procedimiento para determinar el límite de contracción. (Carter y Bentley, 1991).





Dentro del capítulo de la consolidación encontramos principalmente fórmulas para calcular el índice de compresión, el cual es la pendiente de la curva  $e$  vs.  $\text{Log } \sigma'$  para suelos normalmente consolidados. Todas las ecuaciones presentadas son empíricas y en algunos casos se aplican solamente para los suelos estudiados. Skempton en 1944 propuso la relación entre el índice de compresión y el límite líquido  $C_c = 0.007*(LL-7)$ , ecuación que no aparece en los textos modernos de mecánica de suelos. La ecuación propuesta por Terzaghi y Peck en 1967 es similar a la anterior. Otras correlaciones existentes se muestran en la Tabla 1.

Autores	Ecuación	Comentarios
Terzaghi y Peck (1967)	$C_c = 0.009*(LL-10)$ $C_c = 0.007*(LL-10)$ LL = Límite líquido (%)	Arcillas no remoldeadas Arcillas remoldeadas
Azzouz et al (1976)	$C_c = 0.01*w_N$ $w_N = \text{Humedad natural (\%)}$	Arcilla de Chicago
	$C_c = 0.0046*(LL-9)$ LL = Límite líquido (%)	Arcilla de Brasil
	$C_c = 1.21 + 1.005*(e_o - 1.87)$ $e_o = \text{índice de huecos}$	Arcilla de la ciudad de Sao Paulo
	$C_c = 0.208 * e_o + 0.0083$ $e_o = \text{índice de huecos}$	Arcilla de Chicago
	$C_c = 0.0115 * w_N$ $w_N = \text{Humedad natural (\%)}$	Suelo orgánico, turba
Nacci et al. (1975)	$C_c = 0.02 + 0.014 * IP$ IP = Índice de Plasticidad (%)	Arcilla del Atlántico Norte
Rendon-Herrero (1983)	$C_c = 0.141 * G_s^{1.2} * \left(\frac{1 + e_o}{G_s}\right)^{2.30}$ $G_s = \text{Peso específico de las partículas}$ $e_o = \text{índice de huecos}$	
Nagaraj y Murty (1985)	$C_c = 0.2343 * \left(\frac{LL}{100}\right) * G_s$ $G_s = \text{Peso específico de las partículas}$ LL = Límite líquido (%)	
Park y Koumoto (2004)	$C_c = \frac{n_o}{371.747 - 4.275 * n_o}$ $n_o = \text{Porosidad in situ del suelo}$	

Tabla 1. Correlaciones empíricas entre  $C_c$  y los límites de Atterberg.

(Adaptado Das, Braja, 2008).

Existe también un gráfico que relaciona de forma aproximada el coeficiente de consolidación  $C_v$  y el límite líquido (véase Figura 11).

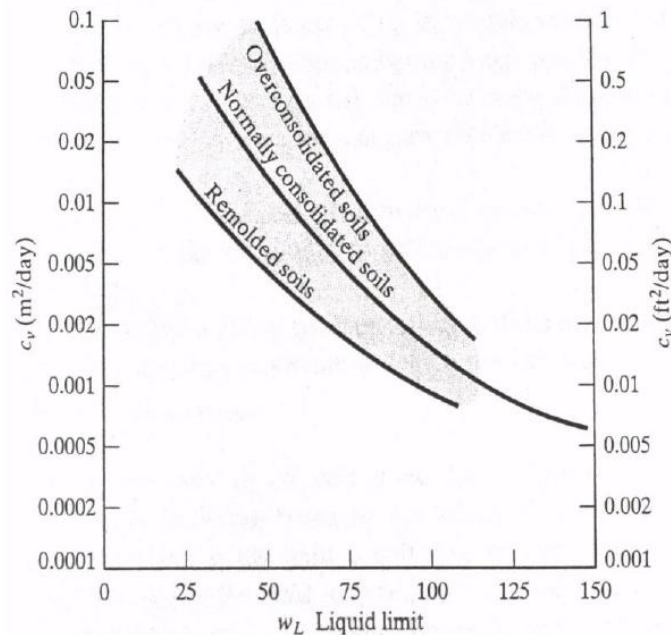


Figura 11. Correlación aproximada entre el coeficiente de consolidación y el límite líquido. (Donald P. Coduto, 1999).

Es común asumir que el esfuerzo de corte de los suelos está gobernado por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, el cual relaciona la tensión de corte ( $\tau$ ) con la tensión normal ( $\sigma$ ) y los parámetros de cohesión ( $c$ ) y ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) del suelo. En las Figuras 12 y 13 se muestran correlaciones existentes entre el índice de plasticidad (IP) y el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) obtenidas por diversos autores.

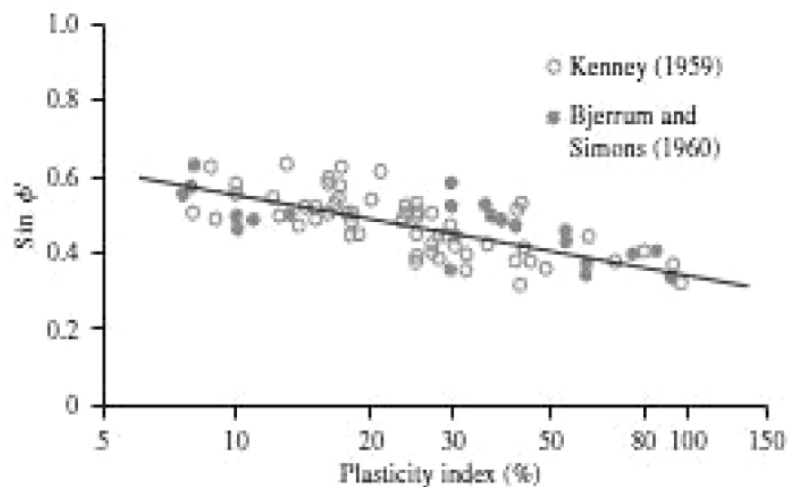


Figura 12. Relación entre el seno del ángulo de fricción efectivo y el índice de plasticidad para algunas arcillas normalmente consolidadas. (Das, Braja, 2011).

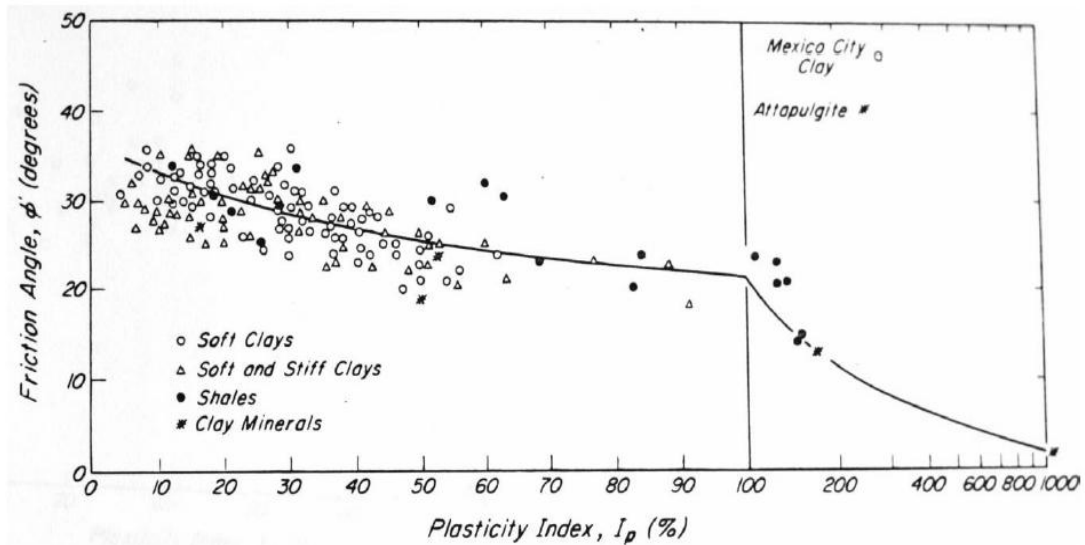


Figura 13. Relación entre el ángulo de fricción efectivo y el índice de plasticidad para arcillas de varios compuestos. (Terzaghi, Peck y Mersi, 1996).

También se han obtenido correlaciones entre el índice de plasticidad y el CBR para varios valores del índice de liquidez (véase Figura 14).

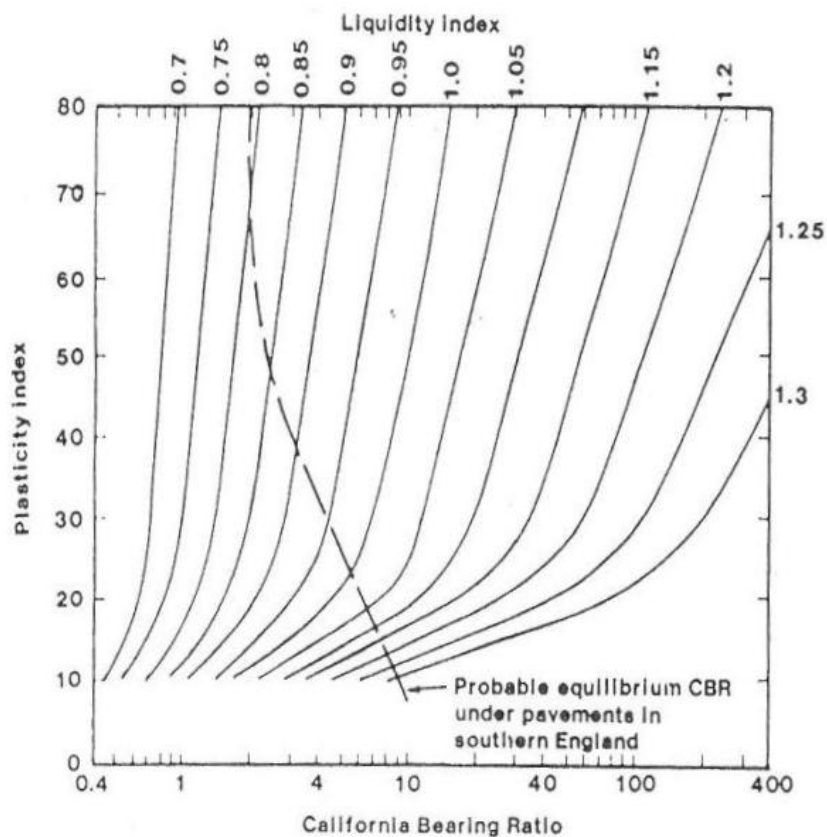


Figura 14. Relación entre el CBR y el índice de plasticidad para distintos valores del índice de liquidez. (Carter M. y Bentley S., 1991).



Los suelos expansivos son aquellos cuyo cambio de volumen es muy marcado con el incremento o disminución del contenido de agua. Dichas propiedades se limitan a suelos que presentan minerales arcillosos, los cuales son susceptibles a absorber agua dentro de su estructura química. El mineral arcilloso se puede determinar mediante su origen geológico y mediante algunas características del suelo, junto con los límites de Atterberg. El ensayo para determinar hinchamiento potencial (S) generalmente no se lleva a cabo, por esta razón se ha intentado correlacionar esta propiedad con la plasticidad.

Seed estableció una relación en 1962, la cual usa al índice de plasticidad (IP) como su factor de referencia (ecuación 9).

$$S = 60 * K * IP^{2,44} \quad (9)$$

En esta fórmula K es una constante igual a  $3,6*10^{-5}$ . Esta ecuación es válida para suelos que tengan un contenido de arcilla entre el 8% y 65%. Los valores obtenidos de esta fórmula se asemejan a los valores obtenidos por el ensayo de hinchamiento, la variación existente es del 33%. Teniendo en consideración esta relación se pueden obtener rangos de valores de la plasticidad correspondiente a los diferentes tipos de hinchamiento potencial (véase Tabla 2).

Hinchamiento potencial	Índice de Plasticidad*	Índice de Plasticidad**
Bajo (0-1.5%)	0-15	0-15
Medio (1.5-5%)	10-30	15-24
Alto (5-25%)	20-55	25-46
Muy alto (+25%)	>40	>46

\* En base a la relación dada por Seed et al. (1962)

\*\* Valores según Krebs y Walker (1971)

*Tabla 2. Identificación del hinchamiento del suelo en base a la plasticidad.*

*(Adaptado Carter y Bentley, 1991).*

Otra correlación que involucra el hinchamiento potencial y el índice de plasticidad es la propuesta por Chen en 1988 (ecuación 10). Para obtener dicha correlación se basó en un estudio de 321 muestras de suelo inalterado.

$$S = 0.2558 * e^{0.0838*(IP)} \quad (10)$$

Una comparación entre varias correlaciones propuestas se puede observar en el siguiente gráfico (Figura 15). Hay que aclarar que la correlación de Holtz y Gibbs dada en la figura no es del todo

comparable con las demás debido a que la medición del cambio de volumen se realizó en muestras de suelos inalterados secadas al aire.

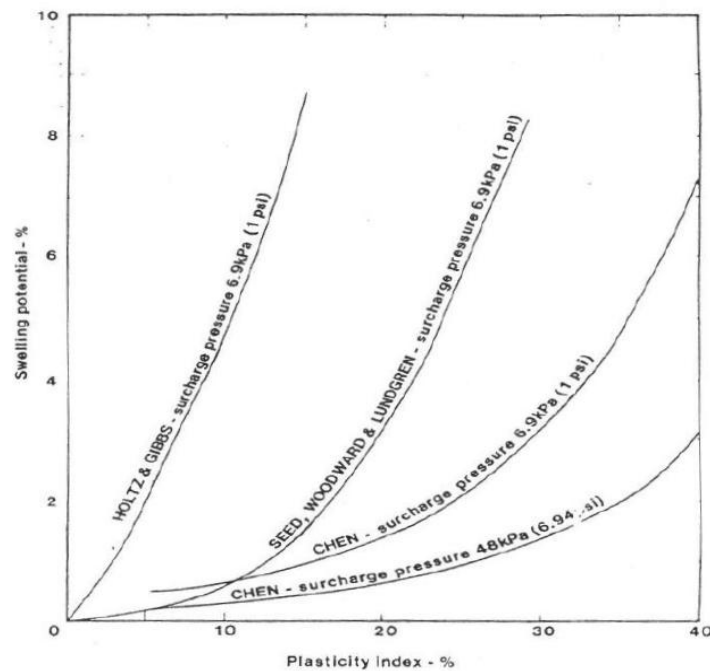


Figura 15. Comparación de varias correlaciones entre el hinchamiento y el índice de plasticidad. (Carter M. y Bentley S., 1991).

Seed junto a otros investigadores sugirieron que debe existir una correlación entre el potencial de hinchamiento y el contenido de partículas de tamaño inferior a  $2 \mu\text{m}$ . Desafortunadamente la correlación muestra factores relacionados con el tipo de mineral arcilloso presente. Para resolver este problema se hizo una correlación tomando como referencia la actividad, obteniendo así una relación simplificada entre el índice de plasticidad y el contenido de minerales arcillosos (véase Figura 16).

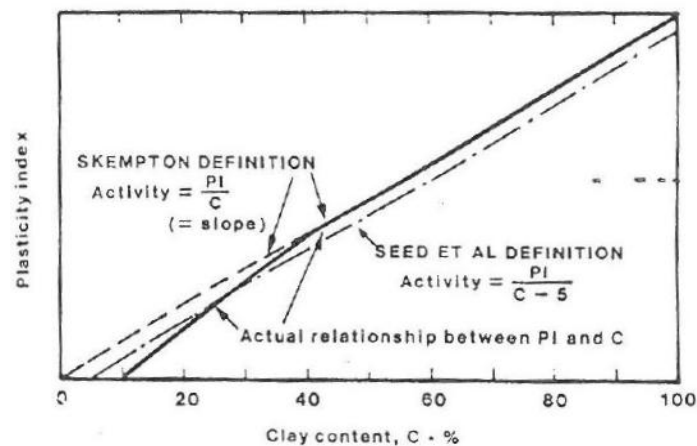


Figura 16. Relación simplificada entre la plasticidad y el contenido de arcilla.

(Carter M. y Bentley S., 1991).

Por otro lado Holtz y Gibbs (1956) correlacionaron el cambio de volumen con el contenido de coloides, el índice plástico y el límite de contracción, como se muestra en la Figura 17.

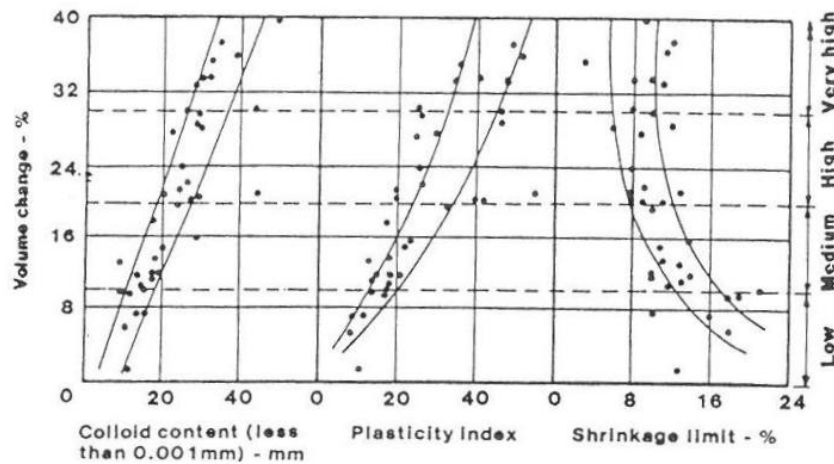


Figura 17. Relación entre el cambio de volumen, el contenido de coloides, el índice de plasticidad y límite de retracción bajo una carga de  $6.9 \text{ kN/m}^2$ . (Carter M. y Bentley S., 1991).

Los autores sugieren esto porque consideraron que el potencial de expansión debe ser calculado tomando en cuenta las tres correlaciones presentadas en la Figura 17. Este procedimiento ha sido adoptado por el servicio de agua y recursos energéticos de los Estados Unidos de Norteamérica. Como se menciona anteriormente se debe tener en cuenta que el cambio de volumen medido, a una presión de  $6.9 \text{ kN/m}^2$  es para suelos inalterados secos y no son directamente comparables con los valores obtenidos para el potencial de hinchamiento.

Holtz y Kovacs (1981) proponen una carta (Figura 18) en la cual se puede ver la susceptibilidad a la expansión o al colapso en base de la densidad seca in situ del suelo y el límite líquido.

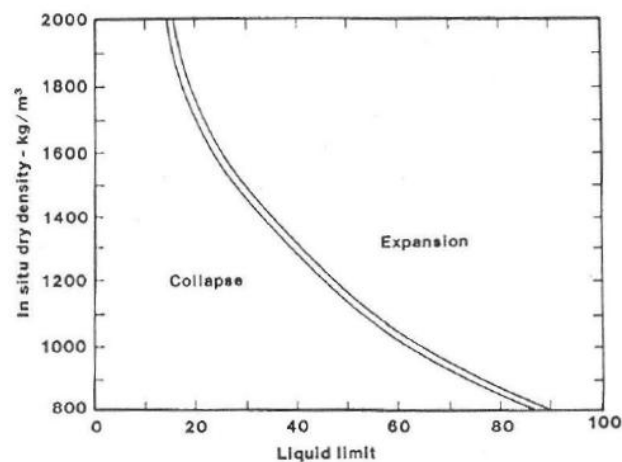


Figura 18. Guía de susceptibilidad de un suelo frente al colapso o expansión, basada en el límite líquido y la densidad seca in situ del suelo. (Carter M. y Bentley S., 1991).

Una vez identificado el suelo expansivo y su potencial de hinchamiento es necesario determinar la presión que este suelo puede ejercer para propósitos de diseño. Como es sabido existen métodos directos para poder medir la presión de expansión de un suelo ya sea en campo como en laboratorio, pero también hay correlaciones empíricas basadas en valores de ensayos más comúnmente realizados. Vijayvergiya y Ghassahy (1973) basándose en estudios empíricos de suelos de las Montañas Rocosas, proponen estimar la presión de hinchamiento del suelo basándose en el índice de hinchamiento ( $I_s$ ).

$$I_s = \frac{w_n}{LL} \quad (11)$$

siendo  $w_n$  la humedad natural y LL el límite Líquido del suelo. La relación entre el índice de hinchamiento, la presión y el límite líquido se muestra en la Figura 19.

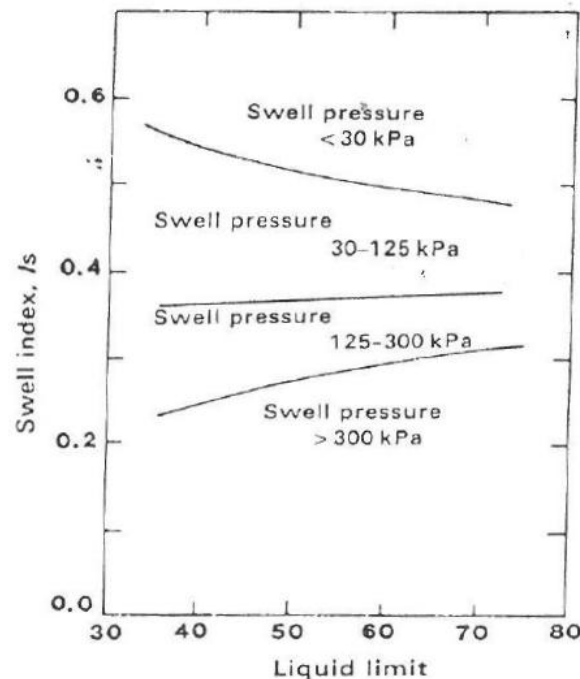


Figura 19. Relación entre el índice de hinchamiento, la presión de hinchamiento y el límite líquido. (Carter M. y Bentley S., 1991).

### 2.1.5. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la Mecánica de Suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente, su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado. Y así se tiene la clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas, la clasificación francesa, la clasificación de la American Association of State Highway and Transportation



Officials (AASHTO) o el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) entre muchas otras.

La existencia de la amplia variedad de sistemas de clasificación de suelos se debe, posiblemente, al hecho de que tanto el ingeniero civil como el geólogo y el agrónomo analizan el suelo desde diferentes puntos de vista. Sin embargo, lo que es fundamental es el hecho de que cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes, debe estar basada en las propiedades mecánicas de los suelos, ya que estas son elementales en las variadas aplicaciones de la ingeniería.

Los dos sistemas de clasificación más empleados en la actualidad son el AASHTO y el SUCS, siendo este último el que mejor satisface los diferentes campos de aplicación de la Mecánica de Suelos.

Ambos sistemas toman como ensayos clave para la clasificación el análisis granulométrico y los límites de Atterberg (especialmente el límite líquido).

#### **2.1.5.1. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)**

Este sistema fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en 1942 para aeropuertos.

La Tabla 3 presenta la clasificación del sistema unificado. Como puede observarse en dicha tabla, los suelos de partículas gruesas y los suelos de partículas finas se distinguen mediante el cribado del material por el tamiz n° 200. Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y los finos a los que lo pasan, y así un suelo se considera grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz n° 200, y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicha malla.

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales grupos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos.





- **Suelos gruesos**

En los suelos gruesos se tienen las gravas (G) y las arenas (S) de tal modo que un suelo pertenece al grupo de las gravas (G) si más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz nº 4, y pertenece al grupo de las arenas (S) en caso contrario.

Tanto las gravas como las arenas se dividen en cuatro grupos (GW, GP, GM, GC) y (SW, SP, SM, SC), respectivamente, como puede verse en la Tabla 3.

En el símbolo GW, el prefijo G (gravel) se refiere a las gravas y W (well graded) quiere decir bien graduado. De igual modo, el símbolo GP indica gravas pobremente o mal graduadas (poorly graded gravel), el símbolo GM indica gravas limosas, en la que el sufijo M proviene del sueco (mo), y el símbolo GC indica gravas arcillosas. El sufijo C indica arcillas (clay).

Así mismo, los símbolos SW, SP, SM y SC indican arenas (sands) bien graduadas, arenas mal graduadas, arenas limosas y arenas arcillosas respectivamente.

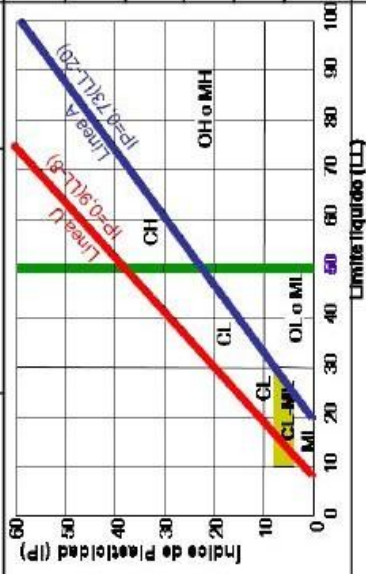
El criterio de clasificación de estos suelos de estos suelos viene detallado en la Tabla 4.

- **Suelos finos**

En los suelos finos el sistema unificado los considera agrupados en tres grupos para limos y arcillas con límite líquido menor del 50%, en tres grupos para limos y arcillas con límite mayor de 50% y en un grupo para los suelos finos altamente orgánicos. Si el límite líquido del suelo es menor de 50%, es decir, el suelo es de plasticidad baja o media, se añade el sufijo L (low plasticity) a los prefijos M, C y O, obteniéndose de ese modo los símbolos ML (limos inorgánicos de baja plasticidad), CL (arcillas inorgánicas de baja plasticidad) y OL (limos orgánicos de baja plasticidad). Si el límite líquido es mayor de 50%, es decir, si el suelo es de plasticidad alta, se añade el sufijo H (high plasticity) a los prefijos M, C y O, obteniéndose así los símbolos MH (limos inorgánicos de alta plasticidad), CH (arcillas inorgánicas de alta plasticidad) y OH (arcillas orgánicas de alta plasticidad). Los suelos altamente orgánicos, como las turbas, se designan con el símbolo PT.

En la Tabla 5 se detalla la clasificación para los suelos finos inorgánicos y en la Tabla 6 la clasificación para los suelos finos orgánicos.

DIVISIÓN	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN		SIM	NOMBRES TÍPICOS
SUELOS DE GRANOS GRUESO < 50% Pasa por el Nº 200 (0,075 mm)	%Finos: - <5% Nº200, GW, GP, SW, SP - >12% Nº200 GM, GC, SM, SC - 5-12% Nº200 símbolos dobles	GRAVAS <50% de la fracción gruesa pasa por el Nº 4 (4,75 mm)	GW	Gravas bien graduadas, ↓ fino
		ARENAS >50% de la fracción gruesa pasa por el Nº 4 (4,75 mm)	GP	Gravas mal graduadas, ↓ fino
SUELOS DE GRANO FINOS ≥ 50% Pasa por el Nº 200 (0,075 mm)	Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	GRAVAS limpias	GM	Gravas limosas
		GRAVAS con finos	GC	Gravas arcillosas
SUELOS ↑↑ ORGÁNICOS	Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	ARENAS limpias	SW	Areñas bien graduadas, ↓ fino
		ARENAS con finos	SP	Areñas mal graduadas, ↓ fino
SUELOS Y ARCILLAS LL < 50	Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	ARENAS limpias	SM	Areñas limosas
		ARENAS con finos	SC	Areñas arcillosas
SUELOS Y ARCILLAS LL > 50	Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	ARENAS limpias	ML	Limos inorg., arenas finísima
		ARENAS con finos	CL	Arcilla. inorg., plast baja-md
SUELOS Y ARCILLAS LL > 50	Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	ARENAS limpias	OL	Limos. org., plast baja
		ARENAS con finos	MH	Limos inorg., micaceos
SUELOS Y ARCILLAS LL > 50	Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	ARENAS limpias	CH	Arcilla. inorg., plast alta
		ARENAS con finos	OH	Arcilla. org., plast alta-media
SUELOS ↑↑ ORGÁNICOS			PT	Turba, y otros suelos orgán.



**Carta de plasticidad:**

- Para suelos finos y fracción fina de los gruesos
- Área sombreada, símbolo doble

Tabla 3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). (Mañas Sánchez, 2010).



		Simbolo del grupo		Nombre del grupo	
<5% finos	GRAVA %Grava>%Arena	Cu≥4 y 1≤Cc<3	GW	<15% Arena ≥15% Arena	Grava bien graduada Grava bien graduada con arena
		Cu<4 y/o 1>Cc>3	GP	<15% Arena ≥15% Arena	Grava pobremente graduada Grava pobremente graduada con arena
5-12% finos	GRAVA %Grava>%Arena	Cu≥4 y 1≤Cc<3	GW-GM	<15% Arena ≥15% Arena	Grava bien graduada con limo Grava bien graduada con arena y limo
			GW-GC	<15% Arena ≥15% Arena	Grava bien graduada con arcilla (o arcilla limosa) Grava bien graduada con arena y arcilla (o arena y arcilla limosa)
	GRAVA %Grava>%Arena	Cu<4 y/o 1>Cc>3	GP-GM	<15% Arena ≥15% Arena	Grava pobremente graduada con limo Grava pobremente graduada con arena y limo
			GP-GC	<15% Arena ≥15% Arena	Grava pobremente graduada con arcilla (o arcilla limosa) Grava pobremente graduada con arena y arcilla (o arena y arcilla limosa)
>12% finos	GRAVA %Grava>%Arena		GM	<15% Arena ≥15% Arena	Grava limosa Grava limosa con arena
			GC	<15% Arena ≥15% Arena	Grava arcillosa Grava arcillosa con arena
	GRAVA %Grava>%Arena		GC-GM	<15% Arena ≥15% Arena	Grava arcillosa, limosa Grava arcillosa, limosa con arena
			SW	<15% Grava ≥15% Grava	Arena bien graduada Arena bien graduada con grava
<5% finos	ARENA %Arena≥%Grava	Cu≥6 y 1≤Cc<3	SP	<15% Grava ≥15% Grava	Arena pobremente graduada Arena pobremente graduada con grava
			SW-SM	<15% Grava ≥15% Grava	Arena bien graduada con limo Arena bien graduada con grava y limo
5-12% finos	ARENA %Arena≥%Grava	Cu<6 y/o 1>Cc>3	SW-SC	<15% Grava ≥15% Grava	Arena bien graduada con arcilla (o arcilla limosa) Arena bien graduada con grava y arcilla (o grava y arcilla limosa)
			SP-SM	<15% Grava ≥15% Grava	Arena pobremente graduada con limo Arena pobremente graduada con grava y limo
>12% finos	ARENA %Arena≥%Grava		SM	<15% Grava ≥15% Grava	Arena limosa Arena limosa con grava
			SC	<15% Grava ≥15% Grava	Arena arcillosa Arena arcillosa con grava
			SC-SM	<15% Grava ≥15% Grava	Arena arcillosa, limosa Arena arcillosa, limosa con grava

Tabla 4. Clasificación para los suelos gruesos según el SUCS (más del 50% es retenido en el tamiz n° 200). (Matías Sánchez, 2010).



				Simbolo del grupo					Nombre del grupo	
LL<50	Inorgánico	IP>7 y en el gráfico por encima de la línea "A"	<30% pasa por el Nº 200	CL				<15% pasa por el Nº 200	Arcilla magra (poco plástica)	
								15-29% pasa por el Nº 200	Arcilla magra con arena	
								% arena<-% grava	Arcilla magra con grava	
								<15% grava	Arcilla magra arenosa	
								≥15% grava	Arcilla magra arenosa con grava	
								<15% arena	Arcilla magra gravosa	
	≥15% arena	Arcilla magra gravosa con arena								
	Orgánico	4≤IP≤7 y en el gráfico por encima de la línea "A"	CL-ML						<15% pasa por el Nº 200	Arcilla limosa
									15-29% pasa por el Nº 200	Arcilla limosa con arena
									% arena>-% grava	Arcilla limosa con grava
									<15% grava	Arcilla limosa arenosa
									≥15% grava	Arcilla limosa arenosa con grava
<15% arena									Arcilla limosa gravosa	
≥15% arena	Arcilla limosa gravosa con arena									
LL>50	Inorgánico	IP<4 y en el gráfico por debajo de la línea "A"	ML					<15% pasa por el Nº 200	Limo	
								<30% pasa por el Nº 200	Limo con arena	
								15-29% pasa por el Nº 200	Limo con grava	
								% arena>-% grava	Limo arenoso	
								<15% grava	Limo arenoso con grava	
								≥15% grava	Limo gravoso	
	<15% arena	Limo gravoso con arena								
	Orgánico	IP en el gráfico por encima de la línea "A"	CH						<15% pasa por el Nº 200	Arcilla muy plástica
									15-29% pasa por el Nº 200	Arcilla muy plástica con arena
									% arena>-% grava	Arcilla muy plástica con grava
									<15% grava	Arcilla muy plástica arenosa
									≥15% grava	Arcilla muy plástica arenosa con grava
<15% arena									Arcilla muy plástica gravosa	
≥15% arena	Arcilla muy plástica gravosa con arena									
Orgánico	IP en el gráfico por debajo de la línea "A"	MH						<15% pasa por el Nº 200	Limo plástico	
								15-29% pasa por el Nº 200	Limo plástico con arena	
								% arena>-% grava	Limo plástico con grava	
								<15% grava	Limo plástico arenoso	
								≥15% grava	Limo plástico arenoso con grava	
								<15% arena	Limo plástico gravoso	
≥15% arena	Limo plástico gravoso con arena									
Orgánico								<15% pasa por el Nº 200	Limo plástico gravoso con arena	
								15-29% pasa por el Nº 200	Limo plástico gravoso con arena	
								% arena>-% grava	Limo plástico gravoso con arena	
								<15% grava	Limo plástico gravoso con arena	
								≥15% grava	Limo plástico gravoso con arena	
								<15% arena	Limo plástico gravoso con arena	
≥15% arena	Limo plástico gravoso con arena									

Tabla 5. Clasificación para los suelos finos según el SUCS (más del 50% pasa por el tamiz nº 200). (Matías Sánchez, 2010).

Símbolo del grupo					Nombre del grupo
OL	IP ≥ 4 y en el gráfico por encima de la línea "A"	<30% pasa por el Nº 200	<15% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Arcilla orgánica
			15-29% pasa por el Nº 200	% arena < % grava	Arcilla orgánica con arena
		≥30% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	<15% grava	Arcilla orgánica arenosa
			% arena < % grava	≥15% grava	Arcilla orgánica arenosa con grava
			% arena < % grava	<15% arena	Arcilla orgánica gravosa
			% arena < % grava	≥15% arena	Arcilla orgánica gravosa con arena
	IP < 4 y en el gráfico por debajo de la línea "A"	<30% pasa por el Nº 200	<15% pasa por el Nº 200		Limo orgánico
			15-29% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Limo orgánico con arena
		≥30% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	% arena < % grava	Limo orgánico con grava
			% arena > % grava	<15% grava	Limo arenoso
			% arena < % grava	≥15% grava	Limo orgánico arenoso con grava
			% arena < % grava	<15% arena	Limo orgánico gravoso
OH	En el gráfico por encima de la línea "A"	<30% pasa por el Nº 200	<15% pasa por el Nº 200		Arcilla orgánica
			15-29% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Arcilla orgánica con arena
		≥30% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	% arena < % grava	Arcilla orgánica con grava
			% arena > % grava	<15% grava	Arcilla orgánica arenosa
			% arena < % grava	≥15% grava	Arcilla orgánica arenosa con grava
			% arena < % grava	<15% arena	Arcilla orgánica gravosa
	En el gráfico por debajo de la línea "A"	<30% pasa por el Nº 200	<15% pasa por el Nº 200		Limo orgánico
			15-29% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Limo orgánico con arena
		≥30% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	% arena < % grava	Limo orgánico con grava
			% arena > % grava	<15% grava	Limo arenoso
			% arena < % grava	≥15% grava	Limo orgánico arenoso con grava
			% arena < % grava	<15% arena	Limo orgánico gravoso

Tabla 6. Clasificación para los suelos finos orgánicos según el SUCS (más del 50% pasa por el tamiz nº 200). (Matías Sánchez, 2010).



### 2.1.5.2. SISTEMA AASHTO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

La clasificación de suelos empleada por la AASHTO es una de las más populares y utilizadas en carreteras, siendo originalmente desarrollada por Terzaghi y Hogentogler para el Bureau of Public Roads norteamericano.

Inspirada en el modelo de Casagrande, considera siete grupos básicos de suelos, numerados desde el A-1 hasta el A-7. A su vez, algunos de estos grupos presentan subdivisiones; así, el A-1 y el A-7 tienen dos subgrupos y el A-2, cuatro.

Para clasificar el suelo se necesitan únicamente conocer el análisis granulométrico y los límites de Atterberg. Si queremos determinar su posición relativa dentro del grupo, se necesita calcular el denominado índice de grupo (IG) con la ecuación (16), expresado como un número entero con un valor comprendido entre 0 y 20 en función del porcentaje de suelo que pasa a través del tamiz nº 200 de la ASTM (0.080 UNE):

$$IG = 0.2 * a + 0.005 * a * c + 0.01 * b * d \quad (16)$$

donde:

a: porcentaje en exceso sobre 35, de suelo que pasa por dicho tamiz, sin pasar de 75. Se expresa como un número entero de valor entre 0 y 40.

b: porcentaje en exceso sobre 15, de suelo que atraviesa el tamiz, sin superar un valor de 55. Es un número entero que oscila entre 0 y 40.

c: Exceso de límite líquido (LL) sobre 40, y nunca superior a 60. Se expresa como un número entero comprendido entre 0 y 20.

d: Exceso de índice de plasticidad (IP) sobre 10, nunca superior a 30. Es también un número entero positivo comprendido entre 0 y 20.

En la Tabla 7 se muestra la clasificación de suelos AASHTO, en la que se recogen todas las características exigibles a cada grupo (y subgrupo en el caso de que exista) del suelo.



DIVISIÓN GENERAL	Materiales Granulares (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM #200)								Materiales Limo-arcillosos ( más del 35% por el tamiz ASTM #200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7		
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (% que pasa por cada tamiz)													
Serie ASTM	#10	≤ 50											
	#40	≤ 30	≤ 50	≥ 51									
	#200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36	
ESTADO DE CONSISTENCIA (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM #40)													
LL			NP	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	> 41 (IP<LL-30)	> 41 (IP>LL-30)	
IP	≤ 6			≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≥ 11	
ÍNDICE GRUPO	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 20	≤ 20				
TIPOLOGÍA	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos			
CALIDAD	EXCELENTE A BUENA					ACEPTABLE A MALA							

Tabla 7. Sistema AASHTO de clasificación de suelos. (Bañón Blázquez y Beviá García, 2010).

A continuación se describen los materiales incluidos en los diversos grupos y subgrupos de la clasificación.

