



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**“FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL”**

TESIS

**“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES  
ÍNDICE DE MEZCLAS DE SUELOS FINOS UTILIZANDO  
DIFERENTES MÉTODOS, CASOS DIATOMITA- CAOLÍN Y  
DIATOMITA- BENTONITA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA  
**ALONDRA MARTÍNEZ ROJAS**

ASESOR  
**DR. EN GEOLOGÍA APLICADA  
JOSÉ ELEAZAR ARREYGUE ROCHA**



**MORELIA MICHOACÁN DE OCAMPO,  
MAYO 2018**

*“Los científicos descubren aquello que es, los ingenieros  
crean aquello que nunca fue”*

Theodore Von Karman.

**A MIS PADRES**

*Freder y Olimpia*

*Por darme la oportunidad de tomar este  
camino.*

**A MIS HERMANOS**

*Fernando, Freder, Amara y Amir*

*Por todo su apoyo y compartir uno de los  
momentos más importantes.*

# ÍNDICE

RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 OBJETIVOS .....	11
1.1.1 Objetivo general.....	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
2. ANTECEDENTES .....	12
2.1 FORMACIÓN DE SUELOS.....	12
2.1.1 Suelos arcillosos.....	14
2.2 GENERALIDADES DE LA DIATOMITA, BENTONITA Y CAOLÍN.....	18
2.2.1 Diatomita .....	18
2.2.2 Bentonita .....	25
2.2.3 Caolín .....	27
2.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA .....	29
2.3.1 Límite líquido .....	29
2.3.2 Límite plástico.....	37
2.3.3 Límites de contracción.....	40
2.4 CONTENIDO DE AGUA.....	41
2.4.1 Estudios del secado de suelos con el Horno de Microondas.....	41
3. METODOLOGÍA .....	44
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO .....	44
3.1.1 Determinación del contenido de agua .....	46
3.2 OBTENCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.....	47
3.2.1 Método de la Copa de Casagrande .....	47
3.2.2 Método del Cono de penetración.....	48
3.3 OBTENCIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.....	49
3.3.1 Método convencional de rolado .....	49

3.3.2	Método de doble peso .....	49
3.4	OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE CONTRACCIÓN .....	50
3.4.1	Contracción lineal .....	50
3.4.2	Contracción volumétrica .....	51
3.5	CLASIFICACIÓN SUCS.....	52
3.6	CLASIFICACIÓN INGLESA .....	53
4.	RESULTADOS.....	54
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO .....	55
4.1.1	Muestreo, selección y preparación de la muestra.....	55
4.2	OBTENCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.....	59
4.2.1	Límite líquido con la copa de Casagrande.....	59
4.2.2	Límite líquido con los conos de penetración .....	62
4.2.3	Suelos ensayados para el Límite líquido .....	65
4.2.4	Resultados del límite líquido.....	66
4.3	OBTENCIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.....	74
4.3.1	Límite plástico con el método convencional de rolado.....	74
4.3.2	Límite plástico con el cono Inglés.....	76
4.3.3	Suelos ensayados para el límite plástico.....	77
4.3.4	Resultados del límite plástico .....	78
4.4	OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE CONTRACCIÓN .....	83
4.4.1	Límite de contracción lineal .....	83
4.4.2	Límite de Contracción Volumétrica.....	85
4.4.3	Suelos ensayados para los Límites de Contracción .....	88
4.4.4	Resultados de los Límites de Contracción.....	89
4.5	CLASIFICACION SUCS.....	90
4.6	CLASIFICACIÓN INGLESA .....	95
5.	CONCLUSIONES .....	97
5.1	RECOMENDACIONES .....	98
	BIBLIOGRAFIA .....	99
	ANEXOS .....	104

## RESUMEN

El origen y composición de los suelos es fundamental para determinar su comportamiento mecánico, en México existe un gran número de suelos arcillosos, su participación en la ingeniería civil es sumamente relevante, ya que por su comportamiento son considerados como uno de los suelos más difíciles de analizar.

El contenido de agua  $W$  (%), es el parámetro comúnmente usado para estimar el tipo de estructura de un suelo, debido a que es relacionado con la distancia entre partículas. Los principales parámetros para representar el estado estructural de suelos son los límites de consistencia, el límite líquido  $LL$  (%), y el límite plástico  $PL$  (%).

En los últimos años se han desarrollado métodos alternativos para determinar los límites de consistencia. Con la utilización de éstos, se busca eliminar incertidumbres y subjetividades.

Los materiales seleccionados para realizar esta investigación fueron la diatomita, la bentonita y el caolín, así como algunas propuestas de mezclas. La diatomita o tierra diatomácea es una roca porosa silícica, compuesta por esqueletos fosilizados y finos gránulos de sílice, formado por diatomeas. El interés de la ingeniería en las diatomeas radica en que son ejemplos sobresalientes de materiales micro y nanoestructurados que afectan las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los suelos. La bentonita es arcilla del grupo montmorilonítico, originada por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansión típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico. El caolín es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente, su resistencia en estado seco es relativamente baja.

Se aplicaron dos métodos para la obtención del  $LL$  (%), en el primer caso se utilizó la copa de Casagrande y en el segundo los conos de penetración, de este último se

empleó el cono Sueco (60° y 60 g) y el cono Inglés (30° y 80 g). Para la obtención del PL (%), se utilizó el método convencional de rolado y únicamente el cono de penetración inglés; donde se hizo una modificación a su peso (30° y 240 g). El secado fue a través de un horno de convección y un horno de microondas

De manera general los resultados obtenidos con la copa de Casagrande arrojaron valores superiores a los determinados con el cono sueco; observando que la diferencia aumentaba conforme los valores del LL (%) fueran incrementando. Se puede afirmar que la obtención del LL (%) y PL (%), utilizando los conos de penetración y secado en HMO es viable, y su valor es correlacionable con los métodos convencionales.

**Palabras clave:** Diatomita, Bentonita, Caolín, cono Sueco, cono Inglés, Límite líquido, límite plástico.

## ABSTRACT

The origin and composition of the soil is essential to establish its mechanic behavior , in Mexico exist a great number of clay soils, its participation in the civil engineering is extremely important, now that its behavior are considered as one of the harder soils to analyze.

The water contain  $W$  (%), is the commonly used parameter to estimate the type of soil structure, on account that is related with the distance between particles. The principal parameters to represent the structural phase of soils are the consistency's limits, the liquid limit  $LL$  (%) and the plastic limit  $PL$  (%).

In the last years have been developed alternative methods to establish the consistency's limits. Whit the using of this, it looking erase uncertainties and subjectivities.

The selected materials to make this investigation were the diatomite, bentonite and kaolin, just like some mix proposal. Make up the diatomite or diatoms land is a silica porous rock, composed by fossilized skeletons and thin silica grains, of diatomite. The interest of the engineering in the diatomite consist in that are protruding examples of micro and nanostructured material that affects the physic, mechanic and hydraulic properties of soils. The bentonite is from the group of montmorilonitico clay, proceed by the chemical breaking down of the volcanic remains and present the typical growth of the group in a clever shape, that it makes extremely critiques in its mechanic behavior. The kaolin is aluminum silicate hydrated, principally the result of the feldspar rocks breaking down, it resistance in a dry condition is relatively low.

They applied two methods to get de  $LL$  (%), in the first case it use the Casagrande cup and in the second the English cone ( $30^\circ$  y  $80g$ ). to the obtaining of the  $PL$  (%), it use the conventional method of rolled and only the penetration English cone; where it did a

modification to its weigh (30° y 240g). The dry was through a convection oven and a microwave.

In a general way the results obtained whit the Casagrande cup generate values superiors to the determinate with the swede cone; analyzing that the difference grow as the LL values (%) were incremented . Is possible confirm that the obtaining of the LL (%) and PL (%), using the penetration cones and HMO dry is viable, and its value is correlated with the conventional methods.

Key words: diatomite, bentonite, kaolin, swede cone, English cone, liquid limit, plastic limit.

# 1. INTRODUCCIÓN

En la ingeniería civil, el estudio del terreno es una fase crítica y de gran importancia; la calidad del suelo se controla siguiendo parámetros de clasificación, uno de ellos son los límites de consistencia, los cuales son poco estudiados, a pesar de su gran utilidad en la determinación de las características físicas de los suelos. Se han planteado diferentes metodologías alternativas a las tradicionales, con la finalidad de facilitar el trabajo de laboratoristas y, tener mayor garantía en los resultados obtenidos. Esta investigación se encuentra orientada hacia esas metodologías, así como el estudio de algunos suelos en particular.

La organización de la presente tesis consta de cinco capítulos, incluyendo el de introducción; el *Capítulo 2* se encuentra orientado a la descripción de conceptos, antecedentes y características generales de los suelos blandos, en particular de la diatomita, bentonita y caolín; se presenta un apartado referente a estudios internacionales y nacionales más representativos sobre la caracterización geotécnica de los suelos diatomáceos así como algunas de las interpretaciones acerca de la influencia de este material en las propiedades del suelo.

Adicionalmente se incluye el fundamento y antecedente de los conos de penetración para la determinación de los límites de consistencia como una técnica alternativa, y el secado en horno de microondas, desplegando una serie de investigaciones internacionales y nacionales sobre ellos.

En el *Capítulo 3* se describe el equipo y metodología para determinar las propiedades índice de suelos blandos mediante la copa de Casagrande y el método convencional de rolado, así como los conos de penetración; además de incluir la clasificación SUCS y la carta de plasticidad inglesa.

Los resultados y análisis de los mismos se muestran en el *Capítulo 4*, descritos en dos partes. La primera consiste en la comparación entre la copa de Casagrande y los conos

sueco e inglés, donde se determina el límite líquido, entre el método convencional de rolado y el método de doble peso para la obtención del límite plástico, en ambos casos utilizando un horno de convección y un horno de microondas; dichas comparaciones realizadas por medio de correlaciones lineales.

La segunda parte presenta la caracterización de las propiedades índice de la diatomita, bentonita, caolín, y de las propuestas de mezclas entre ellos, determinando la clasificación de cada tipo de suelo, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) y de la clasificación establecida por la norma Inglesa.

En el *Capítulo 5* se presentan las conclusiones de la investigación, e interpretación del comportamiento de la mezclas, generada a partir de los resultados experimentales y análisis estadístico. Finalmente se incluyen algunas recomendaciones.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo general**

Determinar las propiedades índice de mezclas de diatomita, bentonita y caolín, empleando los métodos tradicionales y los conos de penetración.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Obtener muestras representativas de diatomita, bentonita y caolín.
- Elaborar propuestas de mezclas de diatomita, bentonita y caolín en diferentes proporciones.
- Realizar la caracterización para determinar las propiedades índice de mezclas de diatomita, bentonita y caolín, empleando los métodos tradicionales y los conos de penetración.
- Implementar el secado en horno de microondas.
- Establecer una correlación de resultados entre los métodos convencionales y los conos de penetración, secado en horno de convección y secado en horno de microondas.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 FORMACIÓN DE SUELOS

Los materiales que constituyen la corteza terrestre se especifican en dos categorías: *suelo* y *roca*. Se llama suelo a todo agregado natural de partículas minerales separables por medios mecánicos de poca intensidad, por el contrario, roca es un agregado de minerales unidos por fuerzas cohesivas poderosas y permanentes; los suelos se dividen en dos amplios grupos: suelos cuyo origen se debe esencialmente al resultado de la descomposición física y química de las rocas, y suelos cuyo origen es esencialmente orgánico (Terzaghi 1973).

Los suelos formados por los productos en su lugar de origen son llamados *suelos residuales*, una característica importante del suelo residual es la gradación del tamaño de partícula, los suelos de grano fino se encuentran en la superficie y el tamaño del grano aumenta con la profundidad. Después de la meteorización el suelo formado puede permanecer en el lugar o ser transportado (*suelos transportados*) por agentes naturales como los glaciares, el agua y las corrientes de aire (Das 2015).

Los principales tipos de suelos son clasificados como: grava, arena, limo y arcilla, a las gravas y a las arenas se les llama *suelos de grano grueso*, a los limos y a las arcillas *suelos de grano fino* (Peck 2001).

**Gravas:** Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro, ocupan grandes extensiones y sus partículas varían desde la malla de 3" (75.0 mm) hasta malla No.10 (2.0 mm); su forma y mineralogía dependen de la historia de su formación, encontrándose variaciones desde elementos rodados a los poliédricos (Crespo 2000).

**Arenas:** Es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro. Su origen y existencia es análoga a la de las gravas, suelen encontrarse juntas en el mismo depósito (Crespo 2000).

**Limos:** Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en las canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo este último caso de características plásticas. El diámetro de sus partículas está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm. Su color varía desde gris claro a muy oscuro, su permeabilidad es muy baja y su compresibilidad muy alta; son considerados como suelos pobres para cimentar (Crespo 2000).

**Arcillas:** Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005. Las arcillas se definen como aquellas partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua” (Grim 1953). Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque no en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados (Crespo 2000).

La Tabla 2.1 muestra los límites de separación de tamaño de suelo. En la actualidad el Sistema Unificado es casi universalmente aceptado y ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (Das 2015).

**Tabla 2.1.- Límites de separación de tamaño de suelo (Das 2015).**

NOMBRE DE LA ORGANIZACIÓN	TAMAÑO DE GRANO (MM)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	> 2	2 a 0.06	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075		< 0.075

### 2.1.1 Suelos arcillosos

En México existe un gran número de suelos arcillosos, su participación en la ingeniería civil es sumamente relevante, ya que por su comportamiento son considerados como uno de los suelos más difíciles de analizar.

La característica diferenciante de los suelos arcillosos es la cohesión o resistencia cohesiva, que aumenta al disminuir la humedad, la permeabilidad de la arcilla es muy baja, es difícil de compactar en estado húmedo e imposible de drenar por métodos ordinarios; compactada es resistente a la erosión, estando sometida a expansión y contracción con las variaciones de humedad (Lambe 2004). La propiedad más importante de los granos de los materiales de grano fino es su composición mineralógica (Peck 2001).

#### Minerales de arcilla

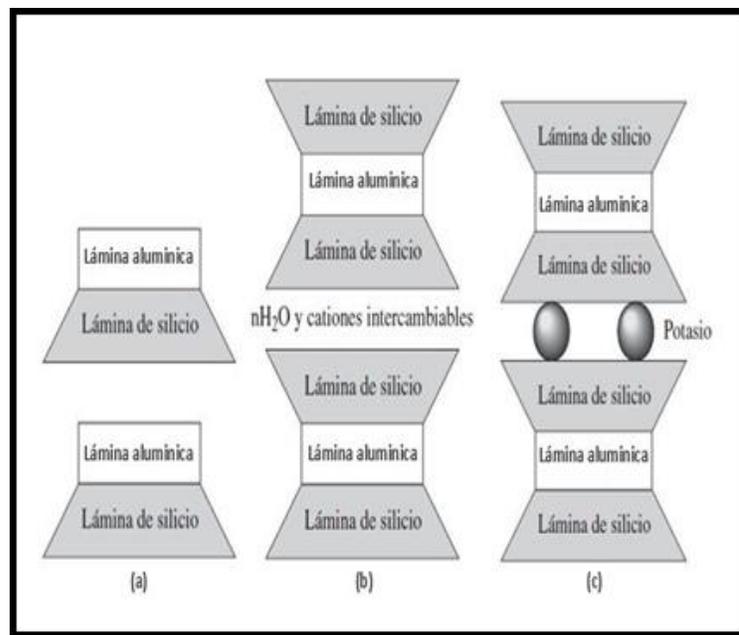
Los minerales son compuestos sólidos inorgánicos que tienen una composición química definida y un arreglo ordenado de los átomos, conocido como estructura cristalina, lo que le da propiedades físicas y químicas únicas (Tarbuck y Lutgens 2000). Los minerales constituyen la mayor parte de las partículas sólidas de un suelo, se clasifican de acuerdo a su composición química y estructura (grado de cristalización de sus partículas). La mayoría de los minerales de interés geotécnico están compuestos por silicio y oxígeno (silicatos); dos de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (Lambe 2004). La composición mineralógica y estructura en general de las arcillas interviene en su comportamiento mecánico, constituidas principalmente por silicatos de aluminio hidratados. De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcillas se encasillan en tres grandes grupos: caolinitas, montmorilonitas e ilitas (Juárez 1973).

Las *caolinitas* están formadas por una lámina silícica y otra aluminica superpuestas de manera indefinida (Fig. 2.1. a), con una unión tal entre sus retículas que no permiten la penetración de moléculas de agua entre ellas, produciendo una capa electrónicamente

neutra (Crespo 2000). En consecuencia, las arcillas caoliniticas serán relativamente estables en presencia de agua.

Las *montmorilonitas* están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente (Fig. 2.1. b), en este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente en una expansión (Juárez 1973), por lo que las arcillas montmoriloniticas en presencia de agua, tendrán fuerte tendencia a la inestabilidad.

Las *ilitas* consisten de una lámina alumínica unida a dos láminas de sílice, una en la parte superior y otra en la parte inferior, unidas entre sí por iones de potasio de manera indefinida (Fig. 2.1. c), presentando un arreglo reticular similar al de las montmorilonitas, pero con la tendencia a formar grumos (Das 2015), reduciendo de esta manera su expansión.



**Figura 2.1.-** Diagrama de estructuras de suelos a) caolinita, b) montmorilonita, c) illita. Modificado de Das (2015).

Una de las causas por las que los minerales de montmorilonita se expanden se debe a que los iones que sirven de enlace entre sus partículas atraen a otros iones (entre ellos el agua), que aunado a su alta capacidad de intercambio catiónico, provoca que el espacio entre sus partículas sea ocupado por moléculas de agua (hidratación). Este fenómeno provoca que la distancia basal de la estructura aumente, que los enlaces entre partículas sean débiles y, por consecuencia, que sea susceptible a la expansión, que su deformación sea alta y a la baja resistencia al corte (Sridharan 1999). Lo contrario ocurre con la caolinita, la cual presenta enlaces más fuertes con iones de hidrógeno, lo que no permite la hidratación.

En general, las partículas de mineral de arcilla son demasiadas pequeñas para visualizarlas a simple vista, de modo que la estructura y el arreglo geométrico de las partículas solamente se pueden ver con la ayuda de un microscopio electrónico. Las partículas de mineral de arcilla tienen cargas eléctricas en su superficie (cara y borde) que influyen en el arreglo de dichas partículas (Peck 2001).

La microestructura de los suelos arcillosos es muy compleja pero aparentemente se debe a factores como: la cantidad y tipo de mineral de arcilla presente, la proporción de limo y arena presente, su depósito y la naturaleza química del agua (pH). Diversos autores han observado distintas formas de la estructura elemental de las partículas de mineral de arcilla y las de un suelo arcilloso. El comportamiento de los suelos arcillosos (resistencia al corte, compresibilidad, consolidación, permeabilidad, expansión, sensibilidad, etc.) se comprenderá de una mejor manera si es tomada en consideración la microestructura del suelo arcilloso y su interacción con la fase líquida (Collins y McGown 1974).

El contenido de agua  $W$  (%), es el parámetro comúnmente usado para estimar el tipo de estructura de un suelo arcilloso, debido a que es relacionado con la distancia entre partículas, tomando en cuenta que el suelo está saturado. Los principales parámetros para representar el estado estructural de suelos arcillosos son el límite líquido  $LL$  (%), y el límite plástico  $PL$  (%).

## Propiedades físico- químicas

Cuando una partícula cristalina de arcilla queda rodeada de agua, los átomos de oxígeno del cristal quedan en la superficie de estos, como consecuencia de la constitución interna. Si el cristal es considerado como unidad, sería eléctricamente neutro, pero se conoce que la superficie de cada una de las partículas de suelo posee carga negativa, debido al desequilibrio causado por la sustitución isomorfa en las láminas de los minerales arcillosos y una ruptura en la continuidad de la estructura en los bordes. La atracción eléctrica del cristal disminuye rápidamente con la distancia, de manera que la concentración de cationes en la atmósfera del cristal también disminuye. La intensidad de la carga depende de la estructura y composición de la arcilla esto es de su superficie específica y de los iones atraídos. La partícula atrae a los iones positivos del agua y a cationes de diferentes elementos químicos, cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura por vínculos eléctricos muy fuertes. Esto se conoce como agua adsorbida (Sowers 1972).

Las moléculas de agua son polarizadas, funcionando como pequeños dipolos, al ligarse a la partícula por su carga positiva, el polo negativo queda libre dejando la posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes. Estos cationes pueden atraer otras moléculas de agua formando un cierto volumen de agua a su alrededor pero cuyos vínculos eléctricos son más débiles que los anteriores, formado junto al agua adsorbida de la arcilla y con su doble capa difusa. Estos cationes no están completamente entregados a los minerales arcillosos, razón por la cual pueden ser reemplazados por otros, siempre que el equilibrio total de las valencias se mantenga (Das 2015).

De acuerdo a Sowers (1972), las propiedades físico-químicas se derivan principalmente en:

- Tamaño de la partícula;
- Morfología laminar;

## 2.2 GENERALIDADES DE LA DIATOMITA, BENTONITA Y CAOLÍN

El origen y composición de los suelos es fundamental para determinar su comportamiento mecánico, es por ello la importancia de conocer sus características generales de cada suelo. En este apartado se muestra de manera sencilla las generalidades del caolín, bentonita y diatomita, puntualizando los yacimientos con mayor influencia en México (Fig. 2.2), así como sus principales aplicaciones.



*Figura 2.2.- Principales yacimientos, modificado de Secretaría de Economía (2016).*

### 2.2.1 Diatomita

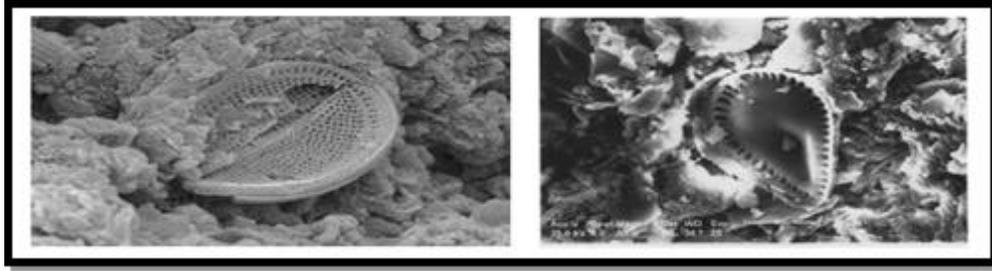
La diatomita o tierra diatomácea es una roca porosa silícica, compuesta por esqueletos fosilizados y finos gránulos de sílice amorfo (Kadey 1975), es un depósito blando, que se disgrega fácilmente, de color claro, formado por diatomeas. Las diatomeas son organismos unicelulares diminutos que viven tanto en el agua salada como en las aguas dulces y que tienen el poder de segregar material opalino (Klein 2003).

Cuando los organismos mueren sus pequeños caparazones se acumulan en el fondo formando un depósito de fósiles, llamada tierra de diatomeas (Klein 2003). Cabe mencionar que para la formación de depósitos de diatomita, es necesario que cumpla con cinco condiciones ambientales, estas se presentan a continuación (Kadey 1975):

1. Cuencas de baja profundidad; llevadas a cabo de dos maneras:
  - **Deposito lacustre:** Lagos de baja profundidad (menos de 35 m) facilitan la fotosíntesis de diatomeas, como las bentoníticas que se adhieren a las piedras y plantas del fondo de los lagos (Digman 1963).
  - **Depósitos marinos:** En los depósitos marinos más grandes existen evidencias de aguas de baja profundidad ideales para las diatomeas y especies bentoníticas.
2. Sílice soluble en abundancia, debido a la correlación entre depósitos grandes de diatomita y la cercanía de cenizas volcánicas.
3. Nutrientes por la acumulación de cenizas volcánicas en los lagos, y la existencia de una gran cantidad de nutrientes provenientes de la materia orgánica contenida en los mismos.
4. Bajo contenido de sales en los lagos, limitando el desarrollo y crecimiento de las diatomeas.
5. Existencia mínima de sedimentos plásticos.