- **Materiales granulares**

- **GRUPO A-1:** El material clasificado en este grupo es una mezcla bien graduada de fragmentos de piedra o grava, arena gruesa, arena fina y un aglomerante no plástico o poco plástico.

- Subgrupo A-1-a: En este subgrupo se clasifican aquellos materiales que están formados, principalmente, de fragmentos de piedra o grava con o sin un aglomerante fino bien graduado.
- Subgrupo A-1-b: Se incluyen en este subgrupo aquellos materiales que están formados, principalmente, de arena gruesa con aglomerante bien graduado o sin él.



- **GRUPO A-2:** En este grupo queda incluida una amplia gama de materiales granulares que forman un campo de transición entre los materiales clasificados como A-1 y los clasificados como A-3, así como los materiales limosos-arcillosos de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Incluye a todos los materiales que contienen hasta un 35% pasando por el tamiz n° 200 que no pueden clasificarse como A-1 o A-3, por sobrepasar las limitaciones de dichos grupos debido a un exceso en la porción de finos, en la plasticidad o en ambas cosas.
  - Subgrupos A-2-4 y A-2-5: Se incluyen en este grupo diversos materiales granulares que contienen hasta un 35% de material pasando por el tamiz n° 200, y en los que la fracción que pasa por el tamiz n° 40 tiene las características de los grupos A-4 y A-5. Quedan incluidos los materiales como gravas y arenas gruesas, con una porción de limo o un índice de plasticidad mayor a la limitación del grupo A-1, y arenas finas que contienen limo no plástico en cantidad superior a las limitaciones del grupo A-3.
  - Subgrupos A-2-6 y A-2-7: Aquí se incluyen los materiales similares a los de los grupos A-2-4 y A-2-5, con la diferencia de que el material fino contiene arcilla plástica que tiene las características de los grupos A-6 y A-7. Los efectos combinados del aumento por encima de 10 del índice de plasticidad y del aumento por encima del 15% de lo que pasa por el tamiz n° 200, se refleja en los valores del índice de grupo.
- **GRUPO A-3:** El material de este grupo es una arena fina de playa o de duna, carente de material fino arcilloso o limoso, o con una cantidad muy pequeña de limo no plástico. También quedan incluidas en este grupo las mezclas de arena fina mal graduada con pequeñas cantidades de arena gruesa y gravas de río.
- **Materiales limo-arcillosos**
  - **GRUPO A-4:** A este grupo pertenecen los suelos limosos sin plasticidad o poco plásticos, que tienen más del 35% de sus partículas pasando por el tamiz n° 200. También incluye este grupo a mezclas de limo fino y hasta un 64% de gravas y arenas que carecen de la fracción que pasa por el tamiz n° 200. El índice de grupo varía de 1 a 8, notándose un aumento en el porcentaje de material grueso a medida que se reduce el índice de grupo.





- **GRUPO A-5:** Los materiales de este grupo son similares a los del grupo A-4, pero con la diferencia de que los suelos del grupo A-5 son, por lo general, del tipo diatomáceo o micáceo. Estos suelos pueden ser muy elásticos, según se refleja por lo alto de su límite líquido. Su índice de grupo varía de 1 a 12, indicando los valores crecientes, el efecto combinado de la disminución del porcentaje de material grueso y el aumento de su límite líquido.
- **GRUPO A-6:** Corresponden a este grupo las arcillas plásticas que tiene más de 35% de material que pasa por el tamiz n° 200. El grupo incluye también a las mezclas de suelo arcilloso fino con hasta 64% de gravas y arenas que carezcan de la fracción que pasa por el tamiz n° 200. Con la humedad estos suelos experimentan fuertes cambios de volumen. Su índice de grupo varía de 1 a 16, indicando los valores crecientes el efecto del aumento de su índice plástico y la disminución del porcentaje de material grueso.
- **GRUPO A-7:** Los materiales de este grupo son similares a los del grupo A-6, excepto que tienen un límite líquido muy alto, como es característico de los suelos del grupo A-5. Los suelos del grupo A-7 pueden ser elásticos y están sujetos a grandes cambios de volumen. Estos suelos tiene un índice de grupo que varía de 1 a 20, reflejándose el efecto combinando del aumento del límite líquido y del índice plástico y de la disminución del porcentaje de material grueso, en los valores crecientes del índice de grupo.
  - Subgrupo A-7-5: En este grupo se incluye a los materiales con un índice de plasticidad moderado en relación con el límite líquido, los cuales pueden ser muy elásticos y estar sujetos a grandes cambios de volumen.
  - Subgrupo A-7-6: Se incluyen en este grupo a los materiales que tienen un índice de plasticidad alto con relación a su límite líquido y que están sujetos a extremadamente grandes cambios de volumen con los cambios de humedad.

## 2.2. ENSAYOS PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO

Básicamente para la determinación del límite líquido de los suelos se han utilizado dos tipos de ensayos: el ensayo dinámico tradicional propuesto por Casagrande, en el que se utiliza el dispositivo conocido como cuchara o copa de Casagrande; y por otra parte los ensayos estáticos basados en la penetración de un elemento cónico.

De estos dos tipos de ensayo, el propuesto por Casagrande ha sido el que mayor difusión ha tenido, habiéndose adoptado dicho ensayo como el de referencia por la inmensa mayoría de los países del mundo (entre ellos España) para la determinación del límite líquido. No obstante en el Reino Unido la normativa contempla los dos tipos de ensayos para su determinación, recomendando el empleo del penetrómetro cónico por sus ventajas.

## 2.2.1. UTILIZACIÓN DE LA CUCHARA DE CASAGRANDE

### 2.2.1.1. ANTECEDENTES

El límite líquido como fue definido por Atterberg ha estado sujeto a distintas variaciones en su determinación. Fue Terzaghi, quien le sugirió a Casagrande en 1927, que diseñara un dispositivo mecánico que pudiera eliminar en la medida de lo posible los errores del operador en la determinación del mismo.

Casagrande desarrolló un dispositivo normalizado conocido con el nombre de cuchara o copa de Casagrande, estableciéndose el límite líquido, como ya se ha comentado anteriormente, como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en la cuchara normalizada, cuando un surco, realizado de tal manera que divide a dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo del fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces dicha cuchara desde una altura de 10 mm con una cadencia de 2 golpes por segundo.

Para entender el significado del ensayo mediante el dispositivo desarrollado por Casagrande, se puede decir que para golpes secos, la resistencia al corte dinámica de los taludes de la ranura se agota, generándose una estructura de flujo que produce el deslizamiento (véase Figura 20).

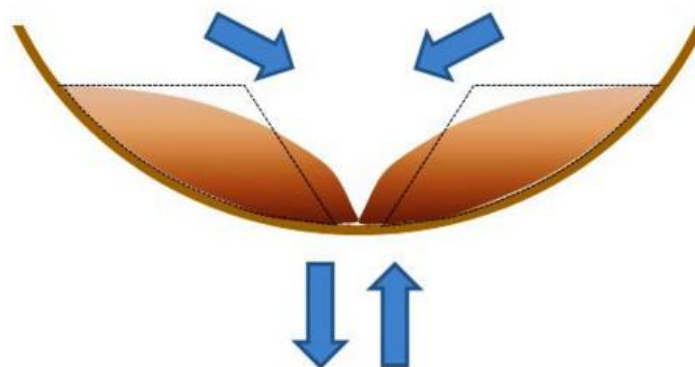


Figura 20. Deslizamiento de un suelo en el límite líquido. (Osorio, 2010).

Casagrande observó que el número de golpes necesarios para cerrar la ranura dependía del contenido de agua del suelo y que cuando una serie de resultados de un suelo se representaba en un gráfico donde el eje de la humedad era aritmético y el eje del número de golpes era logarítmico, esos resultados formaban una línea recta. Esa curva fue llamada curva de flujo.

Las ventajas de graficar los resultados de este modo son: la curva puede ser dibujada con pocos puntos, se pueden detectar más fácilmente los errores en una línea recta (escala semilogarítmica) que en una línea curva (escala aritmética) y el índice de flujo puede ser definido por la pendiente de la recta (véase Figura 21).

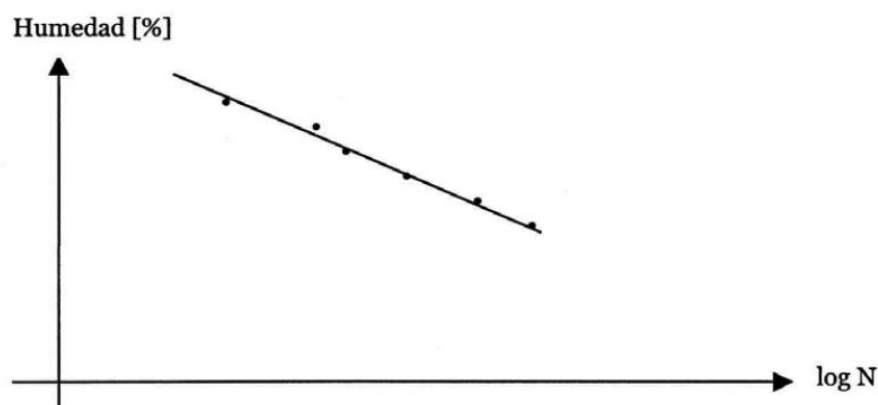


Figura 21. Curva de flujo (Osorio, 2010).

Esta curva puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$w = -F * \log N + C \quad (12)$$

donde:

w = Contenido de humedad en porcentaje de suelo seco.

F = Constante, llamada “índice de flujo”.

N = Número de golpes.

C = Constante

El número de golpes N puede ser considerado como representado por la fuerza igual a N veces la fuerza ejercida en la aplicación de un solo golpe. La resistencia al corte de un suelo es obviamente proporcional a la fuerza requerida para producir una deformación dada (en el caso tratado, el cierre de la ranura). Entonces, el número de golpes N de la ecuación (12), puede ser tomado como proporcional a la resistencia al corte de un suelo  $s$ , y puede ser escrita como:



$$w = -F * \log s + C_i \quad (13)$$

donde  $C_i$  es diferente a  $C$  debido a que  $s$  está expresado en unidades físicas.

La necesidad de ejecutar muchos ensayos de límite líquido llevó a desarrollar un método de determinación que tuviese conexión con la curva de flujo, ya que los estudios de Casagrande pusieron de relieve que muestras de un mismo suelo deberían tener curvas de flujo con pendiente constante.

La U.S. Waterways Experiment Station realizó un estudio sobre 767 ensayos de límite líquido correspondientes a suelos de depósitos aluviales y suelos costeros del Valle de Misisipí. La fórmula general desarrollada como resultado del estudio fue:

$$LL = w * \left(\frac{N}{25}\right)^{\tan \beta} \quad (14)$$

donde  $\tan \beta$  es la pendiente de la curva de flujo en escala doble logarítmica y  $w$  es la humedad correspondiente al número de golpes  $N$  obtenida en la determinación de un punto mediante la cuchara de Casagrande. Esta curva de flujo se transforma en una recta.

El valor obtenido de  $\tan \beta$  para 432 ensayos de suelos aluviales fue de 0.115. Para los 136 ensayos de los suelos del Oeste del Valle fue de 0.125 y para los 135 ensayos de los suelos del Este del Valle fue de 0.130. Finalmente se obtuvo que para los 767 ensayos realizados en todo el proyecto, el valor promedio obtenido fue de 0.121 con una desviación estándar de  $\pm 0.032$ . Lo que significa que todos los suelos no poseen exactamente la misma pendiente pero están cerca de un valor medio.

Finalmente se concluyó que este método podía usarse si el número de golpes  $N$  utilizado en la fórmula estaba comprendido entre 15 y 40 golpes.

En la determinación del límite líquido por dicho método P.J. Edén (1959) propuso inicialmente multiplicar la humedad obtenida  $w$  para cierto número de golpes  $N$  por un factor de corrección  $C_n$  como se muestra en la Tabla 8, suponiendo que la pendiente de la curva de flujo es constante (0.100) para todos los suelos excepto para suelos con gran contenido de materia orgánica o cuando se requiera una exactitud especial en la determinación.



N	C <sub>n</sub>	N	C <sub>n</sub>	N	C <sub>n</sub>	N	C <sub>n</sub>
15	0.950	20	0.977	26	1.004	31	1.022
16	0.955	21	0.983	27	1.008	32	1.025
17	0.962	22	0.987	28	1.012	33	1.028
18	0.968	23	0.992	29	1.015	34	1.031
19	0.973	24	0.996	30	1.019	35	1.034

Tabla 8. Factor de corrección del límite líquido propuesto por P. J. Edén (Edén, 1959).

Finalmente, Edén obtuvo una recta de pendiente 0.117 tras realizar numerosas determinaciones, de las que dedujo que, para un mismo suelo, los puntos correspondientes a distintos grados de humedad formaban una recta en doble escala logarítmica cuya pendiente más probable era ésta, la cual es la pendiente adoptada por la norma UNE 103-103-94.

El hecho de que la pendiente de la recta se considere constante independientemente del origen geológico del suelo, simplifica en gran parte la determinación del límite líquido, conociéndose dicho método como “método de Casagrande puntual”, frente al “método de Casagrande multipunto” en el que la pendiente de la recta de ajuste no queda predefinida, sino que es la que mejor ajuste a los pares de valores nº golpes-humedad que se obtengan en el ensayo.

#### 2.2.1.2. NORMA UNE 103-103-94

##### 2.2.1.2.1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

La norma tiene por objeto establecer el procedimiento para determinar el límite líquido de un suelo mediante la utilización del aparato de Casagrande. Se define el límite líquido, a los efectos de dicha norma, como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada, cuando un surco, realizado con un acanalador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de 2 golpes por segundo.

##### 2.2.1.2.2. APARATOS Y MATERIAL NECESARIO

- Aparato de Casagrande: Es un utensilio mecánico que consiste en una cuchara de aleación de cobre, suspendida de un dispositivo diseñado para controlar su caída sobre

una base dura. En la Figura 22 se muestra un croquis con las características y dimensiones que debe tener este aparato. El diseño de dicho utensilio puede variar siempre y cuando conserve las dimensiones esenciales. El accionamiento de la cuchara puede ser manual o con motor eléctrico.

Medidas

Letra	A Δ	B Δ	C Δ	E Δ	F	G	H	J Δ	K Δ	L Δ	M Δ	X
MM	54 ± 0,5	2 ± 0,1	27 ± 0,5	56 ± 2,0	28	10	28	60 ± 1,0	50 ± 2,0	150 ± 2,0	125 ± 2,0	19
Letra	N	P	R	T	U Δ	V	W	Z	D	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	Y
MM	17	28	21	45	47 ± 1,0	4	13	6,5	23	75° ± 1°	60° ± 1°	12,7

Δ Medidas esenciales

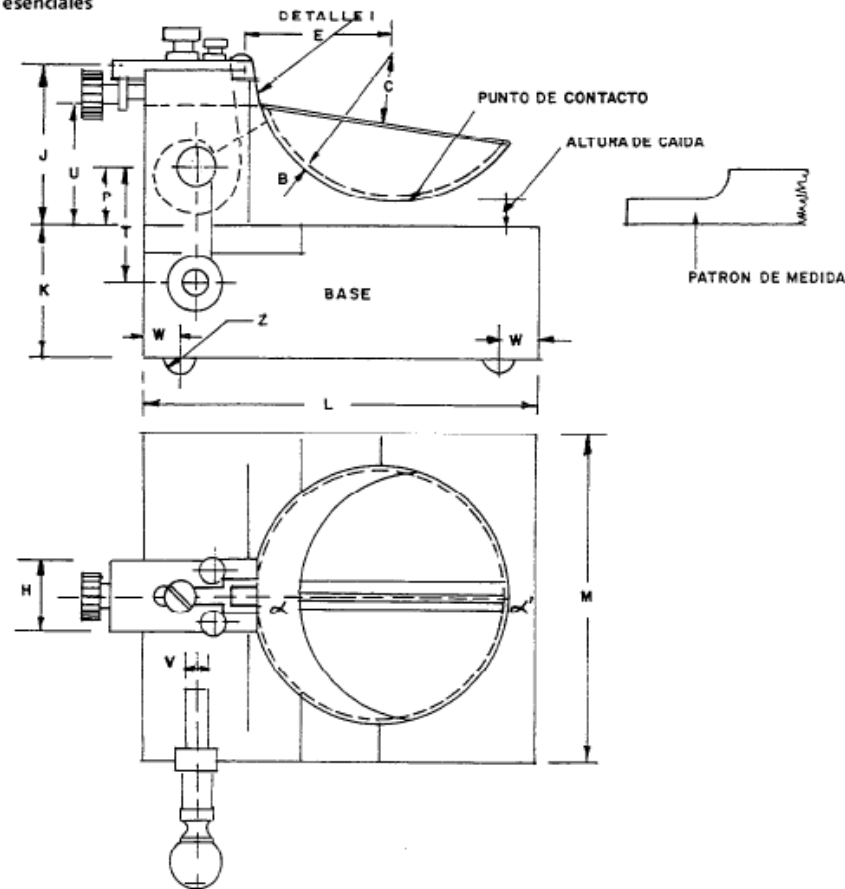


Figura 22. Características y dimensiones del aparato de Casagrande para la determinación del límite líquido según UNE 103-103-94 (Norma UNE 103-103-94., 1994).

- Acanalador normalizado: El denominado de Casagrande o plano con las dimensiones exigidas (véase Figura 23). Su diseño puede variar siempre y cuando se mantengan las dimensiones esenciales. Lleva incorporado un calibre de ajuste de la altura de caída de la cuchara. Además se pueden utilizar los acanaladores, curvo o de la ASTM y hueco o de Hovanyi (véase Figuras 24 y 25 respectivamente), en los casos que se especifican más adelante. El material utilizado en la fabricación de los acanaladores debe ser no

corroible y tal que le proporcione la rigidez suficiente para conseguir un surco uniforme.

Medidas

Letra	A Δ	B Δ	C Δ	D Δ	E Δ	F	G	H Δ
MM	2 ± 0,1	11 ± 0,2	40 ± 0,5	8 ± 0,1	50 ± 0,5	5	55	47° ± 1°
Letra	J Δ	K Δ	L Δ	M Δ	N Δ	P	R	
MM	10 ± 0,05	20 ± 0,1	60° ± 1°	1,6 ± 0,1	3,2 ± 0,1	1,6 ± 0,1	10	

Δ Medidas esenciales

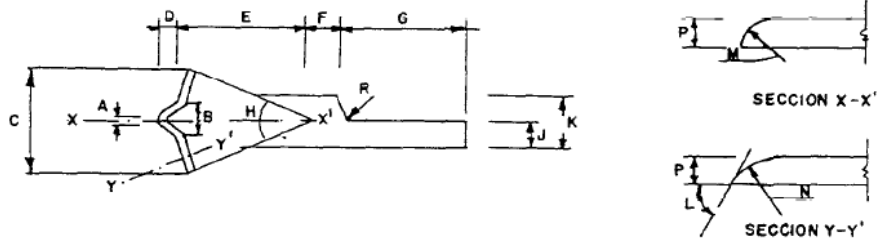


Figura 23. Características y dimensiones del acanalador de Casagrande para la determinación del límite líquido según UNE 103-103-94 (Norma UNE 103-103-94., 1994).

Medidas

Letra	A Δ	B Δ	C Δ	D Δ	E Δ	F Δ	G Δ	H Δ	J Δ
MM	2 ± 0,1	14 ± 0,2	11 ± 0,2	6	30° ± 0,5°	30 ± 0,5	32 ± 0,5	10 ± 0,05	123

Δ Medidas esenciales

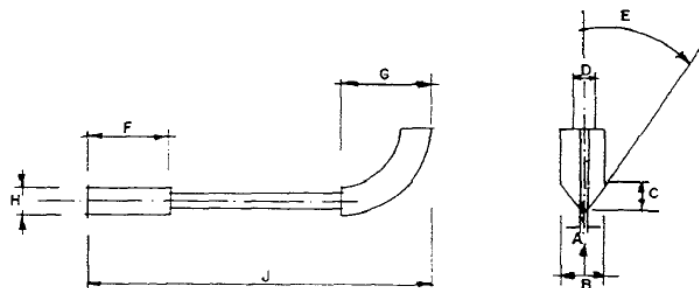


Figura 24. Características y dimensiones del acanalador de la ASTM para la determinación del límite líquido según UNE 103-103-94 (Norma UNE 103-103-94., 1994).

Medidas

Letra	A Δ	B Δ	C Δ	D Δ	E Δ	F	G	H Δ	J Δ	K Δ	L Δ	M Δ	R
MM	2 ± 0,1	11 ± 0,2	1 ± 0,05	8 ± 0,1	50	15	45	70° ± 1°	10 ± 0,05	20 ± 0,1	7 ± 0,1	3 ± 0,1	10

Δ Medidas esenciales

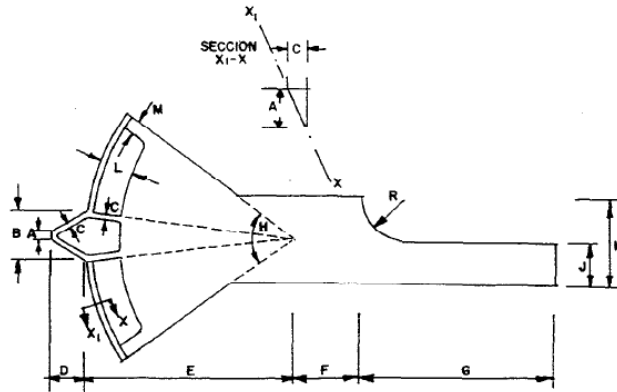


Figura 25. Características y dimensiones del acanalador de Hovanyi para la determinación del límite líquido según UNE 103-103-94 (Norma UNE 103-103-94., 1994).

- Espátulas de hojas flexibles de varios tamaños.
- Pesarustancias con tapa.
- Una balanza de 100 g como mínimo de capacidad que aprecie 0.01 g.
- Un tamiz 400 μm Norma UNE 7-050/2.
- Una superficie lisa, tal como un cristal de 300 mm x 300 mm de lado y 10 mm de espesor para amasar el suelo.
- Estufa de desecación cuya temperatura sea regulable hasta 115 °C.
- Mortero con mazo de goma o molino que disponga de bolas forradas del mismo material.
- Cámara húmeda que mantenga una humedad relativa de 95% ± 5% y una temperatura de 20 °C ± 3 °C.
- Calibre, pinzas para manipular los recipientes calientes, frasco lavador y agua destilada.

### 2.2.1.2.3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- Por secado y desmenuzado

Cuando el suelo a ensayar se encuentre en un estado tal que no sea posible individualizar manualmente sus partículas se procede según se indica a continuación.





Se seca al aire o en estufa a una temperatura que no exceda los 60 °C, hasta que los terrones de tierra se desmenucen fácilmente, una porción representativa del suelo a ensayar, suficiente para proporcionar una muestra de 150 g a 200 g de material que pase por el tamiz 400  $\mu\text{m}$  Norma UNE 7-050/2, siguiendo las instrucciones de la Norma UNE 103-100. Se pulveriza la muestra en un mortero empleando una maza con extremo de goma, o en un molino que disponga de bolas forradas del mismo material, de manera que no se destruyan los granos individuales. Se pasa por el tamiz 400  $\mu\text{m}$  Norma UNE 7-050/2. Se repiten las operaciones de pulverización y tamizado cuantas veces sea necesario, hasta asegurarse de que se ha disgregado todo el material más fino y que el material retenido por el tamiz 400  $\mu\text{m}$  Norma UNE-7-050/2 sólo consiste en granos de grava o arena individuales.

Si antes de la pulverización se encuentran materiales como concreciones, conchas u otras partículas frágiles, no se deben triturar para que pasen a través del tamiz requerido, sino que hay que quitarlos a mano u otro medio adecuado, tal como el lavado.

El material que pasa por el tamiz 400  $\mu\text{m}$  Norma UNE 7-050/2, en cantidad mínima de 150 g, se amasa, sobre un cristal mediante espátulas con la cantidad de agua necesaria a juicio del operador que realiza el ensayo, para que se precisen de 35 a 30 golpes para conseguir cerrar los 13 mm del surco. Se deja la mezcla en reposo durante 2 h en cámara húmeda. Después se amasa de nuevo, añadiendo agua si fuese necesario al final de este periodo.

— En suelo natural. Vía directa

En los suelos orgánicos y en los inorgánicos con alto contenido de limo o arcilla, el proceso de secado previo puede dar lugar a una variación apreciable del límite líquido. Por consiguiente en suelos homogéneos de grano fino, en los que su contenido de humedad natural permita el amasado mediante espátula, se opera de la siguiente forma.

Se toman 200 g de muestra representativa del suelo y se dividen sobre la superficie del cristal en varias porciones por medio de una espátula. Si contiene algunas partículas apreciablemente mayores de 400  $\mu\text{m}$ , tales como concreciones o conchas, se retiran por medio de una pinza y se determina su masa para conocer la proporción que representan con respecto al total de la muestra tomada.

Se añade agua destilada y se amasa convenientemente con las dos espátulas hasta conseguir una masa homogénea.



Finalizado el proceso se deja de un día para otro en cámara húmeda para que se homogeneice la humedad.

— En suelo natural. Vía húmeda

Cuando se trate de un suelo de grano fino que contenga una apreciable proporción de otros materiales de grano más grueso, se debe proceder por vía húmeda para la separación de la fracción necesaria para la realización del ensayo a fin de evitar el secado previo.

Se toma una porción representativa de suelo tal que se pueda obtener de ella una muestra de 300 g de material inferior a 400  $\mu\text{m}$ . Se coloca en un recipiente, se le añade agua destilada hasta cubrirla, sin dispersante, y se remueve con una varilla de vidrio hasta conseguir un líquido denso.

Se vierte éste sobre un tamiz 400  $\mu\text{m}$  Norma UNE 7-050/2, colocado sobre un recipiente adecuado y se lava con agua destilada el material que quede en el tamiz hasta conseguir que pasen todas las partículas de tamaños inferiores.

Se deja sedimentar la suspensión obtenida y se elimina el agua limpia que haya por encima del material depositado. Se seca al aire o bajo la acción de una corriente de aire caliente a no más de 60 °C, agitando la pasta para conseguir un secado uniforme. El proceso puede considerarse finalizado cuando la consistencia de dicha pasta sea la adecuada para iniciar el amasado con las espátulas sobre el cristal, siguiendo el proceso descrito anteriormente.

En cualquiera de los tres casos, cuando se trata de un suelo de elevada plasticidad, el periodo de curado en cámara húmeda debe ampliarse hasta 48 h. Por el contrario en suelos limosos con bajo contenido en arcilla puede reducirse a unas 2 h.

#### **2.2.1.2.4. PROCEDIMIENTO OPERATORIO**

Se separa la cuchara del resto del aparato. Se sujeta firmemente con la palma de la mano, y por medio de una espátula, se coloca en su parte inferior, en la zona en que la cuchara descansa sobre la base, una porción de suelo amasado, aplastándole hacia abajo y extendiéndole dentro de la cuchara de un lado a otro, de manera que el material tenga una altura de unos 10 mm en su punto de mayor espesor y procurando formar una superficie lisa.



Hay que tener cuidado de que no queden burbujas de aire dentro del suelo amasado, debiendo repetir el proceso si hubiese alguna o apareciera durante el proceso posterior. El material sin usar se amontona sobre el cristal y se protege de la posible pérdida de humedad.

Manteniendo la cuchara con el material en la palma de la mano, se hace un surco con el acanalador de Casagrande en el sentido de arriba hacia abajo, con el borde biselado hacia adelante, disponiendo en todo momento el acanalador perpendicular a la superficie de la cuchara y describiendo un arco.

En suelos poco plásticos, para evitar el desgarramiento del material, el surco puede hacerse en varias pasadas, cada una de ellas más profunda que la anterior. A veces en estos suelos el acanalador de Casagrande puede empujar una porción del material fuera de la cuchara, produciendo en general surcos muy irregulares. Esto se puede evitar utilizando el acanalador hueco o de Hovanyi (véase Figura 25). En suelos turbosos es preferible utilizar el acanalador curvo (véase Figura 24).

Después de realizar el surco, se coloca inmediatamente la cuchara en el aparato, comprobando que no queden restos de material en la cara inferior de aquella. Se gira la manivela a razón de dos vueltas por segundo y se cuentan los golpes necesarios para que las paredes del surco se unan por el fondo del mismo en una distancia de 13 mm.

Si el número de golpes está comprendido entre 35 y 15, ambos inclusive, se toma una porción de entre 10 y 15 g del suelo próximo a las paredes del surco, en la parte donde se cerró, y se determina su humedad según la Norma UNE 103-300. Si el número de golpes no está comprendido entre 35 y 15, la determinación no es válida.

Se repite el ensayo hasta obtener una determinación entre 25 y 15 golpes, y otra entre 35 y 25, teniendo en cuenta que el número de golpes disminuye al aumentar la cantidad de agua destilada que se añade para realizar el amasado.

Si después de varias determinaciones, el número de golpes requeridos para cerrar el surco fuese siempre inferior a 25 golpes, es que no se puede determinar el límite líquido y se debe anotar este suelo como no plástico sin realizar el ensayo de determinación del límite plástico.



#### 2.2.1.2.5. RESULTADOS

Se llevan las dos determinaciones a un gráfico que tenga en abscisas el número de golpes, y en ordenadas la humedad, ambos en escala logarítmica. Se traza la paralela a la línea de trazos dibujada en el gráfico del modelo de impreso de la norma, que equidiste de los dos últimos puntos anteriores. La humedad del punto de intersección de esta recta con la ordenada correspondiente a los 25 golpes, expresada con una cifra decimal, es el límite líquido.

Si la recta trazada dista mucho de ambos puntos, hay que hacer una tercera determinación para comprobar si hay algún error en las otras dos o si, por tratarse de un tipo muy especial de suelo, no sigue la ley indicada. En este último caso, se traza la recta que mejor se adapta a los tres puntos obtenidos.

#### 2.2.1.3. NORMATIVA EN OTROS PAÍSES

La normativa que regula el ensayo del límite líquido por el método de la cuchara de Casagrande en otros países difiere poco de la Norma UNE 103-103-94 en cuanto a material utilizado y metodología de preparación de la muestra, si bien la mayoría contemplan la posibilidad de la utilización no excepcional del “método multipunto”, en el que la pendiente de la recta de ajuste no está definida de antemano, mientras que nuestra norma lo restringe a casos excepcionales o tipos de suelos muy especiales que no se ajustan bien al “método puntual”, en el que la pendiente de la recta de ajuste está predefinida.

En cuanto al “método puntual”:

- La Norma ASTM D 4318:95 utiliza una pendiente de 0.121 y el número de golpes ha de estar entre 20 y 30, teniendo que hacerse el ensayo dos veces y el resultado obtenido distar menos de una unidad para ser aceptado, siendo el límite líquido el valor medio.
- La Norma BS 1377:1990 utiliza una pendiente de 0.092 obtenida de un estudio (Norman, 1959) sobre 504 muestras principalmente de Gran Bretaña.

En cuanto al “método multipunto”:

- La Norma ASTM D 4318:95 exige tres o más puntos, aunque lo normal es utilizar cuatro. Uno ha de estar entre 15-25 golpes, otro entre 20-30 y otro entre 25-35.



- La Norma BS 1377:1990 es idéntica a la ASTM, aunque prefiere la utilización del método del penetrómetro cónico como se comentará más adelante. Es importante saber que la superficie de goma sobre la que rebota la cuchara es algo más blanda que la que utiliza la ASTM por lo que los resultados no son del todo comparables.

#### 2.2.1.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU UTILIZACIÓN

Entre las principales ventajas de la utilización de la cuchara de Casagrande tenemos:

- El “método multipunto” se adapta a diferentes tipos de suelos ya que no presupone la pendiente de la recta y además al obtenerse puntos con más de 25 golpes es posible detectar suelos “no plásticos”.
- Con el “método puntual” midiendo un solo punto en lugar de cuatro se obtiene una variabilidad similar al método multipunto. Si se hacen dos mediciones la variabilidad disminuye algo respecto al “multipunto”, aunque no mucho ya que se utiliza el mismo aparato y metodología. Además si se hace un estudio previo de la zona, el “método puntual” puede llegar a ser fiable y sobre todo muy barato, aunque algunas normas no reconocen este sistema como válido.

Como principales inconvenientes destacan:

- El método es muy dependiente del operador. Una variación en el ritmo de golpeo, en la forma de la hendidura realizada o en la visualización de cuando se cierra la misma influye de manera significativa.
- Es un método dinámico, algo desaconsejado en general para estudiar arcillas.
- Aunque la inmensa mayoría de los suelos precisa de 25 golpes para llegar al límite líquido, en algunos casos extremos puede variar entre 11 y 39, por lo que no sirve para suelos no estándar como los volcánicos.
- Con el “método multipunto”, la pendiente obtenida al interpolar suele ser demasiado variable, incluso en suelos estándar, con un coeficiente de variación en los resultados obtenidos de cerca del 8% (Sherwood y Ryley, 1970), además de ser laborioso por necesitarse 4 puntos (algunas normas permiten 3 pero se aconsejan 4).
- Con el “método puntual” la pendiente puede no ser la apropiada para ciertos tipos de suelo.

## 2.2.2. UTILIZACIÓN DEL PENETRÓMETRO CÓNICO

### 2.2.2.1. ANTECEDENTES

Además del método de la cuchara de Casagrande, adoptado por las normas de todo el mundo, existe un método alternativo basado en el empleo de un penetrómetro cónico, con el que se solventan algunas de las deficiencias del método tradicional.

Esencialmente el ensayo del límite líquido es una medida de la resistencia al corte de un suelo blando cuya humedad se acerca al estado líquido. La teoría de plasticidad desarrollada por Prandtl estableció una relación entre la resistencia al corte y la resistencia a la penetración de un suelo, siendo esta relación una constante en materiales como las arcillas saturadas. Entonces, podemos decir que el ensayo de penetración debería ser una medida válida de límite líquido.

Históricamente distintos tipos de penetrómetros cónicos se han desarrollado para determinar el límite líquido.

Inicialmente se usaron la aguja de Vicat y conos estrechos, con los que aparentemente no se obtenían resultados satisfactorios. El primer ensayo normalizado fue desarrollado por Vasilev en 1949, donde el aparato utilizado fue el denominado “cono ruso”, donde la humedad correspondiente a una penetración de 10 mm indicaba el límite líquido (véase Figura 26).

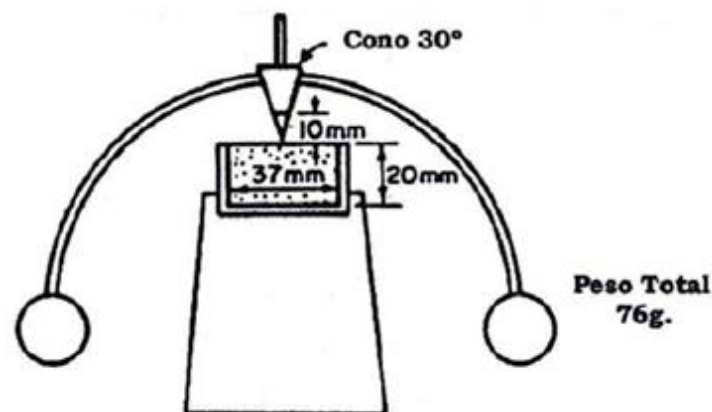


Figura 26. Cono ruso o de Vasilev (Osorio, 2010).

Posteriormente en el año 1951 el Instituto Tecnológico de Georgia desarrolló un penetrómetro denominado “cono de Georgia” en el que la punta del cono penetra en el suelo empujado por un peso de 75 g. Para evitar efectos dinámicos se frena la caída, de modo que el peso total no actúe

sobre la punta hasta pasados diez segundos desde el comienzo del ensayo. Con este aparato se dice que el suelo está en el límite líquido cuando la penetración de la punta es de 10 mm. Para ello habrá que medir las penetraciones de muestras con distinta humedad e interpolar para 10 mm. La Figura 27 muestra un esquema de cono de Georgia y la correlación que existe entre este método y el convencional, la cual fue obtenida por Sowers (1959).

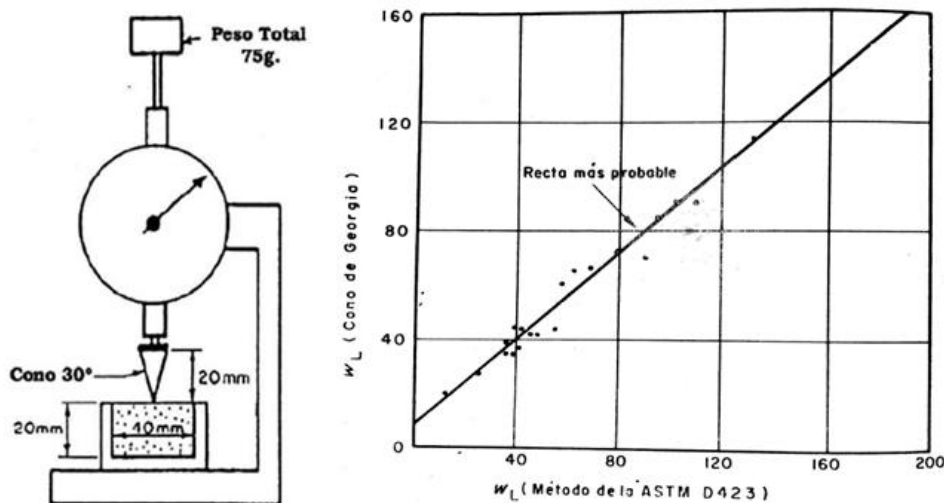


Figura 27. Cono de Georgia y correlación entre los límites líquidos obtenidos por dicho método y el método de la cuchara de Casagrande según Sowers. (Adaptado Jiménez Salas, 1975).

En el año 1953 el Indian Central Road Research Institute desarrolló un ensayo simplificado para determinar el límite líquido y propuso el dispositivo de la Figura 28, conocido con el nombre de “cono hindú” con el que se obtenía el límite líquido para una penetración de una pulgada.

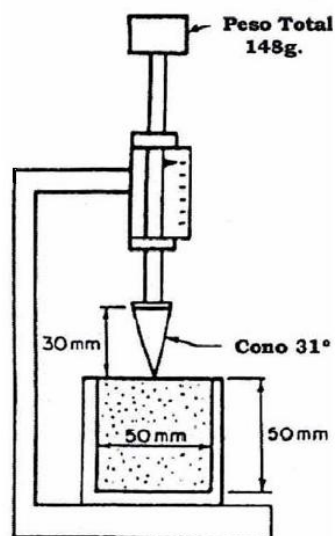


Figura 28. Cono hindú desarrollado por el Indian Central Road Research Institute. (Osorio, 2010).