La frústula o esqueleto de las diatomeas está compuesta de sílice opalina o biogénica. Es simétrica en forma, con una gran proporción de vacíos, decoradas con un patrón único de características del tamaño de nanómetros (poros, canales, espinas). Tienen una superficie rugosa con protuberancias y muescas. Las formas más usuales son cilíndricas, esféricas o de disco circular; con dimensiones comprendidas entre 1 a 500 micras (Fig. 2.3). Un factor decisivo para la presencia de sílice disuelta en un cuerpo de agua es la existencia de actividad volcánica en el área (Díaz 2011).

Otros sedimentos con mayor contenido de diatomeas se denominan arcillas diatomáceas, y el sílice de los fósiles de la diatomea asemeja el ópalo o el sílice hidratado (Kadey 1975).



**Figura 2.3.-** Fotomicrografías de diatomeas vistas en microscopio MEB (Díaz, 2011).

### Composición química de la diatomita

El componente fundamental de la diatomita es el sílice, encontrado en mayor proporción, puede variar desde el 68% al 92% dependiendo de la calidad (Harben 2002), asimismo existen componentes menores como el hierro, calcio, aluminio, titanio, sodio y potasio; a nivel de trazas se detectan una gran cantidad de otros elementos como antimonio, arsénico, bario, berilio, bismuto, paladio, uranio y vanadio (Rivera 1968). Acompañando a la diatomita se encuentran otros minerales en los depósitos tales como arcilla, cuarzo, yeso, mica, calcita y feldespato; adicionalmente se incorporan otros elementos biogénicos como restos de plantas y huesos de peces (Bahls et. al. 1984).

En la Tabla 2.2 se observa la composición química de la diatomita en su estado natural, la cual se compara con las grandes regiones productoras y más importantes del mundo (Harben 2002).

**Tabla 2.2.-** Composición química de la diatomita (Harben 2002).

COMPUESTO	MÉXICO	USA	KENIA	DINAMARCA	ESPAÑA	CHINA
	Jalisco	Nevada	Soysambu	Meler	Albacete	Jillin
SiO <sub>2</sub>	91.2	89.7	84.5	67.8	88.6	90.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.2	3.72	3.06	10.3	0.62	1.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7	1.09	1.89	6.85	0.2	0.67
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.1	0.17	1.21	0.05	0.09
P <sub>2</sub> Os	0.05	0.1	0.04	0.21	-	0.06
CaO	0.19	0.3	1.8	1.35	3.00	0.39
MgO	0.42	0.55	0.39	1.64	0.81	0.28
Na <sub>2</sub> O	0.13	0.31	1.19	0.46	0.5	0.22
K <sub>2</sub> O	0.24	0.41	0.91	1.47	0.39	0.35
PPC	3.6	3.7	6.08	7.91	5.2	6.3
<b>Total</b>	<b>99.9</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>99.2</b>	<b>99.4</b>	<b>100.4</b>

### 2.2.1.1 Estudios de la diatomita

La mayor parte de las investigaciones relacionadas con la diatomita, se limitaban a presentar sus propiedades físicas y mecánicas sin precisar la influencia de los microfósiles en su comportamiento, y los resultados en los límites de consistencia, hasta hace algunos años.

#### Casos internacionales

Lee e Yun (2011) realizaron una caracterización geotécnica de los sedimentos marinos de la cuenca Ulleung, Mar del Este de Japón, los cuales mostraron una estructura predominante por microfósiles, con algunos minerales de arcilla que incluyeron caolinita, illita y clorita; los valores medidos del límite líquido y el límite plástico demostraron que los sedimentos de la Cuenca se clasificaban como **OH**, es decir, "arcilla orgánica de plasticidad media a alta" o **MH**, que concuerda con la arcilla limosa de diatomeas, causando una microestructura de doble porosidad y una relación de vacío inicial alta.

Debido a que los microfósiles en las tierras diatomáceas presentan pequeñas porosidades, tienden a tener un mayor contenido de agua almacenada, traduciéndolo como límites de consistencia altos (khilnani y Capik 1989). Dando pauta a la investigación de las diatomeas en los límites de consistencia, Aksakal et al (2013), evaluaron los efectos de la diatomita, en diferentes proporciones, sobre los límites de consistencia del suelo y los parámetros de compactación en suelos con diferentes texturas; argumentaron que la presencia de la diatomita mejora significativamente las propiedades mecánicas del suelo y reduce su grado de compactación, y en cuyos suelos ensayados presentaron grandes aumentos en los valores de límite líquido y límite plástico.

Palomino et al. (2011) estudiaron el impacto de las diatomeas en la estructura y estabilidad química de las mezclas de caolín- diatomea. Enfatizaron que los suelos naturales que contienen diatomeas tienden a tener una alta compresibilidad, baja resistencia al corte y dificultad de compactación, sin embargo, dadas sus características

únicas existe un gran potencial para utilizar diatomeas en el desarrollo de materiales en partículas diseñadas para aplicaciones de ingeniería geotécnica y geoambiental, indicaron que un ejemplo de esas aplicaciones es el uso de los suelos modificados con diatomeas para la construcción de revestimientos y cubiertas de vertederos, además descubrieron la influencia de las diatomeas en la respuesta fisicoquímica y mecánica de los suelos de grano fino, y mostraron que podría ayudar a mejorar el rendimiento a largo plazo del revestimiento y mejorar las características de retención de agua.

### **Casos nacionales**

Las diatomeas como organismos vivos y sus remanentes fósiles, han sido objeto de una gran variedad de investigaciones en México, con fines paleo-ecológicos principalmente. Zeevaert (1949) realizó un estudio del suelo de la ciudad de México, advirtió la presencia de ostrácodos y diatomeas en su composición, posterior a eso Mesri y Bohor (1975) estudiaron la compresibilidad del mismo suelo y dentro de su análisis determinaron que estaba constituido por microfósiles silíceos, la mayor parte diatomeas y materia orgánica.

Las propiedades singulares de los sedimentos volcánico-lacustres de la ciudad de México, tales como el contenido de agua, los límites de Atterberg, la actividad, la baja densidad y el alto ángulo de fricción, se pueden explicar con base en la presencia de diatomeas en dichos suelos; la presión de poro generada durante el proceso de falla decrece con el contenido de diatomita (Díaz 2011).

Almanza et al. (2016) presentaron la caracterización de suelos blandos en las cuencas del Valle de México y Valle de Toluca observaron que la humedad alta del suelo corresponde a mayor porcentaje de diatomeas, variable que mostró correlación con las propiedades mecánicas y la relación de vacíos.

A pesar de que la mayoría de las investigaciones sobre diatomeas se centran en el estudio del suelo de la ciudad de México, Israde (2002) describió la evolución paleoambiental del centro del lago de Cuitzeo e indicó las características fisicoquímicas

y abundancia de las diatomeas en el lago. Los sitios que presentaron una abundancia mayor de diatomeas correspondieron a la estación Queréndaro y el dren Queréndaro que son las descargas de uso doméstico e industrial que llegan a través del Río Grande de Morelia.

Exploraciones más recientes manifestaron la presencia de diatomeas en el lago de Pátzcuaro, donde Almanza e Israde (2016) determinaron un total de 83 especies de diatomeas, que incluyeron la misma forma del fósil con ocho variedades distintas, de las cuales 20 especies que correspondían al 24%, fueron el primer registro para México y, 57 especies (68.6%) fueron nuevas diatomeas para el área de estudio; describieron por orden taxonómico las 83 especies registradas, incluyeron sus sinónimos, una descripción de su morfología, dimensiones, distribución local y nacional, con referencias y afinidades ambientales en México. Propusieron efectuar más investigaciones que permitan correlacionar las condiciones ambientales del lago con la calidad bioindicadora que poseen las diatomeas.

### **2.2.1.2 Estados productores de diatomita en México**

De acuerdo a datos obtenidos por la Secretaría de Economía (SE), coordinación general de minería (2016), las entidades federativas que producen diatomita en nuestro país son el estado de Jalisco (99.7%) y el estado de Michoacán (0.23%). Los principales yacimientos se encuentran en los estados de Michoacán, Hidalgo, Jalisco, Puebla, Tlaxcala, y ciudad de México.

El uso más importante y espectacular de la diatomita es como ayudante de filtración para la clarificación y purificación de una gran variedad de líquidos en el proceso químico, metalúrgico, alimentos, fármacos, bebidas, petróleo y otras industrias. La diatomita es un importante mineral de relleno, extensión, revestimiento, para diversas composiciones y materiales fabricados. La diatomita utilizada como materia prima para la manufactura de elementos de estructuras aislantes del calor y frío, incluye ladrillos, bloques y cementos. Las mezclas de diatomitas constituyen excelentes composiciones

en la perforación de pozos petrolíferos, ya sea como modificador de los lodos de perforación o bien para la cementación de los huecos de perforación (SE, 2016).

Las tierras diatomáceas prácticamente puras suelen no ser plásticas, por más que su límite líquido pueda ser mayor al 100% (Juárez 1973). El interés de la ingeniería en las diatomeas radica en que son ejemplos sobresalientes de materiales micro y nanoestructurados que afectan las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los suelos (Díaz 2011).

### **Diatomita en Michoacán**

En Michoacán, en el municipio de Charo la diatomita se acumuló en depósitos lacustres en diferentes horizontes y con espesor variable. En el área de Zacapu los mantos se encuentran cubiertos por una capa de suelo y arcilla arenosa. En este mismo municipio hay diatomita de buena calidad pero se desconoce la cantidad de reservas. En Zitácuaro la diatomita se presenta formando cuerpos lenticulares de dimensiones reducidas y en forma tabular (SE 2016). En el lago de Cuitzeo y lago de Pátzcuaro los estudios comprenden análisis de diatomeas (Israde 2002).

El Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2007) indicó que en el municipio de Charo se reconocieron 10 localidades con minerales no metálicos, correspondientes todas a manifestaciones de diatomita, originadas a partir de diatomeas lacustres, ninguna de estas localidades ha sido explotada hasta la fecha, aunque algunas presentaron los requerimientos mínimos para su aprovechamiento

Para fines de esta investigación, la diatomita estudiada corresponde a la cuenca del lago de Pátzcuaro, la cual pertenece a un depósito lacustre. Se trata de un horizonte de diatomita ubicado a un costado de la carretera estatal Pátzcuaro- Chupícuaro km 14, siendo de color gris claro a blanco, suave al tacto, textura fina y porosa, esta se muestra en la Figura 2.4.



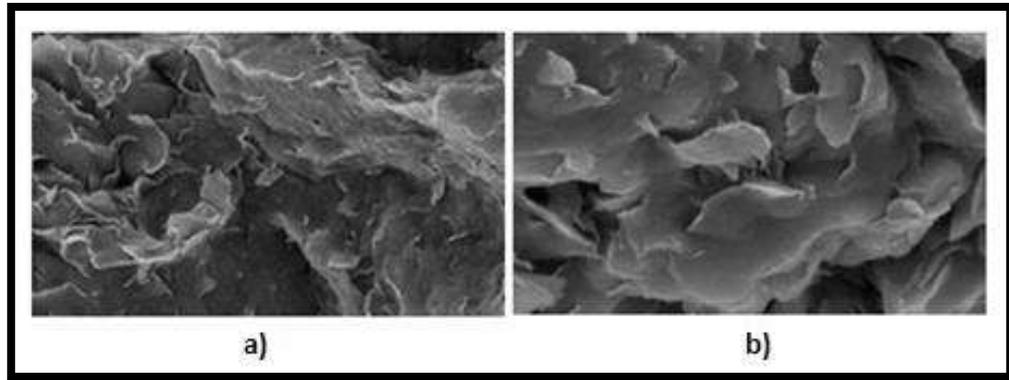
*Figura 2.4.- Sitio de la diatomita en estudio.*

### **2.2.2 Bentonita**

La bentonita es arcilla del grupo montmorilonítico, originada por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansión típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico (Juárez 1973).

Formada esencialmente por minerales del grupo de la esmectita, independientemente de su ocurrencia u origen (SE 2016). Los minerales del grupo de la esmectita, como es bien sabido, son los responsables del comportamiento expansivo de los denominados “suelos difíciles” en Geotecnia. Los factores fundamentales que controlan el fenómeno de la expansión están relacionados con las propiedades cristal químicas de las esmectitas y con la microtextura de la roca (Martín 2010).

En la Figura 2.5 se muestra el estudio microtextural realizado mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), se observa que la arcilla está formada por láminas alabeadas con bordes ligeramente rizados, una textura típica de bentonitas de gran pureza, el inciso a) muestra a la bentonita antes de practicarle el ensaye para determinar el límite líquido y, el inciso b) muestra a la bentonita después de ser ensayada.



**Figura 2.5.** Esmeclita a) antes del ensayo, b) después del ensayo.  
(Martín 2010)

Su plasticidad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de dilatación, en general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta sea su estructura, más plástico es el material (SE 2016).

De acuerdo a datos obtenidos por la SE, coordinación general de minería (2016), las principales entidades federativas que producen bentonita son Durango, San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla.

### **2.2.2.1 Estudios de la bentonita**

Desde su descubrimiento, los estudios y las aplicaciones de las bentonitas se han multiplicado a un ritmo acelerado. Entre sus aplicaciones pueden citarse en la industria de los plásticos, caucho, papel, jabones y detergentes, lubricante en las prospecciones de hidrocarburos (Pinzon 1996).

### **Casos internacionales**

La bentonita se destaca por su soporte catalítico, revelando propiedades excelentes, considerada como un material de importancia científica y comercial, la mayoría de los depósitos de bentonita se extraen de pozos abiertos; después de la extracción, la arcilla

a menudo se almacena o se coloca en almohadillas de secado para permitir el secado natural antes de mezclarse en las reservas de productos. La bentonita se convierte típicamente en productos finales mediante un proceso de secado, trituración, molienda o cribado (Duarte y Rojas 2017).

El Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (2015), estimó que la producción mundial de bentonita correspondía a 16 millones de toneladas, indicó que Estados Unidos y China eran los principales productores del mundo y se calculaba que representaban entre el 50% y el 60% del suministro total.

### **Casos nacionales**

Registros de la SE (2016) indicaron que en la industria petrolera la bentonita es utilizada para fabricar lodos de perforación, recubre y estabiliza las paredes de los pozos, ayuda a la lubricación de las barrenas y garantiza la extracción de escombros a la superficie. Utilizada también en barreras de permeabilización basadas en geomembranas y geotextiles (permeable) produciendo la barrera de sellado compactada. Para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que ésta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones.

#### **2.2.3 Caolín**

El caolín es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente. El término caolín se refiere a arcillas en las que predomina el mineral caolinita, de color blanco, es higroscópico (absorbe agua); su plasticidad es de baja a moderada (SE 2016). El nombre caolín proviene del chino "kauling" que significa "alto", nombre de una colina cerca de Jauchau Fu, China, donde el material fue obtenido hace siglos (Grim 1953).

El mineral caolinita es uno de los minerales mayoritarios en los diez primeros metros de la corteza continental. Comparte la clasificación en abundancia con minerales como cuarzo, micas, feldespato y calcita (Bartolomé 1997).

Los puntos correspondientes al caolín indican que poseen menor plasticidad que las arcillas ordinarias; por lo tanto, un índice plástico bajo no demuestra necesariamente un contenido de materia orgánica. A pesar de que el nombre de arcillas está muy difundido para estos suelos, algunas de sus características corresponden a limos inorgánicos; por ejemplo, su resistencia en estado seco es relativamente baja y en estado húmedo muestran cierta reacción a la prueba de dilatancia; sin embargo, son suelos finos y suaves con un alto porcentaje de partículas *tamaño de arcilla*, comparable con el de otras arcillas típicas (Juárez 1973).

### **2.2.3.1 Estudios del caolín**

#### **Casos internacionales**

Michaels (1962) demostró que la capacidad de controlar y predecir la magnitud y la geometría de las interacciones de partículas en suspensiones del caolín lo convierte en una sustancia ideal. Las aplicaciones del caolín se derivan de su color blanco, sus características refractarias y su granulometría. En Bélgica se emplea principalmente para la fabricación de cemento blanco (Jordá 2003).

La plasticidad y resistencia mecánica de un caolín están estrechamente relacionadas con el grado de compactación de sus partículas, y serán mayores cuanto más fina sea su distribución granulométrica (Bartolomé 1997).

#### **Casos nacionales**

La SE (2016), indicó los principales estados productores de caolín en México, siendo estos Chihuahua, Querétaro, Zacatecas, Hidalgo, Jalisco y Guanajuato; los cuales tienen el 94.5% de la producción nacional. Utilizado como carga y recubrimiento del papel, a causa de su elevada temperatura de fusión es adecuado para la elaboración

de refractarios, en la fabricación de sanitarios, comedores, porcelana eléctrica y tejas de alto grado, vajillas, objetos de baño, refractarios y cajas de arcilla refractaria para cocer alfarería fina.

## 2.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA

Atterberg (1911) describió la consistencia y el comportamiento de los suelos finos con diferentes contenidos de humedad; determinó cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido, a la frontera entre el estado sólido y semisólido se le conoce como *límite de contracción*, entre el semisólido y plástico como *límite plástico*, entre el plástico y líquido como *límite líquido*, los cuales conforman los límites de Atterberg, llamados también límites de consistencia. A su vez el límite plástico y el límite líquido conforman los límites de plasticidad; parámetros necesarios para definir la plasticidad de un suelo.

### 2.3.1 Límite líquido

El límite líquido 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 (Crespo 2000). A partir de las ideas de Atterberg, Casagrande (1932) desarrolló una técnica más consistente para determinar el límite líquido de un suelo, conocida como la prueba de la Copa de Casagrande, generalizó de esta forma el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS (Juárez 1973).

Por otra parte los problemas geotécnicos en la construcción de terraplenes ferroviarios en Suecia a principios del siglo XX, llevó a la comisión Geotécnica de los Ferrocarriles Estatales Suecos a proponer un cono penetrante para la medición de la resistencia cortante de suelos arcillosos. Ajustando peso, ángulo y penetración del cono por lo que se llegó a definir un estándar que, al menos en los países escandinavos, ha desplazado a la copa de Casagrande para la determinación del límite líquido (Mendoza 1996).

El penetrómetro cónico es un método alternativo con el que se solventan algunas de las deficiencias del método tradicional (Duarte y Rojas 2017). La teoría de plasticidad desarrollada por Prandtl (1921) 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, estableció que el ensayo de penetración es una medida válida del límite líquido.

### **2.3.1.1 Conos de penetración**

#### **Cono Ruso**

El primer ensayo normalizado fue desarrollado por Vasilev en 1949, cuyo aparato utilizado fue el denominado “cono ruso”, donde la humedad correspondiente a una penetración de 10 mm, un ángulo de 30° y una masa total de 76 g, indicaba el límite líquido (Duarte y Rojas 2017).

#### **Cono Indio**

En el año 1959 el Indian Central Road Research Institute, propuso un ensayo más simplificado al de la copa de Casagrande, denominado “Cono Indio”, el cual obtenía el límite líquido con penetración de una pulgada y un ángulo de 31° (Leal y Julieth 2017).

#### **Cono de Georgia**

El Instituto Tecnológico de Georgia (1951) desarrolló un penetrómetro denominado “cono de Georgia” en el que la punta del cono de 30° penetra en el suelo empujado por un peso de 75 g. Para evitar efectos dinámicos se frena la caída, de modo que el peso total no actúe sobre la punta hasta pasados diez segundos desde el comienzo del ensayo. Con este aparato se dice que el suelo está en el límite líquido cuando la penetración de la punta es de 10 mm. Para ello se debe medir las penetraciones de muestras con distinta humedad e interpolar para 10 mm (Duarte y Rojas 2017).

## Cono Sueco

También llamado cono penetrante, cuyo aparato consta de un pedestal con un brazo ajustable verticalmente donde se coloca el cono metálico, correspondiente a un ángulo de  $60^\circ$ , y masa de 60 gramos, como se muestra en la Figura 2.6 y que permite que éste apenas toque inicialmente la superficie del suelo; la penetración del cono en la masa de suelo es posible medirla y apreciarla con una lupa, con aproximación de 0.1 mm. El límite líquido se define como el contenido de agua que tiene el suelo cuando el cono penetra 10 milímetros (Mendoza 1996).



*Figura 2.6.- Equipo de penetración, cono Sueco (Mindiamart ®).*

## Cono Francés

Leflaive (1971) propuso utilizar un cono de 80 gramos con un ángulo de 30 grados en la cumbre, para determinar el límite de líquido, que se define como contenido de humedad en el cual este cono se sumergía a una profundidad de 17 mm bajo su propio peso de 80 gramos.

## Cono Inglés

El método del cono de penetración se basa en la relación entre resistencia al corte y resistencia a la penetración usando el cono de caída libre, el cono estándar tiene un

peso de 80 gramos con un ángulo de vértice de 30°, como se muestra en la Figura 2.7. Según este estándar, el límite líquido del suelo se define como el contenido de agua correspondiente a la penetración del cono de 20 mm (Hrubesova 2016).



**Figura 2.7.-** Equipo de penetración, cono Inglés (Mindiamart ®).

Históricamente se han desarrollado diferentes propuestas de conos para la determinación del límite líquido en diferentes países, lo anterior se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.-** Características de los métodos propuestos para la determinación del límite líquido con los conos de caída (Leroueil 1996).

	Ángulo (°)	Masa (g)	Profundidad de penetración para límite líquido (mm)
<b>Cono de la USSR (Vasilev, 1949)</b>	30	76	10.0
<b>Cono Indio (Sowers, 1959)</b>	31	148	25.4
<b>Cono del Instituto Tecnológico de Georgia (Sowers, 1959)</b>	30	75	10.0
<b>Cono Sueco (Karlsson 1961, 1977)</b>	60	60	10.0
<b>Cono Francés (Leflaive, 1971)</b>	30	80	17.0
<b>Cono Inglés (Sherwood and Ryley, 1970; BSI 1975)</b>	30	80	20.0

### **2.3.1.2 Límite líquido utilizando los conos de penetración**

Los límites de Atterberg son un campo poco estudiado, a pesar de su gran utilidad en la determinación de las características y los esfuerzos del suelo, por lo que se han desarrollado algunas investigaciones empleando los conos de penetración, con la finalidad de mejorar los ensayos tradicionales y de facilitar el trabajo de laboratoristas, así como para tener una mayor garantía de los resultados obtenidos.

#### **Casos internacionales**

La prueba de penetración es un método de investigación de campo geotécnico relativamente reciente, pero que se ha vuelto muy popular durante las últimas cuatro décadas, el simposio europeo sobre pruebas de penetración, ESOPT I, celebrado en Estocolmo Suecia, en el año de 1974, fue la plataforma que inició muchos desarrollos positivos, como la armonización y la estandarización de los equipos y métodos de prueba de penetración. Goldmann (1665) probablemente fue el primero en utilizar el método de penetración en Alemania, el primer penetrómetro fue desarrollado en Suecia alrededor de 1935 por la compañía Borros y patentado hasta 1942 (Massarsch 2014).

Debido a la existencia de diferentes conos Emami y Monfared (2012) investigaron los efectos de varios parámetros del cono de caída como el ángulo del ápice del cono, el diámetro, la sobrecarga, la rugosidad de la superficie del cono en los límites Atterberg de muestras de suelo homogéneas y no homogéneas; los resultados se determinaron en base a pruebas de conos de caída con cuatro conos diferentes con ángulos de 30° y 60°, con dos diámetros y penetraciones diferentes, también se consideró la rugosidad superficial que fuera diferente, demostrando que para suelos no homogéneos, la penetración de 20 mm puede no ser precisa para determinar el límite líquido del suelo en comparación con muestras homogéneas.

Koumoto y Houlsby (2001) describieron la teoría y la práctica de la prueba del cono de caída, analizaron el mecanismo de penetración del cono en una arcilla, introdujeron el concepto de resistencia dinámica a los resultados estáticos, además propusieron que el

límite líquido se redefina internacionalmente como el contenido de agua en el cual un cono de caída de 60° y 60 g pueda penetrar 10 mm.

En Inglaterra en el año de 1994 se realizó una investigación, donde se recomendó utilizar el método del cono de caída para determinar el límite líquido de los suelos debido a su alta precisión y facilidad de manejo para la obtención de los resultados, demostrándose que el aparato de cono de caída era un método adecuado para determinar los límites de consistencia debido a su eficiencia y a que la intervención del operador no afectaba en gran medida los resultados (Feng 2004).