Actualmente el equipo del penetrómetro cónico empleado para determinar el límite líquido está construido bajo las prescripciones de la norma BS 1377:1990 (véase Figura 29), el cual dispone de una base de hierro fundido con patas niveladoras, un medidor de penetración digital (con una precisión de 0.01 mm), un dispositivo de ajuste vertical micrométrico y una puesta a cero automática.



*Figura 29. Penetrómetro cónico moderno (Empresa Controls).*

#### **2.2.2.2. NORMA BS 1377:1990**

##### **2.2.2.2.1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN**

La norma tiene por objeto establecer el procedimiento para determinar el límite líquido de un suelo mediante la utilización del penetrómetro cónico. Se define el límite líquido, a los efectos de dicha norma, como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en un recipiente de dimensiones estandarizadas, cuando un cono normalizado de 80 g de peso y con un ángulo central de  $30^\circ$  penetra 20 mm en un lapso de tiempo de 5 s.

##### **2.2.2.2.2. APARATOS Y MATERIAL NECESARIO**

- Penetrómetro cónico: Es un dispositivo que cuenta con un cono de acero inoxidable o aluminio de aproximadamente 35 mm de largo, con una superficie lisa y pulida y con un ángulo central de  $30 \pm 1^\circ$  (véase Figura 30). El peso del dispositivo de caída debe ser de  $80 \pm 1$  g. El penetrómetro debe tener un carrera no menor de 25 mm y un dispositivo de medida con una precisión de 0.01 mm.



- Uno o varios recipientes metálicos de  $55 \pm 2$  mm de diámetro y  $40 \pm 2$  mm de profundidad para colocar la muestra.
- Espátulas de hojas flexibles de varios tamaños.
- Pesasustancias con tapa.
- Una balanza de 100 g como mínimo de capacidad que aprecie 0.01 g.
- Un tamiz n° 40.
- Una superficie lisa, tal como un cristal de 300 mm x 300 mm de lado y 10 mm de espesor para amasar el suelo.
- Estufa de desecación cuya temperatura sea regulable hasta 115 °C.
- Pinzas para manipular los recipientes calientes, frasco lavador y agua destilada.
- Cronómetro.

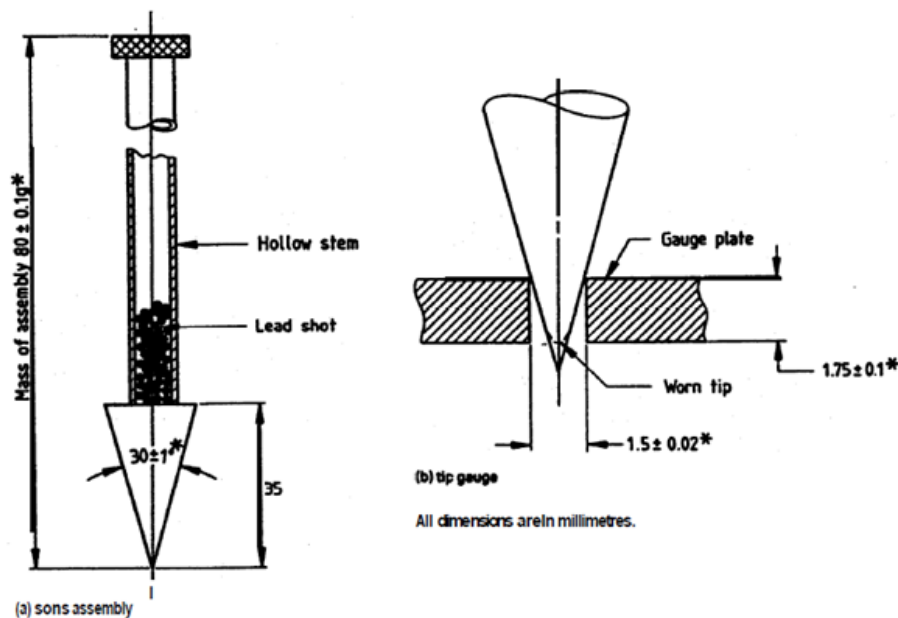


Figura 30. Características y dimensiones del penetrómetro cónico para la determinación del límite líquido según BS 1377:1990 (Norma BS 1377-2, 1990).

### 2.2.2.2.3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

La preparación de la muestra es esencialmente la misma que la que se lleva a cabo cuando se emplea el aparato de Casagrande, utilizando el material que pase el tamiz n° 40 y cuya humedad debe haber sido homogenizada 24 horas antes del ensayo.

Se recomienda que el mezclado de la muestra se realice durante al menos 10 minutos, pero algunos tipos de arcillas muy plásticas pueden requerir hasta 40 minutos para que la humedad sea homogénea en toda la muestra.



#### 2.2.2.2.4. PROCEDIMIENTO OPERATORIO

El procedimiento a seguir según esta norma es el siguiente:

- Se toma una muestra de suelo de aproximadamente 300 g y se mezcla durante un periodo de 10 minutos usando una espátula. De ser necesario se añade más agua a la muestra de tal manera que la primera lectura del ensayo este cerca de 15 mm.
- Colocar una porción de suelo dentro del recipiente metálico, teniendo cuidado de que no quede aire atrapado en el recipiente. Se enrasa el recipiente con una espátula para obtener una superficie lisa.
- Una vez que la muestra de suelo se encuentre bajo la base del penetrómetro, se debe ajustar el cono de manera que solamente la punta del mismo toque la superficie de la muestra. Una manera de asegurarnos de esto es mediante pequeños movimientos del recipiente, evidenciando así marcas del cono en la superficie de la muestra. Se pone a cero el dispositivo de medida.
- Se suelta el cono por un periodo de 5 s y se anota la lectura de penetración.
- Levantar el cono y limpiar cuidadosamente evitando rayones.
- Añadir un poco de suelo húmedo al recipiente, evitando que burbujas de aire queden atrapadas, enrasar la muestra y repetir los pasos anteriores.
- Si la diferencia de lecturas entre la primera y la segunda prueba es menor de 0.5 mm se toma el promedio de las mismas como la penetración del cono para dicha muestra.
- Si por el contrario la diferencia de lecturas es mayor de 0.5 mm pero menor a 1 mm se ensaya una tercera vez. Si el rango de variación entre las tres penetraciones no excede de 1 mm se promedian las tres lecturas de manera que dicho valor medio se adopta como la penetración del cono para la muestra.
- Si el rango de variación de las tres penetraciones es mayor a 1 mm se deberá volver a ensayar la muestra tras mezclar el suelo, por lo que se debe repetir todo el procedimiento antes descrito.
- Después de determinar la penetración del cono, se debe determinar el contenido de humedad para dicho suelo, tomando 10 g de suelo del área penetrada por el cono.
- Este proceso se debe repetir por lo menos tres veces más usando la misma muestra de suelo pero variando su contenido de humedad. Es recomendable ensayar primero la muestra de suelo con menor contenido de humedad. El agua que se debe aumentar a la muestra debe ser tal que se obtengan valores de penetración entre 15 mm y 25 mm, distribuida convenientemente en los cuatro ensayos o más que se realicen.



- Si durante el proceso de ensayo se deja la muestra por un tiempo prolongado, hay que mantener la humedad de la misma tapándola con un trapo húmedo.

#### 2.2.2.2.5. RESULTADOS

Para la obtención del límite líquido se hace un gráfico en el que se representan a escala lineal la penetración en mm (eje de abscisas) frente a la humedad en % (eje de ordenadas) y se dibujan los cuatro puntos obtenidos. Se traza la línea que más se aproxime a los puntos dibujados y se toma de dicha línea el punto correspondiente a una penetración de 20 mm. La humedad correspondiente a dicho valor de penetración es el límite líquido.

#### 2.2.2.2.6. MÉTODO PUNTUAL CON EL PENETRÓMETRO CÓNICO

La Norma BS 1377:1990 permite la determinación del límite líquido utilizando un solo punto de penetración-humedad (“método puntual”) cuando la precisión requerida no sea elevada y se disponga de pequeñas cantidades de suelo, siendo el procedimiento operativo y la preparación de la muestra semejantes a los del “método multipunto”.

Para calcular el límite líquido por este método se debe multiplicar el valor de humedad obtenido por un factor corrector que depende de la penetración media encontrada (véase Tabla 9).

Penetración del cono (mm)	Factor dependiente del contenido de humedad		
	Menor del 35%	Del 35% al 50%	Mayor del 50%
15	1.057	1.094	1.098
16	1.052	1.076	1.075
17	1.042	1.058	1.055
18	1.030	1.039	1.036
19	1.015	1.020	1.018
20	1.000	1.000	1.000
21	0.984	0.984	0.984
22	0.971	0.968	0.967
23	0.961	0.954	0.949
24	0.955	0.943	0.929
25	0.954	0.934	0.909
<b>Plasticidad</b>	<b>Baja</b>	<b>Intermedia</b>	<b>Alta</b>

Tabla 9. Factores de corrección para determinar por el método puntual el límite líquido según Norma BS 1377:1990. (Norma BS 1377-2, 1990).



La ecuación propuesta es la siguiente:

$$LL = K * w \quad (15)$$

Siendo:

w = Contenido de humedad (%).

K = Valor dado por la Tabla 9 (Tabla 1 del apartado 4.4.5 de BS 1377:1990).

### 2.2.2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU UTILIZACIÓN

Entre las principales ventajas de la utilización del penetrómetro cónico tenemos:

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

Como principal desventaja del método tenemos:

- Es más laborioso y caro de hacer que el método de la cuchara de Casagrande.

### 2.2.3. ESTUDIOS COMPARATIVOS PREVIOS ENTRE AMBOS ENSAYOS

A nivel internacional han sido varios los autores que han intentado correlacionar los valores de límite líquido obtenidos por ambos procedimientos.

Los pioneros en estudiar la posibilidad de emplear el penetrómetro cónico para determinar el límite líquido fueron Sowers (1959) y Littleton y Farmilo (1977). Estos últimos hicieron una recopilación de los valores obtenidos con diferentes tipos de penetrómetros (conos de Georgia, hindú, ruso y británico) y los correlacionaron con los valores del ensayo de la Cuchara de Casagrande (véase Figura 31), concluyendo que el cono británico definido en la Norma BS 1377:1975 era con el que se obtenía un mejor ajuste.

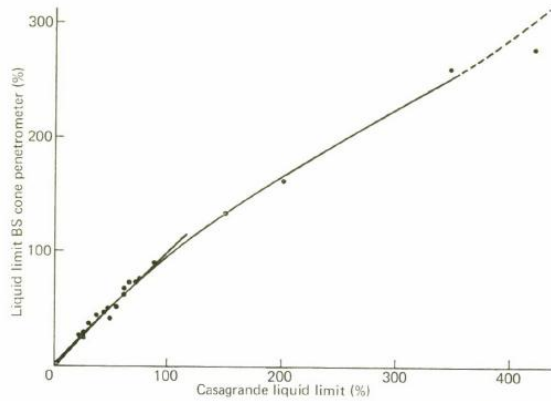


Fig. 2. The liquid limit measured by the Casagrande and BS cone penetrometer methods

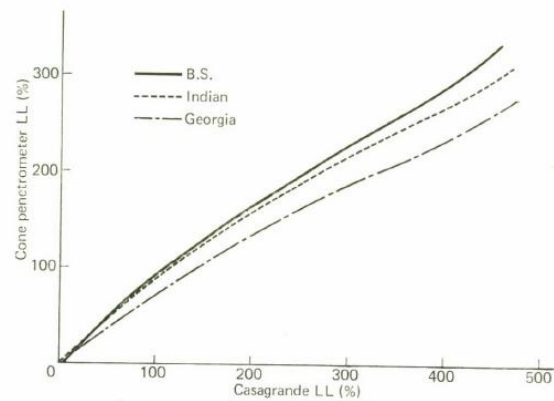


Fig. 3. The liquid limit as measured with the cones of various countries

Figura 31. Correlaciones entre los valores de límite líquido obtenidos por diversos tipos de penetrómetros cónicos y la cuchara de Casagrande (Littleton et al, 1977).

P.V Sivapullaiah y A, Sriharan (1985) estudiaron el límite líquido de diferentes tipos de suelos (constituidos fundamentalmente por arena, caolinita y bentonita) mediante ambos métodos, encontrando que con el penetrómetro se obtenían valores ligeramente inferiores que con la cuchara de Casagrande. La correlación obtenida entre ambos métodos fue relativamente buena (véase Figura 32).

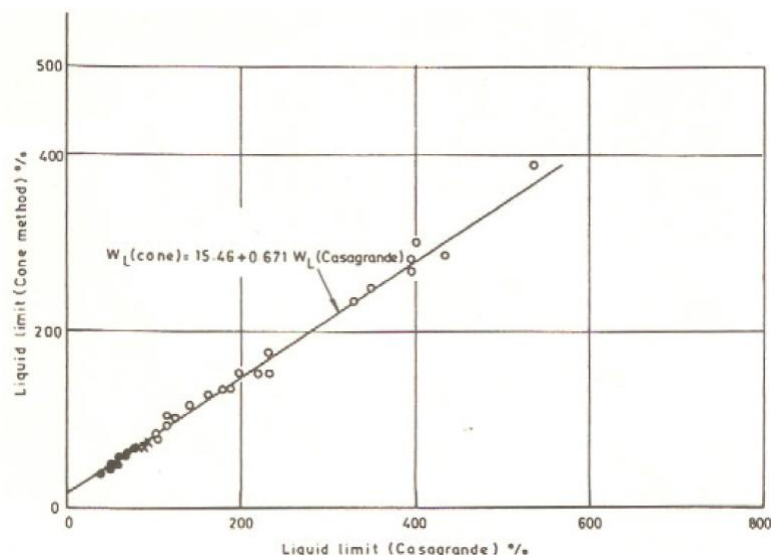


Figura 32. Correlación obtenida por Sivapullaiah entre los límites líquidos determinados por ambos procedimientos (suelos con arena, caolinita y bentonita). (Sivapullaiah et al, 1985).

R. Belviso, S. Ciampoli, V. Cotecchia y A. Federico (1985) propusieron usar el penetrómetro cónico para determinar el límite líquido. Para ello ensayaron un total de 16 suelos diferentes, analizando y correlacionando los valores del límite líquido obtenido según la ASTM D 423-66

(cuchara de Casagrande) y la Norma BS1377:1975 (penetrómetro cónico), estableciendo además una correlación entre los índices de plasticidad obtenidos por ambas normativas mediante el estudio de las rectas de flujo (véase Figura 33).

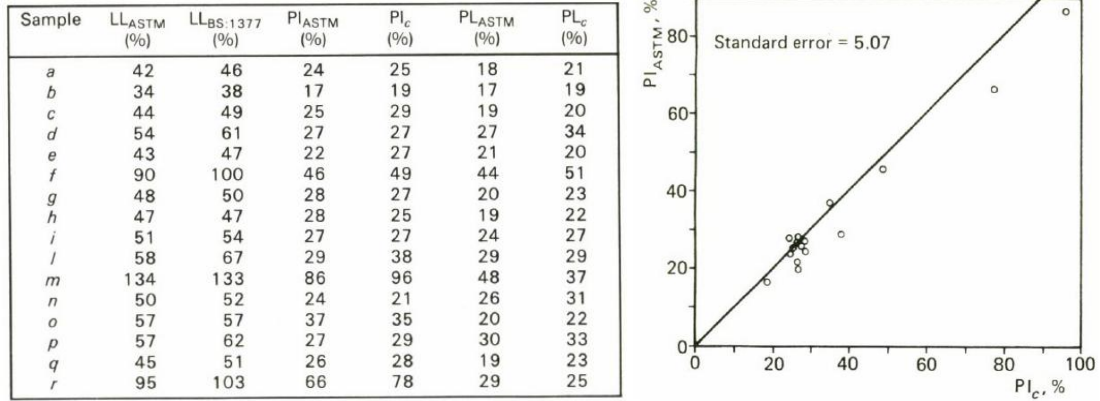


Figura 33. Valores de límite líquido obtenidos por Belviso para ambos procedimientos y correlación entre los índices de plasticidad (Belviso et al, 1985).

M. Özer (2009) realizó un estudio comparativo entre los valores de límite líquido obtenidos con el aparato de Casagrande de base dura y de base blanda y el penetrómetro cónico. Para ello ensayó 42 suelos con un límite líquido comprendido entre 30 y 105, obteniendo como resultados que el límite líquido obtenido con el aparato de Casagrande de base dura era inferior al obtenido con el penetrómetro para suelos con límite líquido inferior a 70, mientras que el aparato de Casagrande de base blanda dada valores de límite líquido más altos que el penetrómetro para suelos con un límite líquido superior a 40 (véase Figura 34).

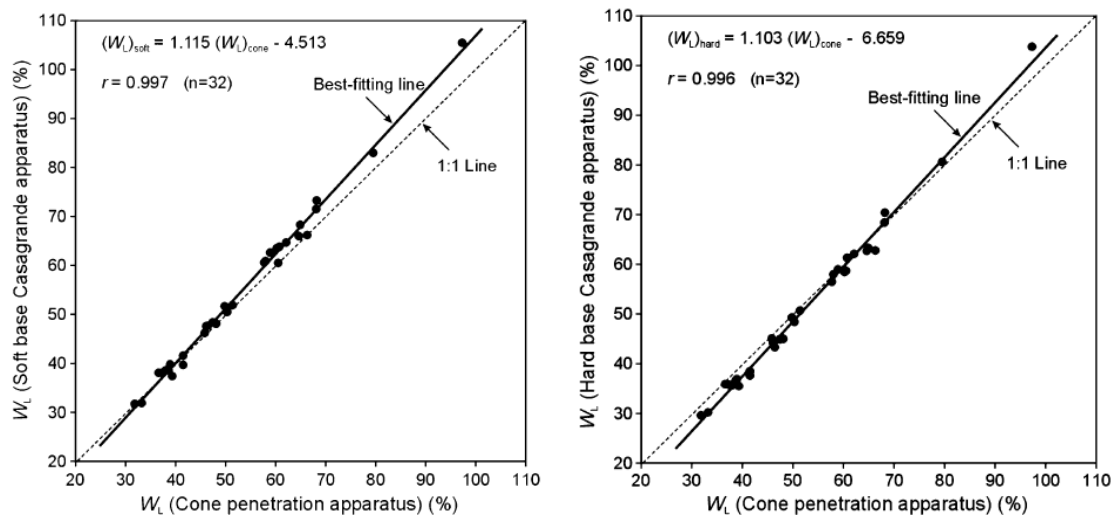


Figura 34. Correlaciones obtenidas por Özer (2009) entre el límite líquido obtenido con la cuchara de Casagrande (de base dura o blanda) y el penetrómetro cónico (Özer, 2009).

R. Zentar, N.E. Abriak y V. Dubois (2009) estudiaron el efecto sobre el límite líquido de los tratamientos de reducción de sales y de materia orgánica a los que son sometidos los sedimentos procedentes del dragado marino para su reutilización como material de construcción, deduciendo que el límite líquido no se ve afectado por dichos tratamientos. En dicha investigación se estudió también la correlación entre los valores de límite líquido obtenidos con ambos procedimientos (véase Figura 35).

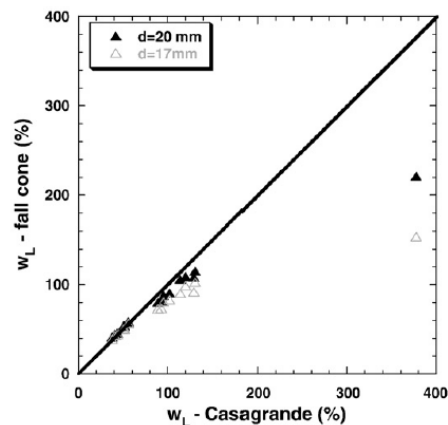


Figura 35. Correlación obtenida por Zentar entre los límites líquidos obtenidos por ambos procedimientos (Zentar et al, 2009).

G. L. Grønbech, B. N. Nielsen y L. B. Ibsen (2011) estudiaron la viabilidad del uso del penetrómetro cónico para la determinación del límite líquido en arcillas muy plásticas (límites líquidos comprendidos entre 100 y 350) y determinaron la correlación entre ambos métodos (véase Figura 36). Además llegaron a la conclusión de que para las arcillas extremadamente plásticas (límite líquido superior a 200) el penetrómetro es poco fiable pues infravalora considerablemente el resultado.

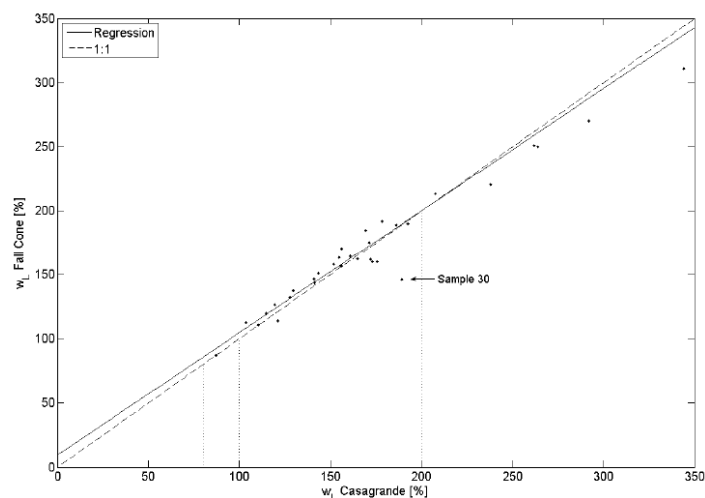


Figura 36. Correlación obtenida por Grønbech entre los límites líquidos determinados por ambos procedimientos para arcillas muy plásticas. (Grønbech et al, 2011).

Lucio Di Matteo (2012) realizó una comparativa entre ambos métodos mediante la recopilación de un centenar de datos obtenidos por diversos autores en suelos con un límite líquido comprendido entre 20 y 50, concluyendo que el valor obtenido con el penetrómetro era generalmente 2.2 puntos mayor que el que se obtenía con la cuchara de Casagrande (véase Figura 37).

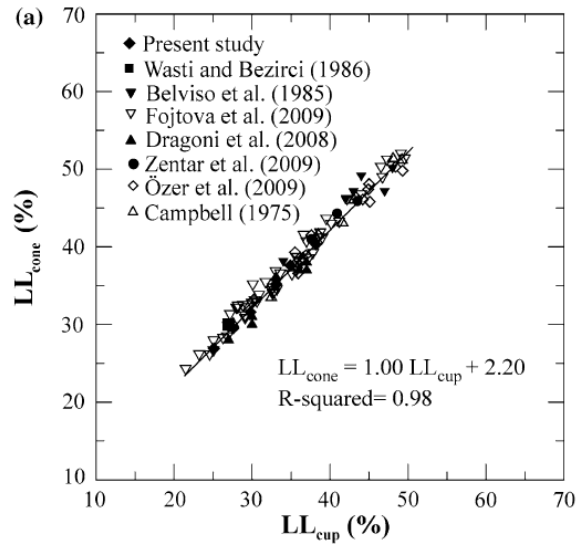


Figura 37. Correlación obtenida por Di Matteo entre los límites líquidos determinados por ambos procedimientos (Di Matteo, 2012).

G. Spagnoli (2012) comparó los valores de límite líquido obtenidos según la Norma DIN (que emplea el método de la cuchara de Casagrande) con los valores obtenidos con el penetrómetro definido en la norma BS1377:1990 para 50 arcillas puras (caolinitas e illitas procedentes del Mar Báltico y del Mar del Norte), obteniendo una correlación muy buena entre ambos métodos (véase Figura 38).

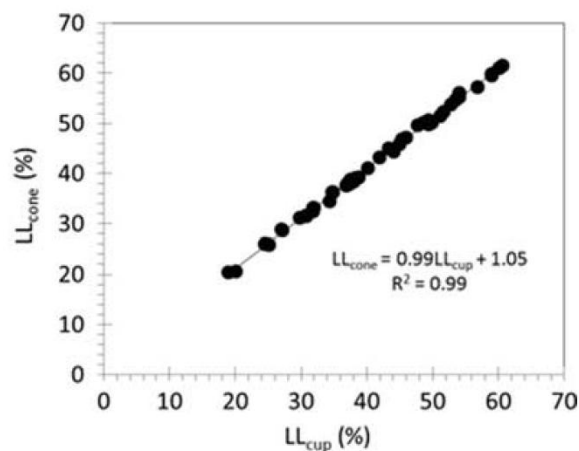


Figura 38. Correlación obtenida por Spagnoli entre los límites líquidos determinados por ambos procedimientos para arcillas puras (Spagnoli, 2012).



A. K. Mishra, M. Ohtsubo, L.Y. Li y T. Higashi (2012) estudiaron la influencia de la bentonita y la presencia de sales en los valores de límite líquido obtenidos por ambos procedimientos (véase Figura 39). Los resultados mostraron que independientemente del tipo de bentonita y de la presencia de sal, se obtenía un valor más alto con el aparato de Casagrande. Sin embargo la diferencia entre estos dos métodos decrecía con la disminución del límite líquido, la fracción arcillosa y la superficie específica. Además la diferencia de valores obtenida entre ambos métodos se reducía a medida que se incrementaba la concentración de sal.

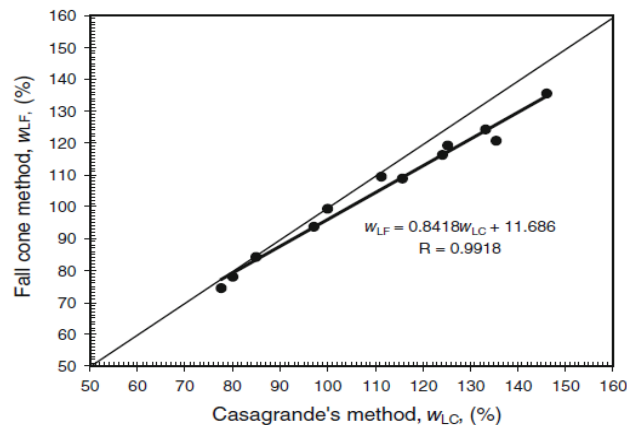


Figura 39. Correlación obtenida por Mishra entre los límites líquidos determinados por ambos procedimientos para mezclas suelo-bentonita (Mishra et al, 2012).

N. Das, B. Sarma, S. Singh y B.B. Sutradhar (2013) compararon los valores de límite líquido por ambos procedimientos en muestras de suelos aluviales, suelos bentoníticos y suelos artificiales, observando una buena correlación entre dichos ensayos. No obstante a medida que el límite líquido se incrementaba, los valores se desviaban de la línea a 45°, obteniéndose valores más altos con la cuchara de Casagrande (véase Figura 40).

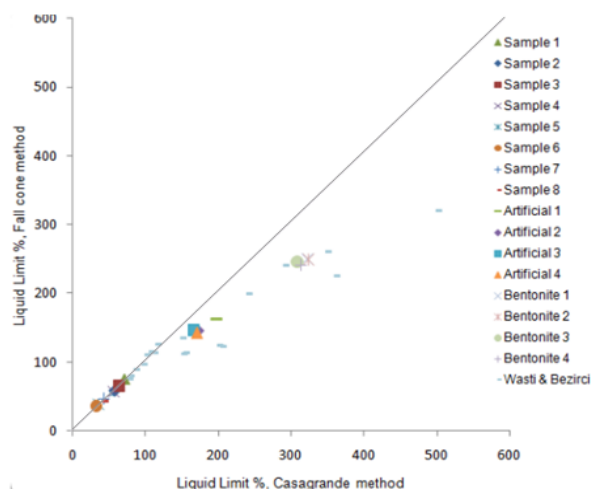


Figura 40. Correlación obtenida por Das entre los límites líquidos determinados por ambos procedimientos para suelos aluviales, bentoníticos y artificiales (Das et al, 2013).



En la Tabla 10 se recogen las fórmulas de correlación más relevantes encontradas por diversos autores entre el valor de límite líquido obtenido por el procedimiento tradicional de la cuchara de Casagrande y el penetrómetro cónico.

Autores	Ecuación	Rango del LL
Karlsoon (1961, 1977)	$LL_{\text{CONO}} = 0.85 * LL_{\text{CUCHARA}} + 5.02$	30-76%
Sherwood y Ryley (1970)	$LL_{\text{CONO}} = 0.95 * LL_{\text{CUCHARA}} + 0.95$	30-72%
Wires (1984)	$LL_{\text{CONO}} = 0.94 * LL_{\text{CUCHARA}} + 0.97$	38-55%
Belviso et al. (1985)	$LL_{\text{CONO}} = 0.97 * LL_{\text{CUCHARA}} + 1.19$	34-134%
Wasti and Bezirci (1986)	$LL_{\text{CONO}} = 1.01 * LL_{\text{CUCHARA}} + 4.92$	27-110%
Leroueil y Le Bihan (1996)	$LL_{\text{CONO}} = 0.86 * LL_{\text{CUCHARA}} + 6.34$	30-74%
Dragoni et al. (2008)	$LL_{\text{CONO}} = 1.02 * LL_{\text{CUCHARA}} + 2.87$	28-74%
Özer (2009)	$LL_{\text{CONO}} = 0.90 * LL_{\text{CUCHARA}} + 6.04$	29-104%
Fojtová et al. (2009)	$LL_{\text{CONO}} = 1.00 * LL_{\text{CUCHARA}} + 2.44$	20-50%
Grønbech et at. (2011)	$LL_{\text{CONO}} = 0.95 * LL_{\text{CUCHARA}} + 9.4$	100-340%
Di Matteo (2012)	$LL_{\text{CONO}} = 1.00 * LL_{\text{CUCHARA}} + 2.20$	24-40%
Spagnoli (2012)	$LL_{\text{CONO}} = 0.99 * LL_{\text{CUCHARA}} + 1.05$	20-61%

Tabla 10. Ecuaciones de correlación entre ambos métodos propuestas por diversos autores.

(Adaptado Spagnoli, 2012).

### 3. SUELOS ENSAYADOS Y METODOLOGÍA UTILIZADA

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

Para este estudio se han ensayado un total de 41 muestras. Dichas muestras proceden en su mayoría de la provincia de Alicante y están asociadas a diferentes obras ejecutadas en los años 2015 y 2016.

Las muestras de suelo han sido tomadas de calicatas, excavaciones o sondeos, habiéndose en todo momento asegurado que las porciones de suelo seleccionadas fueran representativas del terreno que se pretende caracterizar.

En la Tabla 11 se muestra la numeración, la procedencia de cada una de las muestras ensayadas y algunas observaciones.



Nº	Código	Procedencia	Observaciones
1	1810	Alicante	-
2	1068	San Juan Alicante	Terreno natural. Fondo de caja (Obra)
3	984	Monforte	Terreno natural A 1.40 m
4	967	Monforte	-
5	969	Monforte	Terreno natural. Subbase A 0.20 m
6	977	Monforte	-
7	5690	Vera (Almería)	-
8	1387	Villajoyosa	Árido de machaqueo. Zahorra natural
9	1385	Benidorm	Terreno natural. Producción pie de obra
10	1386	Villajoyosa	Árido de machaqueo. Zahorra artificial
11	1329	Alicante	-
12	1712	San Vicente Raspeig	Terreno natural M-2. Producción pie de obra
13	1714	San Vicente Raspeig	Terreno natural M-4. Producción pie de obra
14	1711	San Vicente Raspeig	Terreno natural M-1. Producción pie de obra
15	1713	San Vicente Raspeig	Terreno natural M-3. Producción pie de obra
16	1803	San Vicente Raspeig	-
17	1819	San Vicente Raspeig	-
18	1820	San Vicente Raspeig	Terreno natural M-2. Producción pie de obra
19	2077	Alicante	-
20	982	Monforte	Terreno natural. Relleno zanja A 1.30 m
21	2138	Busot	-
22	570	San Vicente Raspeig	-
23	1137	Elche	-
24	2164	Alicante	-
25	2166	Alicante	-
26	2123	Novelda	-
27	2273	Elche	-
28	2385	Alicante	Terreno natural. Subbase. Producción pie obra
29	2137	Benidorm	Terreno natural (Recisur)
30	1502	Elche	-
31	2579	Benitatxell	-
32	10395	Alicante	-
33	2873	Elda	-
34	2795	Pilar de la Horadada	Terreno vegetal (Zona ajardinada)
35	2872	Elda	Terreno natural (cantera para rellenar)
36	2941	Elche	-
37	3049	San Juan	-
38	981	Monforte	-
39	4188	Indeterminada	-
40	3131	Altea	-
41	3130	Altea	-

Tabla 11. Código y procedencia de las muestras ensayadas.

Las muestras han sido conservadas en sacos o bolsas, por lo que tienen la consideración de muestras alteradas (véase Figura 41). Esto ha sido así por comodidad y porque para la realización de ensayos de granulometría y plasticidad no se requiere el empleo de muestras inalteradas.



Figura 41. Sistema de almacenamiento, conservación e identificación de las muestras.

### 3.2. PREPARACIÓN PREVIA DE LAS MUESTRAS

En algunas de las muestras ha sido necesario realizar un cuarteo previo debido al tamaño de las mismas, con el fin de reducir los tiempos de ensayo (véase Figura 42).

Además en algunas ocasiones el suelo a ensayar se encontraba con un estado de humedad tal que no era posible individualizar manualmente sus partículas, por lo que se procedió a efectuar su secado al aire o en estufa a una temperatura que no excedió los 60 °C, hasta que los terrones de tierra se desmenuzasen fácilmente.



Figura 42. Preparación previa de las muestras: cuarteo y secado al aire o con estufa a 60°.

### 3.3. GRANULOMETRÍA

Para realizar el análisis granulométrico se ha seguido la metodología indicada en la Norma UNE 103-101-95. Concretamente se ha empleado la siguiente serie de tamices: 25, 20, 12.5, 10, 5, 2, 1.25, 0.63, 0.40, 0.16 y 0.08 mm (véase Figura 43). De 4 muestras no se pudo realizar granulometría, por no disponer de cantidad suficiente de las mismas para ello.



Figura 43. Material utilizado para el análisis granulométrico.

### 3.4. LÍMITES DE CONSISTENCIA

#### 3.4.1. LÍMITE LÍQUIDO CON EL PENETRÓMETRO CÓNICO

Para la determinación del límite líquido por el método del penetrómetro cónico se ha seguido lo estipulado en la Norma BS 1377:1990, concretamente se ha llevado a cabo el “método multipunto” con la obtención para cada muestra de cuatro parejas de valores penetración-humedad.

El proceso resumido que se siguió para ensayar cada una de las muestras es el siguiente:

- Se tamizó una muestra de suelo para conseguir unos 300 g. de material que pasase por el tamiz nº 40. Para ello se pulverizó la muestra en un mortero empleando una maza con extremo de goma. Se repitieron las operaciones de pulverización y tamizado cuantas veces fue necesario, hasta asegurarse de que se disgregó todo el material más fino (véase Figura 44).

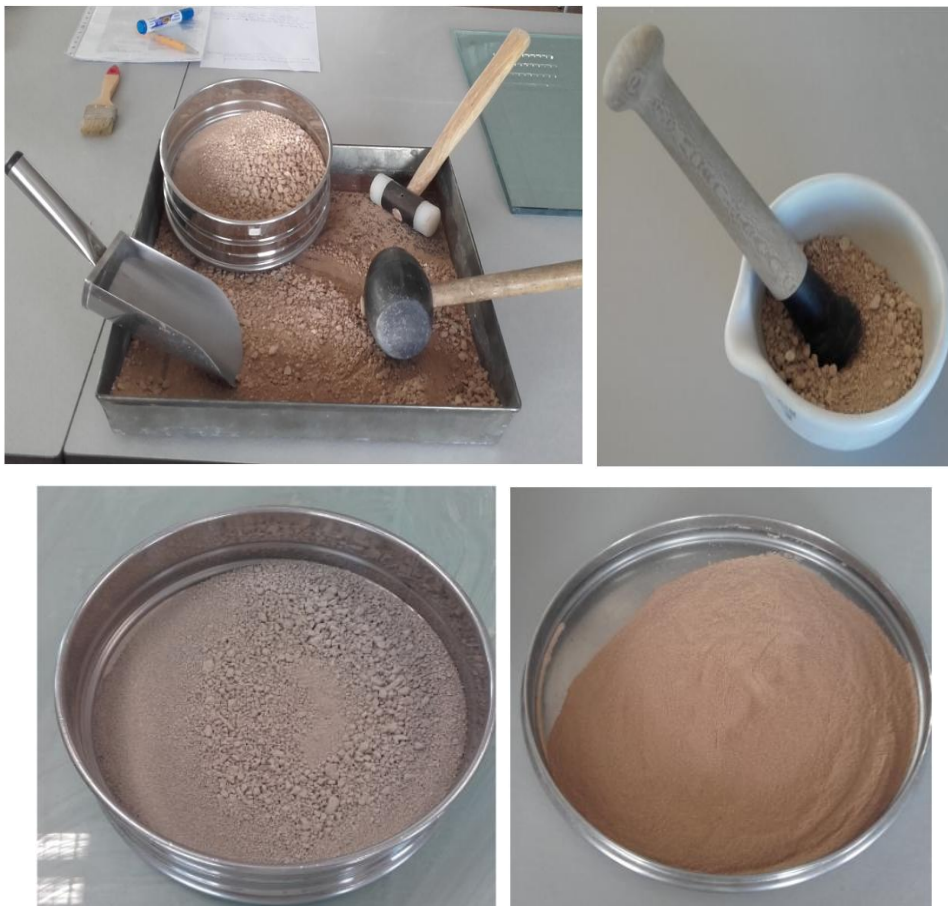


Figura 44. Obtención de la fracción de suelo que pasa por el tamiz nº40.

- Se mezcló y amasó la fracción de suelo que pasó por el tamiz n° 40 con agua destilada durante un periodo de 10 minutos sobre una superficie lisa para obtener una humedad cercana al valor correspondiente con una penetración de 15 mm. Se dejó la mezcla en reposo durante 24 h en cámara húmeda (véase Figura 45).



*Figura 45. Amasado y reposo de las muestras de suelo.*

- Se amasó la muestra de suelo de nuevo y se colocó una porción de la misma dentro del recipiente metálico, teniendo cuidado de que no quedase aire atrapado en el recipiente. Posteriormente se colocó el recipiente con la muestra bajo la base del penetrómetro y se calibró el mismo con la chapa metálica (véase Figura 46).



Figura 46. Colocación de la muestra en el recipiente y calibración del penetrómetro.

- Se soltó el cono por un periodo de 5 s y se anotó la lectura de penetración, repitiéndose de nuevo la operación (véase Figura 47). Cuando la diferencia de lecturas entre la primera y la segunda prueba fue menor de 0.5 mm se tomó el promedio de las mismas como la penetración del cono para dicha muestra. En caso contrario se ensayó una tercera vez. Si el rango de variación de la penetración entre las tres lecturas no excedía de 1 mm se promediaron, de manera que el valor obtenido se adoptó como la penetración del cono para la muestra. En caso contrario se inició de nuevo el ensayo.



Figura 47. Antes y después de la penetración del cono.



- Este proceso se repitió tres veces más usando la misma muestra de suelo pero variando su contenido de humedad. El agua se adicionó a la muestra de manera que se obtuviesen valores de penetración entre 15 mm y 25 mm, distribuida convenientemente en los cuatro ensayos realizados. La humedad se determinó con los instrumentos que aparecen en la Figura 48.

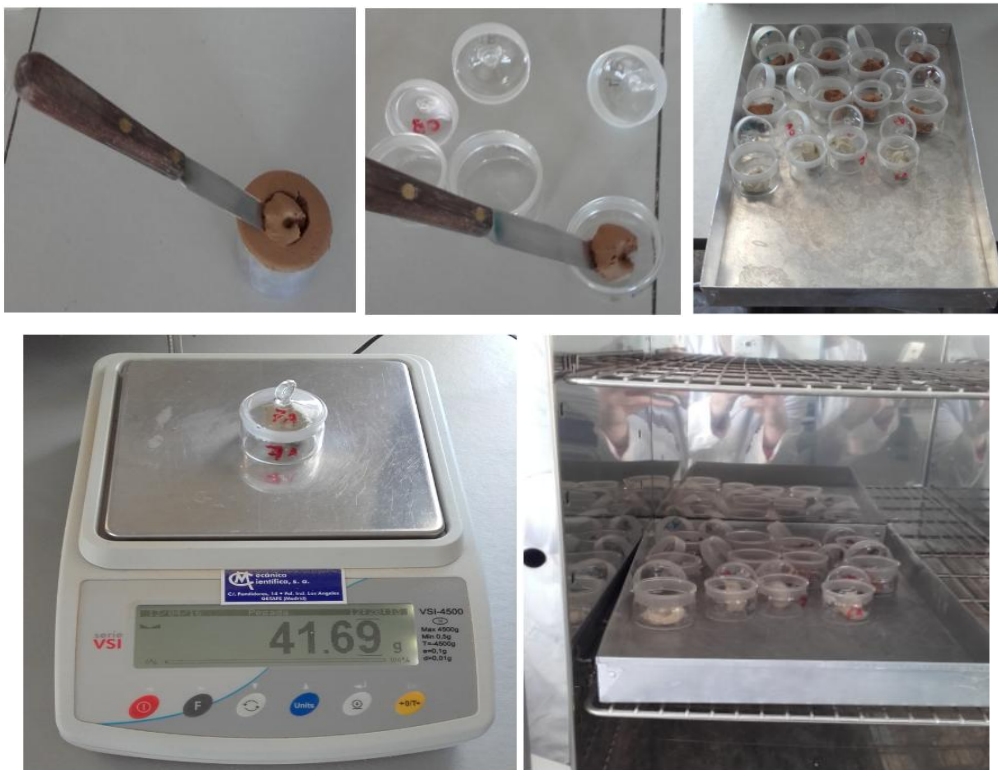


Figura 48. Instrumental empleado para la medición de la humedad.

- Se realizó un ajuste lineal a las cuatro parejas de valores penetración-humedad, siendo el límite líquido la humedad asociada a una penetración de 20 mm.

### 3.4.2. LÍMITE LÍQUIDO CON LA CUCHARA DE CASAGRANDE

Para la determinación del límite líquido por el método de la cuchara de Casagrande se ha seguido lo estipulado en la Norma UNE 103-103-94.

El proceso resumido que se siguió para ensayar cada una de las muestras es el siguiente:

- Se obtuvo una porción representativa del suelo a ensayar, concretamente unos 150 g ó 200 g de material que pasase por el tamiz 400  $\mu\text{m}$ . Para ello se pulverizó la muestra en

un mortero empleando una maza con extremo de goma. Se repitieron las operaciones de pulverización y tamizado cuantas veces fue necesario, hasta asegurarse de que se disgregó todo el material más fino (véase Figura 49).



Figura 49. Obtención de la fracción de suelo que pasa por el tamiz 400 $\mu$ m.

- El material que pasó por el tamiz 400  $\mu$ m Norma UNE 7-050/2 se amasó sobre un cristal mediante espátulas con aproximadamente la cantidad de agua necesaria para que se precisasen de 35 a 30 golpes para conseguir cerrar los 13 mm del futuro surco a realizar. Se dejó la mezcla en reposo durante 2 h en cámara húmeda (véase Figura 50).



Figura 50. Amasado y curado de las muestras de suelo.

- Se amasó la muestra de suelo de nuevo, se colocó sobre la cuchara de Casagrande y se realizó la acanaladura sobre la muestra. Luego se dejó caer la cuchara desde una altura de 10 mm a una cadencia de dos golpes por segundo y se contó el número de golpes  $N$  hasta que la abertura se cerró a lo largo de 13 mm, estando el número de golpes entre 15 y 35. Posteriormente se extrajo una muestra de unos 10 g de la zona de unión para obtener la humedad. (véase Figura 51).



Figura 51. Colocación de la muestra sobre la cuchara y resultado tras ejecutar los golpes.

- Se repitió el mismo proceso para diferentes humedades hasta obtener una determinación entre 15 y 25 golpes y otra entre 25 y 35 golpes. Se representaron los datos en el gráfico normalizado, se trazó la recta de ajuste y se obtuvo por interpolación la humedad correspondiente a 25 golpes, que se corresponde con el valor del límite líquido.

### 3.4.3. LÍMITE PLÁSTICO

Para la determinación del límite plástico de los suelos se ha seguido lo estipulado en la Norma UNE 103-104-93.

El proceso resumido que se siguió para ensayar cada una de las muestras es el siguiente:

- Se preparó una porción de muestra que pasase por el tamiz 400  $\mu\text{m}$  de la misma forma que para la determinación del límite líquido por el método de la cuchara de Casagrande, amasándola en este caso con una humedad cercana al límite plástico.
- Se dividió la muestra en varios trozos y se formó un elipsoide, haciendo rodar el mismo sobre una superficie lisa y la palma de la mano, aplicando la presión necesaria y moviendo la mano hacia delante y hacia detrás hasta la posición de partida con una velocidad de unos 80 a 90 ciclos por minuto, hasta alcanzar un diámetro de 3 mm. Si al llegar a dicho diámetro el cilindro no se desquebrajó se volvió a repetir el proceso hasta que al llegar justo a dicho diámetro el cilindro se desquebrajase longitudinal o transversalmente. La porción obtenida se colocó en un pesasustancias y se tapó inmediatamente. El proceso se repitió hasta obtener unos 6 gr de suelo y se determinó la humedad, siendo está el límite plástico (véase Figura 52).



Figura 52. Determinación del límite plástico.



#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

En la Tabla 12 se recoge el análisis granulométrico de las muestras ensayadas.

Nº	Código	% PASE POR CADA TAMIZ (tamices en mm)										
		25	20	12.5	10	5	2	1.25	0.63	0.40	0.16	0.08
1	1810	99	98	97	96	95	94	93	92	91	84	73.5
2	1068	79	77	73	72	70	68	67	65	63	52	42.2
3	984	81	77	73	64	58	56	52	47	43	37	31.3
4	967	99	98	97	96	93	91	90	88	85	73	58.7
5	969	85	84	78	75	67	60	57	52	48	39	31.7
6	977	97	95	92	90	82	76	72	65	60	45	31.1
7	5690	100	100	100	100	100	100	100	100	99	99	97.6
8	1387	87	82	65	58	43	35	32	29	28	25	23.1
9	1385	83	79	73	70	63	57	54	49	47	42	37.7
10	1386	95	87	70	64	46	33	29	25	23	15	12.8
11	1329	96	94	85	80	67	57	52	45	42	37	33.9
12	1712	86	81	74	71	61	51	44	34	30	23	18.5
13	1714	95	94	89	86	78	73	69	64	61	54	46.6
14	1711	93	91	83	80	71	63	60	54	50	41	32.7
15	1713	89	84	77	73	67	62	60	56	53	44	34.6
16	1803	81	77	69	65	55	47	45	41	38	33	29.4
17	1819	87	81	71	67	57	49	44	38	35	29	23.6
18	1820	88	86	79	75	67	62	58	53	50	45	38.4
19	2077	62	61	59	57	51	46	44	41	38	33	30.2
20	982	83	81	77	75	67	63	60	55	43	37	23.6
21	2138	100	100	100	100	100	98	97	95	93	90	88.0
22	570	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	87.9
23	1137	100	100	100	100	100	100	99	99	98	95	81.1
24	2164	100	100	100	100	100	99	98	97	95	87	72.6
25	2166	100	100	100	100	100	100	99	99	98	93	79.1
26	2123	100	100	100	100	100	100	100	99	98	82	66.7
27	2273	100	100	98	98	97	95	94	93	92	91	88.9
28	2385	78	74	65	61	48	39	35	31	28	24	21.7
29	2137	80	77	72	70	64	60	58	55	54	51	47.7
30	1502	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	98.4
31	2579	100	100	100	100	99	98	97	96	95	93	89.4
32	10395	96	94	85	80	67	57	52	45	42	37	33.9
33	2873	85	81	74	71	61	55	51	47	45	40	34.1
34	2795	99	99	98	97	91	86	83	79	76	57	46.4
35	2872	69	63	52	47	34	26	22	19	18	14	9.9
36	2941	100	100	100	100	100	99	99	99	97	86	67.3
37	3049	100	100	100	100	99	99	99	98	97	94	85.3

Tabla 12. Análisis granulométrico de las muestras ensayadas.



Como se puede observar 23 de los suelos ensayados son de grano grueso (gravas y arenas), ya que el porcentaje de pase por el tamiz nº 200 (0.08 mm) es inferior al 50%. Sin embargo el porcentaje de la fracción fina es importante en gran parte de ellos, pues es superior al 20% en la inmensa mayoría de las muestras. Esta significativa cantidad de finos hace que dicha fracción pueda proporcionar un carácter plástico a dichos suelos. En la Tabla 13 se recogen parámetros granulométricos como el diámetro efectivo  $D_{10}$ , el coeficiente de uniformidad  $C_u$  y el coeficiente de curvatura  $C_c$  de los suelos de grano ensayados.

Nº	Código	$D_{10}$ mm	$D_{30}$ mm	$D_{60}$ mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$	$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$
2	1068	0.019	0.057	0.335	17.65	0.51
3	984	0.026	0.077	6.667	260.83	0.03
5	969	0.025	0.076	2.000	79.25	0.11
6	977	0.026	0.077	0.400	15.55	0.58
8	1387	0.035	0.837	10.714	309.38	1.89
9	1385	0.021	0.064	3.500	164.94	0.05
10	1386	0.063	1.438	8.889	142.22	3.72
11	1329	0.024	0.071	2.900	122.89	0.07
12	1712	0.043	0.400	4.700	108.69	0.79
13	1714	0.017	0.052	0.366	21.30	0.42
14	1711	0.024	0.073	0.667	27.25	0.33
15	1713	0.023	0.069	1.250	54.06	0.17
16	1803	0.027	0.093	7.500	275.63	0.04
17	1819	0.034	0.200	1.400	41.30	0.84
18	1820	0.021	0.063	1.625	78.00	0.12
19	2077	0.026	0.079	16.250	613.44	0.01
20	982	0.034	0.118	1.250	36.88	0.33
28	2385	0.037	0.553	9.615	260.82	0.86
29	2137	0.017	0.050	2.000	119.25	0.08
32	10395	0.024	0.071	2.900	122.89	0.10
33	2873	0.023	0.070	4.500	191.81	0.05
34	2795	0.017	0.052	0.198	11.48	0.78
35	2872	0.082	3.500	17.955	219.09	8.33

Tabla 13. Principales parámetros granulométricos de los suelos de grano grueso ensayados.

Como vemos el coeficiente de uniformidad es elevado, lo que indica que las muestras son poco uniformes, es decir, están bien graduadas. No obstante para su cálculo en algunos casos se han tenido que extrapolar los resultados del análisis granulométrico (con el fin de obtener el diámetro efectivo  $D_{10}$ ) debido al elevado contenido en finos y a que no se ha hecho granulometría por sedimentación sino únicamente por tamizado hasta 0.08 mm, lo que hace que dicho valores sean solamente orientativos.

El resto de las muestras ensayadas (14) son suelos de grano fino (limos y arcillas) pues tienen un porcentaje de pase superior al 50% por el tamiz nº 200 (0.08 mm).



#### 4.2. LÍMITES DE CONSISTENCIA DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

En la Tabla 14 se recogen los valores de límite plástico (LP) y límite líquido por ambos procedimientos ( $LL_{CUCHARA}$  y  $LL_{CONO}$ ), así como el índice de plasticidad (IP) de cada una de las 41 muestras ensayadas.

Nº	Código	LP	$LL_{CUCHARA}$	$LL_{CONO}$	$IP_{CUCHARA}$	$IP_{CONO}$
1	1810	17.7	27.8	29.1	10.1	11.4
2	1068	16.7	22.0	23.7	5.3	7.0
3	984	16.3	20.6	20.2	4.3	3.9
4	967	20.1	24.2	24.3	4.1	4.2
5	969	23.5	31.2	31.5	7.7	8.0
6	977	16.8	25.6	24.5	8.8	7.7
7	5690	44.5	72.3	70.3	27.8	25.8
8	1387	15.8	22.7	23.5	6.9	7.7
9	1385	17.5	23.8	24.6	6.3	7.1
10	1386	14.1	19.0	20.5	4.9	6.4
11	1329	13.8	26.5	28.1	12.7	14.3
12	1712	16.4	19.3	20.9	2.9	4.5
13	1714	15.0	23.0	23.1	8.0	8.1
14	1711	15.3	20.2	21.4	4.9	6.1
15	1713	19.0	20.9	21.8	1.9	2.8
16	1803	15.6	23.3	23.9	7.7	8.3
17	1819	16.1	21.3	21.6	5.2	5.5
18	1820	15.6	23.1	25.1	7.5	9.5
19	2077	17.3	28.3	28.5	11.0	11.2
20	982	13.7	22.5	23.3	8.8	9.6
21	2138	20.8	42.9	40.4	22.1	19.6
22	570	16.8	23.9	25.2	7.1	8.4
23	1137	13.7	26.2	25.1	12.5	11.4
24	2164	17.4	22.3	21.0	4.9	3.6
25	2166	17.7	22.1	21.8	4.4	4.1
26	2123	15.7	23.1	23.6	7.4	7.9
27	2273	21.2	42.2	40.3	21.0	19.1
28	2385	16.5	24.0	24.1	7.5	7.6
29	2137	17.3	28.4	28.1	11.1	10.8
30	1502	33.4	61.8	63.0	28.4	29.6
31	2579	20.2	28.4	27.8	8.2	7.6
32	10395	13.8	26.5	28.1	12.7	14.3
33	2873	17.9	27.5	27.3	9.6	9.4
34	2795	14.4	21.6	23.5	7.2	9.1
35	2872	19.2	25.4	26.0	6.2	6.8
36	2941	14.1	21.6	22.8	7.5	8.7
37	3049	19.6	27.7	28.4	8.1	8.8
38	981	15.7	24.2	26.0	8.5	10.3
39	4188	22.7	32.7	33.8	10.0	11.1
40	3131	18.5	28.1	27.9	9.6	9.4
41	3130	16.6	24.6	26.3	8.0	9.7

Tabla 14. Límites de Atterberg e Índice de Plasticidad de los suelos ensayados.

En la Figura 53 se representa la ubicación en la Carta de Plasticidad de cada uno de los suelos ensayados. Se ha adoptado como valor de límite líquido de las muestras el obtenido por el método del penetrómetro cónico por considerarlo más fiable.

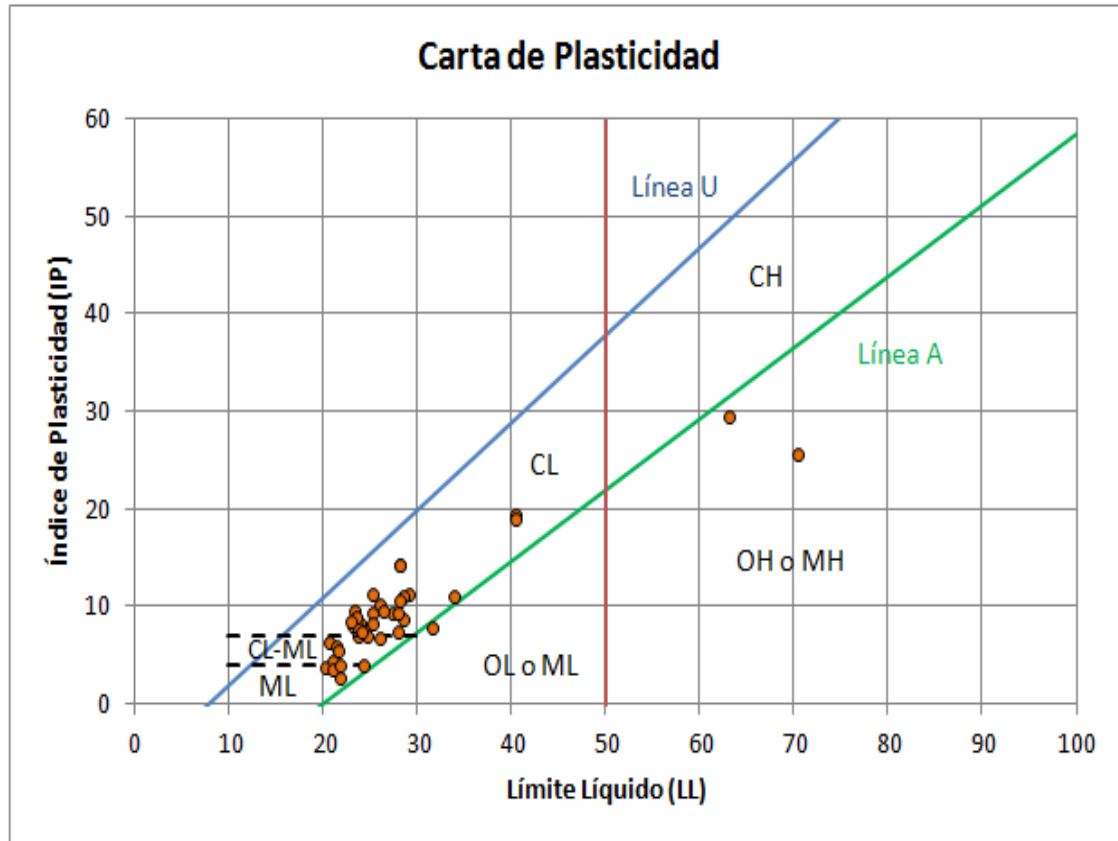


Figura 53. Ubicación dentro de la Carta de Plasticidad de las muestras ensayadas.

Como se desprende de la Figura 53, los suelos finos o la fracción fina de los suelos gruesos ensayados están en su inmensa mayoría dentro de los grupos CL, ML o CL-ML por los que se trata de limos o arcillas de baja plasticidad. Como vemos tan sólo dos muestras (5690 y 1502) son de alta plasticidad (limos plásticos).

Analizando con un poco más de detalle las actas de los resultados obtenidos para el límite líquido con el penetrómetro cónico (véase Anejo 1) se observa una correlación significativa entre la pendiente de las rectas de ajuste y el límite líquido (coeficiente de determinación de 0.92), tal y como se muestra en la Figura 54. Concretamente al aumentar el límite líquido aumenta dicha pendiente, aspecto ya descrito al utilizar el cono de Georgia (Sowers et al, 1959) y que ha servido para el desarrollo del “método puntual” recogido en la Norma BS 1377:1990.



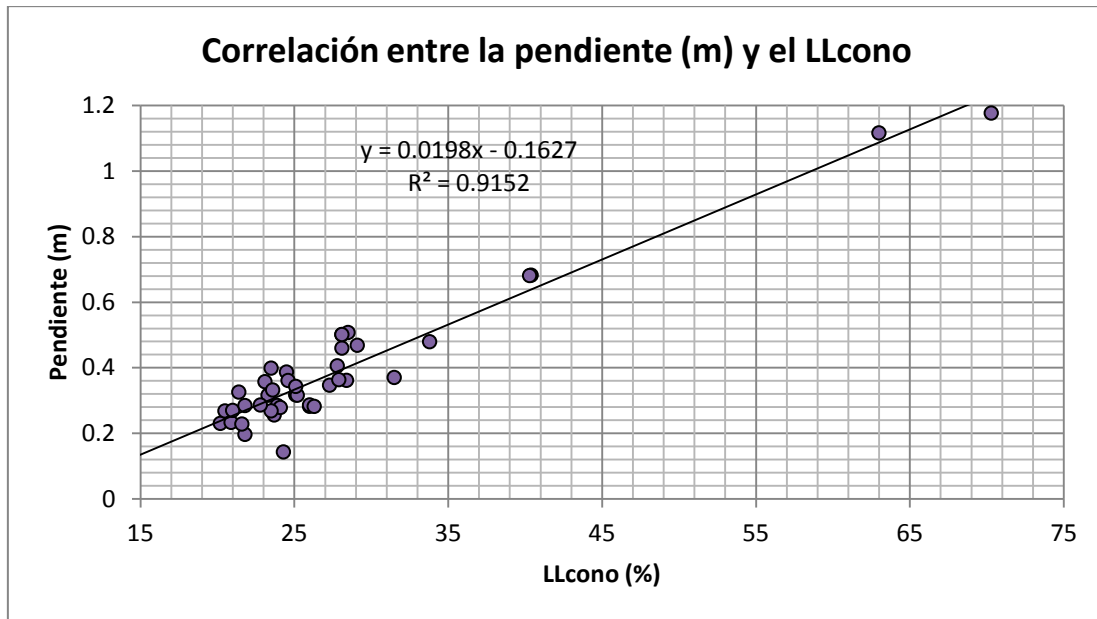


Figura 54. Correlación entre la pendiente (m) y el límite líquido obtenido con el cono.

Además también se observa una buena correlación (coeficiente de determinación de 0.89) entre dicha pendiente y el índice de plasticidad del suelo (véase Figura 55), lo que podría indicar la posibilidad de determinar también el límite plástico por medio del penetrómetro cónico, tal y como han intentado autores como Belviso et al (1985), Jayantha Kodikara et al (1986), Muntohar et al (2003) o Al-Dahlaki et al (2008). No obstante, esto requeriría la utilización de un cono de mayor peso con el fin de obtener penetraciones mayores para valores de humedad cercanos al límite plástico, lo que permitiría cometer un error pequeño en su determinación.

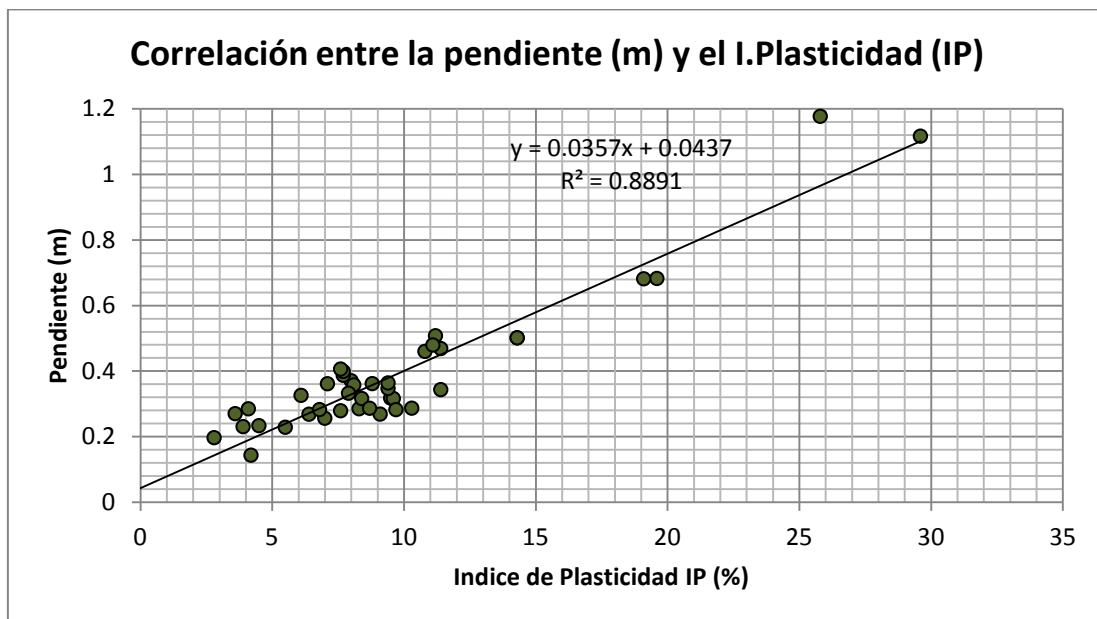


Figura 55. Correlación entre la pendiente (m) y el Índice de Plasticidad obtenido con el cono.



### 4.3. CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

En la Tabla 15 se recoge la clasificación en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) de las muestras ensayadas. Como se puede observar la inmensa mayoría de las muestras son arcillas magras arenosas y gravas arcillosas.

Nº	Código	Símbolo	Nombre del grupo
1	1810	CL	Arcilla magra arenosa
2	1068	GC-GM	Grava arcillosa, limosa con arena
3	984	GC	Grava arcillosa con arena
4	967	CL-ML	Arcilla limosa arenosa
5	969	SM	Arena limosa con grava
6	977	SC	Arena arcillosa con grava
7	5690	MH	Limo plástico arenoso
8	1387	GC	Grava arcillosa con arena
9	1385	GC	Grava arcillosa con arena
10	1386	GC-GM	Grava arcillosa, limosa con arena
11	1329	SC	Arena arcillosa con grava
12	1712	SC-SM	Arena arcillosa, limosa con grava
13	1714	SC	Arena arcillosa con grava
14	1711	SC-SM	Arena arcillosa, limosa con grava
15	1713	GC	Grava arcillosa con arena
16	1803	GC	Grava arcillosa con arena
17	1819	GC-GM	Grava arcillosa, limosa con arena
18	1820	GC	Grava arcillosa con arena
19	2077	GC	Grava arcillosa con arena
20	982	SC	Arena arcillosa con grava
21	2138	CL	Arcilla magra arenosa
22	570	CL	Arcilla magra arenosa
23	1137	CL	Arcilla magra arenosa
24	2164	CL	Arcilla magra arenosa
25	2166	CL-ML	Arcilla limosa arenosa
26	2123	CL	Arcilla magra arenosa
27	2273	CL	Arcilla magra arenosa
28	2385	GC	Grava arcillosa con arena
29	2137	GC	Grava arcillosa con arena
30	1502	MH	Limo plástico arenoso
31	2579	CL	Arcilla magra arenosa
32	10395	SC	Arena arcillosa con grava
33	2873	GC	Grava arcillosa con arena
34	2795	SC	Arena arcillosa
35	2872	GP-GC	Grava pobremente graduada con arena y arcilla
36	2941	CL	Arcilla magra arenosa
37	3049	CL	Arcilla magra arenosa

Tabla 15. Clasificación de las muestras ensayadas según el SUCS.



En la Tabla 16 se muestra la clasificación en el Sistema AASHTO de las muestras ensayadas. Como se puede observar la inmensa mayoría de las muestras están dentro de los grupos A-2 (concretamente del A-2-4) y A-4.

Nº	Código	#10	#40	#200	LL	IP	a	b	c	d	IG	GRUPO
1	1810	94	91	73.5	29.1	11.4	38.5	40	0	1.4	8.3	A-6
2	1068	68	63	42.2	23.7	7	7.2	27.2	0	0	1.4	A-4
3	984	56	43	31.3	20.2	3.9	0	16.3	0	0	0.0	A-2-4
4	967	91	85	58.7	24.3	4.2	23.7	40	0	0	4.7	A-4
5	969	60	48	31.7	31.5	8	0	16.7	0	0	0.0	A-2-4
6	977	76	60	31.1	24.5	7.7	0	16.1	0	0	0.0	A-2-4
7	5690	100	99	97.6	70.3	25.8	40	40	20	15.8	18.3	A-7-5
8	1387	35	28	23.1	23.5	7.7	0	8.1	0	0	0.0	A-2-4
9	1385	57	47	37.7	24.6	7.1	2.7	22.7	0	0	0.5	A-4
10	1386	33	23	12.8	20.5	6.4	0	0	0	0	0.0	A-2-4
11	1329	57	42	33.9	28.1	14.3	0	18.9	0	4.3	0.8	A-2-6
12	1712	51	30	18.5	20.9	4.5	0	3.5	0	0	0.0	A-1-b
13	1714	73	61	46.6	23.1	8.1	11.6	31.6	0	0	2.3	A-4
14	1711	63	50	32.7	21.4	6.1	0	17.7	0	0	0.0	A-2-4
15	1713	62	53	34.6	21.8	2.8	0	19.6	0	0	0.0	A-2-4
16	1803	47	38	29.4	23.9	8.3	0	14.4	0	0	0.0	A-2-4
17	1819	49	35	23.6	21.6	5.5	0	8.6	0	0	0.0	A-1-b
18	1820	62	50	38.4	25.1	9.5	3.4	23.4	0	0	0.7	A-4
19	2077	46	38	30.2	28.5	11.2	0	15.2	0	1.2	0.2	A-2-6
20	982	63	43	23.6	23.3	9.6	0	8.6	0	0	0.0	A-2-4
21	2138	98	93	88	40.4	19.6	40	73	0.4	9.6	15.1	A-7-6
22	570	100	100	87.9	25.2	8.4	40	40	0	0	8.0	A-4
23	1137	100	98	81.1	25.1	11.4	40	40	0	1.4	8.6	A-6
24	2164	99	95	72.6	21	3.6	37.6	40	0	0	7.5	A-4
25	2166	100	98	79.1	21.8	4.1	40	40	0	0	8.0	A-4
26	2123	100	98	66.7	23.6	7.9	31.7	40	0	0	6.3	A-4
27	2273	95	92	88.9	40.3	19.1	40	40	0.3	9.1	11.7	A-6
28	2385	39	28	21.7	24.1	7.6	0	6.7	0	0	0.0	A-2-4
29	2137	60	54	47.7	28.1	10.8	12.7	32.7	0	0.8	2.8	A-6
30	1502	100	100	98.4	63	29.6	40	40	20	19.6	19.8	A-7-5
31	2579	98	95	89.4	27.8	7.6	40	40	0	0	8.0	A-4
32	10395	57	42	33.9	28.1	14.3	0	18.9	0	4.3	0.8	A-2-6
33	2873	55	45	34.1	27.3	9.4	0	19.1	0	0	0.0	A-2-4
34	2795	86	76	46.4	23.5	9.1	11.4	31.4	0	0	2.3	A-4
35	2872	26	18	9.9	26	6.8	0	0	0	0	0.0	A-2-4
36	2941	99	97	67.3	22.8	8.7	32.3	40	0	0	6.5	A-4
37	3049	99	97	85.3	28.4	8.8	40	40	0	0	8.0	A-4

Tabla 16. Clasificación de las muestras ensayadas según la AASHTO.



#### 4.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL LÍMITE LÍQUIDO POR AMBOS MÉTODOS

Los resultados de límite líquido obtenido por los métodos de Casagrande y del penetrómetro cónico, la diferencia entre ambos y el porcentaje de variación se muestran en la Tabla 17.

Nº	Código	LL <sub>CUCHARA</sub>	LL <sub>CONO</sub>	$x_i = LL_{CONO} - LL_{CUCHARA}$	% Variación
1	1810	27.8	29.1	1.3	4.68
2	1068	22.0	23.7	1.7	7.73
3	984	20.6	20.2	-0.4	-1.94
4	967	24.2	24.3	0.1	0.41
5	969	31.2	31.5	0.3	0.96
6	977	25.6	24.5	-1.1	-4.30
7	5690	72.3	70.3	-2	-2.77
8	1387	22.7	23.5	0.8	3.52
9	1385	23.8	24.6	0.8	3.36
10	1386	19.0	20.5	1.5	7.89
11	1329	26.5	28.1	1.6	6.04
12	1712	19.3	20.9	1.6	8.29
13	1714	23.0	23.1	0.1	0.43
14	1711	20.2	21.4	1.2	5.94
15	1713	20.9	21.8	0.9	4.31
16	1803	23.3	23.9	0.6	2.58
17	1819	21.3	21.6	0.3	1.41
18	1820	23.1	25.1	2	8.66
19	2077	28.3	28.5	0.2	0.71
20	982	22.5	23.3	0.8	3.56
21	2138	42.9	40.4	-2.5	-5.83
22	570	23.9	25.2	1.3	5.44
23	1137	26.2	25.1	-1.1	-4.20
24	2164	22.3	21.0	-1.3	-5.83
25	2166	22.1	21.8	-0.3	-1.36
26	2123	23.1	23.6	0.5	2.16
27	2273	42.2	40.3	-1.9	-4.50
28	2385	24.0	24.1	0.1	0.42
29	2137	28.4	28.1	-0.3	-1.06
30	1502	61.8	63.0	1.2	1.94
31	2579	28.4	27.8	-0.6	-2.11
32	10395	26.5	28.1	1.6	6.04
33	2873	27.5	27.3	-0.2	-0.73
34	2795	21.6	23.5	1.9	8.80
35	2872	25.4	26.0	0.6	2.36
36	2941	21.6	22.8	1.2	5.56
37	3049	27.7	28.4	0.7	2.53
38	981	24.2	26.0	1.8	7.44
39	4188	32.7	33.8	1.1	3.36
40	3131	28.1	27.9	-0.2	-0.71
41	3130	24.6	26.3	1.7	6.91

Tabla 17. Comparación de resultados de límite líquido por ambos métodos.



Como vemos la máxima diferencia en cuanto a valores de límite líquido entre ambos métodos se obtiene para la muestra nº 21 (2138), siendo de 2.5 (42.9 frente a 40.4), representando una variación de humedad de un 5.8%.

Por otra parte, el mayor porcentaje de variación de humedad se obtiene para la muestra nº 34 (2795), siendo de un 8.8%, variando el límite líquido en 2 puntos (21.6 frente a 23.5).

En la Figura 56 se representan los resultados obtenidos para el límite líquido determinado según la Norma UNE 103-103-94 (cuchara de Casagrande) y el límite líquido obtenido según la Norma BS 1377:1990 (penetrómetro cónico), intuyéndose visualmente una buena correlación entre ambos métodos.

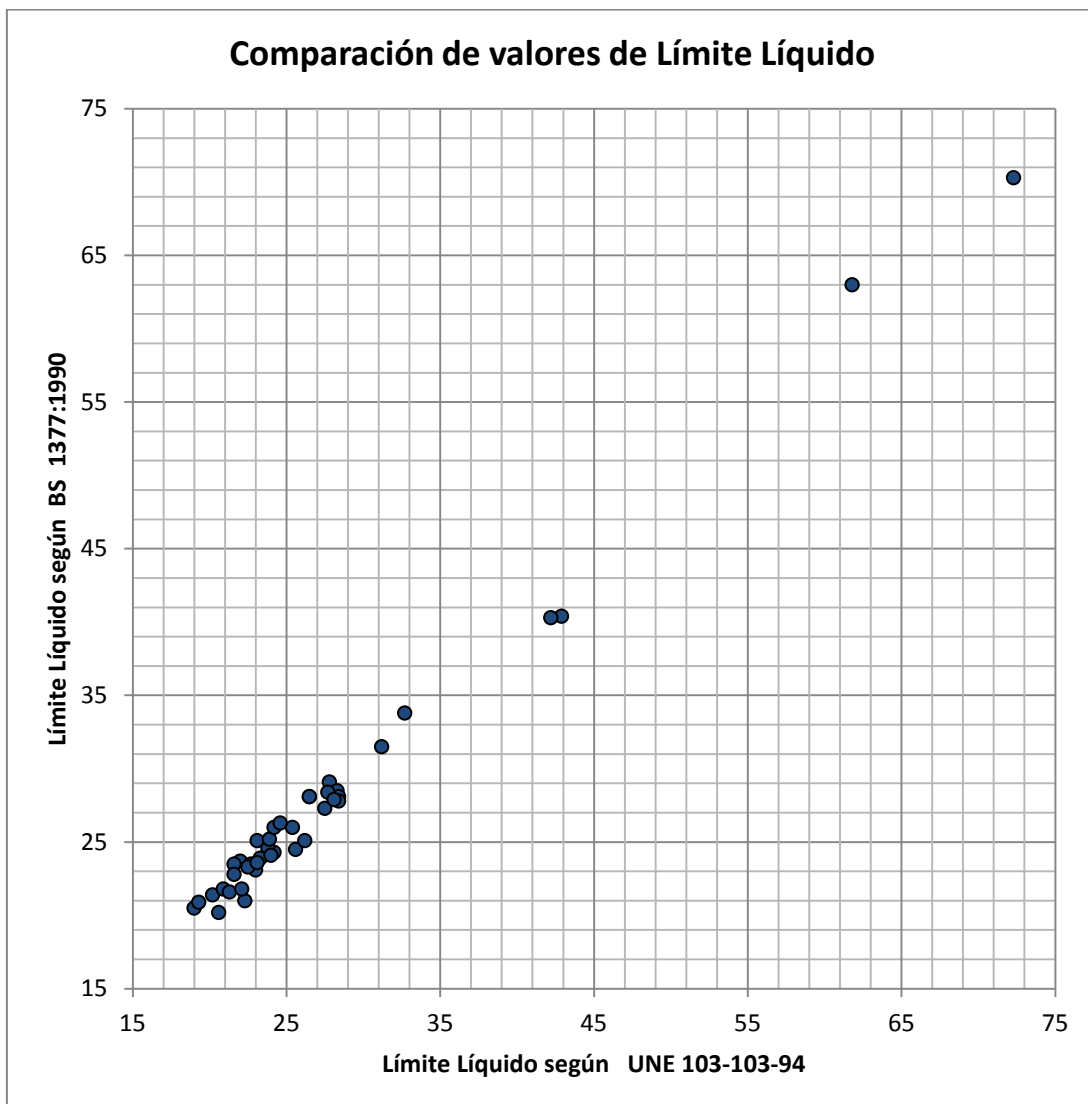


Figura 56. Comparación de resultados de límite líquido por ambos métodos.

#### 4.4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Si utilizamos el coeficiente de correlación de Pearson como parámetro para determinar la afinidad existente entre los resultados obtenidos por ambos métodos se obtiene un valor de 99.48 % lo que indica un gran grado de correlación.