En la ciudad de Esmirna, Turquía, en 2013 se desarrolló un trabajo de investigación en el cual se utilizaron quince conos de penetración con diferentes formas y pesos, utilizando dos tipos de arcilla. Estudiaron la relación entre el contenido de agua y la penetración, observaron que la penetración de los conos estuvo en el rango de los 8.99 milímetros a los 28.23 milímetros y que, al considerar la correlación de cada cono con peso constante, la penetración disminuye mientras el ángulo aumenta (Altıntaş 2013).

Varios autores se plantearon la interrogante de la factibilidad de implementar los conos de caída, Christaras (1991) realizó una comparación en Creta, Grecia, sobre los métodos para determinar el límite líquido, empleó la copa de Casagrande y el penetrómetro de caída, determinó que los dos métodos arrojan resultados similares, y cuya similitud fue mayor en suelos más finos, especialmente en arcillas puras. Los valores de Casagrande fueron sistemáticamente inferiores a los valores del penetrómetro en suelos con menor contenido de arcilla, argumentó que una profundidad de penetración del cono de caída inferior a 10 mm podría disminuir esa divergencia.

Hrubesova (2016) elaboró una comparación entre el método de la copa de Casagrande y el cono de penetración Inglés para la determinación del límite líquido, analizó dos tipos de suelo: una arcilla de baja plasticidad, y una arcilla bentonítica (alta plasticidad). Los resultados presentados de pruebas de laboratorio mostraron que el límite de líquido de bentonita basado en la prueba de penetración de cono (con una penetración de 20

mm) fue significativamente menor en comparación con el límite líquido de Casagrande; concluyó que la prueba del penetrómetro de cono Inglés con una penetración de 20 mm, proporciona un valor significativamente menor del límite líquido en comparación con el método de la copa Casagrande para suelos de alta plasticidad.

Una correlación buena es entre el límite líquido por Casagrande y el cono de caída, empleando arcillas súper plásticas. Gronbech et al. (2011) investigaron arcillas las cuales alcanzaron límites líquidos de hasta 350% e índices plásticos de hasta 300%, se halló que el método del cono de caída reduce el límite líquido hasta con un 43 por ciento, por lo que determinan que el cono de caída es un método poco fiable para determinar el límite líquido de arcillas extremadamente plásticas.

Spagnoli (2012) obtuvo una correlación basada en los resultados de pruebas experimentales aplicadas a arcillas puras, realizó una comparación de métodos para determinar el límite líquido, entre la copa de Casagrande y el cono Británico, para finalmente proponer ecuaciones para relacionar los datos obtenidos con cada método, aplicables a arcillas puras.

La prueba del cono británico, normado BS 1377: (1990) como lo soporta el artículo escrito por Feng (2004) recomienda el método del Penetrómetro de cono como la mejor alternativa para determinar el límite líquido, teniendo en cuenta que para la ejecución de este ensayo se necesita un recipiente que sostenga la muestra, surge la preocupación con respecto al aire que puede afectar la muestra durante el llenado.

Ante dicho acontecimiento Feng (2004) recomendó reemplazar el recipiente por un anillo con las mismas dimensiones que permitiera la preparación de la muestra.

Actualmente los conos de caída son ampliamente conocidos en gran parte del mundo, y es el estándar aceptado para encontrar el límite líquido en muchos países.

## Casos nacionales

Tradicionalmente se ha usado la copa de Casagrande para determinar el límite líquido, aun sabiendo que esta prueba suma factores que influyen en su determinación, en México desde hace tiempo se han aportado resultados que abonan la pertinencia y conveniencia de utilizar los conos de penetración, sin embargo su uso en México no se ha generalizado (Orozco y Mendoza 2000).

Mendoza (1996) habló sobre los métodos alternativos, centrando su investigación en determinar el contenido de agua de suelos con secado en horno microondas y límite líquido de suelos con el cono Sueco, realizó una comparación entre la copa de Casagrande y el cono Sueco, analizando diversos suelos representativos, cuyos valores del límite líquido alcanzan hasta 400%. Las pruebas fueron realizadas por varios operadores, a fin de poner en claro la influencia que tienen los resultados cuando lo hace un laboratorista experimentado y cuando los laboratoristas tienen con poco tiempo en el laboratorio, así mismo los suelos fueron secados en un horno convencional y a la vez en un horno de microondas, demostrando que el secado en microondas resulta ser muy conveniente (Mendoza 1991).

Los resultados comparativos del trabajo de Mendoza (1991) fueron mostrados y discutidos más tarde, (Mendoza 1996) mencionando otros conos de penetración, como es el caso del cono inglés, donde determinó que la utilización del cono resulta ser más sencillo y tan confiable que la técnica de Casagrande.

Mendoza y Orozco (2001) expusieron resultados comparativos de las determinaciones de límite líquido correspondiente a 34 suelos de grano fino, haciendo uso del método de percusión tradicional (copa de Casagrande) y el cono de caída, (sueco e inglés). Los materiales empleados fueron caolín y bentonita, adquiridos comercialmente, otros grupos de suelo pertenecen al suelo lacustre de la Ciudad de México y arcillas marinas del Golfo de México, los suelos restantes fueron muestreados en algunas presas mexicanas. Los valores obtenidos con el cono sueco e inglés difirieron ligeramente, pero correlacionados linealmente; su coeficiente de correlación fue prácticamente igual a uno.

Aun cuando el uso de conos para la determinación del límite líquido en suelos tiene mucha aceptación en otros países, la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios, no ha considerado su empleo (Orozco y Mendoza 2000).

Cabe mencionar que Mendoza y Orozco son los pioneros, y posiblemente los únicos en realizar estudios sobre los conos de penetración para la determinación del límite líquido de suelos en México, a pesar de la influencia en otros países donde la copa de Casagrande ha quedado prácticamente obsoleta, México es uno de los países en el que el cono de penetración no se ha implementado como prueba estandarizada en sus laboratorios.

### 2.3.2 Límite plástico

La frontera convencional entre los estados plástico y semi-sólido fue llamada por Atterberg (1911) límite plástico y definido también en términos de una manipulación de laboratorio (Juárez 1973). La prueba para la determinación del límite plástico, tal como Atterberg (1911) la definió, no especifica el diámetro a que debe llegarse al formar el cilindrito de suelo requerido. Terzaghi (1973) agregó la condición de que el diámetro sea de 3.2 mm.

El límite plástico se define como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo al enrollarse en rollitos de 3.2 mm de diámetro se desmorona, el límite plástico es el límite inferior del escenario plástico del suelo (Das 2015). Atterberg (1911) demostró que la plasticidad de una arcilla puede describirse en términos de dos parámetros: el *límite líquido* y el *índice plástico*, este numéricamente igual a la diferencia del límite líquido y el plástico (Juárez 1973).

El límite plástico es una propiedad importante del suelo de grano fino, el proceso convencional presenta varias implicaciones negativas sobre la obtención de este.

Se han hecho varios intentos para sustituir el rolado manual por la acción mecánica de algún aparato, pero sin resultados satisfactorios, debido, en primer lugar, a que la experiencia ha demostrado que en esta prueba la influencia del operador no es importante y, en segundo, no se ha podido desarrollar ningún aparato en que la presión ejercida se ajuste a la tenacidad de los diferentes suelos; en el rolado manual, el operador, guiado por el tacto, hace el ajuste automáticamente (Juárez 1973).

Sin embargo varios estudios han sido realizados por investigadores anteriores para introducir un método alternativo para la determinación del límite plástico del suelo y superar la inconsistencia de los resultados obtenidos del método estándar.

El método de cono de caída doble propuesto por Wood y Wroth (1978) consistió en utilizar el cono de penetración empleado para determinar el límite líquido, únicamente cambiar la masa del cono, sugirieron un cono de 240 g de peso, 3 veces más pesado que el cono estándar y con la misma geometría y profundidad de penetración.

Por lo que se han desarrollado diferentes propuestas de conos para la determinación del límite plástico, lo que se muestra en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4.-** Características de los métodos propuestos para la determinación del límite plástico con los conos de caída, modificado de (Duarte y Rojas 2017).

	Ángulo (°)	Masa (g)	Profundidad de penetración para límite plástico (mm)
<b>Cono Inglés (Sherwood and Ryley, 1970; BSI 1975)</b>	30	240	20
<b>Cono de la USSR (Vasilev, 1949)</b>	30	228	10
<b>Cono Indio (Sowers,1959)</b>	31	444	25.4

### **2.3.2.1 Límite plástico aplicando los conos de penetración**

La determinación del límite plástico a través del método de los conos de penetración, es relativamente nuevo, y en muchos países aun no es puesto en práctica, carece de normatividad, considerado como una propuesta alternativa.

#### **Casos internacionales**

Harison (1990) redefinió la propuesta de Wood y Wroth (1978) para determinar el límite plástico, argumentó que para la predicción de límites plásticos muy bajos, así como la verificación experimental de la relación de resistencia asumida, es difícil con contenidos de agua tan bajos.

Koumoto y Houlsby (2001) encontraron que para suelos de baja plasticidad al hacer los ensayos del rollo de 3 mm no se adaptan bien. Por lo anterior, realizaron una investigación en la cual se mostró una gran variedad de valores de límite plástico para un mismo suelo. De la investigación se notó que el límite plástico obtenido con el cono se encuentra dentro del promedio de valores, proponiendo regirse por la norma británica con la particularidad de permitir cambiar su peso sin tener que mover la punta del cono. El contenido de agua en la regresión lineal que se obtiene del esfuerzo de corte no drenado y el límite plástico, se da cuando se usa un cono del mismo peso, pero se ha demostrado que se puede aplicar para un cono de peso doble (Luna 2012).

Una aportación diferente al método es la dada por Feng (2004), en la cual propuso como límite plástico el contenido de humedad a una penetración de 2mm, de acuerdo a las investigaciones realizadas por Houlsby (2000), el cual decía que el esfuerzo de corte no drenado es inversamente proporcional al cuadrado de la penetración. Como parte central del método y de la relación que se usó, fue un modelo lineal entre el logaritmo de la penetración y el logaritmo del contenido de humedad.

Prakash y Sridharan (2006) realizaron una evaluación crítica del método del cono para determinar la plasticidad del suelo, mostraron que la plasticidad se debe principalmente a la cohesión no drenada, argumentaron que los resultados obtenidos del método de

penetración del cono no pudieron representar completamente la plasticidad, aunque un valor del límite plástico pudo obtenerse mediante el método de penetración de cono, incluso para fines no plásticos, ese valor no representó el límite plástico verdadero debido a la incapacidad del método para medir el grado de cohesión, que contribuye a la plasticidad del suelo. El método de penetración de cono para la determinación del límite plástico podría conducir a una posición a los suelos no plásticos en algún lugar en la carta de plasticidad (Prakash y Sridharan 2006).

### **Casos nacionales**

En los últimos años el uso de los conos de penetración, ha incrementado notablemente, sobre todo en países asiáticos y europeos, el estudio para determinar el límite plástico continua en proceso, pese a varias aportaciones que se han realizado. En México no se tienen registros del cono de penetración para el límite plástico. Orozco y Mendoza (2000) mencionan la aplicabilidad del método del cono inglés, añadieron una variante, realizar la prueba con una penetración menor a la utilizada para el límite líquido, sin embargo no mostraron una investigación detallada acerca de este.

#### **2.3.3 Límites de contracción**

La masa de suelo se contrae a medida que éste pierde humedad gradualmente. Con la pérdida continua de humedad se alcanza un estado de equilibrio hasta el punto en el que más pérdida de humedad no dará lugar a ningún cambio de volumen adicional (Das 2015). El límite de contracción, es la frontera entre los estados de consistencia semi-sólido y sólido, definido como el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando; este límite se manifiesta visualmente por un característico cambio de tono oscuro a más claro que el suelo puede presentar en su proximidad, es decir al irse secando gradualmente. Atterberg lo determinaba efectuando mediciones durante el proceso de contracción (Juárez 1973).

## 2.4 CONTENIDO DE AGUA

El contenido de humedad, también se conoce como contenido de agua y se define como la razón del peso de agua al peso de los sólidos en un volumen dado de suelo (Das 2015).

La determinación del contenido de agua consiste en el peso de una muestra de suelo antes y después de secarla bajo ciertas condiciones; esta se conoce por la diferencia entre masas corresponde al agua removida. Esta diferencia entre la masa seca del suelo resulta del contenido de agua, generalmente representada en porcentaje. Tradicionalmente el secado de los suelos se lleva a cabo en un horno convencional con el que se calienta al suelo a una temperatura constante y durante un lapso de tiempo estandarizado, hasta lograr la evaporación y remoción del agua libre, alcanzando peso constante de la muestra de suelo (Orozco y Mendoza 2000).

Actualmente existen diferentes técnicas para el secado de las muestras, el método tradicional es un horno de convección estándar, otro es el secado directamente en la parrilla de una estufa, y más reciente el uso de un horno de microondas.

### 2.4.1 Estudios del secado de suelos con el Horno de Microondas

El tiempo de secado empleando un horno de convección toma usualmente por lo menos 16 horas, y de manera práctica de un día para otro; es bien sabido que para diversas actividades geotécnicas, sobre todo en el campo, el lapso anterior no responde a la necesidad de conocer con rapidez el contenido de agua de los suelos involucrados (Orozco y Mendoza 2000).

### Casos internacionales

Gee y Dodson (1981) establecieron un procedimiento de rutina para determinar el contenido de agua del suelo por secado con horno de microondas, dicho procedimiento requirió muestras de suelo pequeñas de 20 gramos que fueron calentadas durante un

período de 20 minutos a máxima potencia (600 a 650 W) en un horno de microondas de tipo doméstico, obtuvieron una concordancia constante (dentro de 0,5% en peso) entre microondas y secado en horno eléctrico, para materiales de suelo que van desde arenas de cuarzo hasta limos y arcillas finas.

Hagerty et al (1990) realizaron un estudio de laboratorio para investigar las diferencias entre los contenidos de humedad del suelo en función del secado en horno de microondas y los contenidos de humedad desarrollados a partir de los procedimientos de secado convencionales, realizaron el ensayo para nueve materiales que variaban desde agregados densos a arcillas altamente plásticas, las diferencias entre los contenidos de humedad que obtuvieron por los dos métodos fueron muy pequeñas, en muchos casos sin exceder la variabilidad entre los valores obtenidos de muestras múltiples de la misma mezcla de suelo secada en un horno convencional.

Los hornos de microondas ofrecen un medio para secar muestras de suelo más rápidamente que el secado estándar en hornos de convección, sin embargo, existe duda sobre la idoneidad del secado por microondas de suelos altamente plásticos y suelos que contienen material orgánico. Hagerty y Ullrich (1990) estudiaron el secado con el horno de microondas en arcillas y arcillas altamente plásticas mezcladas con turba, elaboraron una comparación de resultados de secado en horno de microondas y en hornos convencionales, mostraron que el uso cuidadoso de un horno de microondas produjo valores de contenido de humedad muy cercanos a los obtenidos usando un horno convencional.

La determinación del contenido de agua en un horno convencional puede requerir hasta 24 horas. Gilbert (1991) describió un sistema de secado por horno de microondas para determinar el contenido de agua de manera confiable y precisa en tiempo real; el diseño del sistema se basaba en el monitoreo continuo del cambio de peso de una muestra de suelo sometida a radiación de microondas, determino que el sistema de microondas arrojó resultados satisfactorios.

## Casos nacionales

Mendoza y Orozco (1999) describieron procedimientos confiables para determinar el contenido de agua de los suelos, emplearon métodos alternativos a la técnica tradicional del horno convencional. Durante el desarrollo de su experimentación obtuvieron relaciones lineales entre los resultados del procedimiento convencional y los obtenidos con el del horno de microondas, finalmente determinaron que los hornos de microondas son un medio mucho más rápido y más barato que los hornos convencionales, siendo tan confiables también.

Un año más tarde Orozco y Mendoza (2000) demostraron la facilidad del uso del horno de microondas como herramienta para la clasificación completa de los suelos arcillosos; la potencia que utilizaron fue la máxima (10), con intervalos de secado de 30 segundos, 1 ó 2 minutos dependiendo de qué tan húmedo estaba el suelo, realizaron un proceso reiterativo de secado y pesaje, hasta prácticamente alcanzar peso constante.

El secado con el horno de microondas es una técnica que en los últimos años se ha implementado en algunos países, las investigaciones acerca de su uso van en incremento, demostrando la facilidad del método y consistencia en sus resultados.

### 3. METODOLOGÍA

La clasificación de un suelo se realiza con base en su composición granulométrica y características de plasticidad, representada por los límites de consistencia y basándose en las diferentes normas internacionales. En este apartado se muestra la metodología que se utilizó para la realización de este estudio, como la determinar del límite líquido (LL %), el límite plástico (PL %), el índice plástico (PI %), la contracción lineal (CL %) y la contracción volumétrica (CV %).

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

De acuerdo a las normas ASTM D2487 y ASTM D 4318 la clasificación del suelo fino se hace a través de:

- Contenido de agua  $W$  (%) – Horno de convección.
- Límite líquido LL (%) – Copa de Casagrande.
- Límite plástico PL (%) – Método de rolado.

Con base a la norma ASTM D2487-17 y siguiendo las recomendaciones del manual M·MMP·1·02/03 la clasificación de fragmentos de rocas y suelos, donde los suelos se clasifican como finos cuando más del 50% de sus partículas son menores a la malla No. 200 (0.075 mm), clasificándose como arcilla cuando su límite líquido y su índice plástico precisan un punto dentro de las zonas II o IV de la carta de plasticidad, como limo cuando se encuentran en las zonas I y III (Fig. 3.1).

La norma BS 5930:1999 (norma inglesa) incluye su propia carta de plasticidad, y de manera general coincide con la norma ASTM D2487-17, una diferencia es que la norma inglesa incluye cinco parámetros de plasticidad: baja, intermedia, alta, muy alta y extremadamente alta, como se muestra en la Figura 3.2.

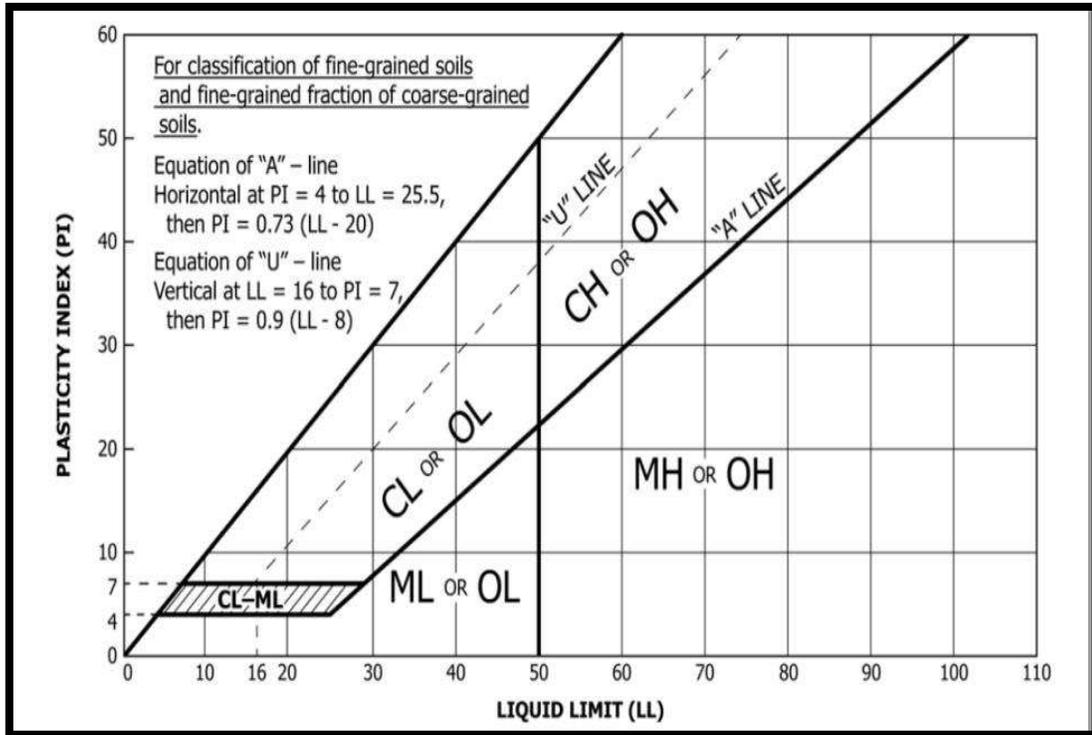


Figura 3.1. Carta de plasticidad (ASTM D2487-17).

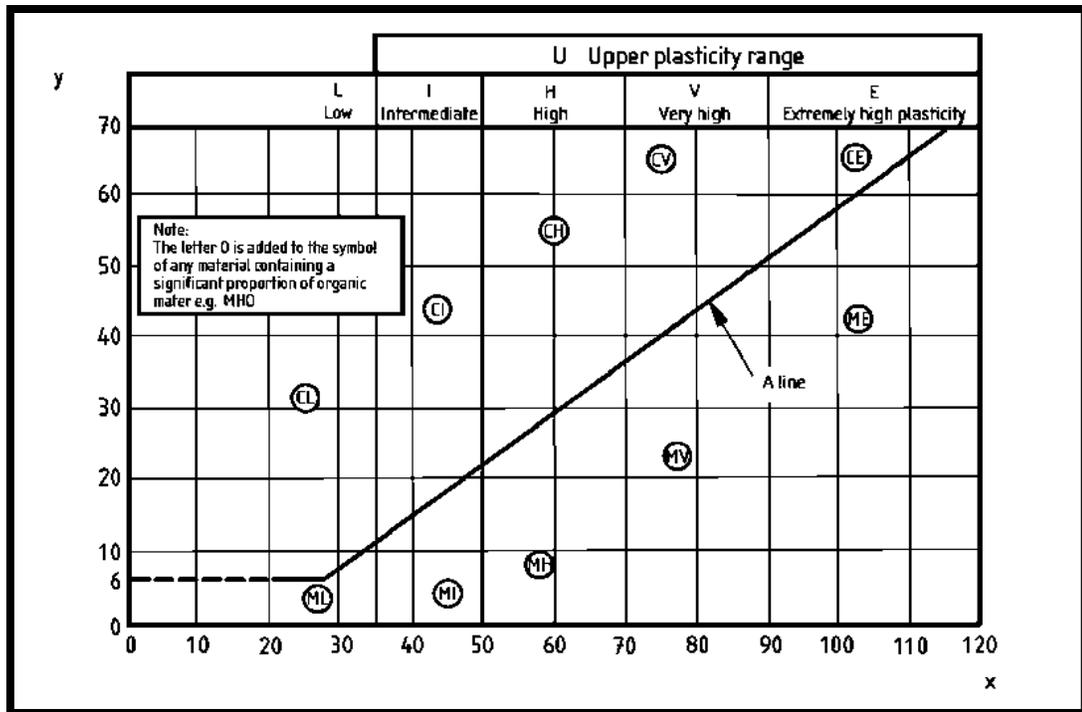


Figura 3.2. Carta de plasticidad (BS 5930:1999).

A la diferencia entre el LL (%) y el PL (%) se le conoce como índice plástico PI (%), de acuerdo a la norma ASTM D4318-05, el índice plástico se obtiene mediante la ecuación 3.1.

$$PI = LL - PL \quad (3.1)$$

### 3.1.1 Determinación del contenido de agua

De acuerdo a la norma ASTM D2216-90, el contenido de agua  $W$  (%) de un suelo se obtiene aplicando la ecuación 3.2.

$$W = \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_t} \times 100 = \frac{w_w}{w_s} \times 100 \quad (3.2)$$

Donde:

$W$  = Contenido de agua (%)

$W_1$  = Masa de la muestra humedad más la masa del recipiente y su tapa (g)

$W_2$  = Masa de la muestra seca más la masa del recipiente y su tapa (g)

$W_t$  = Masa del recipiente y su tapa (g)

$W_w$  = Masa del agua (g)

$W_s$  = Masa de los sólidos (g)

### Secado del material

La norma ASTM D2216-90, establece que el secado del material se realiza en un horno de convección (HC), el cual debe mantenerse a una temperatura de  $105 \pm 5$  °C hasta obtener su masa constante, lo cual ocurre en un lapso de 16 horas aproximadamente. En caso de materiales que contengan materia orgánica, o minerales como es el yeso que contiene agua en su composición, la temperatura de secado no será mayor a 60 °C.