Con este dato como base y con la existencia de una recta de tendencia que relacione los datos se podría proponer una ecuación de correlación entre ambos métodos. Empleando el método de mínimos cuadrados, la ecuación de la recta obtenida que define la tendencia lineal de los datos es  $LL_{\text{CONO}} = 0.9525 * LL_{\text{CUCHARA}} + 1.7292$  (véase Figura 57).

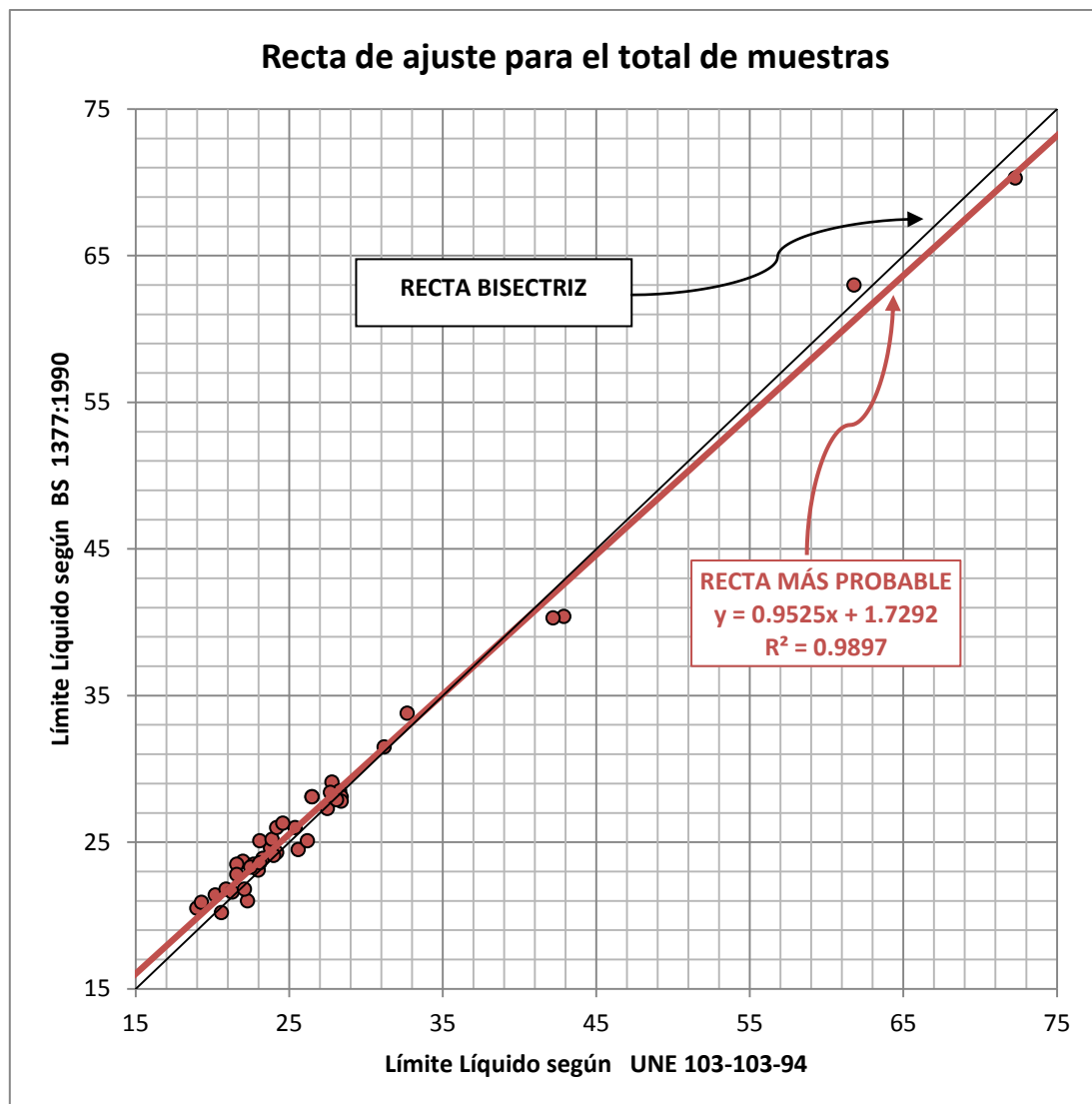


Figura 57. Recta de ajuste más probable entre ambos métodos para el conjunto total de muestras ensayadas.



Podemos además verificar el intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95% para los datos obtenidos por el método del penetrómetro cónico. En la Tabla 18 se muestra un resumen de los cálculos realizados para calcular la media aritmética  $\bar{x}$  y la desviación típica  $\sigma$ .

Nº	Código	LL <sub>CUCHARA</sub>	LL <sub>CONO</sub>	$x_i =$ LL <sub>CONO</sub> - LL <sub>CUCHARA</sub>	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1810	27.8	29.1	1.3	1.03785
2	1068	22.0	23.7	1.7	2.01285
3	984	20.6	20.2	-0.4	0.46410
4	967	24.2	24.3	0.1	0.03285
5	969	31.2	31.5	0.3	0.00035
6	977	25.6	24.5	-1.1	1.90785
7	5690	72.3	70.3	-2	5.20410
8	1387	22.7	23.5	0.8	0.26910
9	1385	23.8	24.6	0.8	0.26910
10	1386	19.0	20.5	1.5	1.48535
11	1329	26.5	28.1	1.6	1.73910
12	1712	19.3	20.9	1.6	1.73910
13	1714	23.0	23.1	0.1	0.03285
14	1711	20.2	21.4	1.2	0.84410
15	1713	20.9	21.8	0.9	0.38285
16	1803	23.3	23.9	0.6	0.10160
17	1819	21.3	21.6	0.3	0.00035
18	1820	23.1	25.1	2	2.95410
19	2077	28.3	28.5	0.2	0.00660
20	982	22.5	23.3	0.8	0.26910
21	2138	42.9	40.4	-2.5	7.73535
22	570	23.9	25.2	1.3	1.03785
23	1137	26.2	25.1	-1.1	1.90785
24	2164	22.3	21.0	-1.3	2.50035
25	2166	22.1	21.8	-0.3	0.33785
26	2123	23.1	23.6	0.5	0.04785
27	2273	42.2	40.3	-1.9	4.75785
28	2385	24.0	24.1	0.1	0.03285
29	2137	28.4	28.1	-0.3	0.33785
30	1502	61.8	63.0	1.2	0.84410
31	2579	28.4	27.8	-0.6	0.77660
32	10395	26.5	28.1	1.6	1.73910
33	2873	27.5	27.3	-0.2	0.39598
34	2795	21.6	23.5	1.9	2.16305
35	2872	25.4	26	0.6	0.02915
36	2941	21.6	22.8	1.2	0.59403
37	3049	27.7	28.4	0.7	0.07330
38	981	24.2	26	1.8	1.87891
39	4188	32.7	33.8	1.1	0.44988
40	3131	28.1	27.9	-0.2	0.39598
41	3130	24.6	26.3	1.7	1.61476
			<b>Σ</b>	<b>17.6</b>	<b>51.10488</b>

Tabla 18. Resumen de cálculos para obtener intervalos de confianza para el límite líquido por el método del penetrómetro cónico para el total de muestras.



La media aritmética resulta ser:  $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 0.429$

La desviación típica  $\sigma = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} = 1.1164$

Debido al número de datos de que se dispone (n=41) se opta por la distribución de T-Student para su cálculo, cuya ecuación es:

$$\text{Intervalo de confianza } T - \text{Student} = \bar{x} \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n-1} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

A partir de la función de distribución de T-Student, sabiendo que buscamos un intervalo de confianza del 95% se tiene que  $\alpha = 1 - 0.95 = 0.05$  y  $n=41$  por lo que  $t_{\alpha/2, n-1} = t_{0.025, 40} = 2.0211$ .

Por tanto, los límites superior e inferior del intervalo de confianza serán:

$$\text{Intervalo de confianza } T - \text{Student} = 0.429 \pm 2.0211 * \frac{1.1164}{\sqrt{41}} = (+0.781 | +0.077)$$

Por lo que se esperaría que para límites líquidos en el rango entre 20 y 75, el 95% de los resultados obtenidos con el ensayo del penetrómetro cónico tuvieran una diferencia máxima con respecto al método de la cuchara de Casagrande de 0.78 puntos, valor muy aceptable.

Si además tomamos como referencia el “Informe del ejercicio de comparación interlaboratorio a nivel nacional de materiales del año 2015” (EILA 2015) en el que se dictamina un coeficiente de variación para el ensayo de límite líquido mediante el empleo de la cuchara de Casagrande del 6.44% y una desviación típica de 2.12 puntos para una muestra de límite líquido con un valor medio de 33 (véase Figura 58), el empleo del método del penetrómetro cónico como alternativa al método tradicional estaría plenamente justificado para límites líquidos comprendidos dentro del intervalo 20-75. No obstante, esto no significa que fuera de este intervalo no esté justificado el uso del penetrómetro cónico, sino solamente que este aspecto no se ha comprobado en el presente estudio.



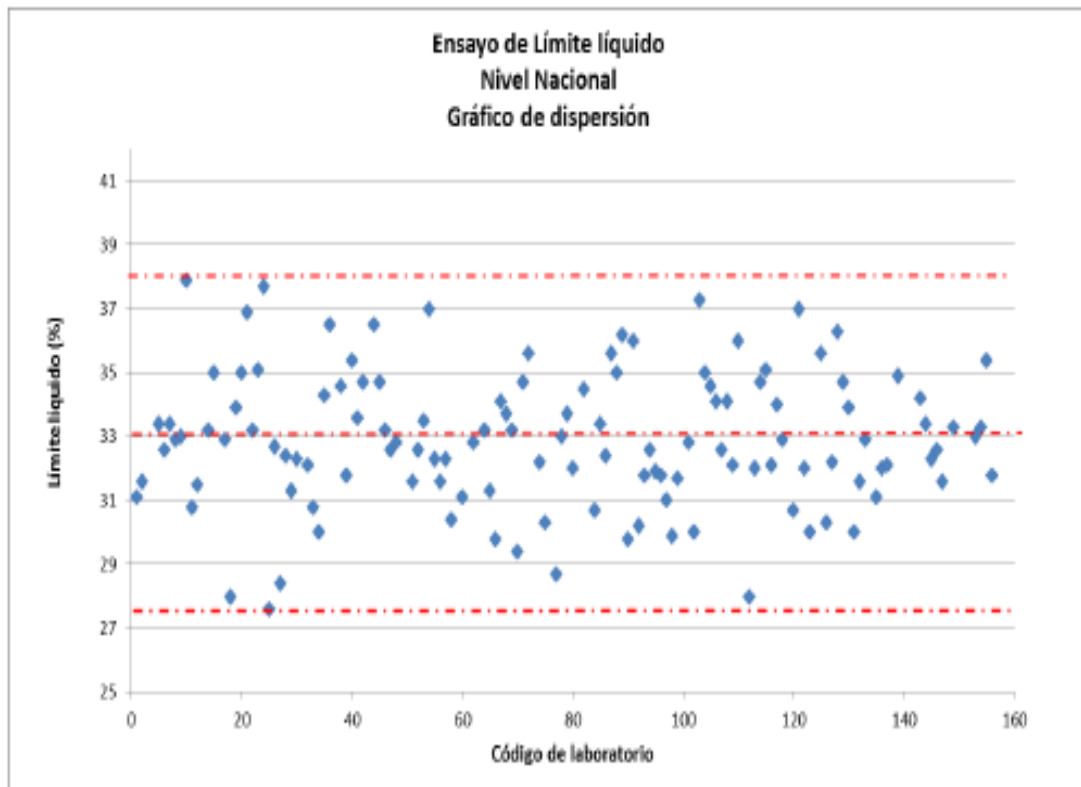


Figura 58. Dispersión de los resultados del ensayo de Límite Líquido a nivel nacional por el método de la Casagrande (EILA, 2015)

Si analizamos los resultados obtenidos para los suelos con un límite líquido inferior a 35 (baja plasticidad), subconjunto en el que se incluyen la mayoría de los suelos ensayados (37 de las 41 muestras ensayadas) y utilizamos de nuevo el coeficiente de Pearson como parámetro para determinar el grado de correlación existente entre los resultados obtenidos por ambos métodos, se obtiene un valor de 96.04%, lo que indica también una gran afinidad para este subconjunto de datos.

Con este parámetro como base y con la existencia de una recta de ajuste que relacione los datos, se podría proponer una ecuación de correlación entre ambos métodos especialmente aplicable para suelos de baja plasticidad.

Empleando el método de mínimos cuadrados, la ecuación de la recta que define la tendencia lineal de este subconjunto de datos es  $LL_{CONO} = 0.9361 * LL_{CUCHARA} + 2.1779$  (véase Figura 59).

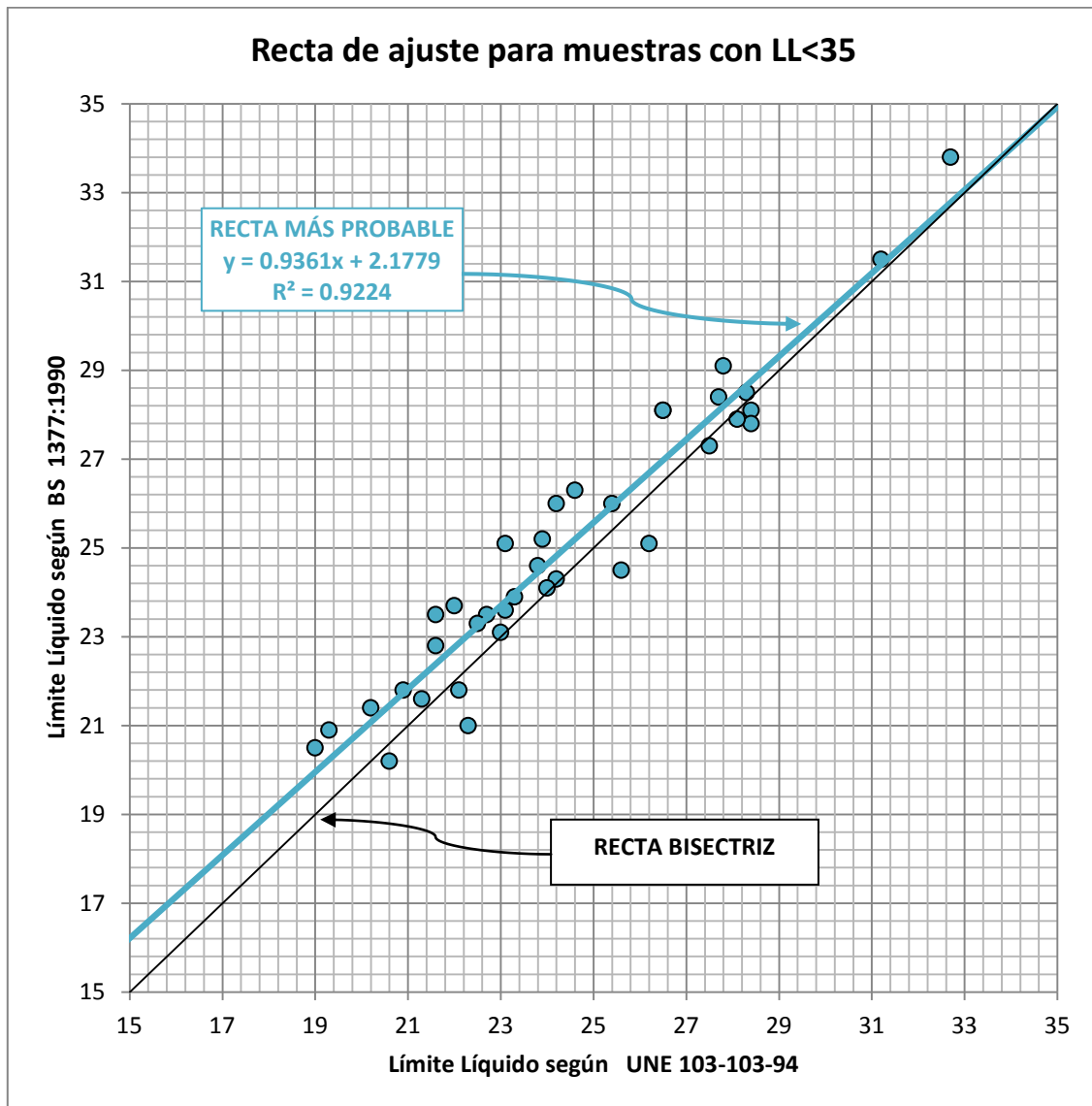


Figura 59. Recta de ajuste más probable entre ambos métodos para las muestras con límite líquido inferior a 35.

Procediendo de la misma manera que para el análisis del total de las muestras ensayadas, podemos además verificar el intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95% para los datos obtenidos por el método del penetrómetro cónico para estas muestras de baja plasticidad.

Debido al número de datos de que se dispone ( $n=37$ ) se opta de nuevo por la distribución de T-Student para su cálculo, cuya ecuación es:

$$\text{Intervalo de confianza T - Student} = \bar{x} \pm t_{\frac{\alpha}{2}; n-1} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$



La media aritmética resulta ser:  $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 0.6162$

La desviación típica  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} = 0.8900$

A partir de la función de distribución de T-Student, sabiendo que buscamos un intervalo de confianza del 95% se tiene que  $\alpha = 1 - 0.95 = 0.05$  y  $n=37$  por lo que  $t_{\alpha/2, n-1} = t_{0.025, 36} = 2.0281$ .

Por tanto, los límites superior e inferior del intervalo de confianza serán:

$$\text{Intervalo de confianza } T - \text{Student} = 0.6162 \pm 2.0281 * \frac{0.8900}{\sqrt{37}} = (+0.913 | +0.319)$$

Por lo que se esperaría que para límites líquidos inferiores a 35, el 95% de los resultados obtenidos con el ensayo del penetrómetro cónico tuvieran una diferencia máxima con respecto al método de la cuchara de Casagrande de 0.91 puntos, valor también muy bueno y que justificaría plenamente el empleo del penetrómetro como alternativa a la cuchara de Casagrande para suelos de baja plasticidad (LL < 35%).

#### 4.4.2. PROPUESTA DE NUEVAS FÓRMULAS DE CORRELACIÓN

En los últimos años algunos autores han propuesto diferentes fórmulas de correlación entre el valor de límite líquido obtenidos por el procedimiento tradicional de la cuchara de Casagrande y el penetrómetro cónico (véase Tabla 10).

En este trabajo se proponen dos fórmulas de correlación (véase Tabla 19) que se desprenden del análisis realizado en el apartado 4.4.1, una para valores de límite líquido comprendidos entre 20 y 75 (suelos de baja y media plasticidad) y otra más afinada para suelos de baja plasticidad (límites líquidos inferiores al 35%).

Ecuación	Rango de estudio del LL
$LL_{\text{CONO}} = 0.95 * LL_{\text{CUCHARA}} + 1.73$	20-75% (baja y media plasticidad)
$LL_{\text{CONO}} = 0.94 * LL_{\text{CUCHARA}} + 2.18$	20-35% (baja plasticidad)

Tabla 19. Ecuaciones de correlación entre ambos métodos propuestas por este estudio.



Como vemos ambas ecuaciones son bastante parecidas. La primera de las ecuaciones obtenidas se asemeja a la obtenida por Belviso et al (1985) aunque el rango de aplicación difiere bastante, mientras que la segunda ecuación obtenida se asemeja a la obtenida por Di Matteo (2012) tanto en sus parámetros como en el intervalo en el que es aplicable.

## 5. CONCLUSIONES

La investigación llevada a cabo nos ha ayudado a eliminar las dudas sobre el empleo del penetrómetro cónico para la determinación del límite líquido en suelos de nuestro país, concretamente bajo la metodología de ensayo recogida en la Norma BS 1377:1990.

El método del penetrómetro cónico se ha revelado como un procedimiento válido para la determinación del límite líquido, debido a la buena correlación de los resultados obtenidos entre este método y el método tradicional de la cuchara de Casagrande definido en la norma UNE 103-103-94.

Esta validez del método del penetrómetro cónico para la determinación del límite líquido no significa que el método tradicional deba desecharse, pero sí que debería considerarse el penetrómetro como un método alternativo a la cuchara de Casagrande, sobre todo debido a la gran dependencia del operador en los resultados obtenidos por el método convencional, tal y como se desprende del informe de comparación interlaboratorio a nivel nacional (EILA 2015).

A este respecto, con la utilización del penetrómetro cónico se lograrían superar varios inconvenientes respecto a la influencia del operador, ya que es un método más sistemático y que no está sujeto a interpretaciones como la apreciación de cuando se junta la muestra o a operaciones dependientes de la destreza del laborante como la ejecución de la acanaladura, por lo que la dispersión de los resultados obtenidos por varios laborantes para un mismo suelo cabría esperar que fuese inferior al del método tradicional. Quizá los únicos inconvenientes del penetrómetro cónico son que se requiere una mayor cantidad de muestra y que se necesita un tiempo algo mayor para realizar el ensayo puesto que la Norma BS 1377:1990 exige realizar el ajuste para el cálculo del límite líquido con cuatro parejas de valores de penetración-humedad distintos, mientras que el método de la cuchara de Casagrande definido en la Norma UNE 103-103-94 requiere tan sólo de dos parejas de valores de nº golpes-humedad. No obstante estos inconvenientes se pueden sortear empleando el “método puntual” recogido en la norma británica.



Esta aplicabilidad del penetrómetro cónico debe entenderse especialmente para suelos de baja plasticidad puesto que la inmensa mayoría de los suelos ensayados tienen un límite líquido inferior a 35. Dicha aplicabilidad también estaría justificada, en gran parte, para suelos de media plasticidad (límite líquido comprendido entre 35 y 75) ya que se han ensayado diversos suelos de este tipo, corroborándose que la buena correlación entre ambos métodos se mantiene. En consonancia con lo indicado, las fórmulas de correlación entre ambos métodos que se han obtenido sólo son válidas dentro del rango indicado.

La posibilidad de emplear el penetrómetro en suelos españoles de alta plasticidad necesita ser comprobada mediante ensayos de laboratorio en futuras investigaciones, si bien hay estudios en otros países que lo afirman para suelos con límite líquido de hasta 200 (Grønbech et al, 2011).

Otro aspecto que se ha puesto de manifiesto en el presente trabajo es la posibilidad de emplear el penetrómetro cónico para la determinación del límite plástico del suelo, ya que se ha encontrado una buena correlación entre la pendiente de la recta de ajuste de la determinación del límite líquido y el índice de plasticidad, si bien se requeriría corroborarlo en futuras investigaciones estudiando la relación entre la profundidad de penetración del cono y la humedad del suelo para penetraciones pequeñas o con la utilización de un penetrómetro cónico de mayor peso, como han intentado algunos investigadores (Landris T. Lee, 2009).

## 6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Tras la realización del presente trabajo se abren algunas líneas futuras de investigación que serían fundamentalmente:

- Comprobar la menor dependencia del operador en la determinación del límite líquido por el método del penetrómetro cónico que con el método de la cuchara de Casagrande, mediante el ensayo por parte de otro operador con el penetrómetro de las mismas muestras que se han utilizado en el presente estudio (en base al análisis teórico de ambos ensayos es muy probable que esto ocurra).
- Estudiar la aplicabilidad del penetrómetro cónico y de la Norma BS 1377:1990 para la determinación del límite líquido en suelos españoles de alta plasticidad, particularmente en aquellos con un límite líquido superior a 75, lo que permitiría utilizar el penetrómetro cónico para todo tipo de suelos y facilitaría la promulgación de una nueva norma española más fiable, si se comprueba lo indicado en el primer punto.



- Estudiar la posibilidad de emplear un penetrómetro cónico de mayor peso que el definido por la Norma BS 1377:1990 para la determinación del límite plástico de los suelos españoles, lo que homogeneizaría bastante la forma de obtener los dos límites de Atterberg (plástico y líquido).

## 7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Al-Dahlaki, M.H. and Al-Sharify, G.A., 2008. *A Proposed Approach for Plastic Limit Determination Using the Drop-Cone Penetrometer Device*. Journal of Engineering and Development, Vol. 12, No. 1, pp. 107-117.
- Ballard, G.E.H. y Weeks, W.F., 1963. *The human factor in determining the plastic limit of cohesive soil*. Material Research and Standard, ASTM, Vol 3, pp. 726-729.
- Bañón Blázquez L. y Beviá García J.F., 2000. *Manual de carreteras. Volumen II: Construcción y mantenimiento*. Universidad de Alicante.
- Belviso, R., Ciampoli, S., Cotecchia, V., and Federico, A., 1985. *Use of the Cone Penetrometer to Determine Consistency Limits*. Ground Engineering, Vol. 18, N° 5, pp. 21-22.
- Carter M. y Bentley S., 1991. *Correlations of Soil Properties*. London. Pentech Press Limited.
- Crespo Villalaz C., 2007. *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. (6ª Ed). México. Limusa
- Das, Braja., 2008. *Advanced Soil Mechanics*. (3ª Ed). London. Taylor & Francis.
- Das, Braja., 2011. *Principles of Foundation Engineering*. (7ª Ed) .
- Das, N., Sarma, B., Singh, S. and Sutradhar, B.B., 2013. *Comparison in Undrained Shear Strength between Low and High Liquid Limit Soils*. International Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 2, N° 1, pp. 1-6.



- Di Matteo, L., 2012. *Liquid Limit of Low- to Medium-Plasticity Soils: Comparison between Casagrande Cup and Cone Penetrometer Test*. Bulletin of Engineering Geology and Environment, Vol. 71, pp. 79-85.
- Donald P. Coduto., 1999. *Geotechnical Engineering Principles and Practices*.
- Dragoni, W., Prosperini, N. and Vinti, G. 2008. *Some observations on the procedures for the determination of the liquid limit: an application on Plio-Pleistocenic clayey soils from Umbria region (Italy)*. Ital. J. Eng Geol. Environ. Vol 1, pp. 185-197.
- Edén, P.J., 1959. *Use of a one-point liquid limit procedure*. ASTM., STP 254:168-176.
- Fojtová , L., Marschalko, M., Franeková , R. and Kovàr, L. 2009. *Study of compatibility of methods for liquid limit measurement according to Czech State Standard and newly adopted European Standard*. Geosci. Eng. Vol 1, pp. 55-68.
- Grim, R. E., 1962. *Applied Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, N. Y.
- Grønbech, G.L., Nielsen, B.N. and Ibsen, L.B., 2011. *Comparison of Liquid Limit of Highly Plastic Clay by Means of Casagrande and Fall Cone Apparatus*. Proceedings of the Pan American Geotechnical Conference, 7 pp.
- *Informe del ejercicio de comparación interlaboratorio a nivel nacional de ensayos de materiales (EILA15)*, 2015. CSIC. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- Jefferson, I. y Rogers, C.D.F., 1998. *Liquid Limit and the Temperature Sensitivity of Clays*. Engineering Geology, Vol. 49, pp. 95-109.
- Jiménez Salas J.A. y Justo Alpañés J.L., 1975. *Geotecnia y cimientos I Propiedades de los suelos y de las rocas*. (2ª Ed.). Madrid. Rueda.
- Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A., 2005. *Mecánica de Suelos Tomo 1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. (3ª Ed.). México. Limusa.
- Karlsson, R. 1977. *Consistency limits*. Document D6.



- Karlsson, R. 1961. *Suggested improvements in the liquid limit test with reference to flow properties of remoulded clays*. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1961, Paris, France. pp. 171-184.
- Kodikara, J.K., Seneviratne, H.N., and Wijayakulasooriya, C.V., 1986. *Evaluation of Plastic Limit and Plasticity Index by Cone Penetrometer*. Proceedings of the Asian Regional Symposium on Geotechnical Problems and Practices in Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 229-233.
- Landris, T. L. y Freeman R. B., 2009. *Dual Weight Fall Cone Method for Simultaneous Liquid and Plastic Limit Determination*. J. of Geotech. & Geoenviron. Eng., ASCE, Vol.135, N°.1, pp.158.
- Littleton, I. y Farmilo, M., 1977. *Some Observations on Liquid Limit Values with Reference to Penetration and Casagrande Tests*. Ground Engineering, Vol. 10, N°. 5, pp. 39-40.
- Leroueil, S. and Le Bihan, J. P. 1996. *Liquid limits and fall cones*. Can. Geotech. J. Vol. 33, pp. 793-798.
- Matías Sánchez, A., 2010. *Ingeniería y morfología del Terreno*. Universidad de Extremadura.
- Mishra, A.K., Ohtsubo, M., Li, L.Y., and Higashi, T., 2012. *Influence of Various Factors on the Difference in the Liquid Limit Values Determined by Casagrande's and Fall Cone Method*. Environmental Earth Sciences, Vol. 65, pp. 21-27.
- Müller-Vonmoos, M., 1965, *Determination of organic matter for the classification of soil samples* VI Cong. Int. Mec. Suelo, Montreal, Vol. 1, pp.77-79.
- Muntohar, A.S. and Hashim, R., 2005. *Determination of Plastic Limits of Soils Using Cone Penetrometer: Re-Appraisal*. J. Teknik Sipil, N°. 2. 17 pp.
- Norma ASTM D 4318-05. *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils*. 2005.





- Norma BS 1377:1990. Part 2. Classification test. *Determination of the liquid limit*. Methods of test for Soils for civil engineering purposes. British Standard. 1990.
- Norma UNE 103-101-95. *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*. Secretaria del CTN. MOPTM. 1995.
- Norma UNE 103-103-94. *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*. Secretaría del CTN. MOPTM. 1994.
- Norma UNE 103-104-93. *Determinación del límite plástico de un suelo*. Secretaria del CTN. MOPTM. 1993.
- Norma UNE 103-300-93. *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa*. Secretaria del CTN. MOPTM. 1993.
- Norman, L.E.J, 1959. *The one-point method of determining the value of the liquid limit of a soil*. Géotechnique, Vol. 9, pp 1-8.
- Osorio, S., 2010. *Apuntes de geotecnia con énfasis en laderas*.
- Özer, M., 2009. *Comparison of Liquid Limit Values Determined Using the Hard and Soft Casagrande Apparatus and the Cone Penetrometer*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 68, pp. 289-296.
- Sherwood, P.T. y Ryley, M.D., 1970. *An Investigation for a Cone-Penetrometer Method for the Determination of the Liquid Limit*. Geotechnique, Vol. 20, N°. 2, pp. 203-208.
- Sivapullaiah, P.V. and Sridharan, A., 1985. *Liquid Limit of Soil Mixtures*. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 8, N°. 3, pp. 111-116.
- Sowers, G.F., Vesic, A. y Grandolfi, M., 1959. *Penetration tests for liquid limit*. ASTM. STP Vol. 254, pp. 216-224.

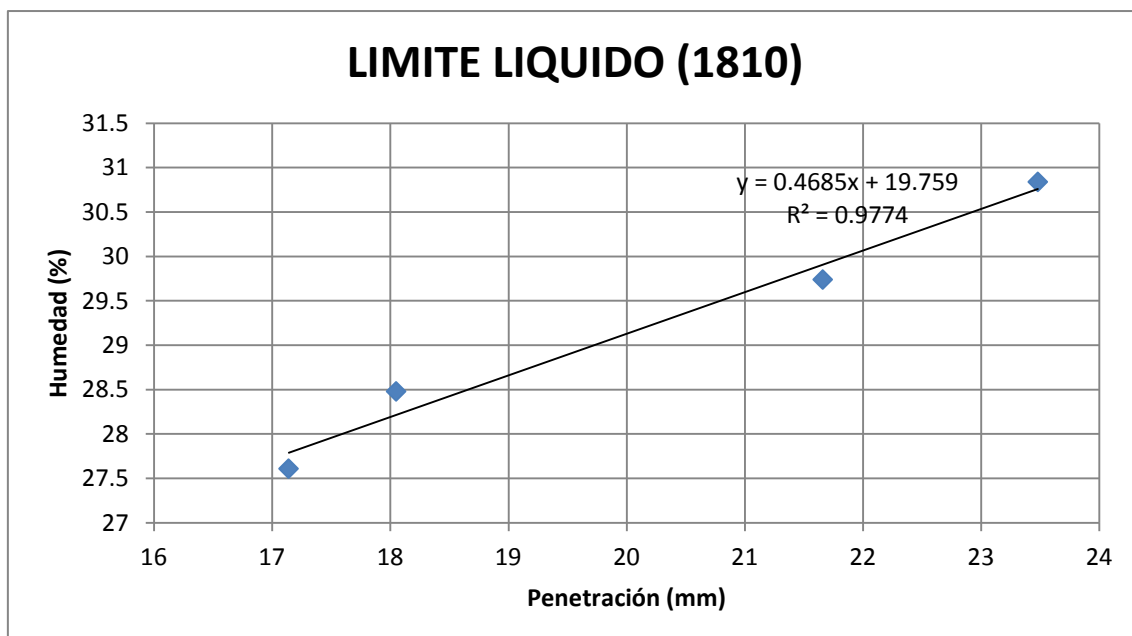


- Spagnoli, G., 2012. *Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay*. Canadian Journal of Soil Science, Vol. 92, pp. 859-864.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. y Mersi, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*.
- Tomás, R., Cano, M., García-Barba, J., Santamarta, J.C. y Hernández, L.E, 2013. *Ensayos geotécnicos de suelos y rocas*. License: Creative Commons BY-NC-SA.
- Wasti, Y. and Bezirci, M. H. 1986. *Determination of the consistency limits of soils by the fall-cone test*. Can. Geotech. J. Vol. 3, pp. 241-246.
- Wires, K. C. 1984. *The Casagrande method versus the dropcone penetrometer method for the determination of liquid limit*. Canadian Journal of Soil Science, Vol. 6 pp. 297-300.
- Zentar, R., Abriak, N., and Dubois, V., 2009. *Effects of Salts and Organic Matter on Atterberg Limits of Dredged Marine Sediments*. Applied Clay Science, Vol. 42, pp. 391-397.