## 3.2 OBTENCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

Para la determinación del límite líquido LL (%) se encuentran dos metodologías; la primera empleando el método tradicional de percusión de Casagrande, y la segunda utilizando los conos penetrantes, de este último existen diferentes propuestas de conos.

### 3.2.1 Método de la Copa de Casagrande

Actualmente la determinación del límite líquido en suelos, es realizada con base en la norma ASTM D4318-05, donde se define como LL (%) al contenido de agua de la fracción de suelo que pasa la malla No. 40 (0.425 mm), cuando al ser colocada en la copa de Casagrande y efectuar en ella una ranura trapecial de dimensiones específicas, los bordes inferiores de la misma se ponen en contacto en una longitud de 13.0 mm, después de golpear la copa 25 veces, dejándola caer sobre una superficie dura de características especiales, desde una altura de 1 centímetro y a una velocidad de 2 golpes por segundo.

El LL (%) se obtiene gráficamente con la curva de fluidez (número de golpes contra contenido de agua) dicha gráfica es logarítmica en el eje de las abscisas.

También se puede obtener mediante el método simplificado, el cual se determina conociendo un solo punto de la curva de fluidez, aplicando la ecuación 3.3.

$$LL = W_N \left( \frac{N}{25} \right)^{0.12} \quad (3.3)$$

Donde:

LL= Es el límite líquido del suelo (%)

$W_N$  = Contenido de agua, a la cual le fue aplicado un número N de golpes (%).

N = Es el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm.

### 3.2.2 Método del Cono de penetración

La determinación del límite líquido se obtiene de acuerdo al procedimiento establecido por la norma británica BS 1377 (*Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes*), definiendo como LL (%) al contenido de agua de la fracción de suelo que pasa la malla No. 40 cuando al ser introducido en un recipiente cilíndrico logra una penetración establecida, mediante un cono de dimensiones y masa normalizadas bajo la acción de su propio peso durante un lapso aproximado de 5 segundos.

El LL (%) se obtiene gráficamente con la curva de fluidez, cuyos valores de penetración se ubican en el eje logarítmico de las abscisas, y en el eje de las ordenadas se colocan los contenidos de humedad; actualmente existen diferentes propuestas de conos como se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.-** Conos utilizados para determinar el LL (%) en suelos.

	Ángulo (°)	Masa (g)	Profundidad de penetración para límite líquido (mm)
<b>Cono de la USSR</b>	30	76	10.0
<b>Cono Indio</b>	31	148	25.4
<b>Cono de Georgia</b>	30	75	10.0
<b>Cono Sueco</b>	60	60	10.0
<b>Cono Francés</b>	30	80	17.0
<b>Cono Inglés</b>	30	80	20.0

### 3.3 OBTENCIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO

Para la determinación del límite plástico PL (%) se conocen dos metodologías, el método convencional de rolado propuesto por Atterberg y el cono de penetración, añadiendo una modificación al peso del cono, conocido como método de doble peso.

#### 3.3.1 Método convencional de rolado

Actualmente la determinación del límite plástico en suelos, es realizada con base en la norma ASTM D4318-05, definiendo como PL (%) al mínimo contenido de agua de la fracción de suelo que pasa la malla No. 40, requerido para que se puedan formar con ella cilindros de 3 mm de diámetro empleando una presión manual y a una frecuencia normada, debe llegar a un contenido de humedad en la que el cilindro presente fisuras, pero sin romperse y no se pueda volver a remoldar. El PL (%) se determina de acuerdo al cálculo de la ecuación 3.4.

$$PL = \frac{\sum Wi}{3} \quad (3.4)$$

Donde:

PL = Es el límite plástico del suelo (%)

Wi = Contenido de agua para cada una de las tres determinaciones (%)

#### 3.3.2 Método de doble peso

La determinación del PL (%) se obtiene siguiendo el procedimiento de la norma británica BS 1377 (*Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes*), con la particularidad de permitir cambiar la masa del cono empleado sin tener que modificar el ángulo de su punta.

Se define como PL (%) al contenido de agua de la fracción de suelo que pasa la malla No. 40 cuando al ser introducido en un recipiente cilíndrico logra una determinada

penetración, mediante un cono de dimensiones y masa propuestas bajo la acción de su propio peso durante un lapso aproximado de 5 segundos.

El PL (%) se obtiene gráficamente con la curva de fluidez, cuyos valores de penetración se ubican en el eje logarítmico de las abscisas, y en el eje de las ordenadas se colocan los contenidos de humedad; las propuestas de conos se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.-** Conos utilizados para determinar el PL (%) en suelos.

	Ángulo (°)	Masa (g)	Profundidad de penetración para límite plástico (mm)
<b>Cono Inglés</b>	30	240	20
<b>Cono de la USSR</b>	30	228	10
<b>Cono Indio</b>	31	444	25.4

### 3.4 OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE CONTRACCIÓN

Los límites de contracción se pueden clasificar de dos maneras, el primero es a través del límite de contracción lineal (CL %) y el segundo es con la contracción volumétrica (CV %), estos dos son obtenidos con base en la norma ASTM D427-04.

#### 3.4.1 Contracción lineal

La contracción lineal (CL %) de un suelo se define como la reducción que puede tener un suelo en su mayor dimensión de forma prismática rectangular, elaborado con la

fracción de suelos que pasa la malla No. 40, cuando su humedad disminuye desde la correspondiente al LL (%) hasta la del límite de contracción (LC %), expresada como un porcentaje de la longitud inicial del espécimen. La CL (%) se obtiene de acuerdo a la utilización de la ecuación 3.5.

$$CL = \frac{Li-Lf}{Li} \times 100 \quad (3.5)$$

Donde:

CL = Es la contracción lineal aproximada al décimo más cercano (%)

Li = Es la longitud inicial de la barra de suelo húmedo, que corresponde a la longitud interior del molde (cm)

Lf = Es la longitud final de la barra de suelo seco (cm)

### 3.4.2 Contracción volumétrica

Observando una gráfica de volumen del suelo en función de su contenido de humedad, observaríamos que todo suelo llega a un punto donde su volumen no decrece inclusive cuando el contenido de humedad siga disminuyendo. Es este punto, el W (%) que deseamos conocer, por lo que se aplica la ecuación 3.6 y se determina la contracción volumétrica CV (%).

$$CV = W - \left( \frac{(V_h - V_s) \gamma_w}{W_s} \right) \quad (3.6)$$

Donde:

CV = Límite de contracción volumétrica (%)

W = Humedad del suelo en el momento que fue moldeado (%)

V<sub>h</sub> = Volumen de la pastilla de suelo húmedo (cm<sup>3</sup>)

V<sub>s</sub> = Volumen de la pastilla de suelo seco (cm<sup>3</sup>)

γ<sub>w</sub> = Densidad del agua (gr/cm<sup>3</sup>)

W<sub>s</sub> = Peso del suelo seco (gr)

### 3.5 CLASIFICACIÓN SUCS

De acuerdo a la norma ASTM D2487-17, los suelos finos se clasifican según sus características de plasticidad en una arcilla (C), limo (M), suelo orgánico (O) y turbas (P<sub>t</sub>). En la Tabla 3.3 se muestra la clasificación de suelos finos de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), empleando la carta de plasticidad y los límites de consistencia.

**Tabla 3.3.- Clasificación suelos finos de acuerdo al SUCS.**

<b>SUELOS FINOS</b> Más de la mitad del material pasa la malla No. 200 (0.075 mm)	<b>LIMO Y ARCILLA</b> Límite líquido	Menor de 50%	Limos inorgánicos, limos arenosos o limos arcillosos ligeramente plásticos; polvo de roca; zona I de la carta de plasticidad.	<b>ML</b>	
			Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas arenosas, limosas, pobres, zona II de la carta de plasticidad.	<b>CL</b>	
			Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad, se ubican en la zona I de la carta de plasticidad.	<b>OL</b>	
		Mayor de 50%		Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos, se ubican en la zona III de la carta de plasticidad.	<b>MH</b>
				Arcillas inorgánicas de alta plasticidad se ubican en la zona IV de la carta de plasticidad.	<b>CH</b>
				Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad; zona III.	<b>OH</b>
		Altamente orgánicos		Turbas y otros suelos altamente orgánicos.	<b>P<sub>t</sub></b>

### 3.6 CLASIFICACIÓN INGLESA

De acuerdo a la norma BS 5930:1999, los suelos finos se clasifican según sus características de plasticidad en arcilla (C), limo (M), suelo orgánico (O) y turbas (Pt), con cinco parámetros de plasticidad, baja (L), intermedia (I), alta (H), muy alta (V) y, extremadamente alta (E). En la Tabla 3.4 se muestra la clasificación de suelos finos de acuerdo a la norma BS 5930:1999, empleando la carta de plasticidad y los límites de consistencia.

**Tabla 3.4.** Clasificación suelos finos (BS 5930).

<b>SUELOS FINOS</b>	Más de la mitad del material pasa la malla No. 200 (0.075 mm)	<b>LIMO Y ARCILLA</b> Límite líquido	< 35%	Limos inorgánicos, limos arenosos o limos arcillosos de baja plasticidad.	<b>ML</b>
				Arcillas inorgánicas de baja plasticidad, arcillas arenosas, limosas de baja plasticidad.	<b>CL</b>
			35% ≤ LL ≤ 50%	Limos inorgánicos de plasticidad intermedia.	<b>MI</b>
				Arcillas inorgánicas de plasticidad intermedia.	<b>CI</b>
			50% ≤ LL ≤ 70%	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, de alta plasticidad.	<b>MH</b>
				Arcillas inorgánicas de alta plasticidad.	<b>CH</b>
			70% ≤ LL ≤ 90%	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, de muy alta plasticidad.	<b>MV</b>
				Arcillas inorgánicas de muy alta plasticidad.	<b>CV</b>
			> 90 %	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, de plasticidad extremadamente alta.	<b>ME</b>
				Arcillas inorgánicas de plasticidad extremadamente alta.	<b>CE</b>

## 4. RESULTADOS

Para poder obtener los propósitos de esta investigación se realizó una serie de pruebas experimentales para determinar la caracterización de la diatomita, bentonita y caolín mediante los límites de consistencia; así mismo se propuso realizar mezclas de estos materiales, proponiendo las siguientes: diatomita- bentonita, diatomita- caolín y bentonita- caolín, en diferentes proporciones.

El límite líquido (LL%) fue obtenido con el método de la copa de Casagrande y los conos de penetración (sueco e inglés); el límite plástico (PL%) con el método tradicional de rolado y el método de doble peso (cono inglés); el secado del material se realizó con un horno de convección (HC) y un horno de microondas (HMO), todas las pruebas se elaboraron y trabajaron en forma simultánea. En la Tabla 4.1 se muestra el tipo de resultados obtenidos en esta investigación.

Con la utilización de otras técnicas, como el cono sueco, cono inglés y HMO, se buscó eliminar incertidumbres en la utilización de los métodos convencionales y eliminar subjetividades. Por lo anterior, la clasificación de un suelo con diferentes métodos alternativos debe ser la más clara posible.

**Tabla 4.1.** Tipo de resultados de la investigación.

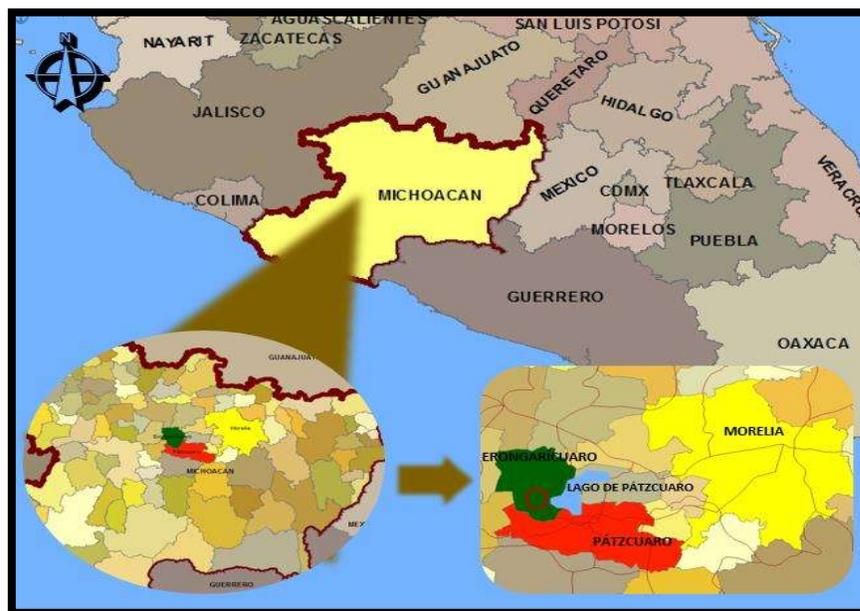
<b>Límite líquido</b>		
<b>LL</b>	Copa de Casagrande	CC
	Cono inglés	CI
	Cono sueco	CS
<b>Límite plástico</b>		
<b>LP</b>	Convencional	LP-C
	Cono inglés	LP-CI
<b>Contenido de agua</b>		
<b>w</b>	Horno de convección	HC
	Horno de microondas	HMO
<b>Límites de contracción</b>		
<b>LC</b>	Contracción lineal	CL
	Contracción volumétrica	CV

## 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

En este apartado se encuentra el proceso de muestreo, selección y preparación de las muestras en estudio; la caracterización del suelo se realizó conforme a lo señalado en el apartado 3.1 párrafo 2 de acuerdo a la carta de plasticidad y la clasificación SUCS. Adicional a lo anterior se realizó la clasificación del suelo de acuerdo al apartado 3.1 párrafo 3, empleando la carta de plasticidad inglesa.

### 4.1.1 Muestreo, selección y preparación de la muestra

Los materiales seleccionados para esta investigación fueron la diatomita, la bentonita y el caolín; el sitio del muestreo para la diatomita correspondió a la localidad de Erongarícuaro Michoacán, sobre la carretera estatal Pátzcuaro- Chupícuaro en el km 14, sus coordenadas geográficas son 19°33'52.3"N, 101°42'31.4"W (Fig. 4.1).



**Figura 4.1.** Localización del sitio de muestreo de la diatomita (imagen propia).

El muestreo se realizó tomando una porción representativa del suelo de aproximadamente 100 kg, material que se encontró en la superficie de la pared del talud así como al pie del mismo (Fig. 4.2).

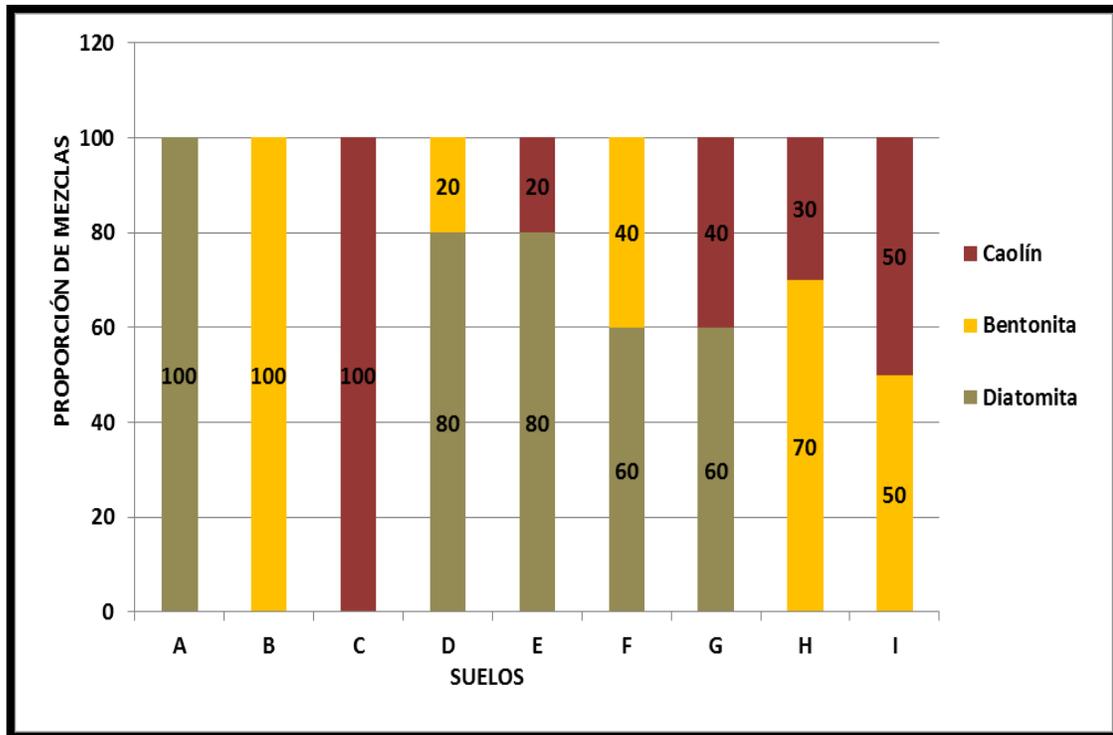


**Figura 4.2.** Muestreo de la diatomita.

Los suelos ensayados fueron la diatomita, la bentonita, y el caolín, así como algunas propuestas de mezclas y mostradas en la Tabla 4.2, así mismo están representadas en la Figura 4.3. La bentonita y el caolín se obtuvieron de forma comercial en polvo; la pureza del caolín fue del 95%.

**Tabla 4.2.** Suelos ensayados.

	Suelo	Mezclas	Origen
<b>A</b>	Diatomita	100%	Material de un depósito lacustre, Erongarícuaro Michoacán.
<b>B</b>	Bentonita	100%	Material obtenido de forma comercial.
<b>C</b>	Caolín	100%	Material obtenido de forma comercial.
<b>D</b>	Diatomita- Bentonita	80-20%	Mezcla artificial.
<b>E</b>	Diatomita- Caolín	80-20%	Mezcla artificial.
<b>F</b>	Diatomita- Bentonita	60-40%	Mezcla artificial.
<b>G</b>	Diatomita- Caolín	60-40%	Mezcla artificial.
<b>H</b>	Bentonita- Caolín	70-30%	Mezcla artificial.
<b>I</b>	Bentonita- Caolín	50-50%	Mezcla artificial.

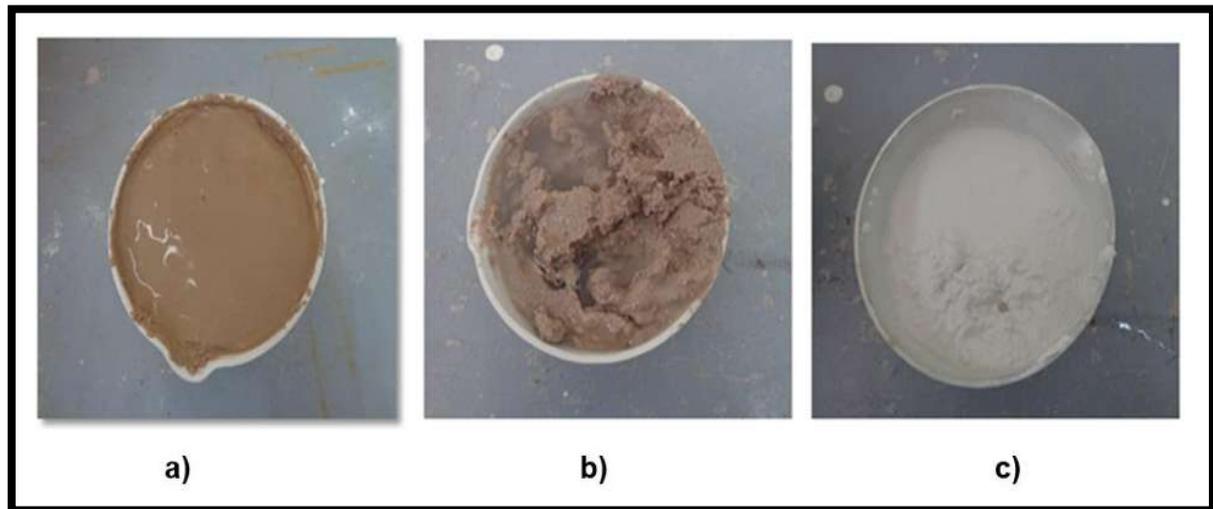


**Figura 4.3.** Suelos ensayados en porcentaje.

La preparación de la muestra se realizó conforme al apartado 3.2.1 párrafo 1, el cual consistió en separar el material obtenido en porciones, de tal manera que una vez cribada por la malla No. 40 (0.425 mm) resultaran 300 gramos para cada tipo de prueba (Fig. 4.4). Finalmente se saturó cada porción de muestra durante 48 horas aproximadamente (Fig. 4.5).



**Figura 4.4.** Cribado de la diatomita.



**Figura 4.5.** Muestras saturadas, a) Diatomita, b) Bentonita y c) Caolín.

### Secado del material

El secado fue realizado en todos los casos conforme a lo establecido en el apartado 3.1.1 párrafo 2, donde se indica que se utiliza un horno de convección eléctrica (HC) y con termostato capaz de mantener una temperatura constante de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , así como un horno de microondas (HMO) de uso doméstico, como se muestra en la Figura 4.6.



**Figura 4.6.** Hornos utilizados.

## 4.2 OBTENCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

Se aplicaron dos métodos para la obtención del LL (%), en el primer caso se utilizó la copa de Casagrande y en el segundo los conos de penetración, de este último se empleó el cono Sueco (60° Y 60 g) y el cono Inglés (30° y 80 g). El secado fue a través de un HC y un HMO, todas las pruebas fueron trabajadas y efectuadas en forma simultánea.

### 4.2.1 Límite líquido con la copa de Casagrande

Se obtuvo el límite líquido empleando la copa de Casagrande, de acuerdo a la metodología mostrada en el apartado 3.2.1 párrafo 1, cuyo procedimiento se muestra a continuación, así como el equipo utilizado, así como el número de pruebas efectivas realizadas y los resultados obtenidos.

#### Equipo utilizado

El equipo necesario para efectuar la prueba fue: copa de Casagrande, espátulas, ranurador plano y curvo, cápsulas, vidrios de reloj, franela, cápsulas de porcelana, placa de vidrio, báscula (Fig. 4.7), horno de convección y horno de microondas.



**Figura 4.7.** Equipo utilizado, LL (%) con la copa Casagrande.

### Procedimiento de la prueba

El proceso se realizó de acuerdo al apartado 3.2.1 párrafo 1, partiendo de la muestra saturada, se procedió a homogeneizar el material (Fig. 4.8), y a colocarlo en la copa de Casagrande (Fig. 4.9), de manera continua, dos fracciones de muestra extraídas de la copa de Casagrande se depositaron en vidrios de reloj para ser pesadas (Fig. 4.10). Posteriormente, se llevó una muestra y se colocó en el HC con una temperatura aproximada de 110 °C durante 24 hrs aproximadamente hasta obtener una masa constante; otra muestra fue llevada al HMO para su secado durante 3 minutos en ciclos de 30 segundos hasta masa constante (Fig. 4.11). El procedimiento anterior se repitió para dos diferentes contenidos de agua. En el Anexo A.1 se muestra el formato para registro de secado en HMO.

El límite líquido se determinó de manera gráfica mediante la curva de fluidez, la cual se obtuvo uniendo los puntos que representan los diferentes números de golpes contra los contenidos de agua. El LL (%) representa el contenido de agua correspondiente a 25 golpes.



**Figura 4.8.** Homogeneización del material.



**Figura 4.9.** Colocación y ranura del material en la copa de Casagrande.



**Figura 4.10.** Muestras de material extraídas de la copa de Casagrande.



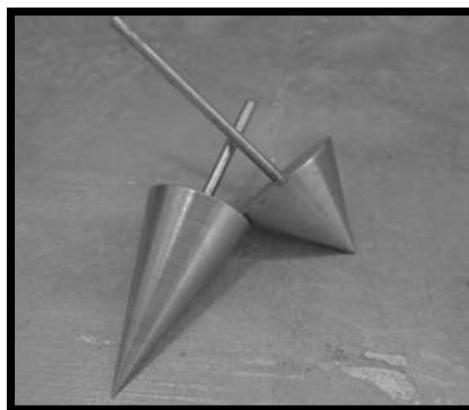
**Figura 4.11.** Secado del material (HC) y (HMO).

#### 4.2.2 Límite líquido con los conos de penetración

Se obtuvo el límite líquido empleando los conos de penetración sueco e inglés, de acuerdo a la metodología mostrada en el apartado 3.2.2 párrafo 1, la cual se muestra a continuación, así como el equipo empleado, también se incluye el número de pruebas efectivas realizadas y los resultados obtenidos.

##### Equipo utilizado

El equipo necesario para efectuar la prueba es: equipo de penetración, cono sueco (60°, 60 g), cono inglés (30°, 80 g) mostrados en la Figura 4.12, espátula, cápsulas, vidrios de reloj, franela, cápsulas de porcelana, placa de vidrio, báscula (Fig. 4.13), horno de convección y horno de microondas.



**Figura 4.12.** Cono Inglés y cono Sueco.



**Figura 4.13.** Equipo utilizado, LL (%) con los conos de penetración.

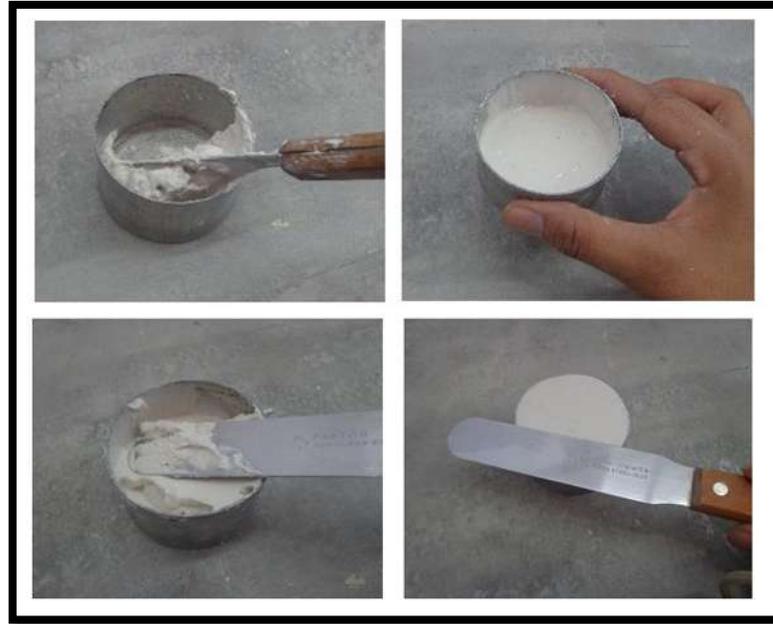
### Procedimiento de la prueba

El procedimiento fue realizado de acuerdo al apartado 3.2.2 párrafo 1. El ensayo consistió en introducir una porción de material preparada en un recipiente cilíndrico, el llenado se efectuó en tres capas asegurando la pérdida de vacíos y acomodo de las partículas (Fig. 4.14), una vez enrasado se colocó en el equipo y accionándolo, el cono cayó por su propio peso (Fig. 4.15).

Se registró el valor de penetración, y se extrajeron dos fracciones de muestra para determinar el contenido de agua (Fig. 4.16), empleando el mismo método de secado descrito en el punto 4.2.1 párrafo 3. Este procedimiento se repitió para tres diferentes contenidos de humedad en la misma muestra.

Con los datos obtenidos se realizó una curva de fluidez, los valores de penetración se ubicaron en el eje logarítmico de las abscisas, y en el eje de las ordenadas se colocaron los contenidos de humedad.

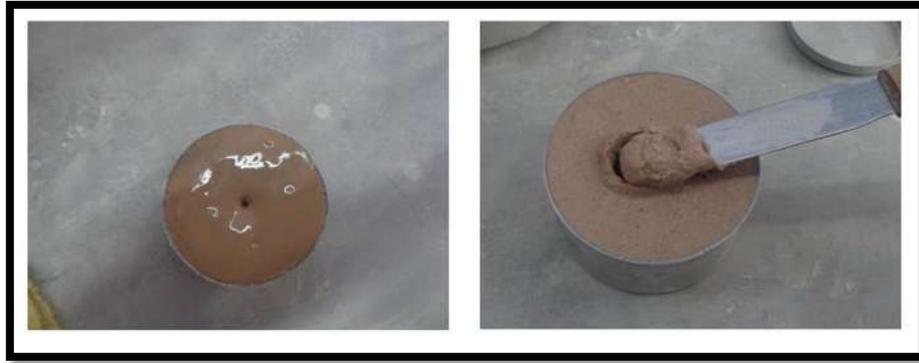
De acuerdo al apartado 3.2.2 párrafo 2, el LL (%) para el cono Sueco se midió a los 10 mm de penetración, mientras que para el cono Inglés a los 20 mm de penetración.



**Figura 4.14.** Procedimiento llenado de capsulas para LL (%).



**Figura 4.15.** Penetración de los conos Sueco e Inglés.



**Figura 4.16.** Extracción del material, conos penetrantes.

### 4.2.3 Suelos ensayados para el Límite líquido

Para la obtención del LL (%) de cada suelo y mezcla en estudio, se efectuaron un total de 251 pruebas, de las cuales 111 utilizando la copa de Casagrande, 73 el cono Sueco y 67 el cono Inglés, como se muestran en la Tabla 4.3 y en su representación gráfica (Fig. 4.17).

**Tabla 4.3.** Número de pruebas para el LL (%) a través de las diferentes técnicas.

Suelo	Pruebas LL (%)		
	Copa de Casagrande	Cono Sueco	Cono Inglés
<b>A</b>	13	8	7
<b>B</b>	17	12	10
<b>C</b>	19	15	12
<b>D</b>	8	6	6
<b>E</b>	11	6	6
<b>F</b>	9	6	6
<b>G</b>	10	6	6
<b>H</b>	12	7	7
<b>I</b>	12	7	7

Se realizaron tres combinaciones diferentes de pruebas, la primera consistió en efectuar de manera simultánea ensayos con la copa de Casagrande y el cono Sueco, la segunda con la copa de Casagrande y el cono Inglés, y el tercer ensayo fue simultáneo con la copa de Casagrande, cono Sueco y cono Inglés.

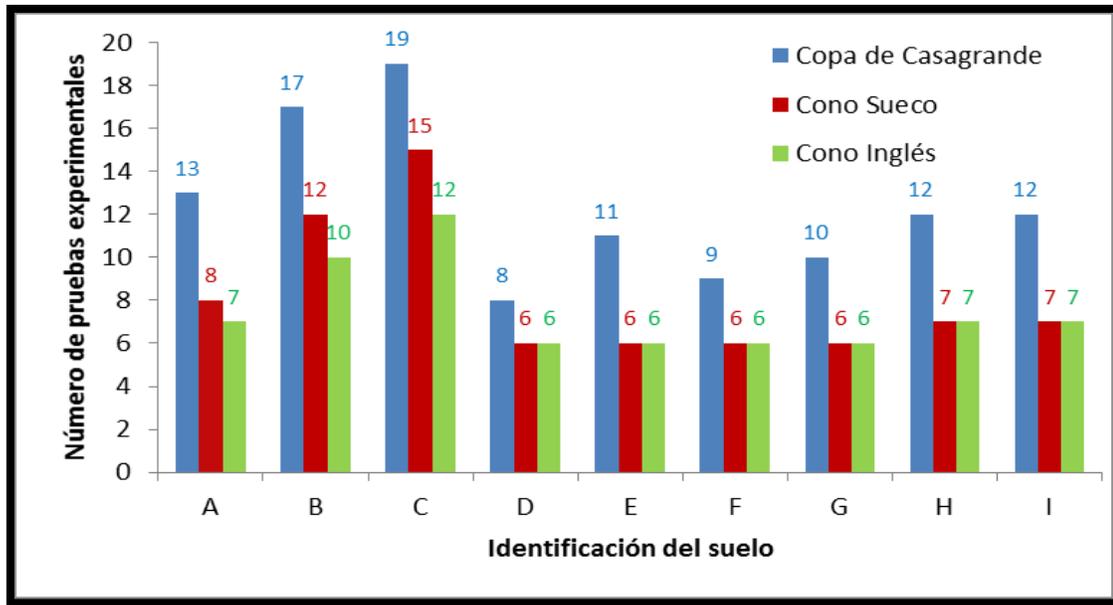


Figura 4.17. Número de pruebas para el LL (%).

#### 4.2.4 Resultados del límite líquido

Los resultados de las pruebas efectuadas para obtener el LL (%) y donde se emplearon la copa de Casagrande, los conos de penetración (sueco e inglés), aplicando el secado en el HC y el HMO, se muestran en la Tabla 4.4. En el Anexo A.2 se muestra el formato y llenado de resultados para obtención del LL (%).

Tabla 4.4. Resultados del Límite Líquido.

Suelo	Copa de Casagrande		Cono Sueco		Cono Inglés	
	HC	HMO	HC	HMO	HC	HMO
A	162.92	162.69	130.87	130.68	139.44	139.17
B	306.76	306.62	231.84	231.85	248.77	249.01
C	45.30	45.99	43.60	43.20	40.11	40.92
D	194.26	194.41	174.02	174.94	171.00	171.62
E	87.01	87.25	80.72	80.02	72.82	72.52
F	181.25	181.05	170.73	170.83	167.73	167.85
G	70.52	70.42	60.17	60.41	57.01	56.77
H	97.54	97.63	77.18	77.45	70.58	70.40
I	61.65	61.79	56.09	56.06	53.79	53.76

El análisis estadístico de resultados consistió en comparar los valores obtenidos con la copa de Casagrande y los conos penetrantes, añadiendo la variable de secado en el HC y HMO, mediante una correlación lineal entre métodos.

### Cono Sueco y Copa de Casagrande

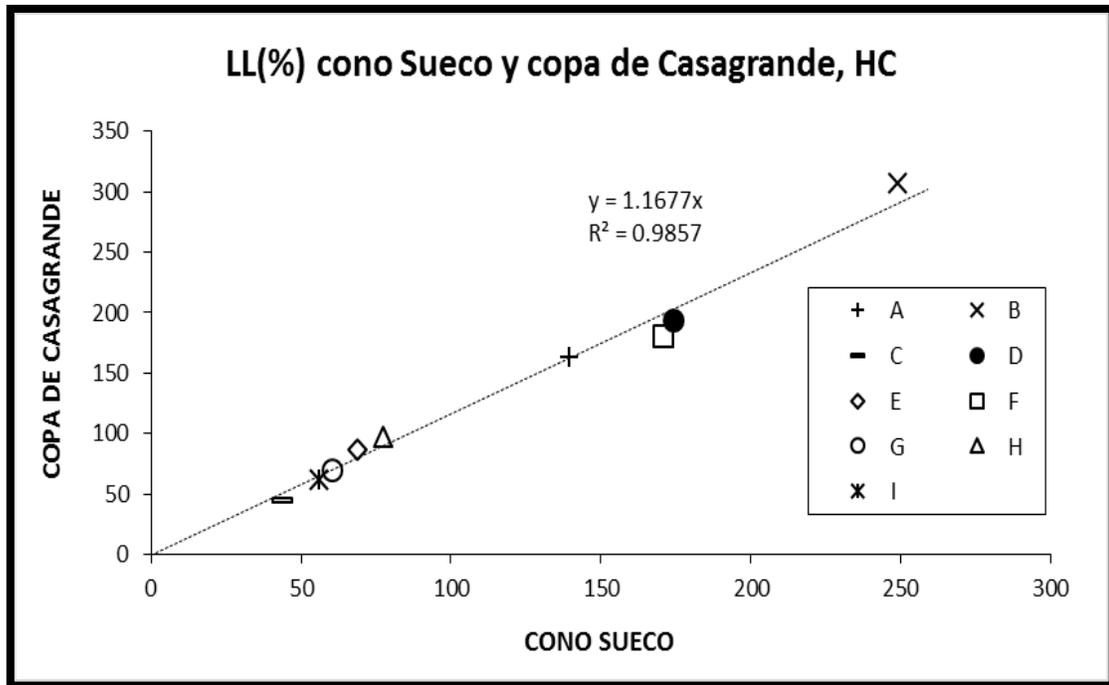
Los primeros resultados consisten entre el cono Sueco y la copa de Casagrande. En la Tabla 4.5 se muestran las comparaciones de los resultados del LL (%) entre el cono sueco (valores de X) y la Copa de Casagrande (valores de Y) utilizando el secado en HC; incluyendo la diferencia relativa en porcentaje y valores de la recta de regresión.

En su representación gráfica (Fig. 4.18) se muestra la correlación lineal y ecuación de la recta de regresión. Los datos procesados de la recta de regresión son mostrados en el Anexo B.1.

**Tabla 4.5.** Comparación de resultados entre el cono Sueco y la copa de Casagrande, HC.

#### LL (%) cono Sueco y Copa de Casagrande con el HC

Suelo	Copa de Casagrande (Y)	Cono Sueco (X)	Dif	Dif rel (%)	Y reg
<b>A</b>	162.92	139.44	23.48	16.8%	162.83
<b>B</b>	306.76	248.77	58.00	23.3%	290.49
<b>C</b>	45.30	43.60	1.70	3.9%	50.91
<b>D</b>	194.26	174.02	20.24	11.6%	203.20
<b>E</b>	87.01	80.72	6.29	7.8%	80.24
<b>F</b>	181.25	170.73	10.52	6.2%	199.37
<b>G</b>	70.52	60.17	10.35	17.2%	70.26
<b>H</b>	97.54	77.18	20.36	26.4%	90.13
<b>I</b>	61.65	56.09	5.56	9.9%	65.50



**Figura 4.18.** Correlación lineal del cono Sueco y la copa de Casagrande, HC.

El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) resultó de 0.9857 lo cual denota la excelente relación que hay entre las determinaciones obtenidas para el LL (%) con el cono Sueco y con la copa de Casagrande mediante el secado en el horno de convección.

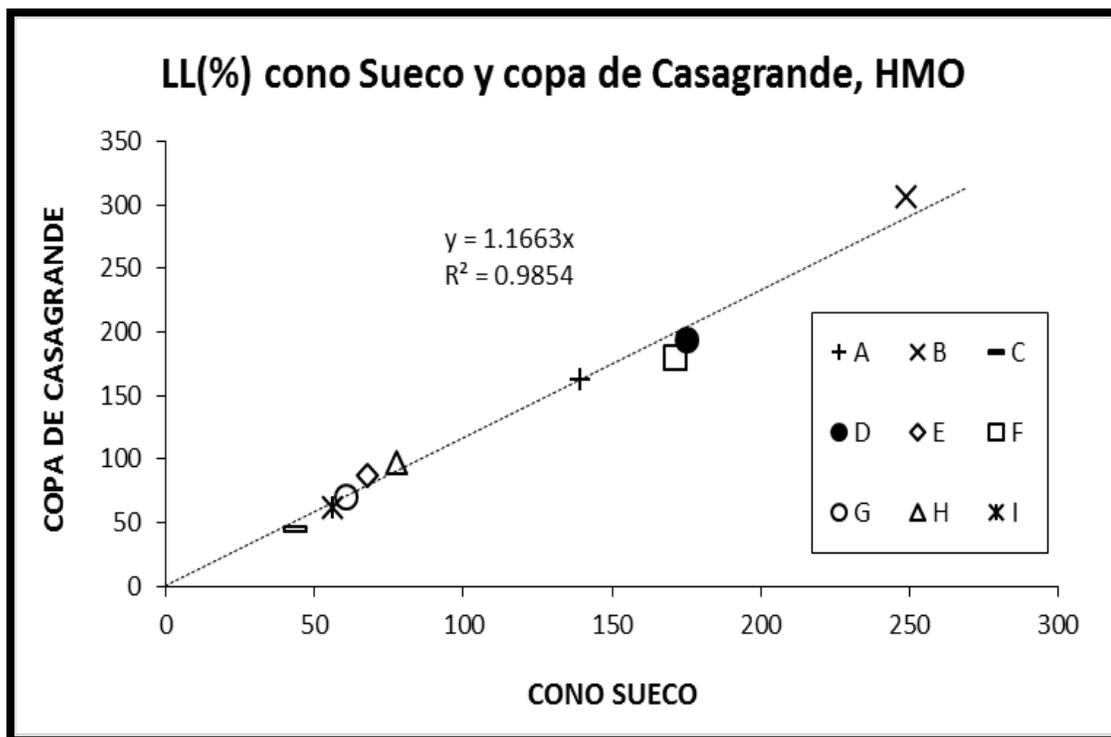
De manera general los resultados obtenidos con la copa de Casagrande arrojaron valores superiores a los determinados con el cono sueco; observando que la diferencia aumentaba conforme los valores del LL (%) fueran incrementando. Estadísticamente se puede afirmar que la obtención del LL (%) utilizando el cono sueco es viable, y su valor es correlacionable con los de la copa de Casagrande.

De la misma forma se realizaron comparaciones de resultados del LL (%) entre el cono Sueco (valores de X) y la Copa de Casagrande (valores de Y) empleando el secado en HMO (Tabla 4.6); incluyendo la diferencia relativa en porcentaje y valores de la recta de regresión; en su representación gráfica (Fig. 4.19), se muestra la correlación lineal y ecuación de la recta de regresión. Los datos procesados de la recta de regresión son mostrados en el Anexo B.2.

**Tabla 4.6.** Comparación de resultados entre el cono Sueco y la copa de Casagrande, HMO.

**LL (%) cono Sueco y copa de Casagrande con el HMO**

Suelo	Copa de Casagrande (Y)	Cono Sueco (X)	Dif	Dif rel (%)	Y reg
A	162.69	139.17	23.52	16.9%	162.32
B	306.62	249.01	57.61	23.1%	290.43
C	45.99	43.20	2.79	6.5%	50.38
D	194.41	174.94	19.48	11.1%	204.04
E	87.25	80.02	7.23	9.0%	79.34
F	181.05	170.83	10.22	6.0%	199.25
G	70.42	60.41	10.00	16.6%	70.46
H	97.63	77.45	20.18	26.0%	90.34
I	61.79	56.06	5.73	10.2%	65.39



**Figura 4.19.** Correlación lineal del cono Sueco y la copa de Casagrande, HMO.

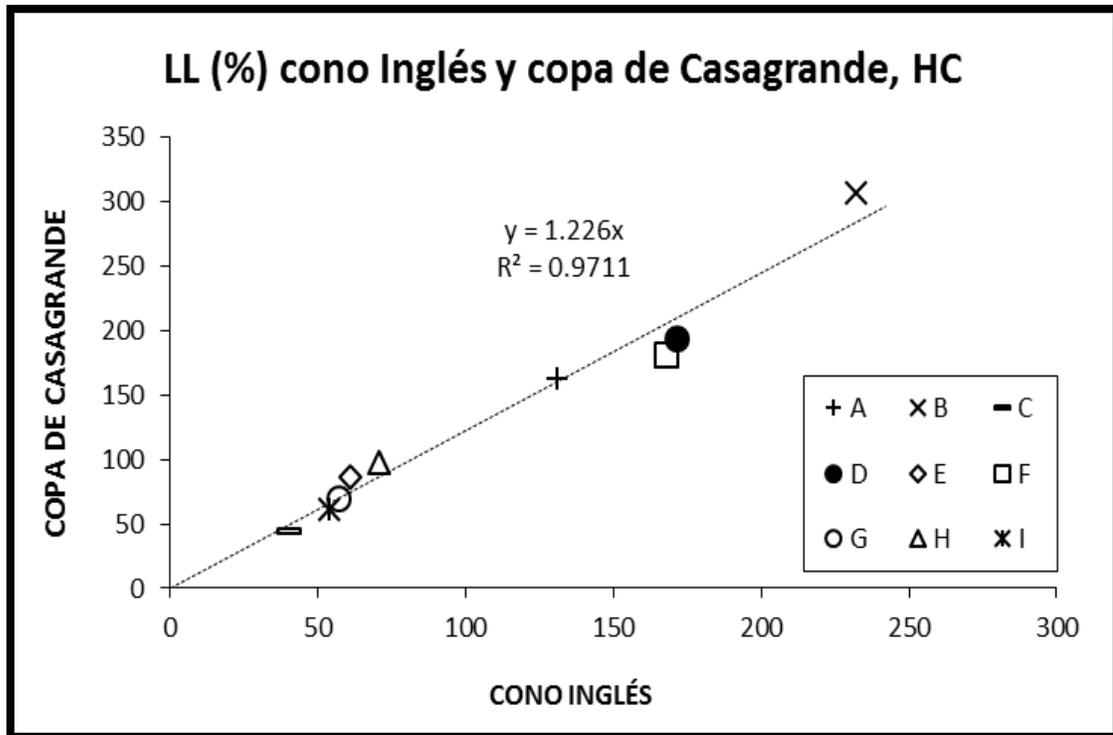
El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) resultó de 0.9854, cuyo valor no muestra diferencia significativa con el obtenido en el HC, mostrando una buena relación entre las determinaciones obtenidas para el LL (%) con el cono Sueco y la copa de Casagrande mediante el secado en el horno de microondas. De la misma manera los resultados obtenidos con la copa de Casagrande arrojaron valores superiores a los determinados con el cono Sueco; observando que la diferencia aumentaba conforme los valores del LL (%) fueran incrementando. Es importante destacar que con el HMO el tiempo de realización de la prueba se reduce notablemente, incluso para contenidos de agua superiores a 300%.

### Cono Ingles y Copa de Casagrande

Posteriormente se realizó el análisis estadístico, entre el cono Inglés y la copa de Casagrande. En la Tabla 4.7 se muestran las comparaciones de los resultados del LL (%) correspondientes al cono Inglés (valores de X) y la Copa de Casagrande (valores de Y) empleando el secado en HC; se incluye la diferencia relativa en porcentaje y valores de la recta de regresión. En su representación gráfica (Fig. 4.20), se muestra la correlación lineal y la ecuación de la recta de regresión. Los datos procesados de la recta de regresión son mostrados en el Anexo B.3.

**Tabla 4.7.** Comparación de resultados entre el cono Inglés y la copa de Casagrande, HC.

LL (%) cono Inglés y Copa de Casagrande con el HC					
Suelo	Copa de Casagrande (Y)	Cono Inglés (X)	Dif	Dif rel (%)	Y reg
<b>A</b>	162.92	130.87	32.05	24.5%	160.45
<b>B</b>	306.76	231.84	74.92	32.3%	284.24
<b>C</b>	45.30	40.11	5.19	12.9%	49.18
<b>D</b>	194.26	171.00	23.25	13.6%	209.66
<b>E</b>	87.01	72.82	14.19	19.5%	74.56
<b>F</b>	181.25	167.73	13.52	8.1%	205.65
<b>G</b>	70.52	57.01	13.50	23.7%	69.90
<b>H</b>	97.54	70.58	26.96	38.2%	86.54
<b>I</b>	61.65	53.79	7.86	14.6%	65.95



**Figura 4.20.** Correlación lineal del cono Inglés y la copa de Casagrande, HC.

El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) resultó de 0.9711, valor relativamente inferior al obtenido con el cono Sueco, sin embargo muestra buena relación entre las determinaciones obtenidas para el LL (%) con el cono Inglés y la copa de Casagrande mediante el secado en el horno de convección.