**8. ANEJO 1: ACTAS DE LOS ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LAS MUESTRAS CON EL PENETRÓMETRO CÓNICO.**

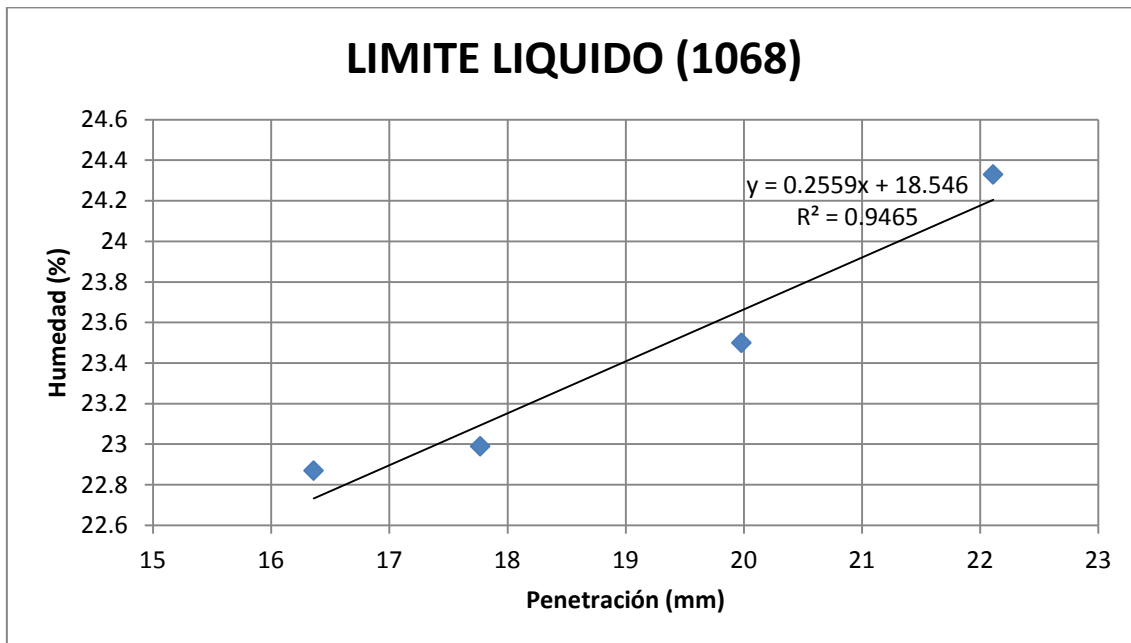
1- MUESTRA: 1810						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	23.64	23.32		21.81	21.50	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>23.48</b>			<b>21.66</b>		
Recipiente n°	1B-1B			4A-4B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.12			39.49		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	73.91			61.74		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	65.71			56.64		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>30.84</b>			<b>29.74</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.27	17.83		17.02	17.26	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.05</b>			<b>17.14</b>		
Recipiente n°	2B-9B			SN-SN		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	41.61			28.32		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	76.93			45.05		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	69.10			41.43		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>28.48</b>			<b>27.61</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 29.1 %**



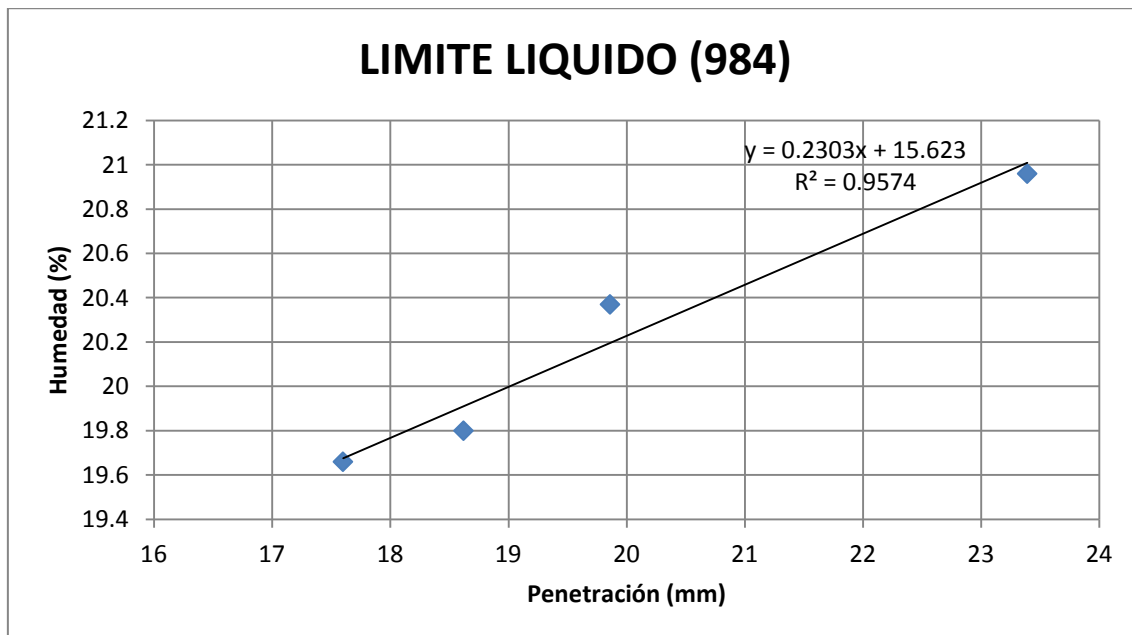
2- MUESTRA: 1068 Terreno natural. Fondo de caja (Obra)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	21.88	22.34		19.84	20.11	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.11</b>			<b>19.98</b>		
Recipiente nº	3B-4A			7A-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.60			28.80		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	68.40			48.14		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	62.96			44.46		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.33</b>			<b>23.50</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	17.95	17.59		16.47	16.25	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>17.77</b>			<b>16.36</b>		
Recipiente nº	8B-6B			6B-0B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	30.40			26.11		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	57.15			47.28		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	52.15			43.34		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>22.99</b>			<b>22.87</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 23.7 %**



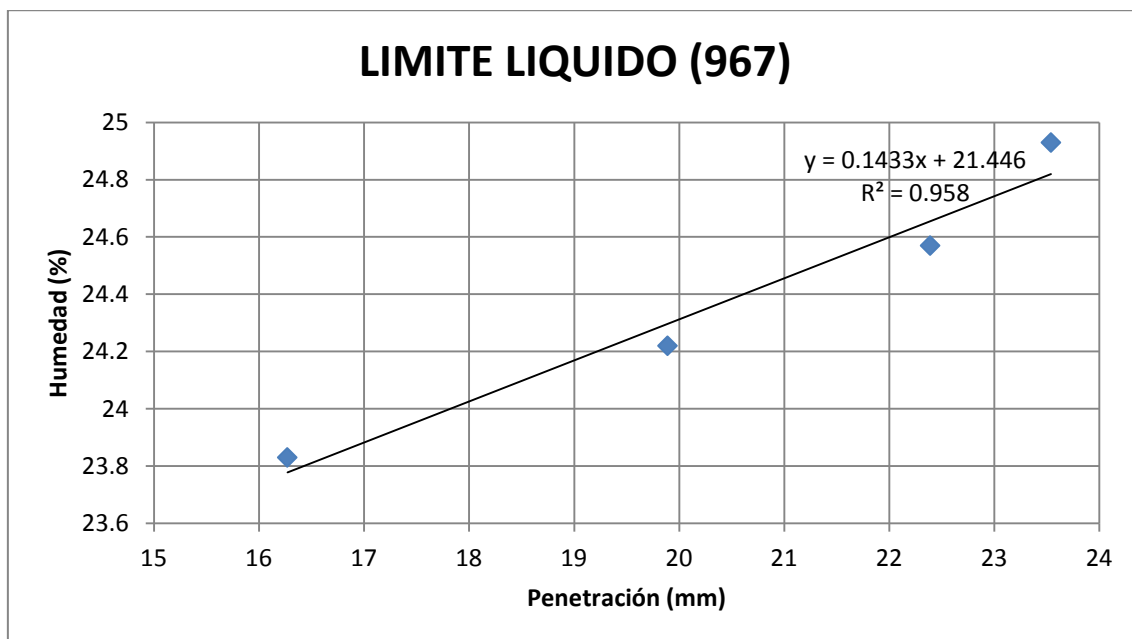
3- MUESTRA: 984 Terreno natural A 1.40 m						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	23.62	23.15		19.28	20.04	20.25
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>23.39</b>			<b>19.86</b>		
Recipiente n°	6A-2A			6A-6A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	37.89			38.02		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	74.83			52.32		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	68.43			49.90		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>20.96</b>			<b>20.37</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.45	18.79		17.73	17.47	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.62</b>			<b>17.60</b>		
Recipiente n°	0A-7B			5B-5B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	27.84			28.55		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	50.83			65.92		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	47.03			59.78		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>19.80</b>			<b>19.66</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 20.2 %**



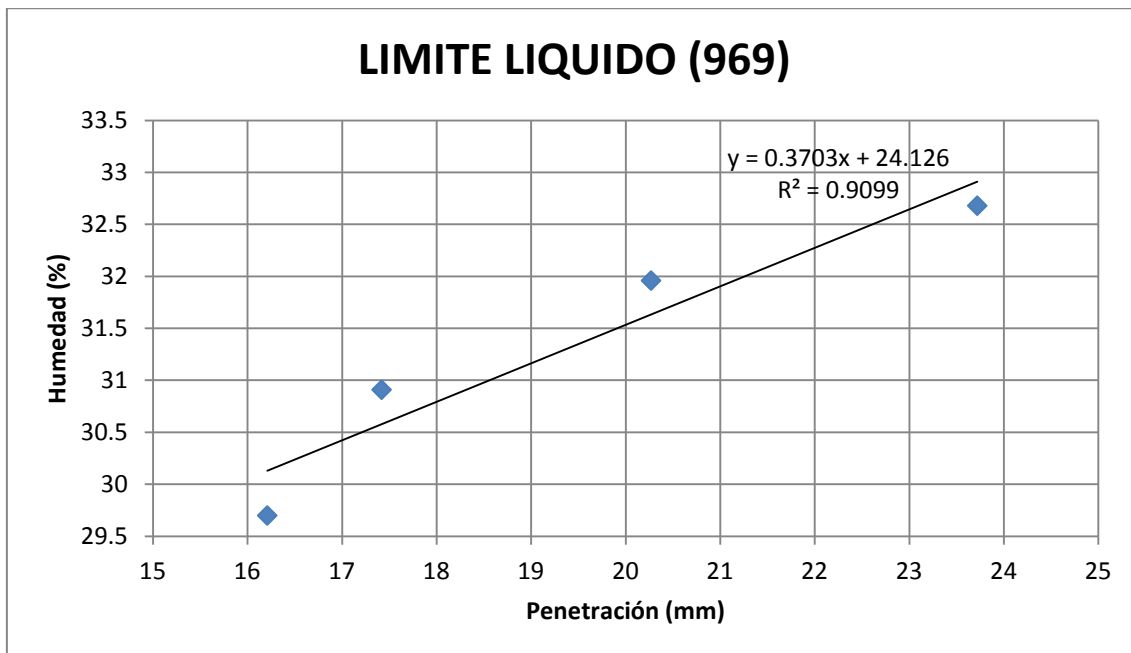
4- MUESTRA: 967						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	23.76	23.31		22.53	22.25	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>23.54</b>			<b>22.39</b>		
Recipiente n°	1A-3B			4A-2B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.47			38.65		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	73.54			73.58		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	66.74			66.69		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.93</b>			<b>24.57</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	19.70	20.08		16.48	16.06	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>19.89</b>			<b>16.27</b>		
Recipiente n°	2A-3A			5A-5A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	37.25			41.98		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	63.61			78.46		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	58.47			71.44		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.22</b>			<b>23.83</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 24.3 %**



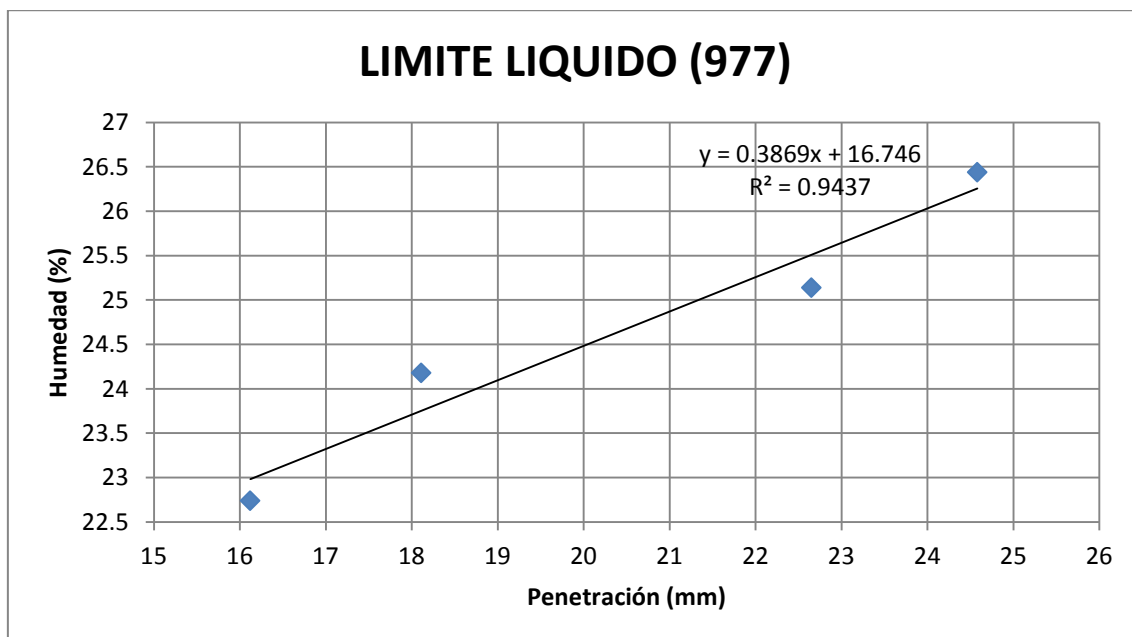
5- MUESTRA: 969 Terreno natural. Subbase A 0.20 m						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	23.55	23.89		20.38	20.16	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>23.72</b>			<b>20.27</b>		
Recipiente n°	8A-7A			7B-8A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.15			29.86		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	49.67			51.37		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	44.37			46.16		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>32.68</b>			<b>31.96</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	17.59	17.25		16.35	16.07	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>17.42</b>			<b>16.21</b>		
Recipiente n°	0B-8B			SN-SN		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.23			28.06		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	49.87			56.53		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	44.76			50.01		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>30.91</b>			<b>29.70</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 31.5 %**



6- MUESTRA: 977						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	24.71	24.45		22.54	22.76	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.58</b>			<b>22.65</b>		
Recipiente n°	4B-2B			7B-7B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.66			29.31		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	65.44			50.12		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	59.84			45.94		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.44</b>			<b>25.14</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.32	17.90		15.98	16.26	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.11</b>			<b>16.12</b>		
Recipiente n°	8A-8A			6A-6A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.58			28.55		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	53.33			48.63		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	48.51			44.91		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.18</b>			<b>22.74</b>		

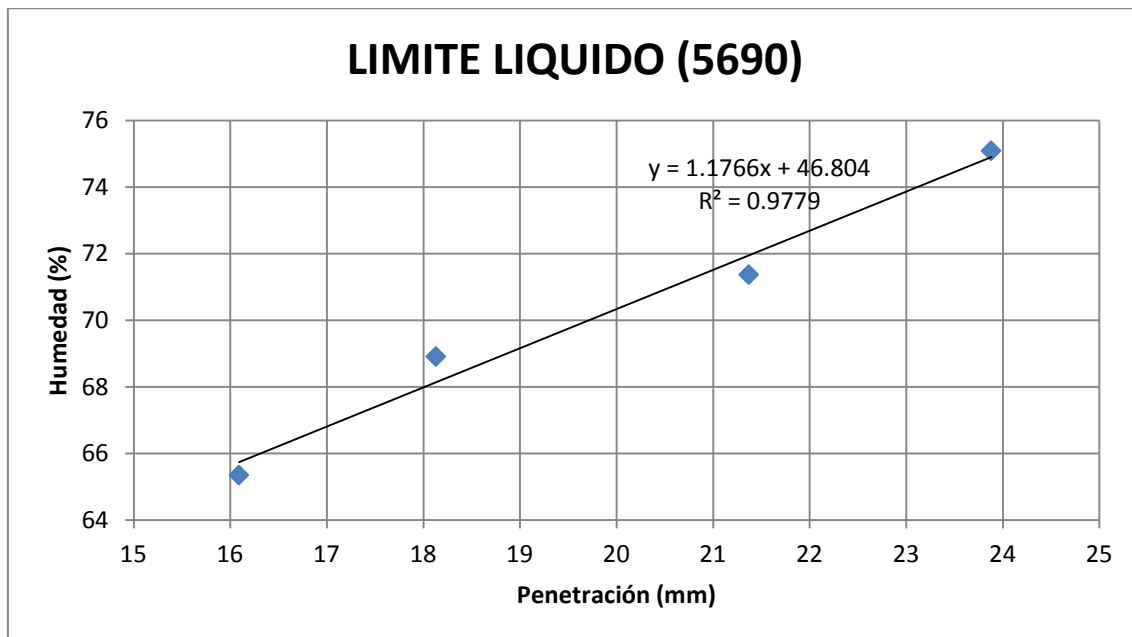


**LÍMITE LÍQUIDO = 24.5 %**





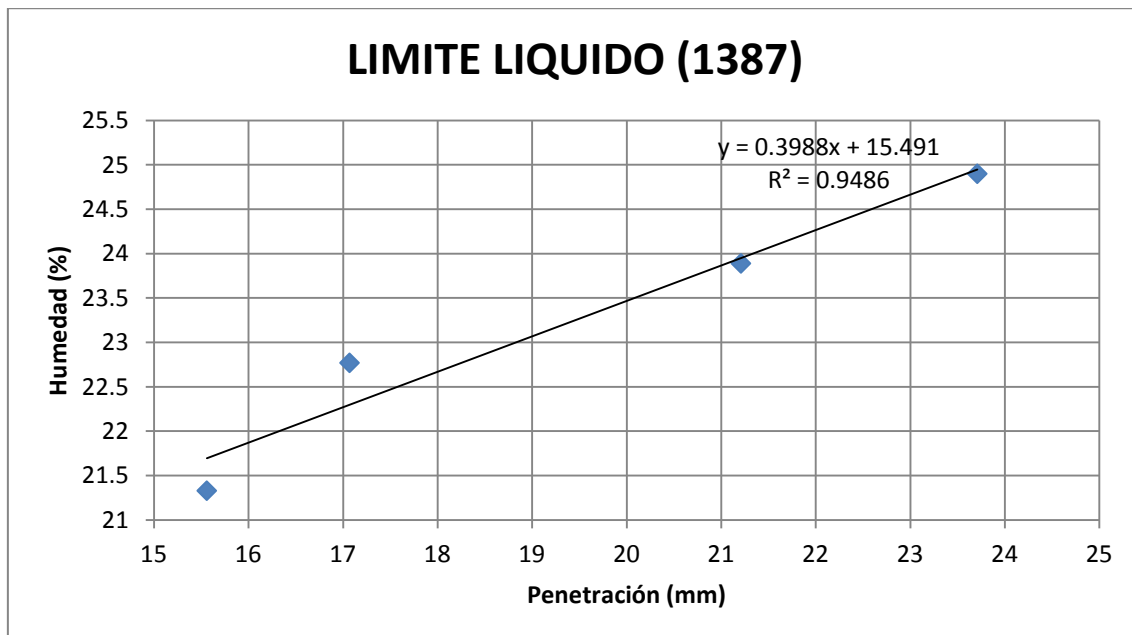
7- MUESTRA: 5690						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.21	15.97		17.98	18.28	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>16.09</b>			<b>18.13</b>		
Recipiente n°	1A-3B			0B-8B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.49			28.22		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	56.67			43.05		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	49.88			37.00		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>65.35</b>			<b>68.91</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.18	21.56		23.80	23.96	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>21.37</b>			<b>23.88</b>		
Recipiente n°	5A-5A			2A-3A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	41.99			37.25		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	64.08			62.27		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	54.88			51.54		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>71.37</b>			<b>75.09</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 70.3 %**



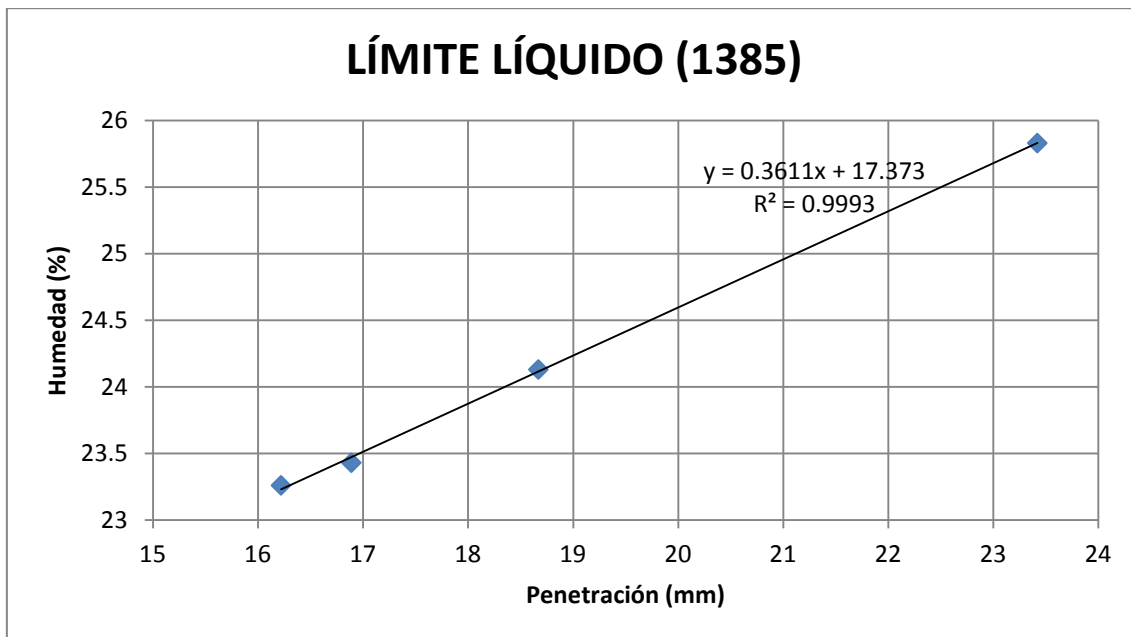
8- MUESTRA: 1387 Árido de machaqueo. Zahorra natural (Producción a pie de obra)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.77	15.35		17.24	16.90	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.56</b>			<b>17.07</b>		
Recipiente n°	5B-5B			SN-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.02			28.25		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	52.58			39.41		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	50.02			37.34		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>21.33</b>			<b>22.77</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.09	21.33		23.54	23.88	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>21.21</b>			<b>23.71</b>		
Recipiente n°	4A-9B			6B-0B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.56			26.10		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	56.43			41.65		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	53.37			38.55		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>23.89</b>			<b>24.90</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 23.5 %**



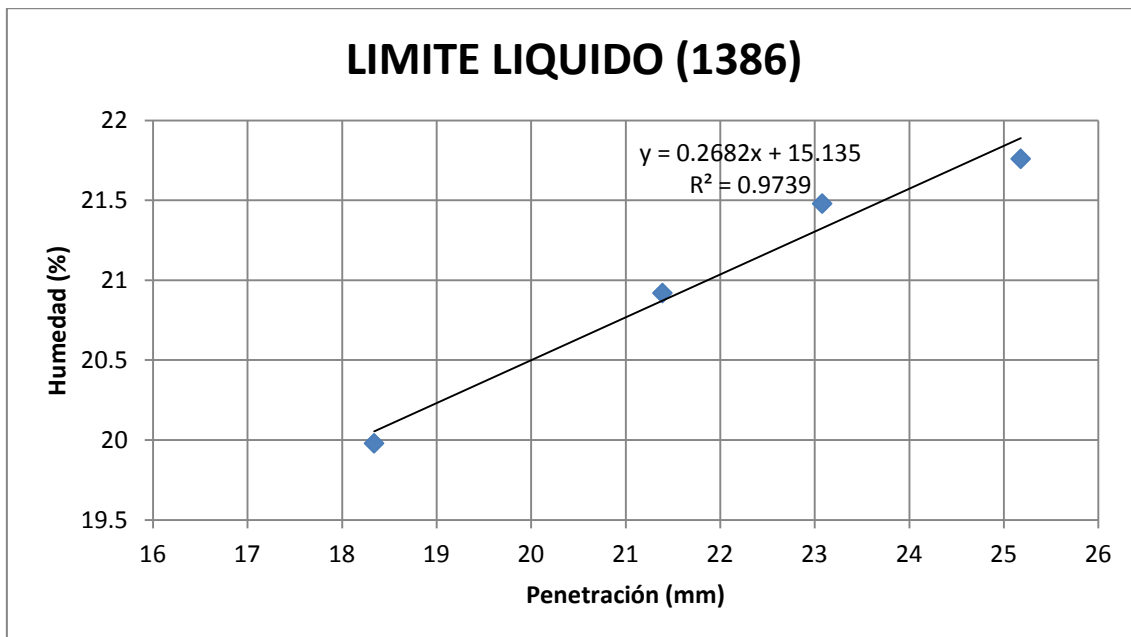
9- MUESTRA: 1385 Terreno natural (Producción a pie de obra)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.43	16.01		17.01	16.77	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>16.22</b>			<b>16.89</b>		
Recipiente n°	5B-5B			5A-5A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.03			42.07		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	53.66			59.35		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	50.71			56.07		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>23.26</b>			<b>23.43</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.55	18.79		23.28	23.56	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.67</b>			<b>23.42</b>		
Recipiente n°	4A-9B			SN-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.58			28.25		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	62.24			50.22		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	58.03			45.71		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.13</b>			<b>25.83</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 24.6 %**



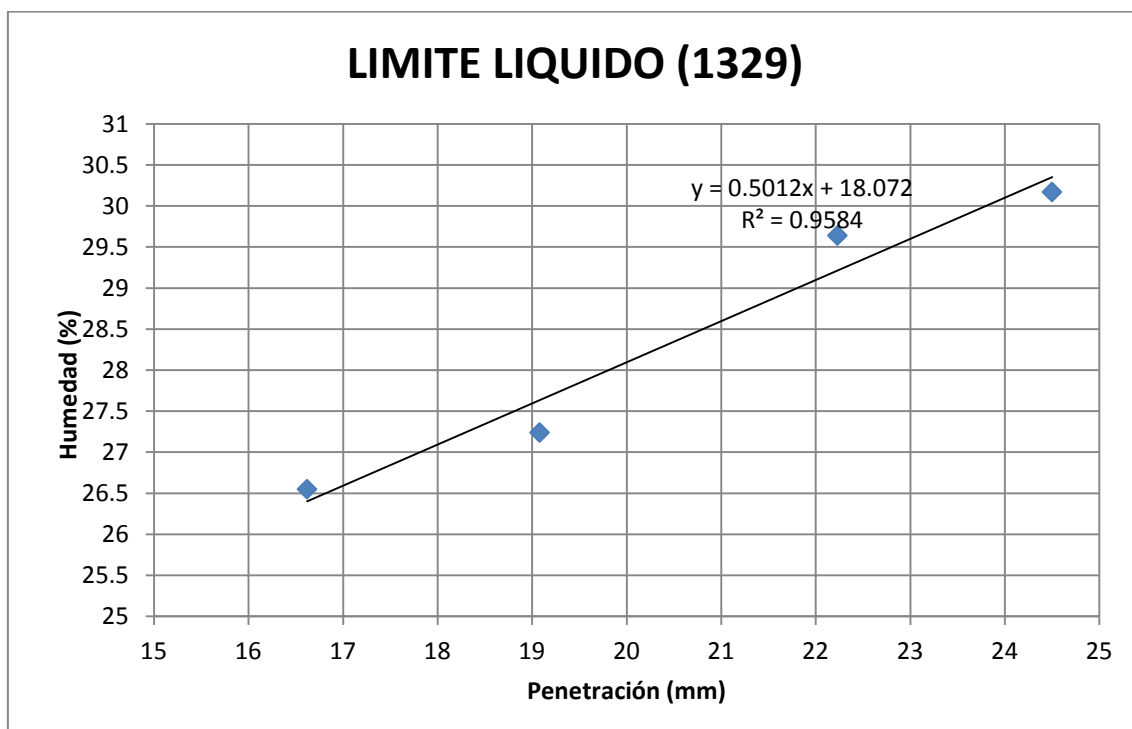
10- MUESTRA: 1386 Árido de machaqueo. Zahorra artificial (Machacadora molino)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	18.42	18.25		21.20	21.58	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.34</b>			<b>21.39</b>		
Recipiente n°	2B-4B			3B-4A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.48			40.59		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	54.47			56.31		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	52.14			53.59		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>19.98</b>			<b>20.92</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	23.01	23.15		24.98	25.37	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>23.08</b>			<b>25.18</b>		
Recipiente n°	8A-8A			1B-1B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.75			39.06		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	44.30			55.12		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	41.55			52.25		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>21.48</b>			<b>21.76</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 20.5 %**



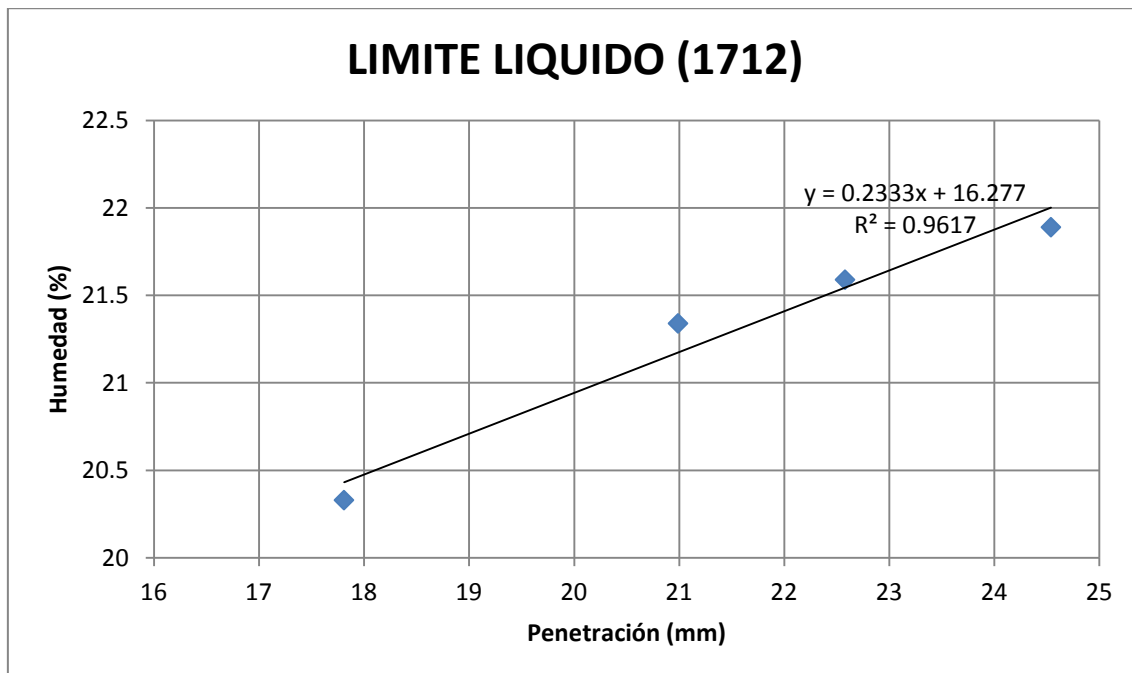
11- MUESTRA: 1329						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.46	16.78		19.15	19.01	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>16.62</b>			<b>19.08</b>		
Recipiente n°	0A-SN			6A-2A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	27.76			37.89		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	39.63			48.54		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	37.14			46.26		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.55</b>			<b>27.24</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.29	22.17		24.63	24.37	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.23</b>			<b>24.50</b>		
Recipiente n°	7A-7A			6A-6A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.80			28.55		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	41.57			41.02		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	38.65			38.13		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>29.64</b>			<b>30.17</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 28.1 %**



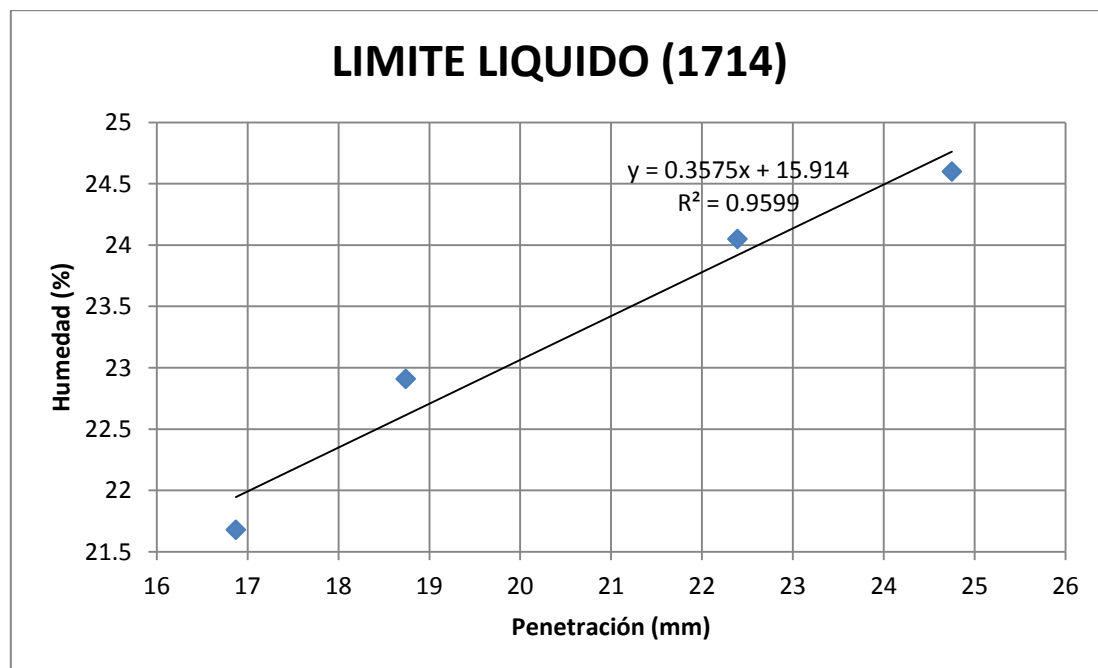
12- MUESTRA: 1712 Terreno natural M-2. Producción a pie de obra						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	17.75	17.86		21.21	20.77	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>17.81</b>			<b>20.99</b>		
Recipiente n°	5B-5B			3B-4A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.03			40.60		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	54.13			59.42		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	51.41			56.11		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>20.33</b>			<b>21.34</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.72	22.44		24.43	24.65	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.58</b>			<b>24.54</b>		
Recipiente n°	1B-1B			8A-8A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.06			28.59		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	59.73			44.57		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	56.06			41.70		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>21.59</b>			<b>21.89</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 20.9 %**



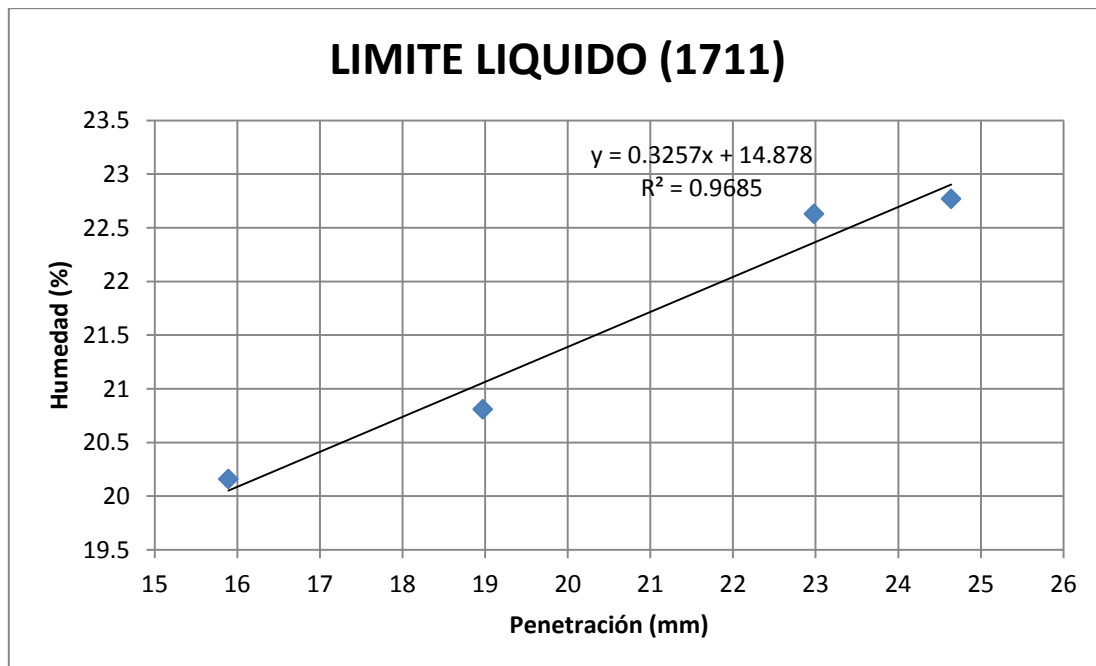
13- MUESTRA: 1714 Terreno natural M-4. Producción a pie de obra						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.73	17.01		18.93	18.55	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>16.87</b>			<b>18.74</b>		
Recipiente n°	8B-6B			SN-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	30.40			28.24		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	43.31			38.97		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	41.01			36.97		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>21.68</b>			<b>22.91</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.21	22.57		24.59	24.91	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.39</b>			<b>24.75</b>		
Recipiente n°	4A-9B			6A-6A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.57			28.55		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	54.96			47.90		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	52.17			44.08		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.05</b>			<b>24.60</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 23.1 %**



14- MUESTRA: 1711 Terreno natural M-1. Producción a pie de obra)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.02	15.76		19.12	18.82	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.89</b>			<b>18.97</b>		
Recipiente n°	4B-2B			5A-5A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.68			41.99		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	53.94			59.00		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	51.38			56.07		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>20.16</b>			<b>20.81</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.80	23.16		24.45	24.83	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.98</b>			<b>24.64</b>		
Recipiente n°	7A-7A			6B-0B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.80			26.11		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	44.57			43.74		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	41.66			40.47		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>22.63</b>			<b>22.77</b>		

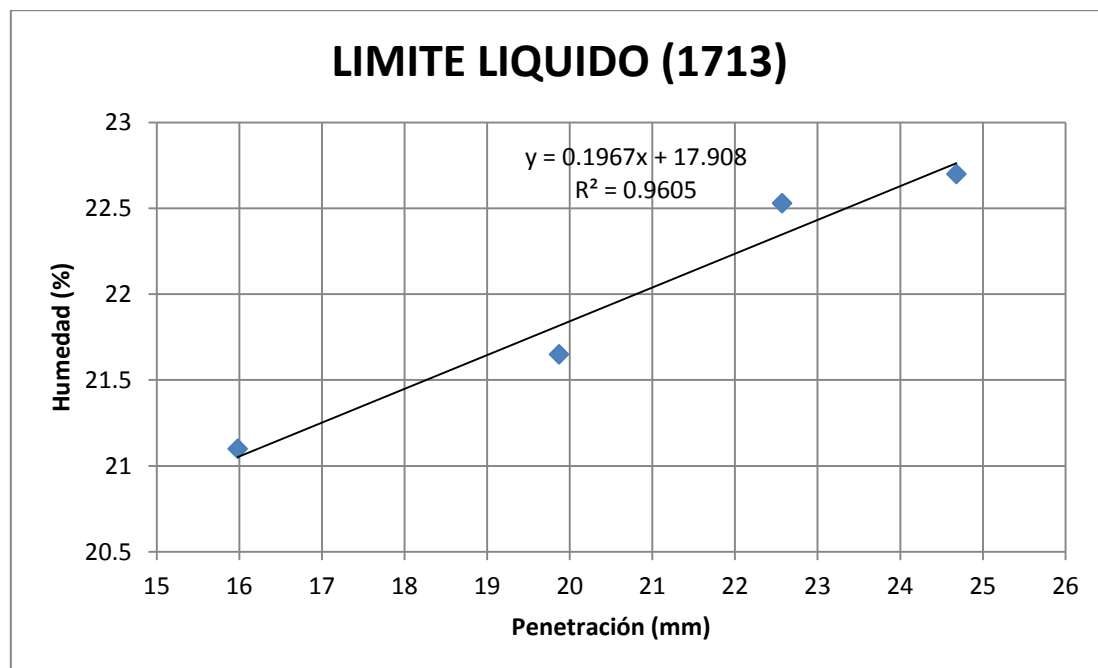


**LÍMITE LÍQUIDO = 21.4 %**





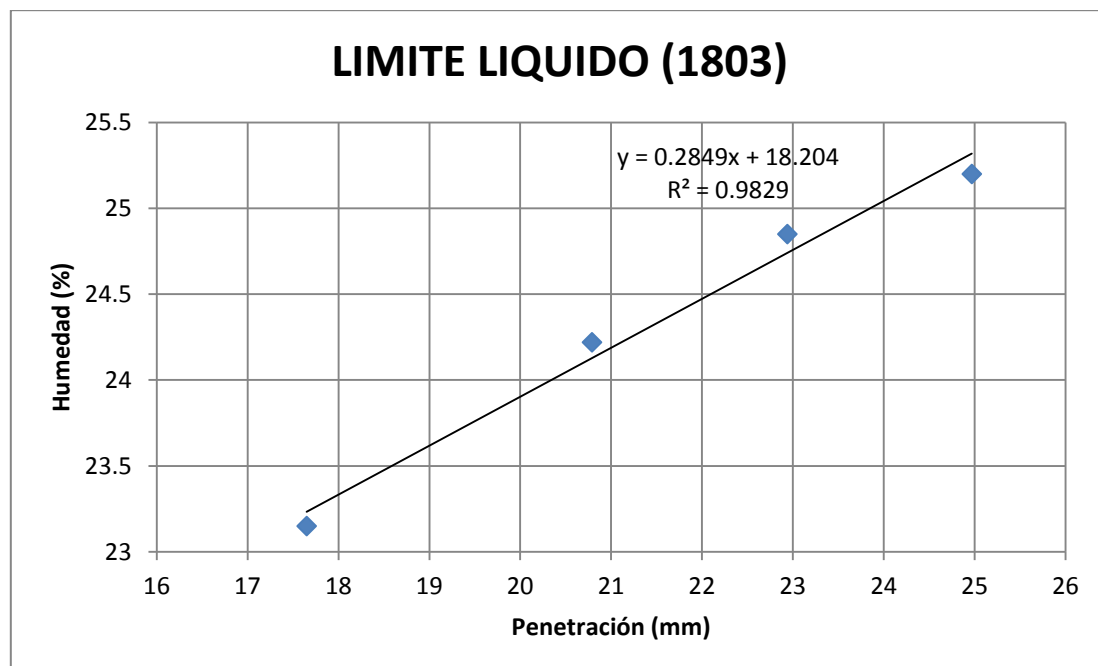
15- MUESTRA: 1713 Terreno natural M-3. Producción a pie de obra						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.18	15.77		19.72	20.02	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.98</b>			<b>19.87</b>		
Recipiente n°	6A-2A			2A-3A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	37.91			37.27		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	47.38			51.43		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	45.73			48.91		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>21.10</b>			<b>21.65</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.75	22.39		24.82	24.54	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.57</b>			<b>24.68</b>		
Recipiente n°	0B-8B			1A-3B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.32			39.49		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	42.08			56.19		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	39.55			53.10		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>22.53</b>			<b>22.70</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 21.8 %**