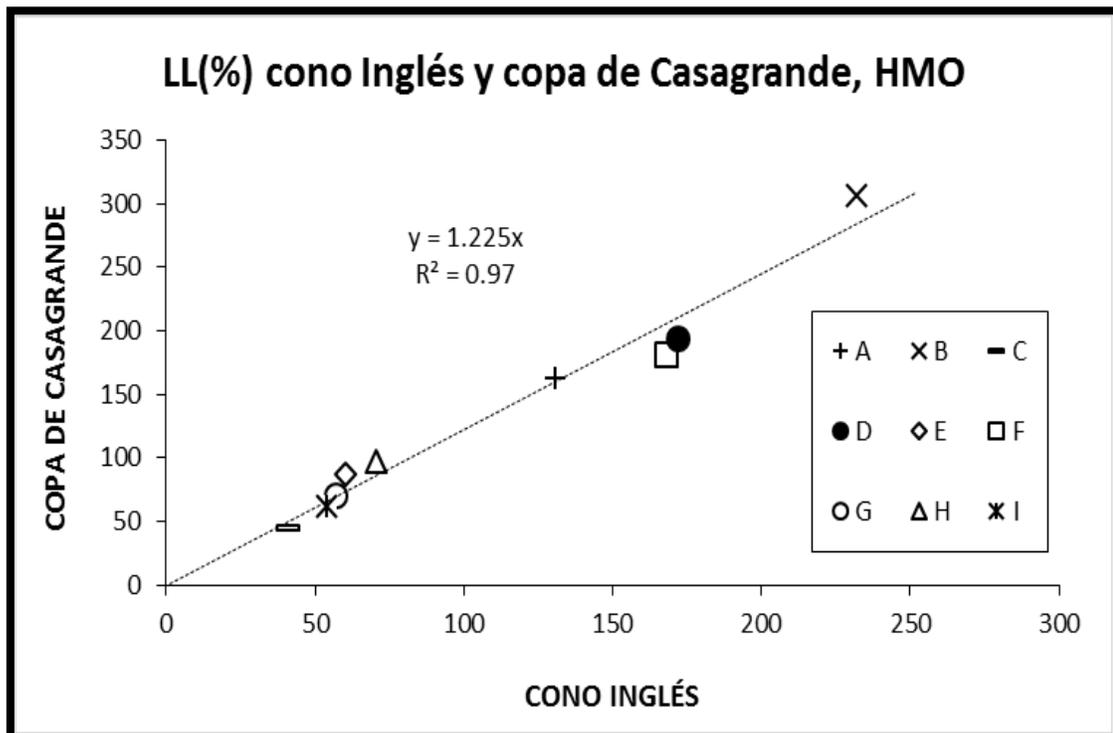
La tendencia es muy similar con ambos conos, las diferencias se esperaban por tener diferente forma y masa del cono; así como la definición de LL (%).

De la misma manera se hicieron comparaciones de resultados del LL (%) entre el cono Inglés (valores de X) y la Copa de Casagrande (valores de Y) empleando secado en HMO; incluyendo la diferencia relativa en porcentaje y valores de la recta de regresión (Tabla 4.8). En su representación gráfica (Fig. 4.21), se muestra la correlación lineal y ecuación de la recta de regresión. Los datos procesados de la recta de regresión son mostrados en el Anexo B.4.

**Tabla 4.8.** Comparación de resultados entre el cono Sueco y la copa de Casagrande, HMO.

**LL (%) cono Inglés y copa de Casagrande con el HMO**

Suelo	Copa de Casagrande (Y)	Cono Inglés (X)	Dif	Dif rel (%)	Y reg
A	162.69	130.68	32.01	24.5%	160.08
B	306.62	231.85	74.77	32.2%	284.02
C	45.99	40.92	5.07	12.4%	50.12
D	194.41	171.62	22.80	13.3%	210.23
E	87.25	72.52	14.74	20.3%	74.13
F	181.05	167.85	13.20	7.9%	205.62
G	70.42	56.77	13.65	24.0%	69.54
H	97.63	70.40	27.23	38.7%	86.24
I	61.79	53.76	8.03	14.9%	65.86

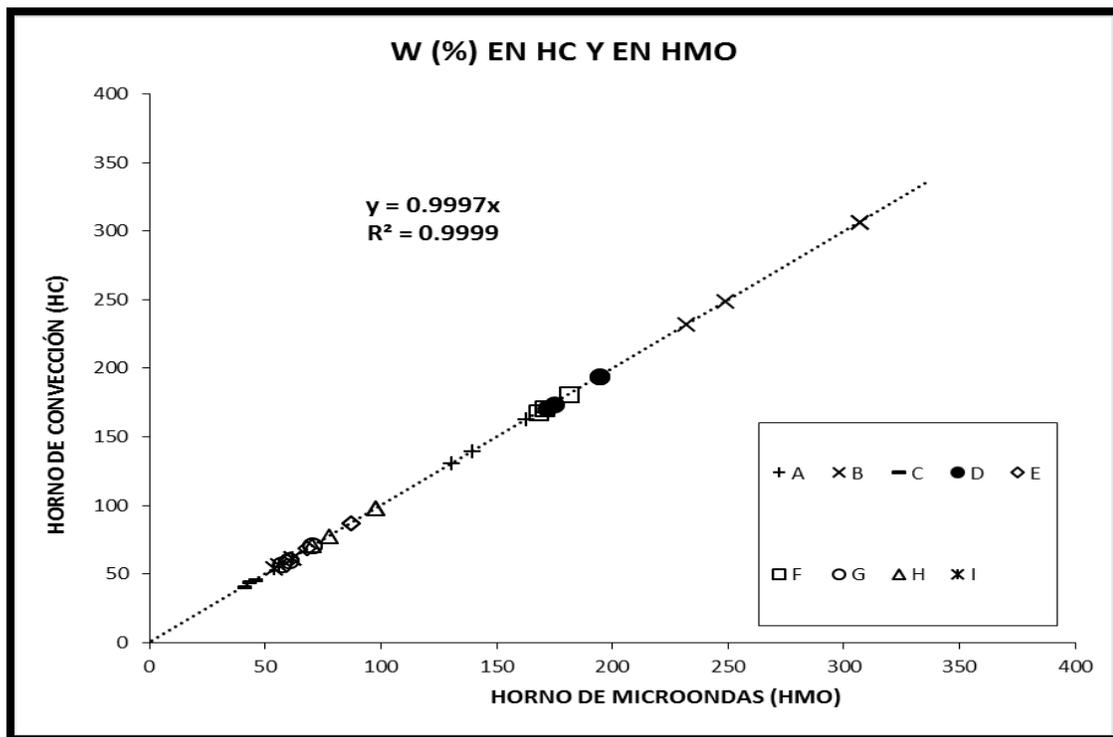


**Figura 4.21.** Correlación lineal del cono Sueco y la copa de Casagrande, HM.

El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) resultó de 0.97, cuyo valor no muestra diferencia significativa con el obtenido en el HC, mostrando una buena relación entre las determinaciones obtenidas para el LL (%) con el cono Inglés y la copa de Casagrande mediante el secado en el horno de microondas.

### Horno de convección y horno de microondas

El empleo del HMO reduce el tiempo de realización de la prueba hasta en un 90%. En la Figura 4.22 se muestran la correlación lineal del W (%) secado en HMO (valores de X) y HC (valores de Y). Los datos procesados de la recta de regresión son mostrados en el Anexo B.5.



**Figura 4.22.** Contenidos de humedad, secados en HC y HMO.

Estadísticamente se puede afirmar que la obtención del LL (%) utilizando los conos penetrantes y secado en HMO es viable, y su valor es correlacionable con los de la copa de Casagrande.

### 4.3 OBTENCIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO

Para la obtención del PL (%), se utilizó el método convencional de rolado y únicamente el cono de penetración inglés; donde se hizo una modificación a su peso. El secado fue a través de un HC y un HMO, todas las pruebas fueron realizadas en forma simultánea.

#### 4.3.1 Límite plástico con el método convencional de rolado

El procedimiento del método convencional de rolado, de acuerdo a la metodología mostrada en el apartado 3.3.1 párrafo 1, se presenta a continuación, así como el equipo utilizado, el número de pruebas efectivas realizadas y los resultados obtenidos.

#### Equipo empleado

El equipo necesario para efectuar la prueba es: espátulas, cápsulas, vidrios de reloj, franela, cápsulas de porcelana, placa de vidrio, alambre de acero, báscula (Fig. 4.23), horno de convección y horno de microondas.



*Figura 4.23. Equipo empleado para determinar el PL (%).*

#### Procedimiento de la prueba

El procedimiento se hizo de acuerdo al apartado 3.3.1 párrafo 1. De manera continua se tomó una porción, de tamaño tal que se pudiera formar una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, la cual se fue moldeando con los dedos para

que perdiera agua, se manipuló sobre la palma de la mano para formar un cilindro (rollito). Posteriormente, se giró con los dedos el cilindro sobre la placa de vidrio, hasta lograr reducir su diámetro hasta 3 mm en toda su longitud. La velocidad de girado fue de 60 a 80 ciclos por minuto. Se realizó el procedimiento anterior hasta lograr que el cilindro se rompiera en tres segmentos, precisamente en el momento de alcanzar los 3 mm de diámetro, el cual se comparó con el alambre de referencia.

Inmediatamente se colocaron sobre dos vidrios de reloj para ser pesados, una muestra fue secada en el HC con una temperatura aproximada de 110 °C durante 24 hrs aproximadamente hasta obtener una masa constante; la otra muestra fue llevada al HMO durante 2 minutos en ciclos de 30 segundos hasta masa constante, en la Figura 4.24 se muestra el procedimiento convencional de rolado. La prueba se efectuó por triplicado, obteniendo para cada una de las determinaciones el contenido de agua. Con los datos obtenidos de W (%) se obtuvo el PL (%) aplicando la ecuación 3.4.



**Figura 4.24.** Límite plástico, método convencional de rolado.

### 4.3.2 Límite plástico con el cono Inglés

Se obtuvo el límite plástico empleando el cono penetrante Inglés, de acuerdo a la metodología mostrada en el apartado 3.3.2 párrafo 1, cuyo procedimiento se muestra en seguida, así como el equipo utilizado, el número de pruebas efectivas realizadas y los resultados obtenidos.

#### Equipo utilizado

El equipo necesario para efectuar la prueba es: equipo de penetración, cono Inglés (30°, 240 g) espátula, cápsulas, vidrios de reloj, franela, cápsulas de porcelana, placa de vidrio, báscula (Fig. 4.25), horno de convección y horno de microondas.



*Figura 4.25. Equipo utilizado para obtener el límite plástico a través del cono Inglés.*

#### Procedimiento de la prueba

El procedimiento fue realizado de acuerdo al apartado 3.3.2 párrafo 1, añadiendo la modificación de masa al cono Inglés. El ensayo consistió en introducir una porción de material preparado en un recipiente cilíndrico, el llenado se efectuó en tres capas asegurando la pérdida de vacíos y acomodo de las partículas, una vez enrasado se colocó en el equipo de prueba, enseguida se liberó el cono cayendo por su propio peso.

Se registró el valor de penetración, y se extrajeron dos fracciones de muestra para determinar el contenido de agua, empleando el mismo método de secado descrito en el punto 4.3.1 párrafo 3. La prueba se efectuó por triplicado, obteniendo el contenido de agua en cada punto de penetración.

Con los datos obtenidos se realizó una curva de fluidez, los valores de penetración se ubicaron en el eje logarítmico de las abscisas, y en el eje de las ordenadas se colocaron los contenidos de humedad. El PL (%) se midió a los 20 mm de penetración, en todos los casos.

### 4.3.3 Suelos ensayados para el límite plástico

Para la obtención del PL (%) de cada suelo y mezcla en estudio, se efectuaron un total de 222 pruebas, de las cuales 111 empleando los rollitos de 3 mm, la misma cantidad se utilizó para el cono Inglés con la modificación de su peso (240 g), lo anterior se muestran en la Tabla 4.9, y en su representación gráfica en la Figura 4.26. Todos los ensayos fueron realizados de forma simultánea.

**Tabla 4.9.** Número de pruebas para el LP (%).

Suelo	Pruebas LP (%)	
	Método convencional de rolado	Método del doble peso, cono Inglés
A	13	13
B	17	17
C	19	19
D	8	8
E	11	11
F	9	9
G	10	10
H	12	12
I	12	12

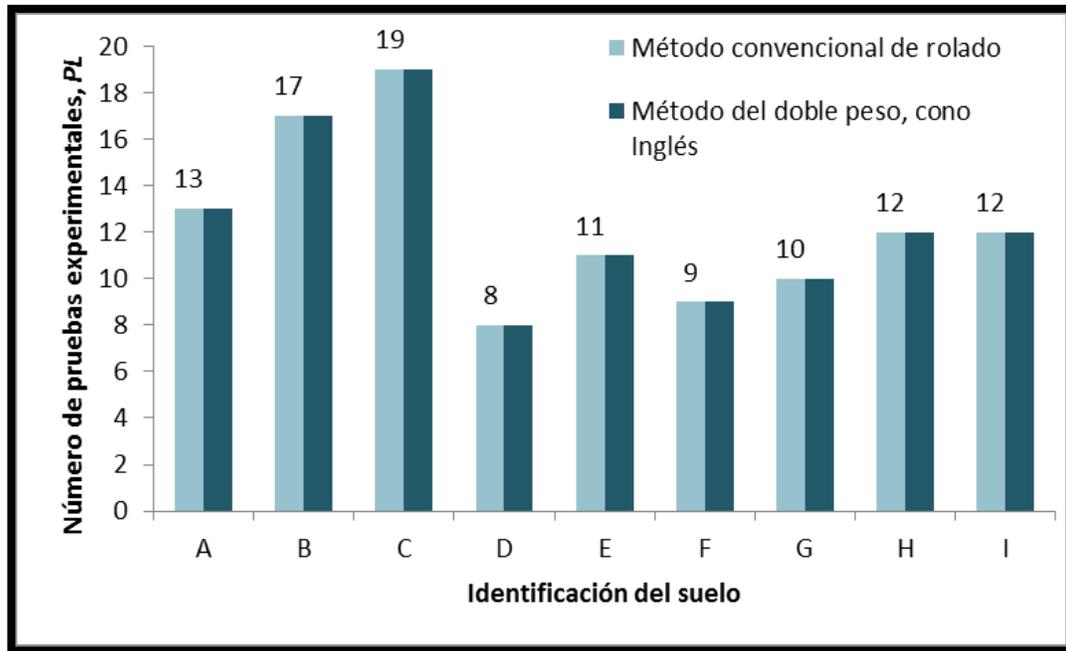


Figura 4.26. Número de pruebas para el PL (%).

#### 4.3.4 Resultados del límite plástico

Los resultados de las pruebas efectuadas que se realizaron para obtener el PL (%) utilizando el método convencional de rolado, el uso del cono inglés considerando la modificación de su peso, y utilizando el secado en el HC y el HMO, son mostrados en la Tabla 410. En el Anexo A.3 se muestra el formato y llenado de resultados para obtención del PL (%).

Tabla 4.10. Resultados del Límite plástico.

Suelo	Método convencional de rolado		Cono Inglés	
	HC	HM	HC	HM
A	89.16	87.83	72.64	71.31
B	61.77	60.90	43.32	42.45
C	23.29	23.80	18.69	19.20
D	82.12	82.32	68.22	68.42
E	66.13	66.17	49.23	49.27
F	76.92	77.07	70.84	70.97
G	46.02	46.06	30.34	30.38
H	51.26	51.76	35.46	35.96
I	42.46	42.96	31.26	31.76

De la misma manera que para el LL (%), el análisis estadístico de resultados del PL (%) consistió en comparar los valores obtenidos con el cono Inglés y el método convencional de rolado, añadiendo la variable de secado en el HC y HMO, mediante una correlación lineal entre métodos.

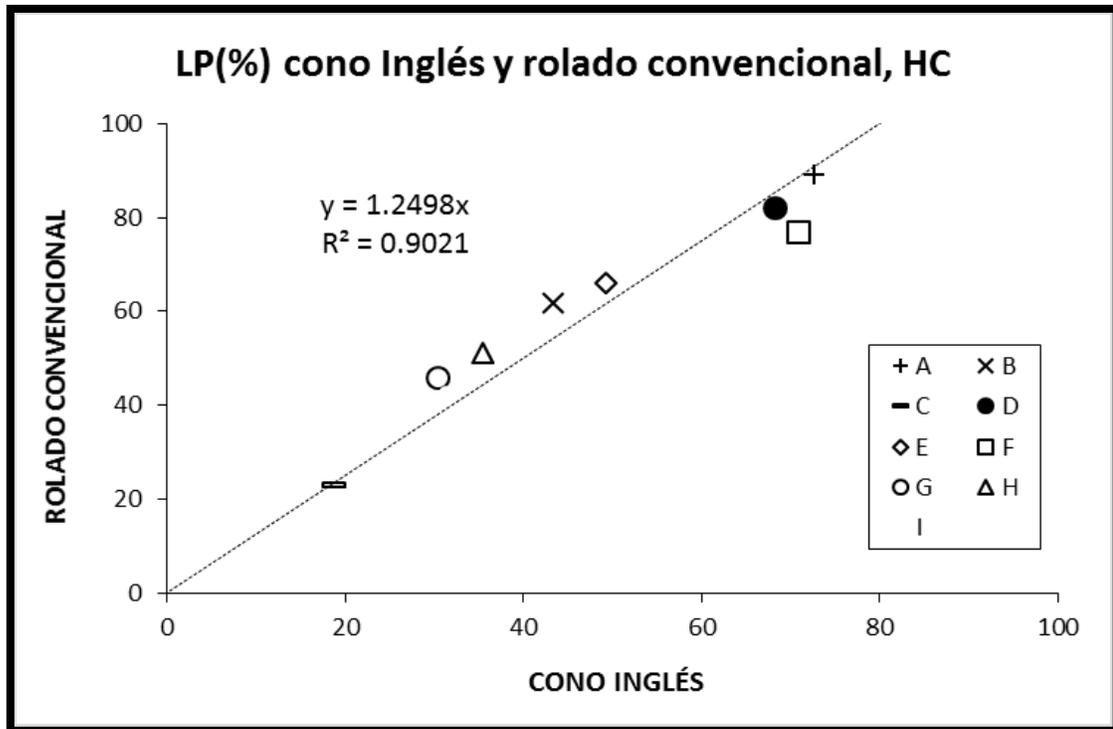
### Cono Inglés y rolado convencional

La primera determinación consistió entre el cono inglés y el método convencional de rolado. En la Tabla 4.11 se muestran las comparaciones de resultados del PL (%) entre el cono Inglés (valores de X) y método convencional de rolado (valores de Y) empleando secado en HC; incluyendo la diferencia relativa en porcentaje y valores de la recta de regresión.

En su representación gráfica (Fig. 4.27) se muestra la correlación lineal y ecuación de la recta de regresión. Los datos procesados de la recta de regresión son mostrados en el Anexo B.6.

**Tabla 4.11.** Comparación de resultados entre el cono Inglés y rolado convencional, HC.

LP (%) cono Inglés y rolado convencional con el HC					
Suelo	Rolado convencional (Y)	Cono Inglés (X)	Dif	Dif rel (%)	Y reg
<b>A</b>	89.16	72.64	16.52	22.7%	90.78
<b>B</b>	61.77	43.32	18.45	42.6%	54.14
<b>C</b>	23.29	18.69	4.60	24.6%	23.36
<b>D</b>	82.12	68.22	13.90	20.4%	85.25
<b>E</b>	66.13	49.23	16.90	34.3%	61.53
<b>F</b>	76.92	70.84	6.09	8.6%	88.53
<b>G</b>	46.02	30.34	15.68	51.7%	37.92
<b>H</b>	51.26	35.46	15.80	44.6%	44.32
<b>I</b>	42.46	31.26	11.20	35.8%	39.07



**Figura 4.27.** Correlación lineal del cono Inglés y rolado convencional, HC.

El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) para el horno de convección resultó de 0.9021, la correlación denota buena relación entre las determinaciones obtenidas para el PL (%) con el cono Inglés y rolado convencional, utilizando un horno de convección en el secado del material.

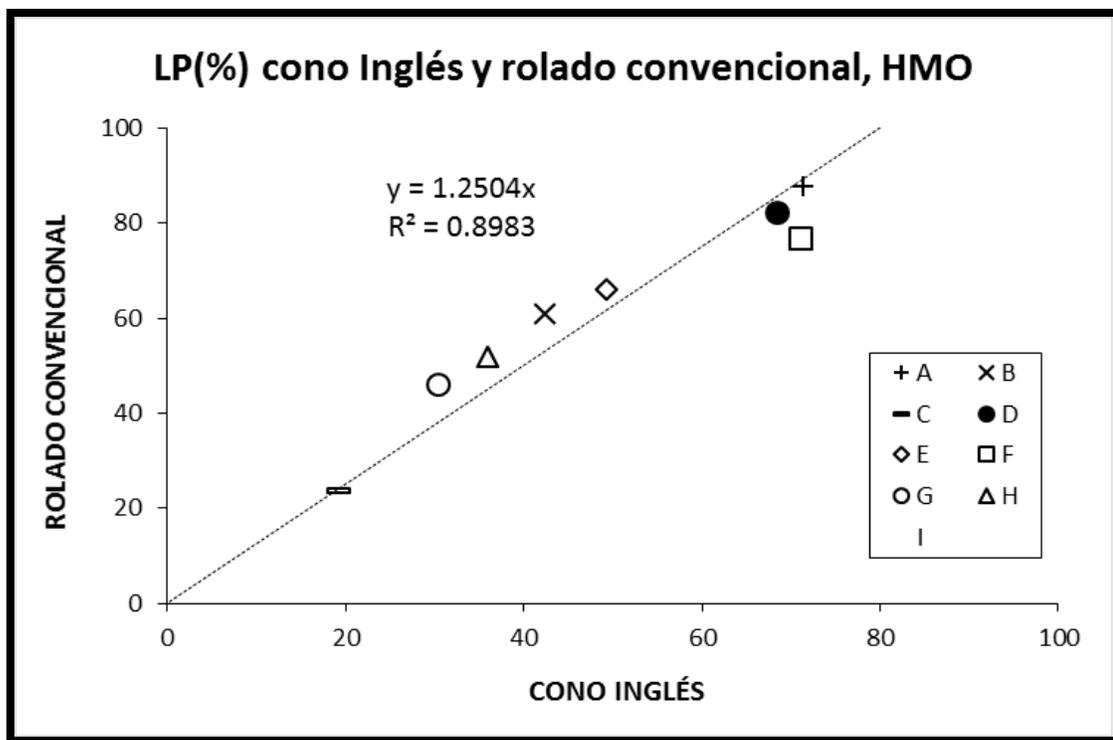
De manera general los resultados obtenidos con el cono Inglés arrojaron valores inferiores a los determinados con el método convencional de rolado; observando que la diferencia aumentaba conforme los valores del W (%) fueran aumentando.

De la misma forma se realizaron comparaciones de los resultados del PL (%) entre el cono Inglés (valores de X) y el método convencional de rolado (valores de Y) secado en HMO (Tabla 4.12); incluyendo la diferencia relativa en porcentaje y valores de la recta de regresión; en su representación gráfica (Fig. 4.28) se muestra la correlación lineal y la ecuación de la recta de regresión. Los datos procesados de la recta de regresión son mostrados en Anexo B.7.

**Tabla 4.12.** Comparación de resultados entre el cono Inglés y rolado convencional, HMO.

**LP (%) cono Inglés y rolado convencional con el HMO**

Suelo	Rolado convencional (Y)	Cono Inglés (X)	Dif	Dif rel (%)	Y reg
A	87.83	71.31	16.52	23.2%	89.17
B	60.90	42.45	18.45	43.5%	53.08
C	23.80	19.20	4.60	24.0%	24.01
D	82.32	68.42	13.90	20.3%	85.55
E	66.17	49.27	16.90	34.3%	61.60
F	77.07	70.97	6.10	8.6%	88.74
G	46.06	30.38	15.68	51.6%	37.99
H	51.76	35.96	15.80	43.9%	44.97
I	42.96	31.76	11.20	35.3%	39.72

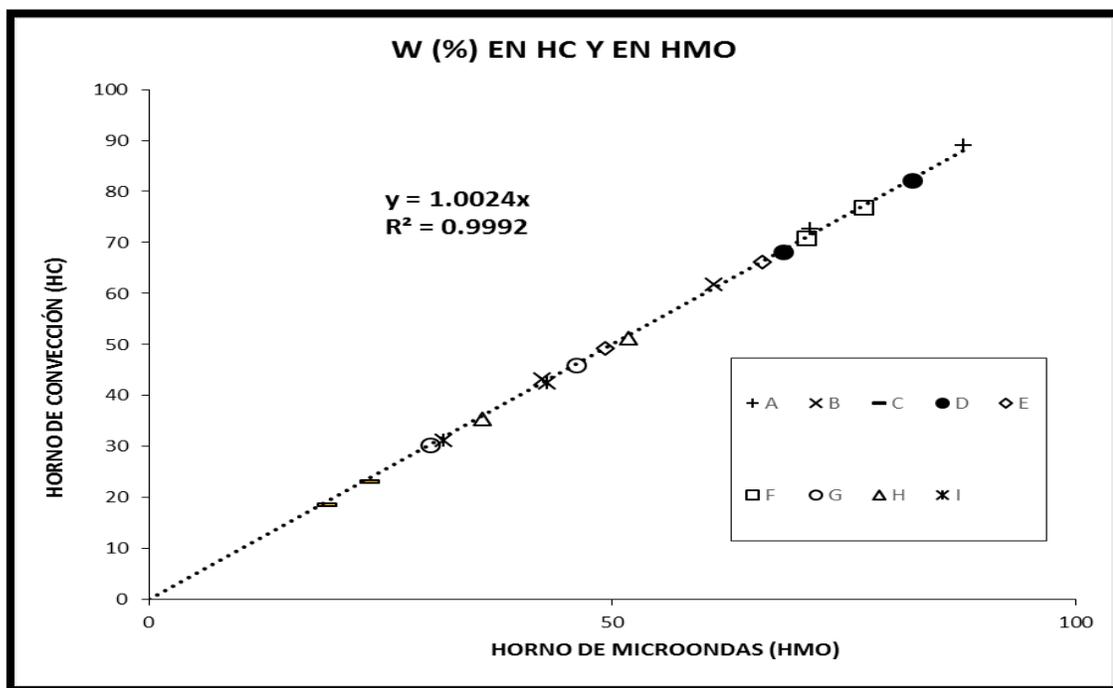


**Figura 4.28.** Correlación lineal del cono Inglés y rolado convencional, HMO.

El coeficiente de correlación (R2) para el horno de microondas resultó de 0.8983; valor relativamente diferente al obtenido con el HC, sin embargo muestra buena relación entre los resultados de ambos métodos.

### Horno de convección y horno de microondas

En la Figura 4.29 se muestran la correlación lineal del W (%) secado en HMO (valores de X) y HC (valores de Y). Los datos procesados de la recta de regresión son mostrados en el Anexo B.8.



**Figura 4.29.** Contenidos de humedad, secados en HC y HMO.

La propuesta de la determinación del PL (%) mediante la aplicación de los conos penetrantes, resulta promisoría. Con base a las correlaciones obtenidas, estadísticamente se puede afirmar que la determinación del LP (%) utilizando el cono inglés (con la modificación de peso) y empleando un secado en el horno de microondas es viable, y sus valores son correlacionales con los del método convencional propuesto por Atterberg.

## 4.4 OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE CONTRACCIÓN

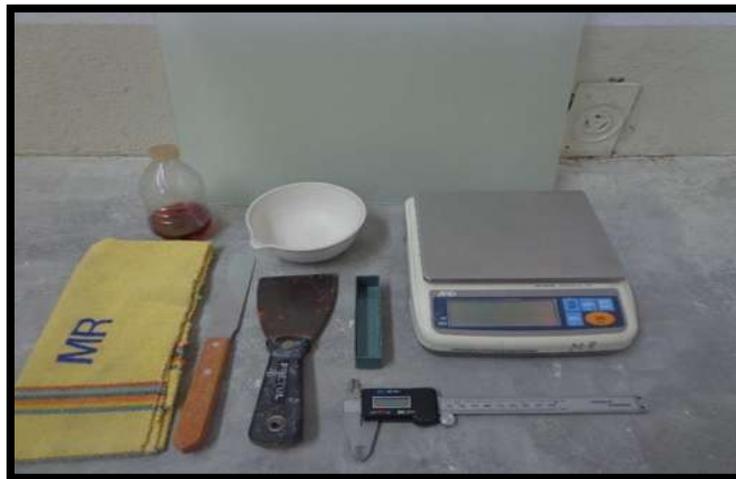
Los límites de contracción tanto lineal como volumétrica se obtuvieron por el método tradicional y el secado únicamente en el HC, de acuerdo al apartado 3.4 párrafo 1.

### 4.4.1 Límite de contracción lineal

El procedimiento para el límite de contracción lineal se muestra a continuación, así como el equipo utilizado, el número de pruebas efectivas realizadas y los resultados obtenidos.

#### Equipo utilizado

El equipo necesario para efectuar la prueba es: espátulas, franela, cápsula de porcelana, placa de vidrio, moldes de lámina galvanizada del N° 16, con sección de 2 por 2 cm y de 10 cm de longitud, franela, báscula, grasa, vernier (Fig. 4.30), y horno de convección.



*Figura 4.30. Equipo utilizado para determinar CL (%).*

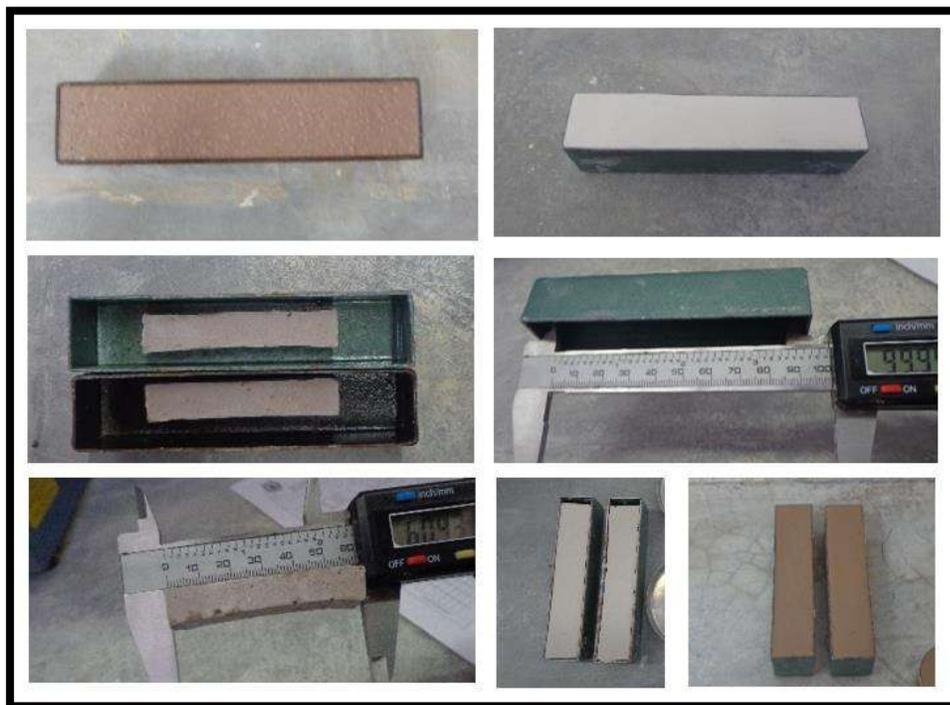
#### Procedimiento de la prueba

El procedimiento se realizó de acuerdo al apartado 3.4.1 párrafo 1. Se utilizó la copa de Casagrande y se tomó una porción del material ya ensayado anteriormente, tal que su

contenido de agua correspondiera al LL (%) del suelo. Posteriormente se procedió a llenar el molde de prueba, al cual se le aplicó previamente una capa delgada de grasa en su interior para evitar que el material fuera adherido a sus paredes; el llenado se efectuó en tres capas asegurando la pérdida de vacíos y acomodo de las partículas.

A continuación se enrasó el molde, dejándose en la sombra, y una vez que cambió ligeramente su tonalidad, se introdujo al HC teniendo una temperatura aproximada de 110 °C durante 24 hrs aproximadamente hasta obtener una masa constante, en la Figura 4.31 se muestra el procedimiento para la contracción lineal del suelo; esta se realizó por triplicado, obteniendo el W (%) para cada una de las muestras.

Finalmente se tomó la longitud media de la barra seca fuera del molde ( $L_f$ ), y la longitud interna del molde ( $L_i$ ). La CL (%) del suelo se determinó a través de la aplicación de la ecuación 3.5.



**Figura 4.31.** Contracción lineal del suelo.

#### 4.4.2 Límite de Contracción Volumétrica

El procedimiento para el límite de contracción volumétrica se muestra a continuación, así como el equipo utilizado, y los resultados obtenidos.

##### Equipo utilizado

El equipo necesario para efectuar la prueba es: plato de evaporación de porcelana, de aproximadamente 140 mm de diámetro, espátulas, molde cilíndrico metálico con el fondo plano y de aproximadamente 44 mm de diámetro y 12 mm de altura, regla de enrase, taza de vidrio, placa de vidrio con 3 puntas para sumergir la muestra, báscula, mercurio suficiente para llenar la taza de vidrio, guantes de protección, franela, grasa (Fig. 4.32), y horno de convección.



*Figura 4.32. Equipo utilizado para determinar CV (%).*

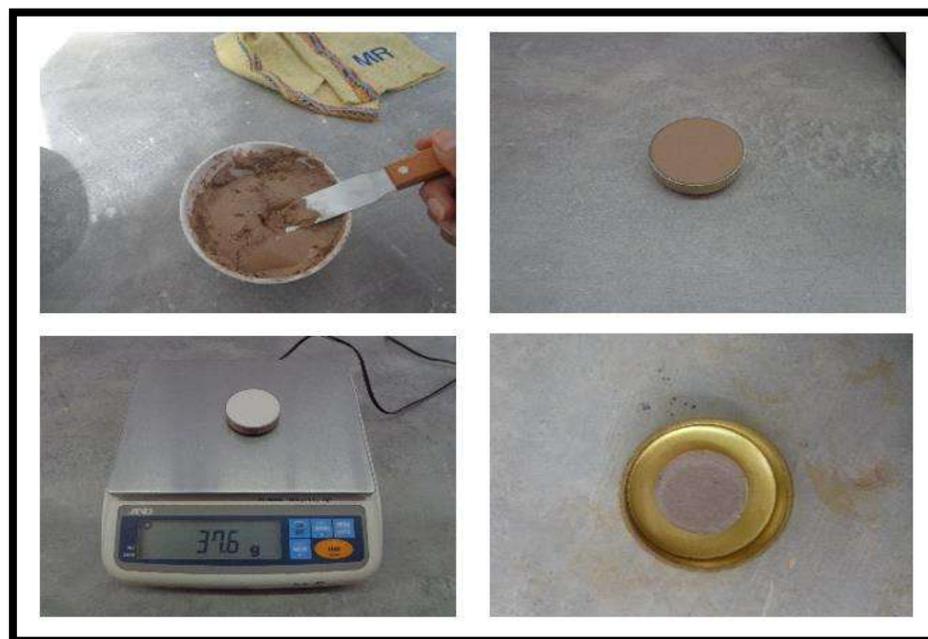
##### Procedimiento de la prueba

El procedimiento se realizó de acuerdo al apartado 3.4.2 párrafo 1. Del material ensayado con la copa de Casagrande, se tomó una porción, tal que su contenido de agua correspondiera al LL (%) del suelo.

Posteriormente se procedió a llenar el molde de prueba, al cual se le aplicó previamente una capa delgada de grasa en su interior para evitar que el material fuera adherido a sus paredes; el llenado se efectuó en tres capas asegurando la pérdida de vacíos y acomodo de las partículas, inmediatamente se registra el peso del molde con el material.

A continuación se enrasó el molde, dejándose en la sombra, y una vez que cambió ligeramente su tonalidad, se llevó al HC el cual tenía una temperatura aproximada de 110 °C, se dejó durante 24 hrs aproximadamente hasta obtener una masa constante.

Este procedimiento se realizó por triplicado, obteniendo el W (%) para cada uno (Fig. 4.33). Una vez que la pastilla estuviera seca, se retiró del molde y se procedió a determinar su volumen, el cual se efectuó utilizando mercurio líquido, siguiendo el procedimiento y recomendaciones del apartado 3.4. (Fig. 4.34). Se registró su volumen y se pesó el molde (Fig. 4.35). La CV (%) se obtuvo aplicando la ecuación 3.6.



**Figura 4.33.** Determinación del W (%) para CV (%).



**Figura 4.34.** Determinación de la CV (%) del suelo.



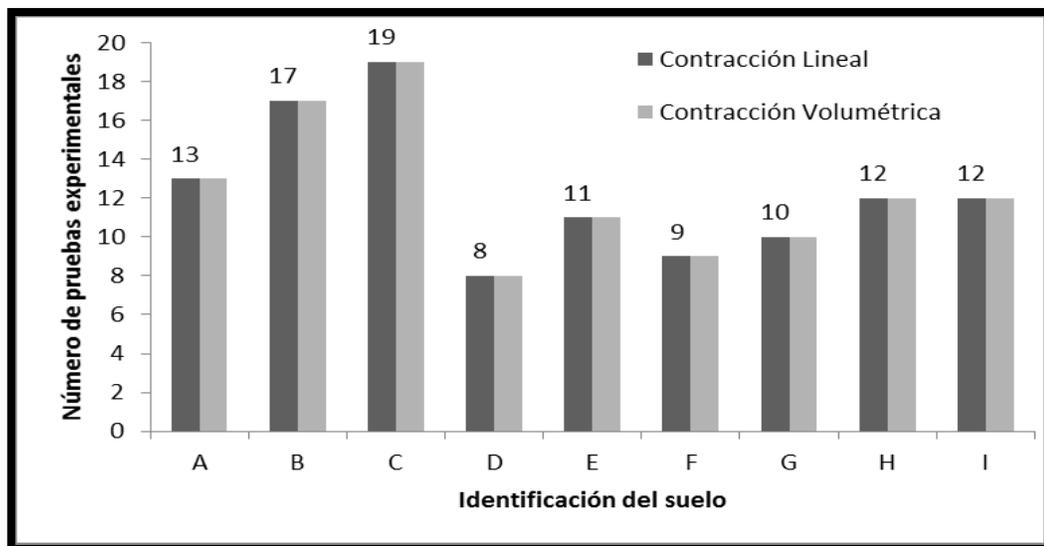
**Figura 4.35.** Determinación del volumen del molde.

### 4.4.3 Suelos ensayados para los Límites de Contracción

Para la obtención de los límites de contracción de cada suelo y mezcla en estudio, se efectuaron un total de 222 pruebas, de las cuales 111 correspondieron para la CL (%), así como para la CV (%). Lo anterior se muestran en la Tabla 4.13, y en su representación gráfica (Fig. 4.36). Los ensayos fueron realizados de forma simultánea.

**Tabla 4.13.** Número de pruebas para los Límites de Contracción

Suelo	Pruebas Límites de contracción	
	Contracción Lineal	Contracción Volumétrica
A	13	13
B	17	17
C	19	19
D	8	8
E	11	11
F	9	9
G	10	10
H	12	12
I	12	12



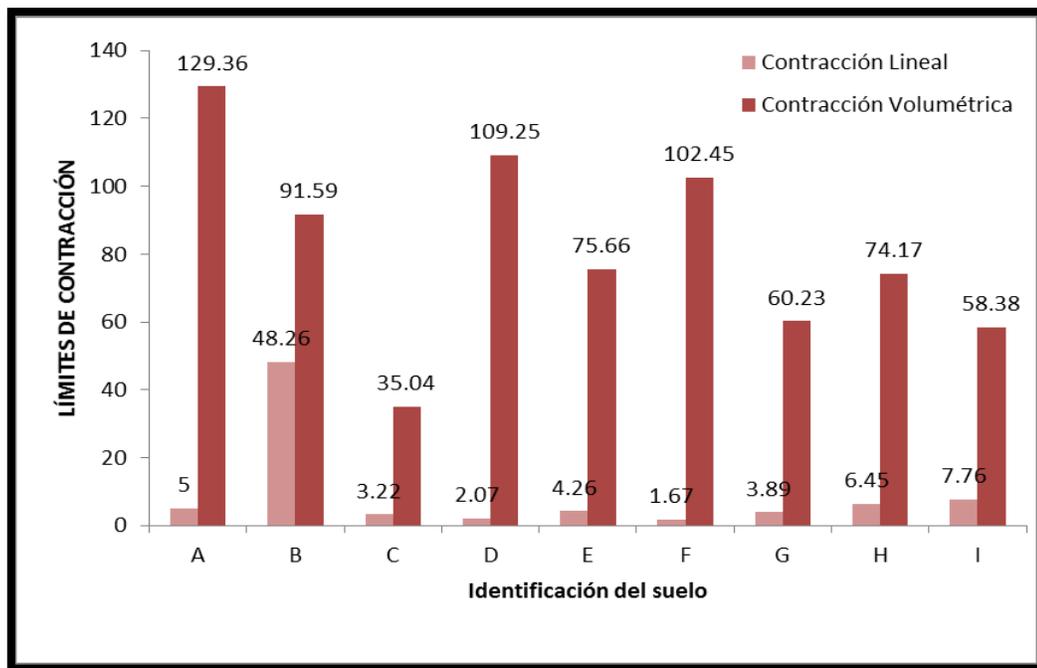
**Figura 4.36.** Número de pruebas para los Límites de contracción.

#### 4.4.4 Resultados de los Límites de Contracción

Los resultados de las pruebas efectuadas para obtener los límites de contracción, tanto lineal como volumétrica son mostrados en la Tabla 4.14 y en su representación gráfica en la Figura 4.37. En el Anexo A.4 se muestra el formato y llenado de resultados para obtención de los LC (%).

**Tabla 4.14.** Resultados de los límites de contracción.

Suelo	CL (%)	CV (%)
A	5.00	129.36
B	48.26	91.59
C	3.22	35.04
D	2.07	109.25
E	4.26	75.66
F	1.67	102.45
G	3.89	60.23
H	6.45	74.17
I	7.76	58.38



**Figura 4.37.** Resultados de los límites de contracción.

## 4.5 CLASIFICACION SUCS

Con los datos obtenidos de LL (%) y PL (%), se propusieron distintas combinaciones de resultados, para realizar la clasificación del suelo de acuerdo a la clasificación SUCS, las cuales son mostradas en la Tabla 4.15, el cálculo del índice plástico PI (%) se realizó con la aplicación de la ecuación 3.1. Posteriormente se determinó la clasificación SUCS para cada tipo de suelo.

**Tabla 4.15.** Combinaciones de clasificación de acuerdo a la SUCS.

Secado en HC		PI (%)		Secado en HMO		PI (%)	
		LP-C	LP-CI			LP-C	LP-CI
LL (%)	CC	X	-	LL (%)	CC	X	-
	CS	X	-		CS	X	-
	CI	X	X		CI	X	X

Los resultados de la clasificación SUCS de la primera combinación (CC y LP-C en HC) son mostrados en la Tabla 4.16 y en su representación gráfica en la carta de plasticidad (Fig. 4.38).

**Tabla 4.16.** Clasificación SUCS, CC y LP-C en HC.

Suelo	LL (%) CC	LP (%) LP-C	IP (%)	SUCS
<b>A</b>	162.92	89.16	73.76	MH
<b>B</b>	306.76	61.77	245.00	CH
<b>C</b>	45.30	23.29	22.01	CL
<b>D</b>	194.26	82.12	112.14	MH
<b>E</b>	87.01	66.13	20.88	MH
<b>F</b>	181.25	76.92	104.33	MH
<b>G</b>	70.52	46.02	24.50	MH
<b>H</b>	97.54	51.26	46.28	MH
<b>I</b>	61.65	42.46	19.19	MH

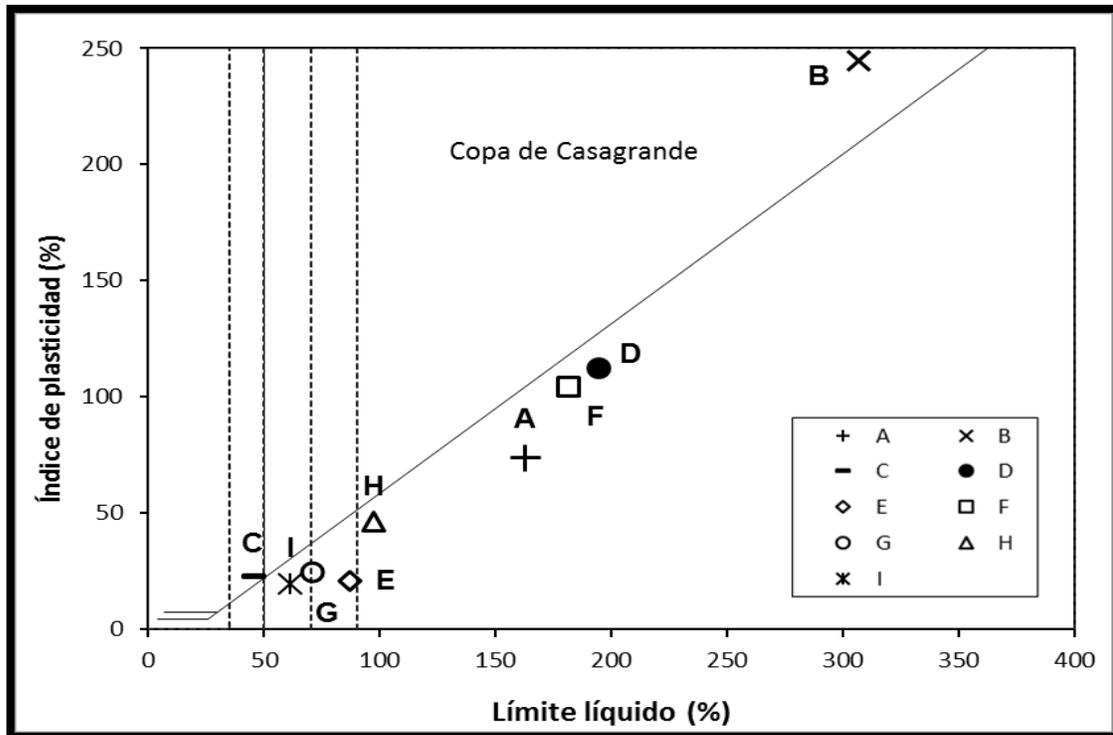


Figura 4.38. Clasificación SUCS, CC y LP-C en HC.

Los resultados de la clasificación SUCS de la segunda combinación (CS y LP-C en HC) son mostrados en la Tabla 4.17 y en su representación gráfica en la carta de plasticidad en la Figura 4.39.

Tabla 4.17. Clasificación SUCS, CS y LP-C en HC.

Suelo	LL (%) CS	LP (%) LP-C	IP (%)	SUCS
A	139.44	89.16	50.28	MH
B	248.77	61.77	187.00	CH
C	43.60	23.29	20.31	CL
D	174.02	82.12	91.90	MH
E	80.72	66.13	14.59	MH
F	170.73	76.92	93.81	MH
G	60.17	46.02	14.15	MH
H	77.18	51.26	25.92	MH
I	56.09	42.46	13.63	MH

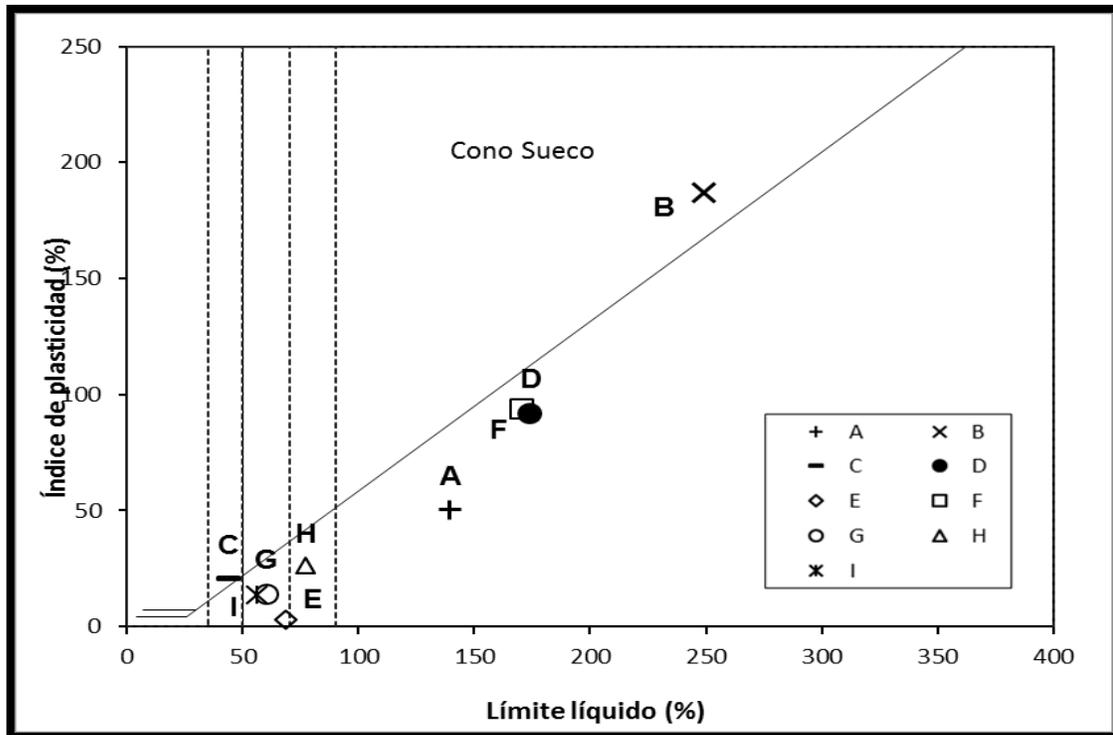


Figura 4.39. Clasificación SUCS, CS y LP-C en HC.