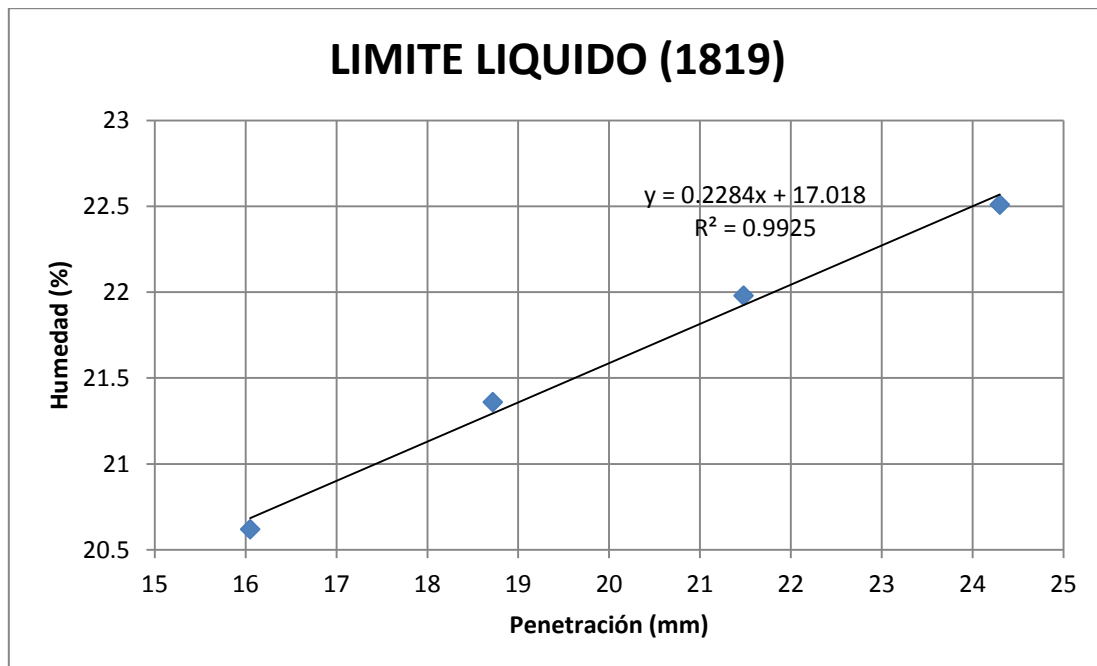
16- MUESTRA: 1803						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	17.52	17.78		20.94	20.64	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>17.65</b>			<b>20.79</b>		
Recipiente n°	6A-6A			0B-8B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.55			28.23		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	40.73			39.31		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	38.44			37.15		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>23.15</b>			<b>24.22</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.80	23.08		24.89	25.05	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.94</b>			<b>24.97</b>		
Recipiente n°	0A-7A			8A-8A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	27.76			28.59		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	40.37			39.37		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	37.86			37.20		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.85</b>			<b>25.20</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 23.9 %**



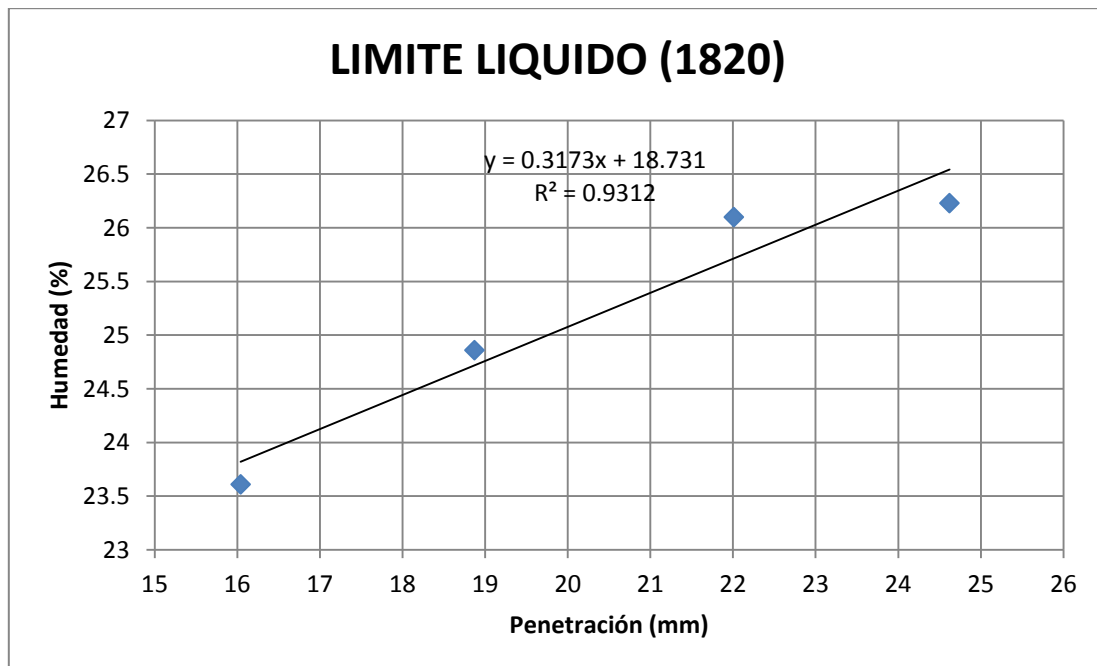
17- MUESTRA: 1819						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	24.14	24.46		21.35	21.61	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.30</b>			<b>21.48</b>		
Recipiente n°	1A-3A			4B-2B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.48			38.66		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	49.93			52.48		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	48.01			49.99		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>22.51</b>			<b>21.98</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.61	18.83		15.94	16.16	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.72</b>			<b>16.05</b>		
Recipiente n°	5A-5A			6A-2A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	42.00			37.90		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	52.91			50.30		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	50.99			48.18		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>21.36</b>			<b>20.62</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 21.6 %**



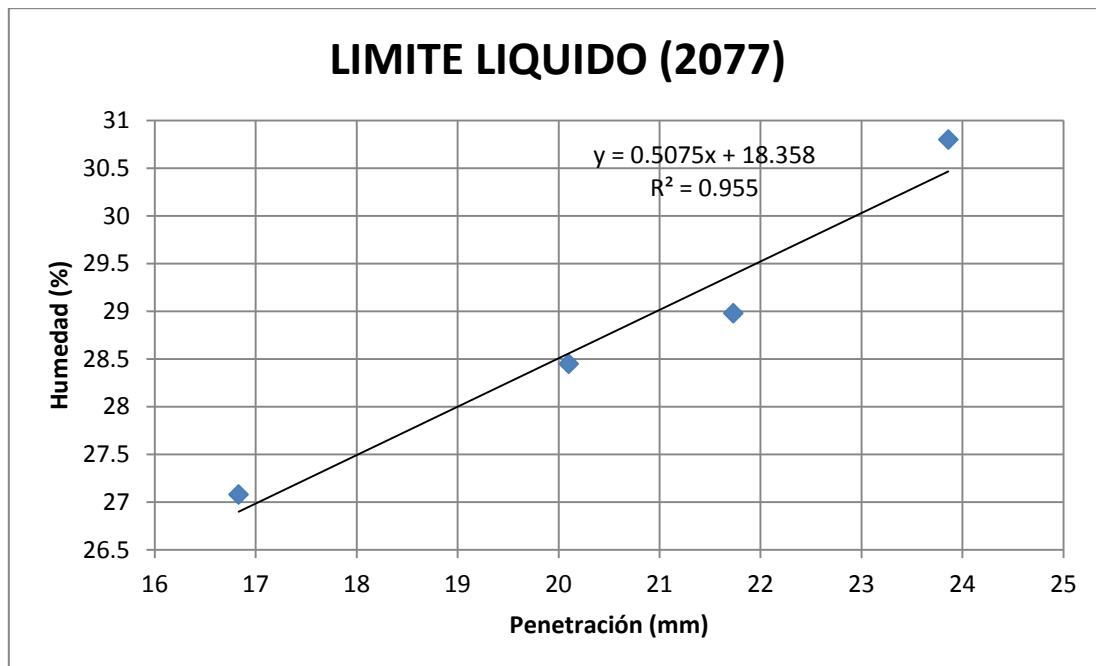
18- MUESTRA: 1820 Terreno natural M-2. Producción a pie de obra						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	24.46	24.77		21.89	22.13	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.62</b>			<b>22.01</b>		
Recipiente n°	3B-4A			SN-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.60			28.24		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	51.91			40.51		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	49.56			37.97		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.23</b>			<b>26.10</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.72	19.01		15.85	16.22	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.87</b>			<b>16.04</b>		
Recipiente n°	5B-5B			8B-6B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.03			30.40		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	49.53			41.92		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	47.24			39.72		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.86</b>			<b>23.61</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 25.1 %**



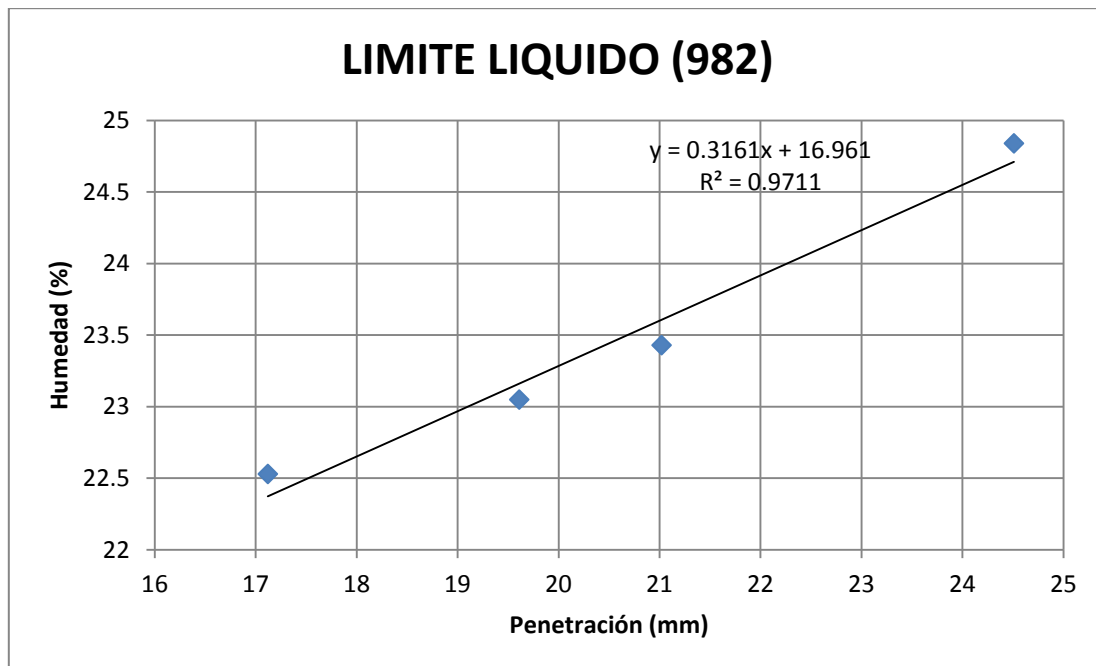
19- MUESTRA: 2077						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.91	16.75		20.01	20.19	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>16.83</b>			<b>20.10</b>		
Recipiente n°	SN-7A			3B-4A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.24			40.62		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	41.85			55.61		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	38.95			52.29		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>27.08</b>			<b>28.45</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.59	21.86		23.72	23.99	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>21.73</b>			<b>23.86</b>		
Recipiente n°	2A-3A			6A-2A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	37.26			38.10		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	55.24			54.11		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	51.20			50.34		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>28.98</b>			<b>30.80</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 28.5 %**



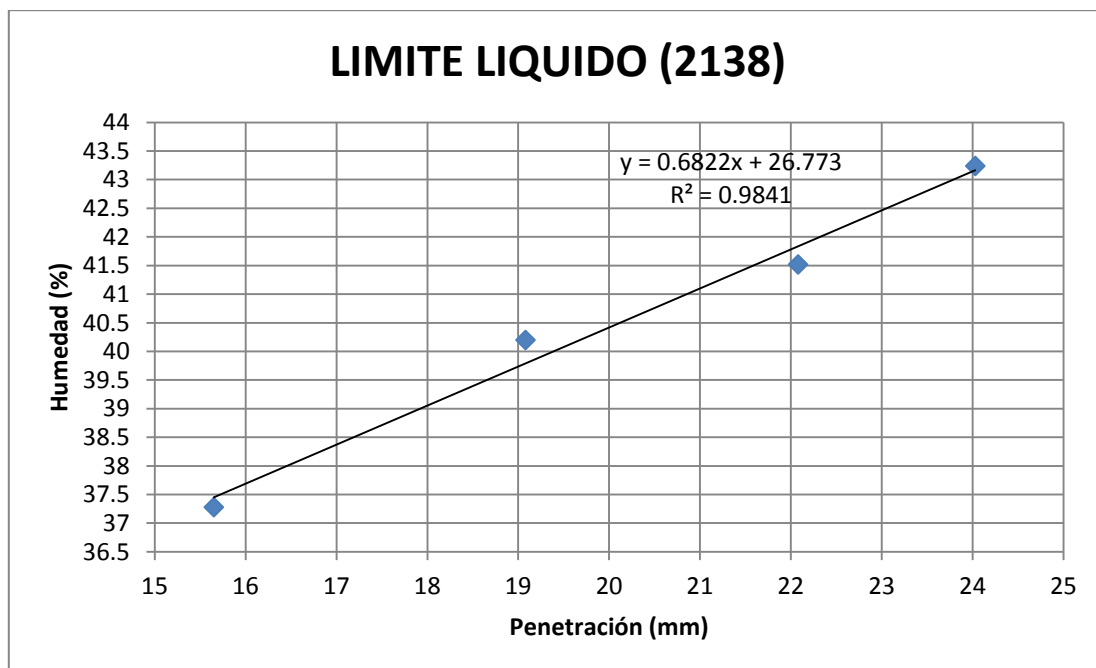
20- MUESTRA: 982 Terreno natural (Relleno zanja A 1.30 m)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	24.31	24.70		20.84	21.19	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.51</b>			<b>21.02</b>		
Recipiente n°	4B-2B			6A-6A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.66			28.68		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	52.03			38.90		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	49.37			36.96		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.84</b>			<b>23.43</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	19.72	19.49		17.20	17.03	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>19.61</b>			<b>17.12</b>		
Recipiente n°	0A-7A			0B-8B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	27.77			28.23		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	40.58			41.39		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	38.18			38.97		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>23.05</b>			<b>22.53</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 23.3 %**



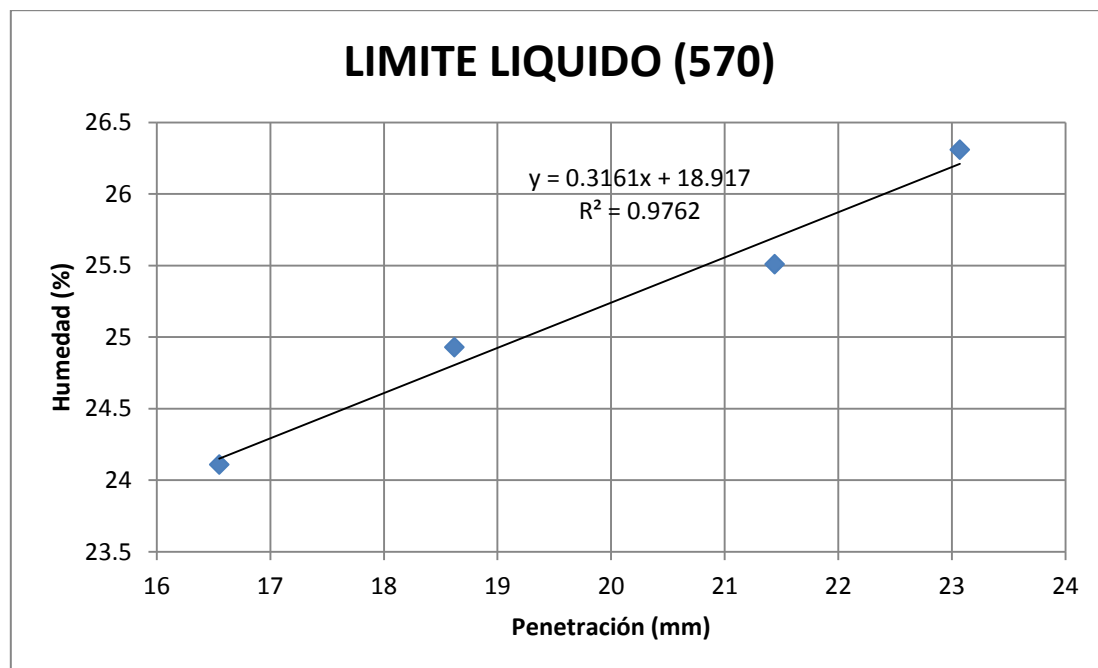
21- MUESTRA: 2138						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	23.89	24.16		22.21	21.94	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.03</b>			<b>22.08</b>		
Recipiente n°	5B-5B			8A-8A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.04			28.60		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	52.98			41.86		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	48.47			37.97		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>43.24</b>			<b>41.52</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.92	19.24		15.50	15.79	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>19.08</b>			<b>15.65</b>		
Recipiente n°	6B-0B			2B-4B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	26.11			40.48		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	37.34			53.22		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	34.12			49.76		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>40.20</b>			<b>37.28</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 40.4 %**



22- MUESTRA: 570						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	22.95	23.19		21.34	21.53	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>23.07</b>			<b>21.44</b>		
Recipiente n°	6A-6A			8B-6B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.58			30.40		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	43.75			40.88		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	40.59			38.75		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.31</b>			<b>25.51</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.48	18.75		16.34	16.75	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.62</b>			<b>16.55</b>		
Recipiente n°	7A-7A			4B-2B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.81			38.68		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	41.64			55.72		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	39.08			52.41		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.93</b>			<b>24.11</b>		

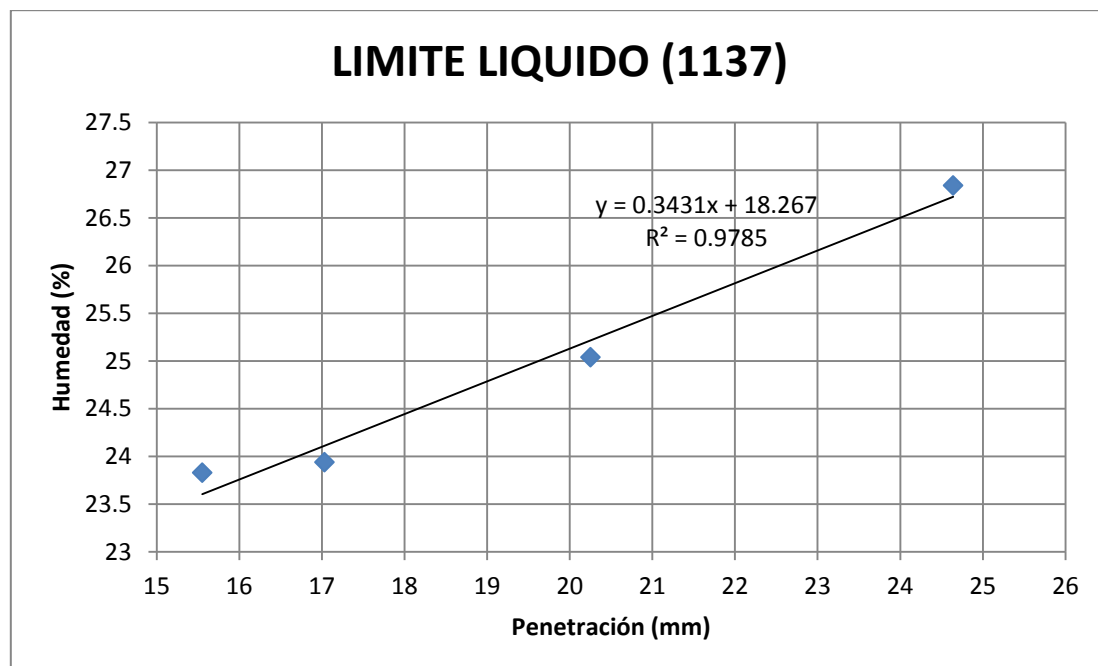


**LÍMITE LÍQUIDO = 25.2 %**





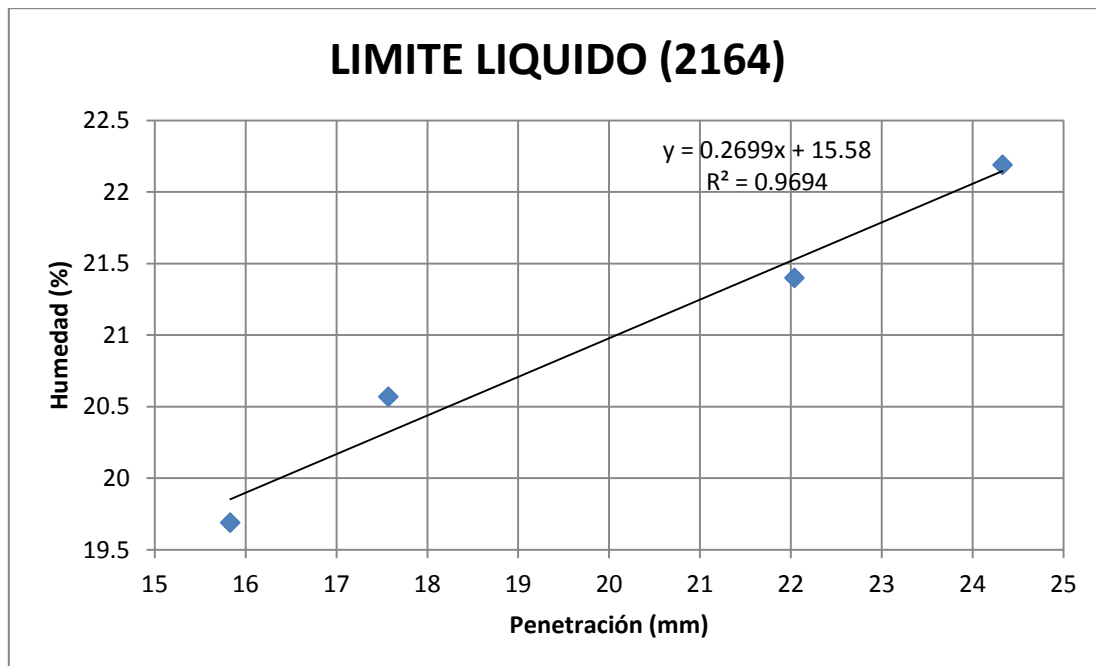
23- MUESTRA: 1137						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.36	15.73		16.89	17.16	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.55</b>			<b>17.03</b>		
Recipiente n°	0B-8B			3B-4A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.25			40.61		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	43.32			59.61		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	40.42			55.94		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>23.83</b>			<b>23.94</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	20.16	20.34		24.53	24.75	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>20.25</b>			<b>24.64</b>		
Recipiente n°	5A-5A			SN-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	42.02			28.27		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	56.75			44.95		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	53.80			41.42		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>25.04</b>			<b>26.84</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 25.1 %**



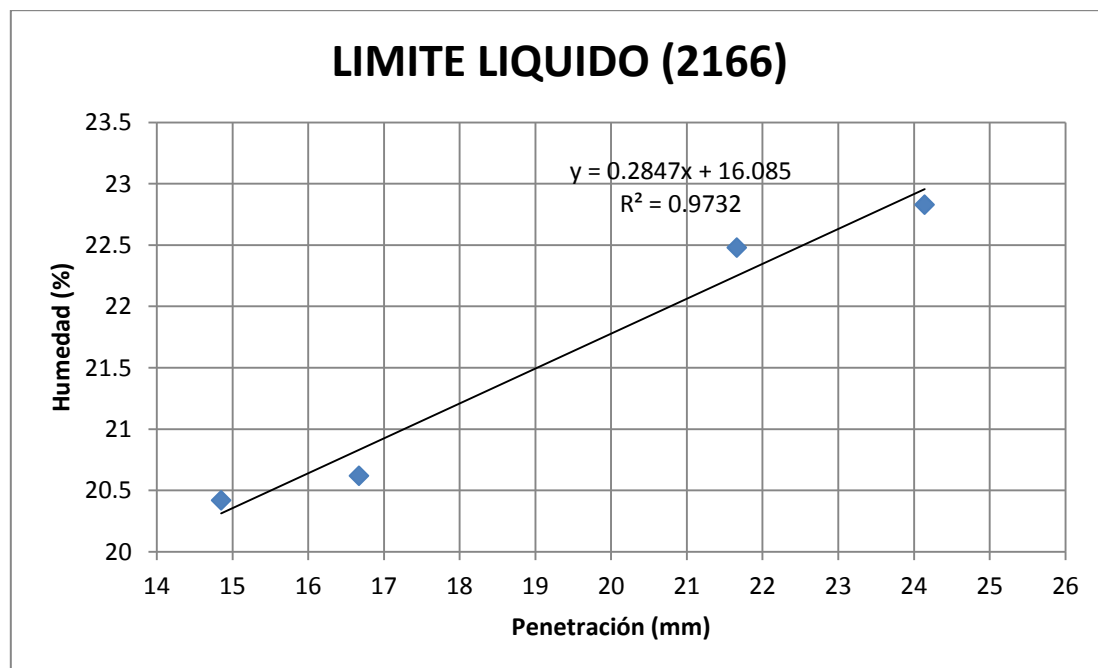
24- MUESTRA: 2164/2016						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.69	15.96		17.44	17.70	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.83</b>			<b>17.57</b>		
Recipiente n°	5A-5A			4B-2B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	41.99			38.65		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	57.37			51.43		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	54.84			49.25		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>19.69</b>			<b>20.57</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.88	22.19		24.21	24.45	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.04</b>			<b>24.33</b>		
Recipiente n°	7A-7A			0B-8B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.80			28.23		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	47.75			44.53		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	44.41			41.57		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>21.40</b>			<b>22.19</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 21.0 %**



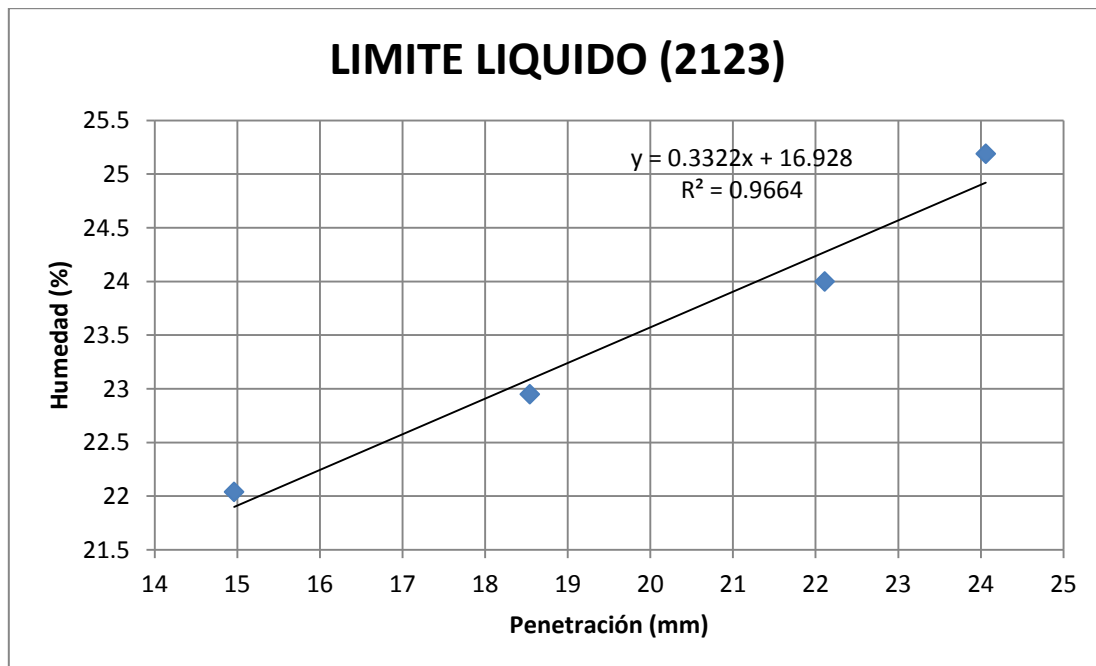
25- MUESTRA: 2166						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.01	14.69		16.53	16.81	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>14.85</b>			<b>16.67</b>		
Recipiente n°	4B-2B			1B-1B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.66			39.06		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	50.22			55.91		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	48.26			53.03		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>20.42</b>			<b>20.62</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.52	21.79		23.96	24.31	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>21.66</b>			<b>24.14</b>		
Recipiente n°	0B-8B			7A-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.23			28.80		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	44.14			47.31		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	41.22			43.87		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>22.48</b>			<b>22.83</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 21.8 %**



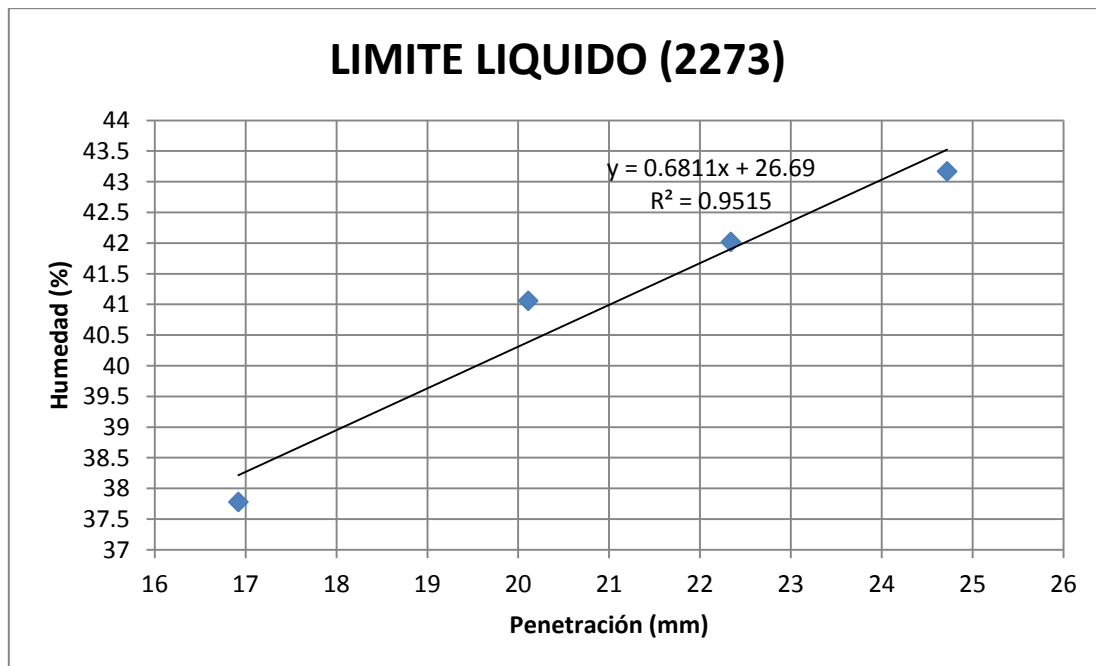
26- MUESTRA: 2123						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.07	14.85		18.34	18.73	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>14.96</b>			<b>18.54</b>		
Recipiente n°	5A-5A			8B-6B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	42.00			30.47		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	56.34			43.54		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	53.75			41.10		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>22.04</b>			<b>22.95</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.98	22.23		23.89	24.23	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.11</b>			<b>24.06</b>		
Recipiente n°	7B-7B			2A-3A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	29.31			37.26		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	46.15			57.19		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	42.89			53.18		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.00</b>			<b>25.19</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 23.6 %**



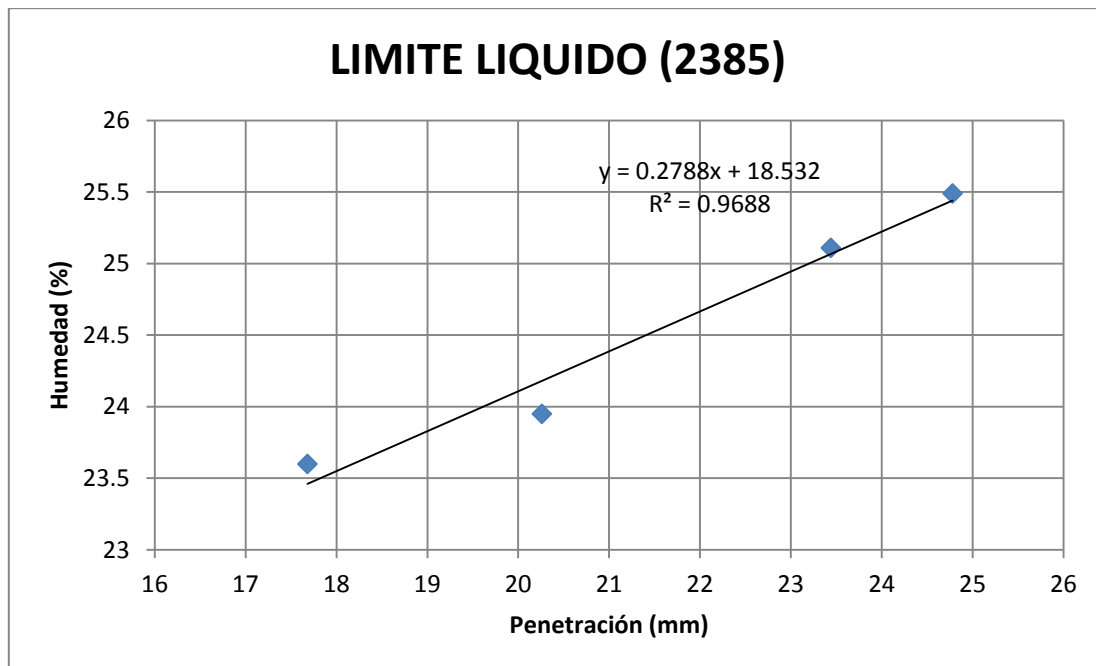
27- MUESTRA: 2273						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
	Lectura de penetración cono (mm)	16.78	17.06		19.98	20.23
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>16.92</b>			<b>20.11</b>		
Recipiente n°	2A-3A			8B-6B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	37.26			30.42		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	50.17			41.86		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	46.63			38.53		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>37.78</b>			<b>41.06</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
	Lectura de penetración cono (mm)	22.19	22.49		24.67	24.76
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.34</b>			<b>24.72</b>		
Recipiente n°	1B-1B			7B-7B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.08			29.31		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	56.52			42.51		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	51.36			38.53		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>42.02</b>			<b>43.17</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 40.3 %**



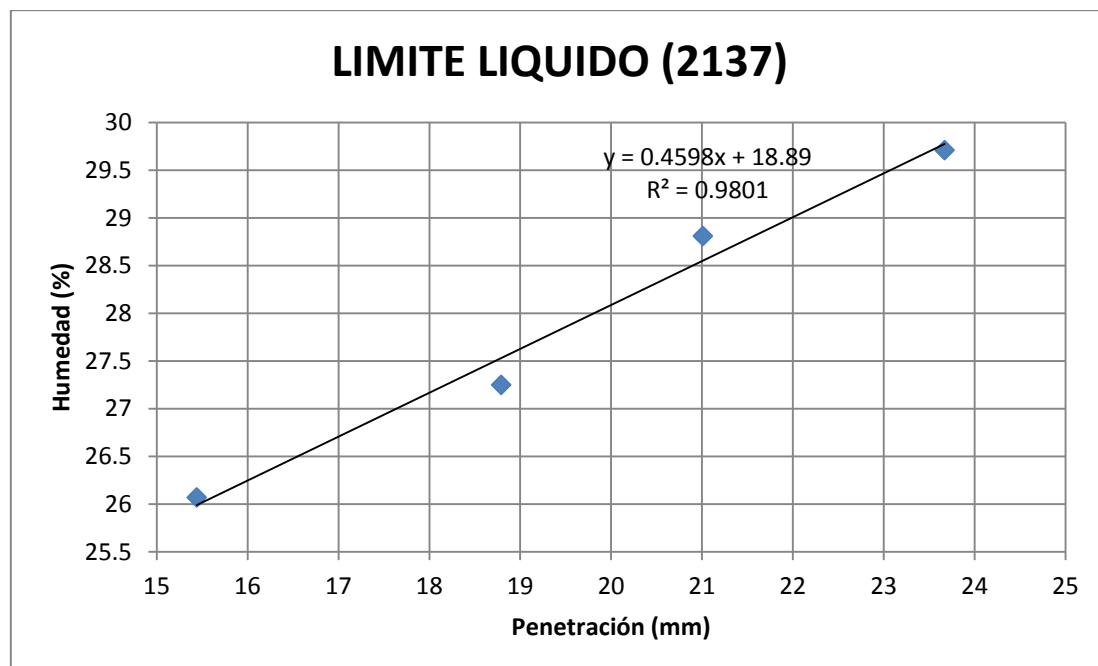
28- MUESTRA: 2385 Terreno natural. Capa subbase (Producción pie de obra)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	17.54	17.82		20.11	20.41	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>17.68</b>			<b>20.26</b>		
Recipiente n°	6A-2A			3B-4A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	37.88			40.60		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	54.38			58.30		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	51.23			54.88		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>23.60</b>			<b>23.95</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	23.31	23.57		24.70	24.86	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>23.44</b>			<b>24.78</b>		
Recipiente n°	6B-0B			SN-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	26.10			28.23		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	40.65			50.63		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	37.73			46.08		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>25.11</b>			<b>25.49</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 24.1 %**



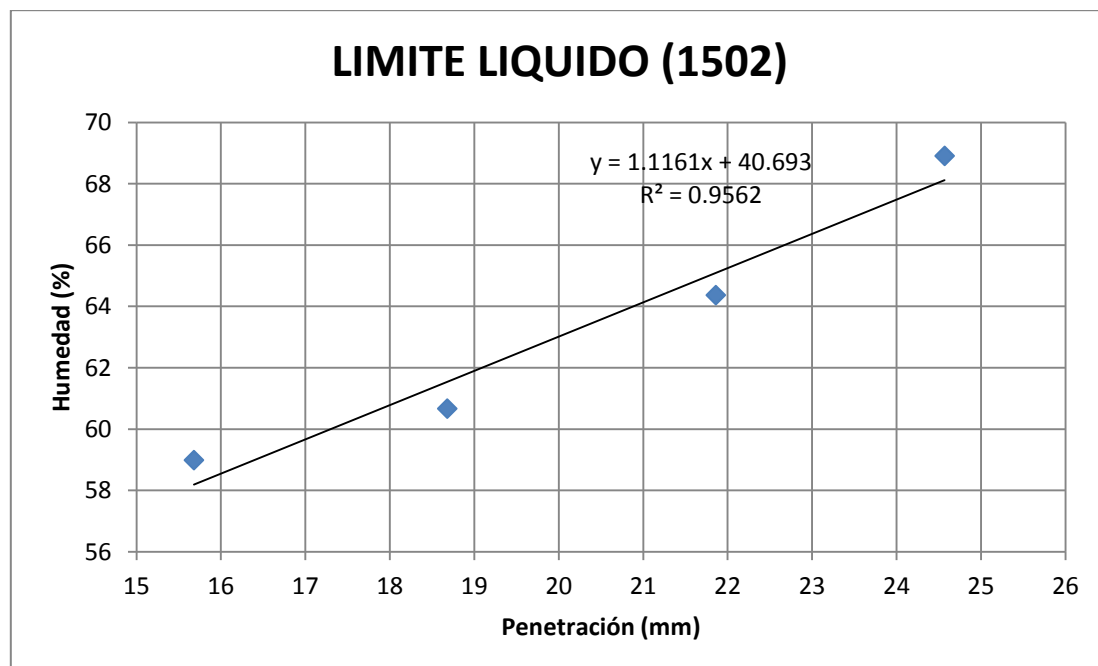
29- MUESTRA: 2137 Terreno natural (Recisur)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.29	15.58		18.60	18.98	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.44</b>			<b>18.79</b>		
Recipiente n°	1B-1B			2A-3A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.15			37.26		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	52.64			54.82		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	49.85			51.06		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.07</b>			<b>27.25</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	20.95	21.07		23.57	23.77	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>21.01</b>			<b>23.67</b>		
Recipiente n°	7A-7A			5A-5A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.85			42.40		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	49.24			60.17		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	44.68			56.10		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>28.81</b>			<b>29.71</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 28.1 %**



30- MUESTRA: 1502						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.51	15.85		18.56	18.79	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.68</b>			<b>18.68</b>		
Recipiente n°	4B-2B			8B-6B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.80			30.61		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	55.24			44.91		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	49.14			39.51		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>58.99</b>			<b>60.67</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.95	21.77		24.41	24.73	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>21.86</b>			<b>24.57</b>		
Recipiente n°	7B-7B			0B-8B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	29.36			28.26		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	43.66			43.58		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	38.06			37.33		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>64.37</b>			<b>68.91</b>		

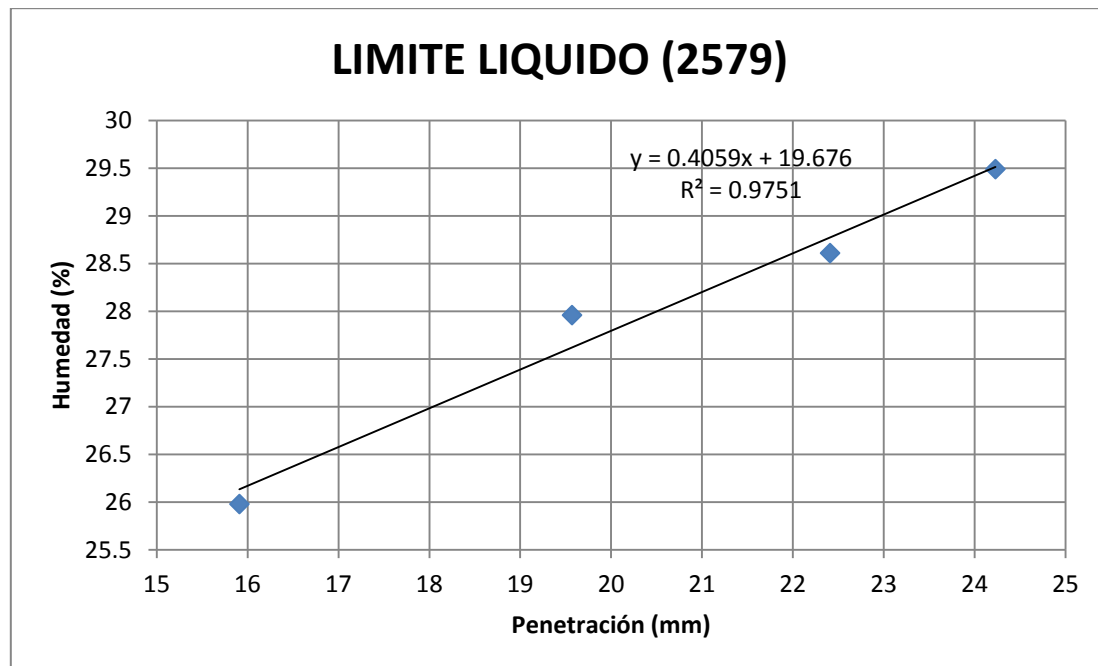


**LÍMITE LÍQUIDO = 63.0 %**





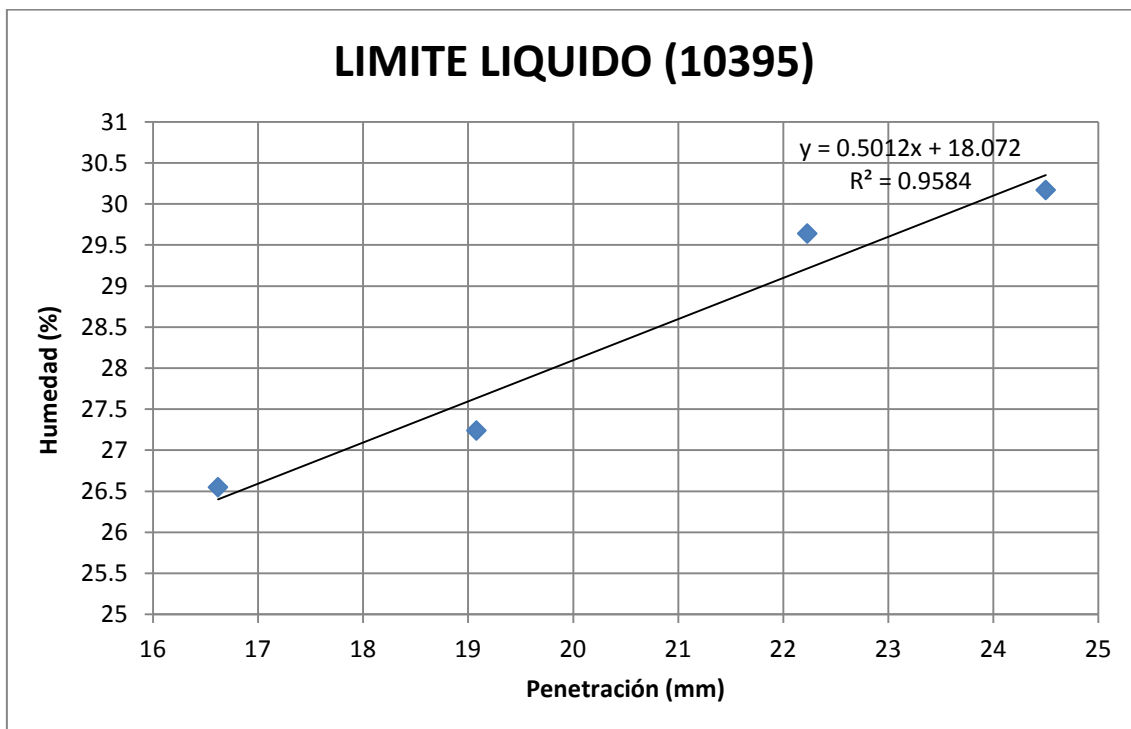
31- MUESTRA: 2579						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.80	16.02		19.38	19.76	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.91</b>			<b>19.57</b>		
Recipiente n°	4A-9B			6A-6A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.57			28.54		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	55.99			40.85		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	52.81			38.16		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>25.98</b>			<b>27.96</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.57	22.25		24.09	24.37	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.41</b>			<b>24.23</b>		
Recipiente n°	8A-8A			2B-4B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.58			40.47		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	42.47			61.59		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	39.38			56.78		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>28.61</b>			<b>29.49</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 27.8 %**



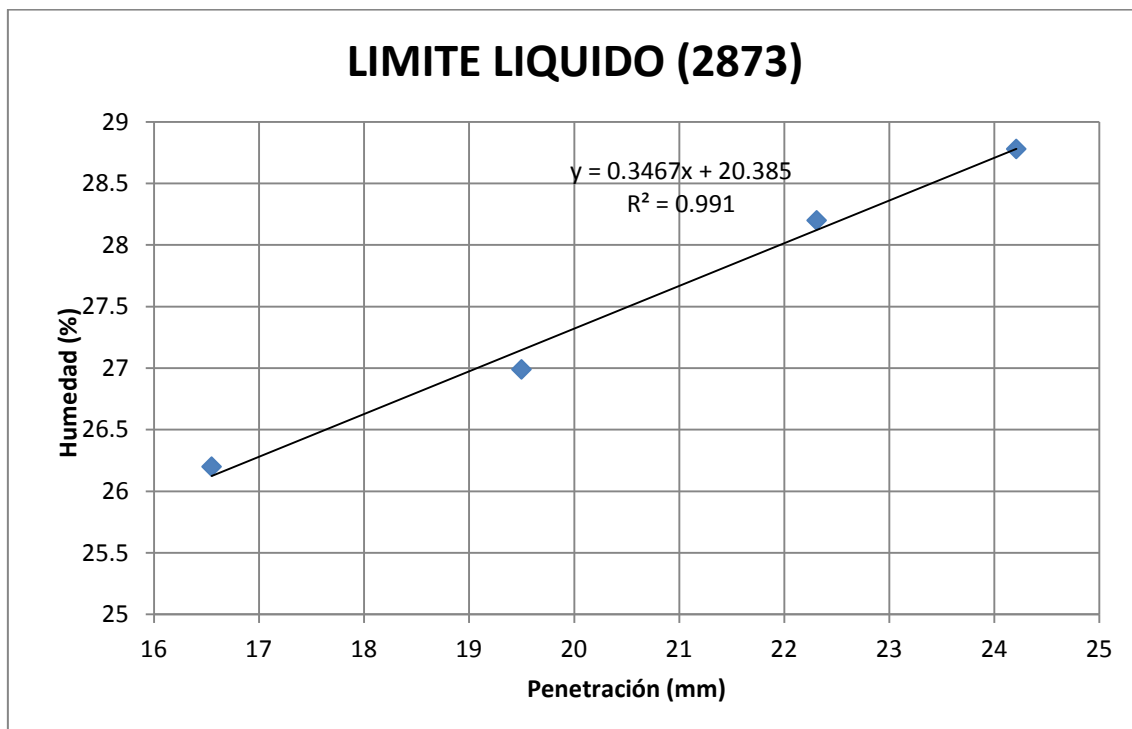
32- MUESTRA: 10395						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.46	16.78		19.15	19.01	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>16.62</b>			<b>19.08</b>		
Recipiente n°	0A-SN			6A-2A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	27.76			37.89		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	39.63			48.54		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	37.14			46.26		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.55</b>			<b>27.24</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.29	22.17		24.63	24.37	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.23</b>			<b>24.50</b>		
Recipiente n°	7A-7A			6A-6A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.80			28.55		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	41.57			41.02		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	38.65			38.13		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>29.64</b>			<b>30.17</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 28.1 %**



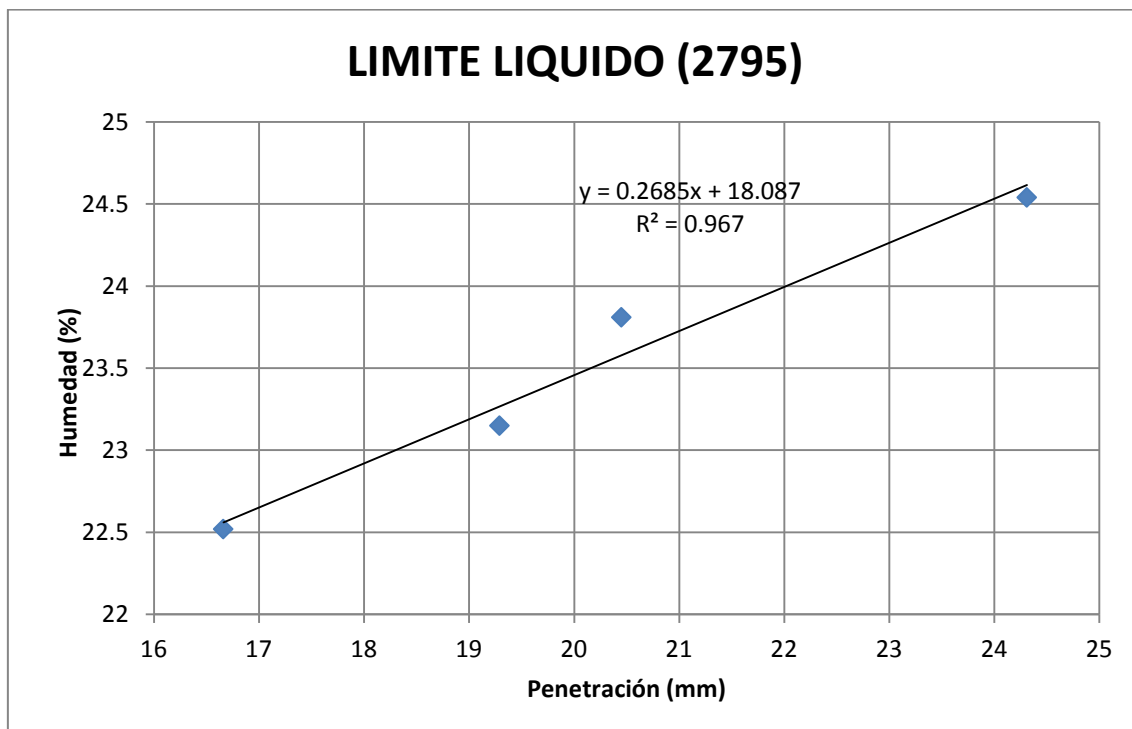
33- MUESTRA: 2873						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	16.33	16.76		19.31	19.69	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>16.55</b>			<b>19.50</b>		
Recipiente n°	8B-6B			2A-3A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	30.40			37.26		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	43.79			57.16		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	41.01			52.93		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.20</b>			<b>26.99</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	22.13	22.49		24.05	24.37	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>22.31</b>			<b>24.21</b>		
Recipiente n°	6A-6A			1B-1B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.55			39.07		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	44.69			58.40		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	41.14			54.08		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>28.20</b>			<b>28.78</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 27.3 %**



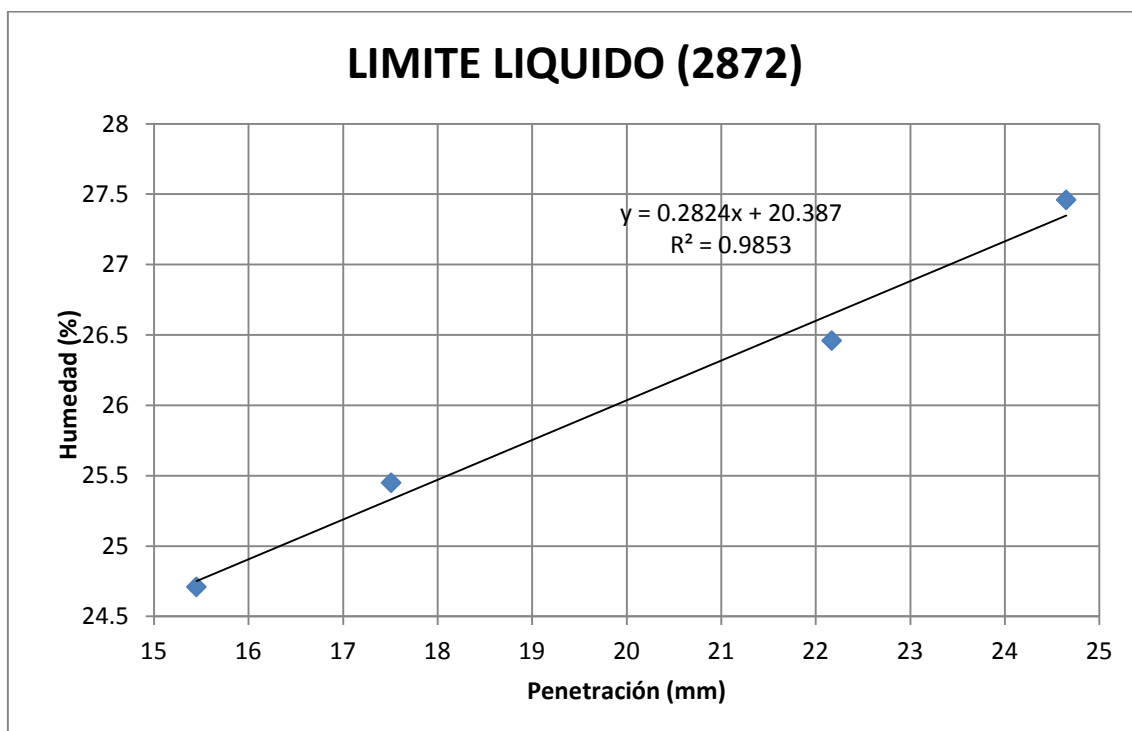
34- MUESTRA: 2795 Terreno vegetal (Zona ajardinada)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	24.15	24.47		20.30	20.60	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.31</b>			<b>20.45</b>		
Recipiente n°	7B-7B			8A-8A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	29.31			28.59		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	45.55			42.94		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	42.35			40.18		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>24.54</b>			<b>23.81</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	19.18	19.39		16.85	16.47	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>19.29</b>			<b>16.66</b>		
Recipiente n°	4B-2B			6B-0B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	38.65			26.10		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	58.49			39.59		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	54.76			37.11		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>23.15</b>			<b>22.52</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 23.5 %**



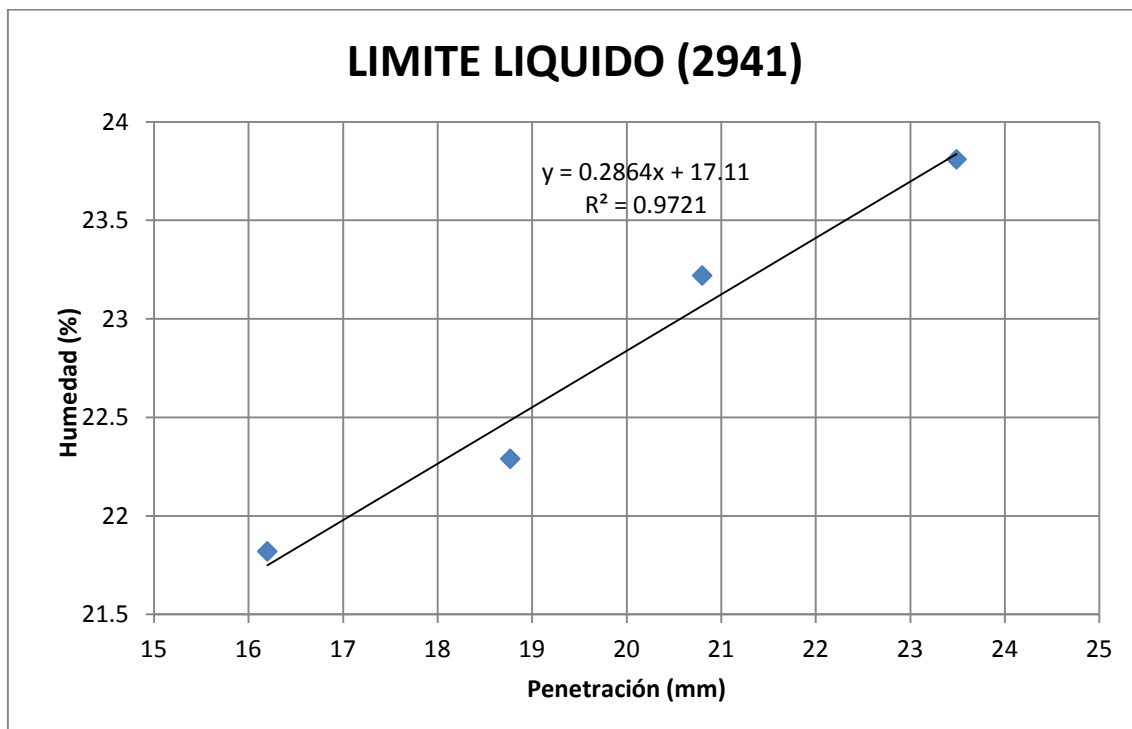
35- MUESTRA: 2872 Terreno natural (Cantera para rellenar)						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	24.52	24.78		22.05	22.29	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.65</b>			<b>22.17</b>		
Recipiente n°	SN-7A			5A-5A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.25			42.00		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	42.87			58.44		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	39.72			55.00		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>27.46</b>			<b>26.46</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	17.40	17.62		15.26	15.63	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>17.51</b>			<b>15.45</b>		
Recipiente n°	0B-8B			2B-4B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.22			40.48		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	45.82			61.02		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	42.25			56.95		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>25.45</b>			<b>24.71</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 26.0 %**



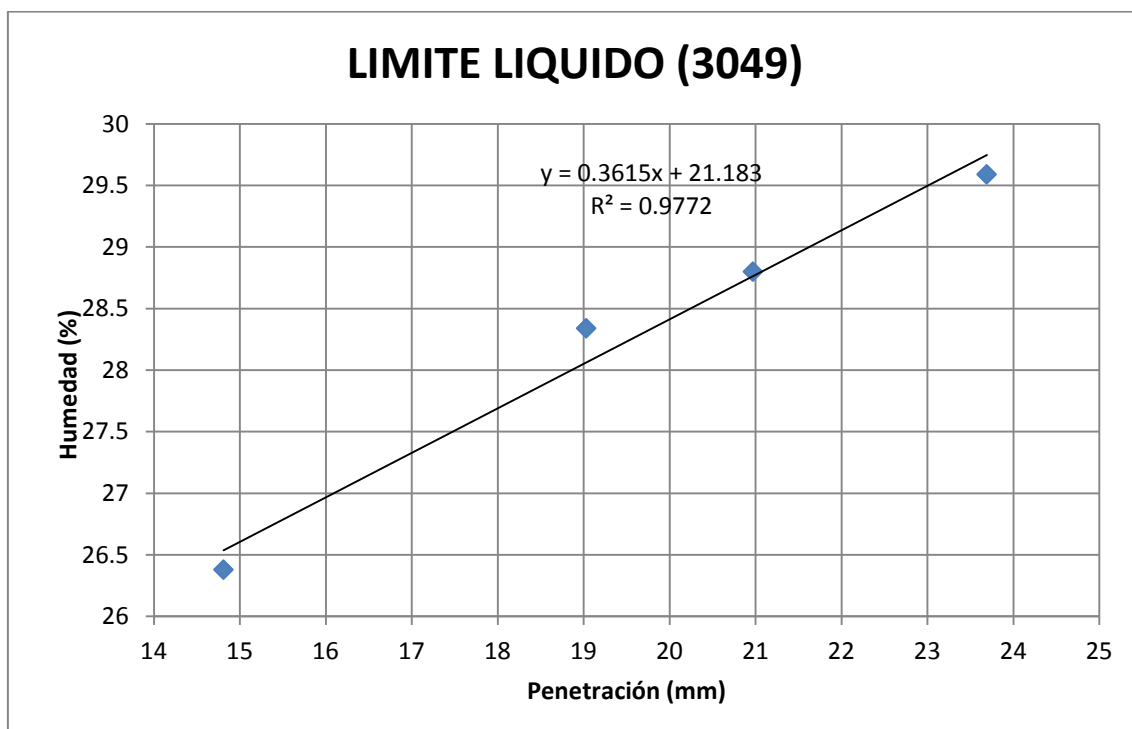
36- MUESTRA: 2941						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	23.34	23.64		20.63	20.97	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>23.49</b>			<b>20.80</b>		
Recipiente n°	2B-4B			SN-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.49			28.25		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	56.92			43.16		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	53.76			40.35		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>23.81</b>			<b>23.22</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.63	18.91		16.28	16.12	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.77</b>			<b>16.20</b>		
Recipiente n°	3B-4A			8B-6B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.59			30.38		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	60.12			44.95		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	56.56			42.34		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>22.29</b>			<b>21.82</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 22.8 %**



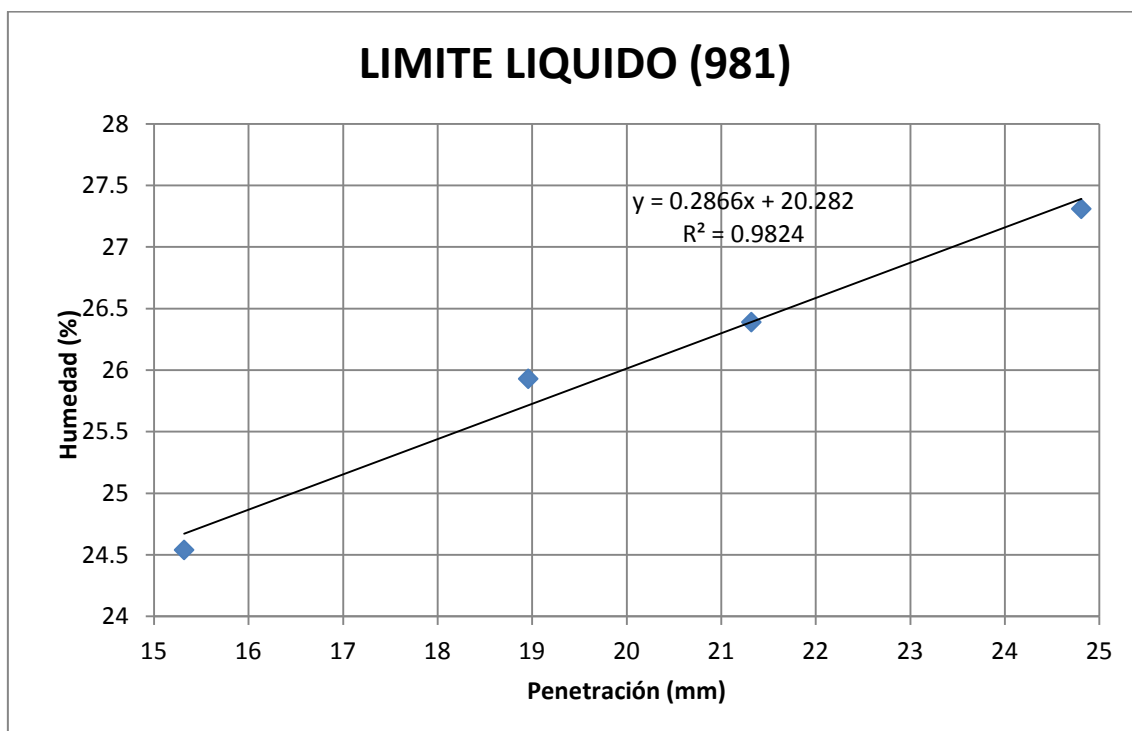
37- MUESTRA: 3049						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	14.62	15.00		18.91	19.14	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>14.81</b>			<b>19.03</b>		
Recipiente n°	4A-9B			4B-2B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.57			38.68		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	52.50			53.85		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	50.01			50.50		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.38</b>			<b>28.34</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	20.80	21.13		23.57	23.81	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>20.97</b>			<b>23.69</b>		
Recipiente n°	7B-7B			0A-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	29.33			27.76		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	42.43			44.97		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	39.50			41.04		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>28.81</b>			<b>29.59</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 28.4 %**



38- MUESTRA: 981						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	25.04	24.58		21.46	21.18	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.81</b>			<b>21.32</b>		
Recipiente n°	1B-1B			4A-4B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.06			39.48		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	78.36			75.74		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	69.93			68.17		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>27.31</b>			<b>26.39</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	19.06	18.86		15.20	15.44	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.96</b>			<b>15.32</b>		
Recipiente n°	2B-9B			SN-SN		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	41.59			28.34		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	78.69			60.01		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	71.05			53.77		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>25.93</b>			<b>24.54</b>		

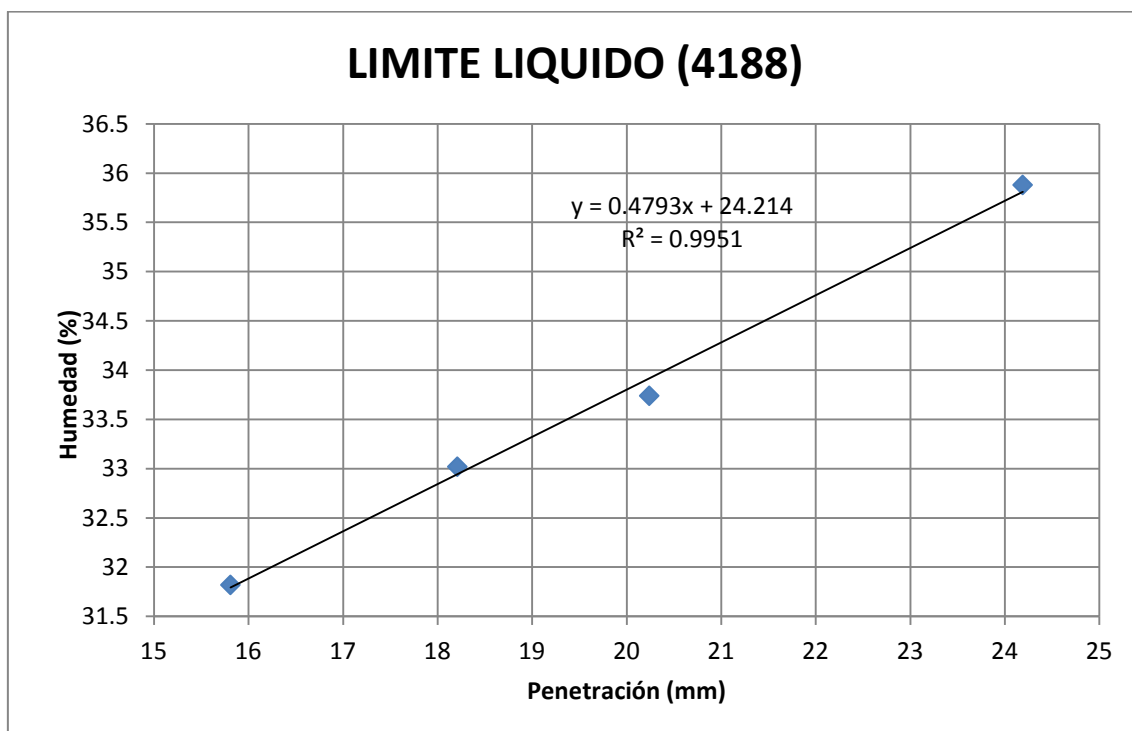


**LÍMITE LÍQUIDO = 26.0 %**





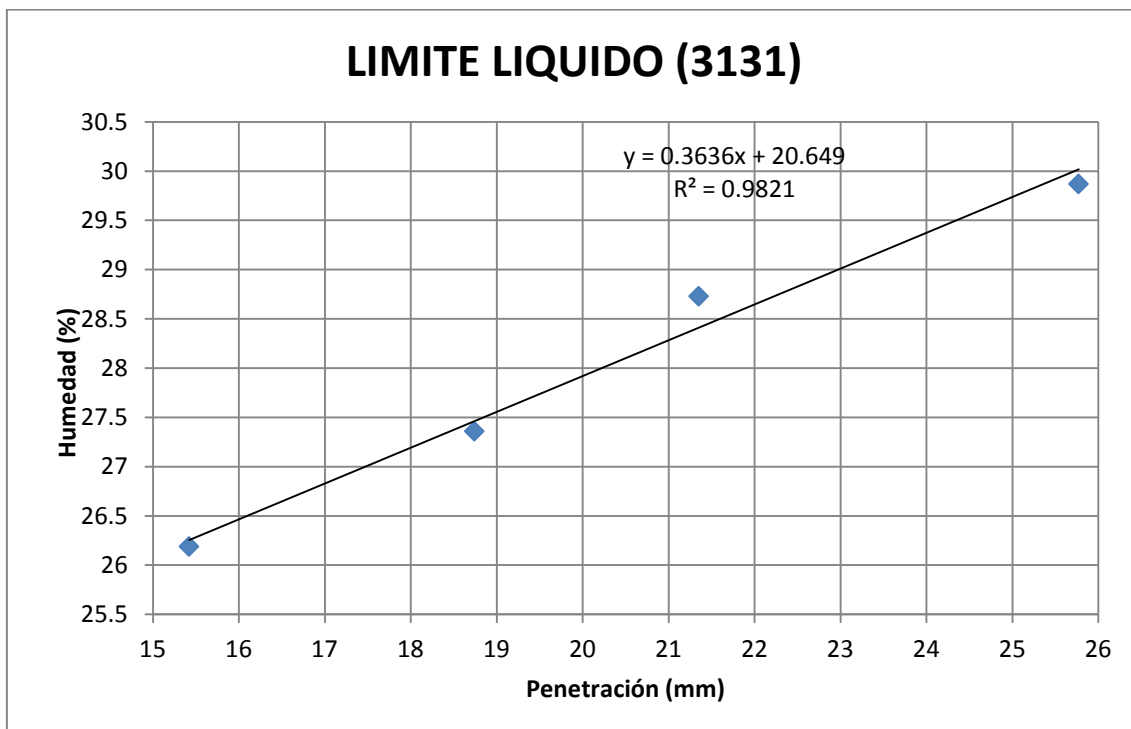
39- MUESTRA: 4188						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	23.97	24.41		20.09	20.38	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>24.19</b>			<b>20.24</b>		
Recipiente n°	1A-3B			6A-2A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.48			37.88		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	54.93			52.03		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	50.85			48.46		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>35.88</b>			<b>33.74</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	18.02	18.40		15.75	15.87	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>18.21</b>			<b>15.81</b>		
Recipiente n°	4A-9B			3B-4A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	40.56			40.59		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	57.44			59.19		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	53.25			54.70		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>33.02</b>			<b>31.82</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 33.8 %**



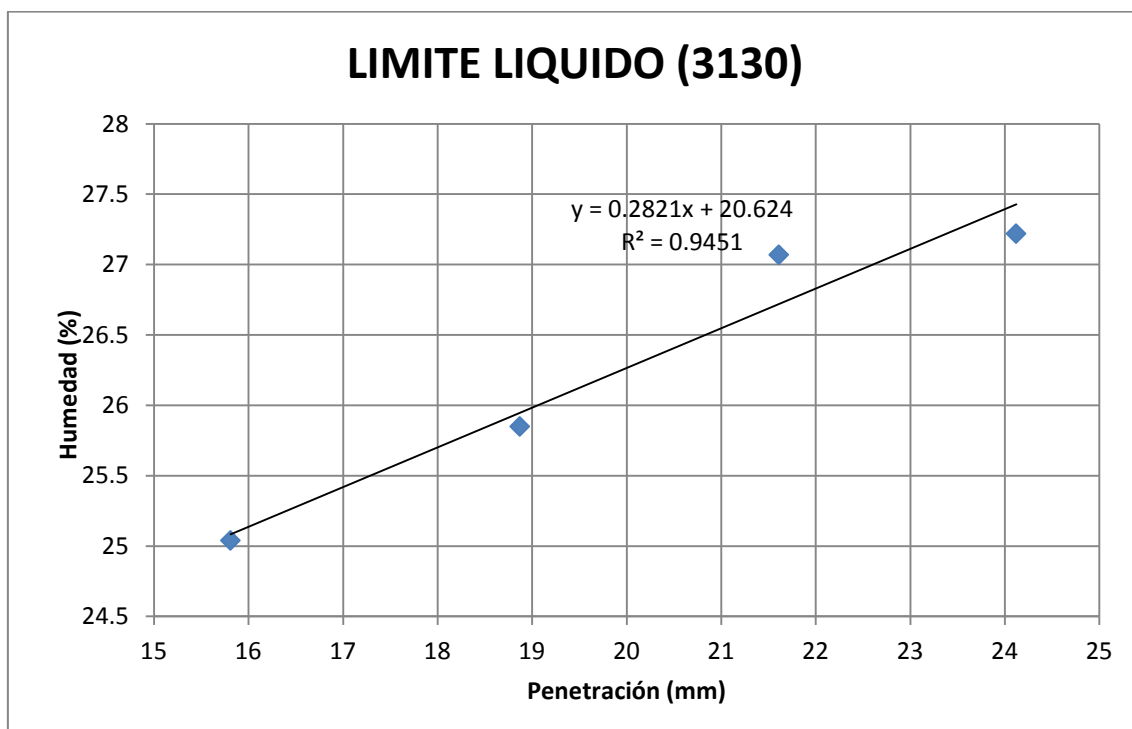
40- MUESTRA: 3131						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.27	15.56		18.52	18.95	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.42</b>			<b>18.74</b>		
Recipiente n°	5A-5A			0B-8B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	42.00			28.24		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	61.61			44.16		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	57.54			40.74		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>26.19</b>			<b>27.36</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.20	21.49		25.58	25.96	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>21.35</b>			<b>25.77</b>		
Recipiente n°	1B-1B			7A-7A		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	39.06			28.80		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	57.34			47.67		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	53.26			43.33		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>28.73</b>			<b>29.87</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 27.9 %**



41- MUESTRA: 3130						
	PUNTO 1			PUNTO 2		
Lectura de penetración cono (mm)	15.64	15.98		18.71	19.03	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>15.81</b>			<b>18.87</b>		
Recipiente n°	2A-3A			6B-0B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	37.26			26.11		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	53.99			42.42		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	50.64			39.07		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>25.04</b>			<b>25.85</b>		
	PUNTO 3			PUNTO 4		
Lectura de penetración cono (mm)	21.48	21.74		24.04	24.20	
<b>Penetración media (mm)</b>	<b>21.61</b>			<b>24.12</b>		
Recipiente n°	8A-8A			1A-3B		
M <sub>1</sub> = Peso del recipiente (g)	28.59			39.48		
M <sub>2</sub> = Peso del recipiente + suelo húmedo (g)	45.96			59.11		
M <sub>3</sub> = Peso del recipiente + suelo seco (g)	42.26			54.91		
<b>Humedad= w(%) = ((M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>)/( M<sub>3</sub>-M<sub>1</sub>))*100</b>	<b>27.07</b>			<b>27.22</b>		



**LÍMITE LÍQUIDO = 26.3 %**