Los resultados de la clasificación SUCS de la tercera combinación (CI y LP-C en HC) son mostrados en la Tabla 4.18 y en su representación gráfica en la carta de plasticidad se muestra en la Figura 4.40.

Tabla 4.18. Clasificación SUCS, CI y LP-C en HC.

Suelo	LL (%) CI	LP (%) LP-C	IP (%)	SUCS
A	130.87	89.16	41.71	MH
B	231.84	61.77	170.07	CH
C	40.11	23.29	16.82	CL
D	171.00	82.12	88.89	MH
E	72.82	66.13	6.69	MH
F	167.73	76.92	90.81	MH
G	57.01	46.02	10.99	MH
H	70.58	51.26	19.32	MH
I	53.79	42.46	11.33	MH

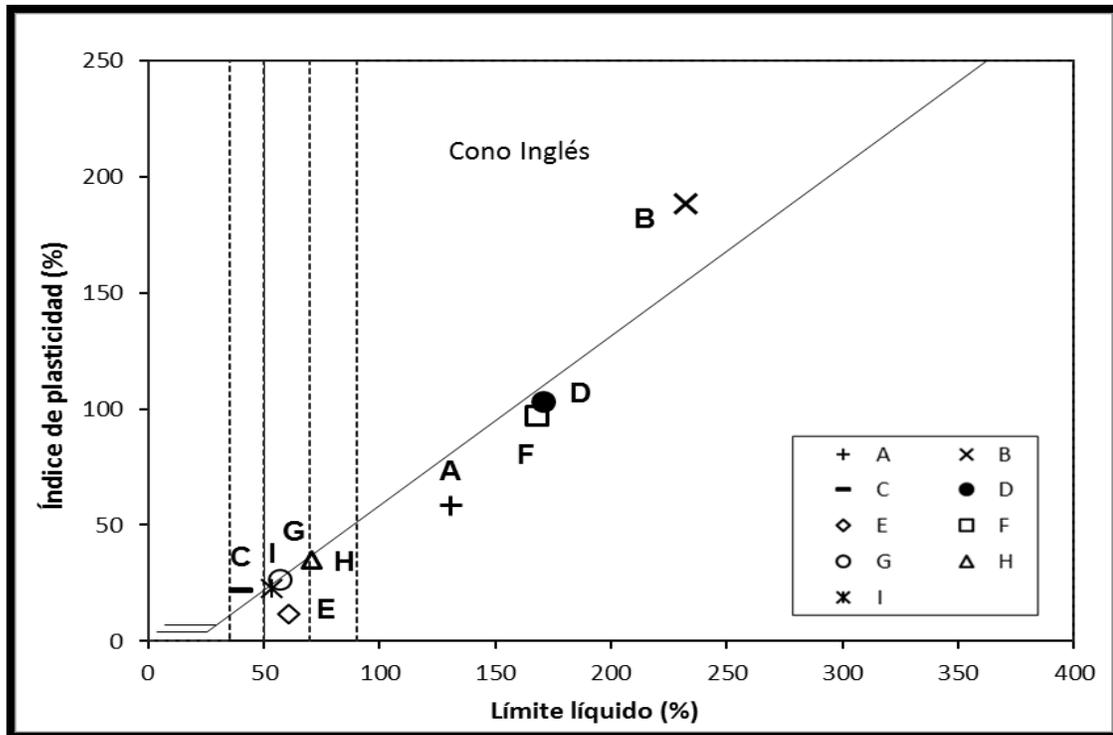


Figura 4.40. Clasificación SUCS, CI y LP-C en HC.

Los resultados de la clasificación SUCS de la cuarta combinación (CI y LP-CI en HC) son mostrados en la Tabla 4.19 y en su representación gráfica en la carta de plasticidad se muestra en la Figura 4.41.

Tabla 4.19. Clasificación SUCS, CI y LP-CI en HC.

Suelo	LL (%) CI	LP (%) LP-CI	IP (%)	SUCS
A	130.87	72.64	58.23	MH
B	231.84	43.32	188.52	CH
C	40.11	18.69	21.42	CL
D	171.00	68.22	102.79	MH
E	72.82	49.23	23.59	MH
F	167.73	70.84	96.90	MH
G	57.01	30.34	26.67	MH
H	70.58	35.46	35.12	MH
I	53.79	31.26	22.53	MH

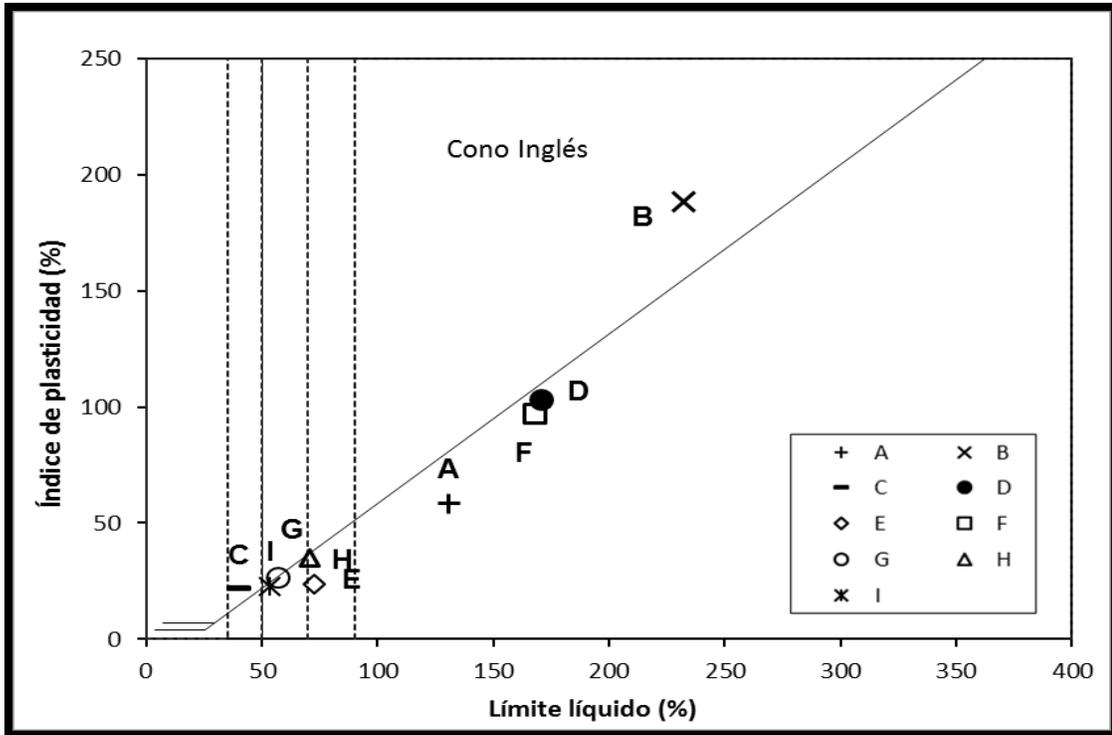


Figura 4.41. Clasificación SUCS, CI y LP-CI en HC.

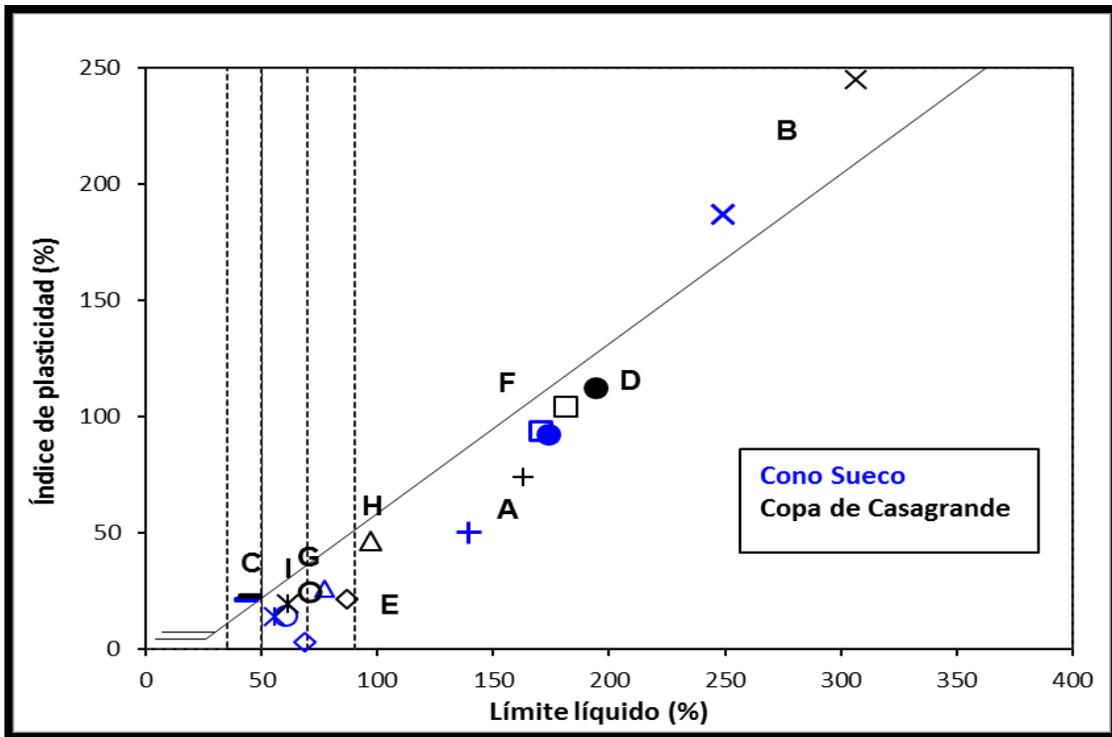


Figura 4.42. Clasificación SUCS, CS y CC en HC.

En la Figura 4.42 se muestra la ubicación de cada tipo suelo en la carta de plasticidad, correspondientes a la copa de Casagrande y el cono Sueco, obteniendo la misma clasificación SUCS, dicho caso sucedió en todas las propuestas de combinaciones, lo que proporciona consistencia en los resultados.

#### 4.6 CLASIFICACIÓN INGLESA

Con los datos obtenidos de LL (%) y PL (%), obtenidos con el cono Inglés se pudo hacer el cálculo del índice plástico PI (%) de acuerdo a la ecuación 3.1. Posteriormente se determinó la clasificación propuesta por la norma Inglesa, los resultados son mostrados en la Tabla 4.20, y en su representación gráfica en la Figura 4.43.

**Tabla 4.20.** Clasificación Inglesa CI y LP-CI en HC.

Suelo	LL (%) CI	LP (%) LP-CI	IP (%)	NORMA INGLESA
<b>A</b>	130.87	72.64	58.23	ME
<b>B</b>	231.84	43.32	188.52	CE
<b>C</b>	40.11	18.69	21.42	MI
<b>D</b>	171.00	68.22	102.79	ME
<b>E</b>	72.82	49.23	23.59	MV
<b>F</b>	167.73	70.84	96.90	ME
<b>G</b>	57.01	30.34	26.67	MH
<b>H</b>	70.58	35.46	35.12	MV
<b>I</b>	53.79	31.26	22.53	MH

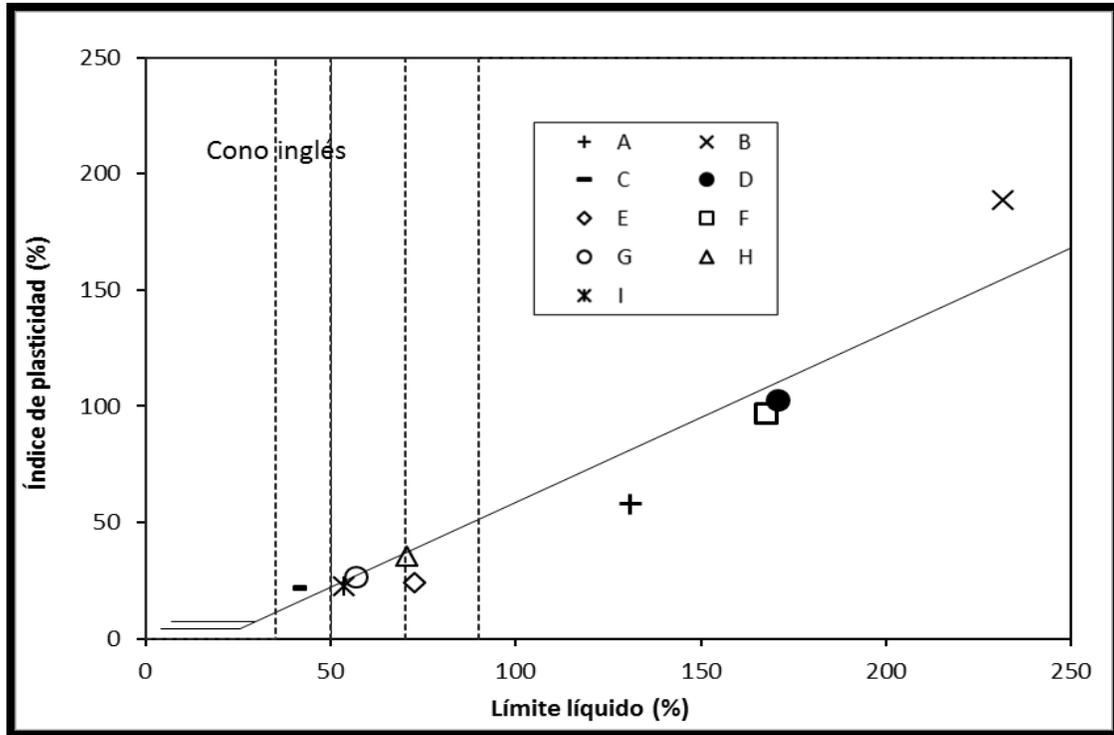


Figura 4.43. Clasificación Inglesa CI y LP-CI en HC.

## 5. CONCLUSIONES

A partir de la caracterización de las propiedades índice de las mezclas diatomita-bentonita, diatomita-caolín, bentonita-caolín, y de la aplicación de modelos estadísticos para la interpretación de los resultados, en esta etapa de la investigación se muestran las conclusiones sobre la utilización de los conos de penetración y el horno de microondas.

- Los límites líquido y plástico se correlacionan linealmente, numéricamente son distintos.
- Para LL (%) inferiores a 100% el valor obtenido con los conos resulta similar al de la copa de Casagrande, sin embargo en el PI (%), donde interviene el LP (%), se notan diferencias.
- Las menores diferencias relativas se tienen en la comparación de conos, se debe a que son técnicas con el mismo principio de penetración y menos influenciada por el operador. Es decir son consistentes entre sí.
- Con el horno de microondas el tiempo de realización de la prueba se reduce notablemente, incluso para contenidos de agua superiores a 300%.
- Estadísticamente se puede afirmar que la obtención del LL (%) utilizando los conos penetrantes y secado en HMO es viable, y su valor es correlacionable con los de la copa de Casagrande.
- Es promisoría la utilización del cono inglés como alternativa al método convencional para determinar el PL (%).
- Es factible utilizar la carta de plasticidad de la norma inglesa de manera comparativa, ya que se tienen resultados con ese equipo y en general coincide con la clasificación SUCS, con la diferencia de que la norma inglesa incluye intervalos de plasticidad.
- Los intervalos del LL (%) obtenidos y tipo de mezclas son generales en la carta de plasticidad, abarcando suelos de diferente naturaleza.

- La clasificación SUCS para la diatomita resultó ser un suelo MH, que concuerda con los limos diatomáceos.
- El efecto de agregar bentonita a la diatomita es notorio en el cambio de su plasticidad, que modifica su posición en la carta de plasticidad. Lo anterior ocurre con los tres métodos utilizados.
- Aparentemente la plasticidad del caolín no se modifica con la mezcla de diatomita. Sin embargo es probable que las propiedades de resistencia y deformación se vean afectadas (el estudio del efecto de mezcla en la resistencia no es alcance de esta investigación).

## 5.1 RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo de las pruebas experimentales, se evidenciaron algunos procesos en los cuales se necesita tener cierto cuidado para evitar resultados erróneos y poco confiables.

- El operador tiene influencia en los resultados obtenidos con la copa de Casagrande, por tal motivo es importante que todas las pruebas sean realizadas por la misma persona.
- Para determinar diferentes contenidos de humedad, es recomendable ir agregando pequeñas cantidades de agua a la muestra.
- Es necesario cuidar el tiempo de ejecución de la prueba, que éste no sea prolongado entre una determinación y otra.
- Revisar que las puntas de los conos se encuentren en buen estado.
- La cantidad de ensayos es determinante para poder realizar análisis estadísticos.

## BIBLIOGRAFIA

- Aksakal E., Angin I., y Oztas, T. (2013). Effects of diatomite on soil consistency limits and soil compactibility. Elsevier, 157-163.
- Almanza, F., Garfías, E., y Rangel, J. (2016). Microscopía de suelos blandos en los Valles de México y Toluca. XXVIII Reunión nacional de Ingeniería Geotécnica. Mérida, Yucatán: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C.
- Almanza, J. S., e Israde, I. (2016). Diatomeas perifíticas del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Hidrobiológica, 161-185.
- Altintaş, E. (2013). An investigation on liquid limit of clays by differently shaped penetration cones.
- Bahls, L., E.E, W., y J.O., J. (1984). Ecology and distribution of major Diatom Ecotypes in tthe Southern Fort union region of Montana. Geol Survey, 88- 103.
- Bartolomé, J. F. (1997). El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. Cerámica y Vidrio, 7-19.
- Christaras, B. (1991). A comparison of the Casagrande and fall cone. Engineering Geology, 131- 142.
- Collins, K., y Mcgown, A. (1974). The form and function of microfabric features in a variety of Natural. Géotechnique, 223- 254.
- Crespo, V. C. (2000). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México, D.F.: Limusa.
- Das, B. M. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México, Ciudad de México: Cengage Learning.
- Díaz, Rodríguez J. A. (2011). Comportamiento monotónico de suelos diatomáceos. Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol. 12(1) 27.
- Digman, R. a. (1963). Late pleistocene diatoms from the arica area. Cit, 69- 72.

- Duarte, M. C., y Rojas, H. D. (2017). Obtención del límite líquido y límite plástico usando el penetrómetro de cono de caída, considerando los diferentes conos existentes en la literatura para un suelo bentonítico. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. BOGOTÁ D.C.: Universidad Católica de Colombia.
- Emami, M., y Monfared, S. (2012). Fall Cone Test Parameters and Their Effects on the Liquid and Plastic Limits of Homogeneous and Non- Homogeneous Soil Samples. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1615- 1646.
- Feng, T. (2004). Determining the consistency limits of high plasticity by the BS fall cone method.
- Grim, R. E. (1953). *Clay Mineralogy*. Estados Unidos de América; McGraw-Hill.
- Gronbech, G., Nielsen, B., & Ibsen, L. (2011). Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of casagrande and fall cone apparatus. *Geotechnical Conference*.
- Harben, W. P. (2002). *The industrial Minerals Handbook*. Production Maria Holmes.
- Harison, J. (1990). Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils. *Geotechnique*, 311-315.
- Hrubesova, E. (2016). Comparison of Liquid Limit of Soils Resulted from Casagrande. *Elsevier*, 364 – 370.
- Israde Alcántara, I. (2002). Paleoambiente lacustre del cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo. *Hidrobiológica*, 61-78.
- Jordá Bordehore, L. (2003). Técnicas geofísicas en exploración de canteras. *MSc Geofísica*, 108-112.
- Juárez Badillo, E. (1973). *Fundamentos de la Mecánica de suelos*. México, D.F: Limusa.
- Kadey, F. L. (1975). Diatome. *Minerals and Rocks*, 145- 152.
- khilnani, K., y Capik, M. (1989). Diatomaceous Soils: A New Approach. *Civil Engineering, ASCE*, 68-70.
- Klein, C. (2003). *Manual de Mineralogía*. Barcelona, España: Reverté S.A.
- Koumoto, T. a. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Géotechnique*, 701-712.

- Koumoto, T., y Houlsby, G. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Geotechnique*, 701-712.
- Lambe, T. W. (2004). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
- Leal, J., y Julieth, A. (2017). Determinación del límite líquido y plástico para un suelo caolín amarillo usando el penetrómetro de cono de caída con diferentes modelos de cono. Tesis. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Lee, C., e Yun, T. (2011). Geotechnical characterization of marine sediments in the Ulleung Basin, East Sea. Elsevier, 151-158.
- Leflaive, E. (1971). Atterberg limits and the cone penetrometer /in french/. Transport and Road Research Laboratory (TRRL), 123-131.
- Leroueil, S. P. (1996). Liquid limits and fall cones. *Can. Geotech*, 793- 798.
- Luna, A. (2012). Determinación del límite líquido y plástico de los suelos mediante el uso del penetrometro cónico. Tesis. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Martín, Puig, B. (2010). Estudio Microtextural y de propiedades Geotécnicas de Bentonitas. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 149- 150.
- Massarsch, K. (2014). Cone Penetration Testing – A Historic Perspective. 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, USA, 98- 134.
- Mendoza L. (1991). Determinación del contenido de agua de suelos con secado en horno microondas y límite líquido de suelos con el Cono Sueco. Informe UNAM.
- Mendoza L., M. (1996). Determinación del Límite Líquido de Suelos con el cono Sueco. *Series del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M*, 81-89.
- Mendoza López, M. J. (s.f.). Técnicas alternativas para la determinación del límite líquido en suelos.
- Mendoza, M. J., y Orozco, M. (2001). Procedimiento rápido y fiable para la determinación del límite líquido de los suelos de grano fino. *Geotechnical testing journal*, 103-108.
- Mesri, G., y Bohor, B. (1975). Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay. *Géotechnique*, 527-554.

- Michaels, A. S. (1962). Settling rates and sediment volumes of flocculated Kaolin suspensions. I & E C Fundamentals, 24- 33.
- Orozco C., M., y Mendoza L., M. (2000). Determinaciones rápidas y confiables de contenido de agua, límite líquido y resistencia cortante no drenada de suelos finos. Reunión Nacional de Mecánica de Suelos (págs. 53- 62). Oaxaca: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C.
- Palomino, A. M. (2011). Impact of diatoms on fabric and chemical stability of diatom–kaolin mixtures. Elsevier, 287-294.
- Peck, R. B. (2001). Ingeniería de Cimentaciones. México: Limusa.
- Pinzón Bello, J. A. (1996). Caracterización y estudio reológico de una bentonita Colombiana. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, 337-344.
- Prakash, K., & Sridharan, A. (2006). Critical appraisal of the cone penetration method of determining soil plasticity. Can. Geotech, 884-888.
- Rivera, R. P. (1968). Sinopsis de las diatomeas de la Bahía de Concepción. Botánica, 18- 27.
- Robertson, P., & Wride, C. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Can. Geotech, 442- 459.
- Secretaría de Economía. (2016). Coordinación general de minería. Perfil de mercado. México: Dirección general de desarrollo minero.
- Servicio geológico mexicano. (Agosto de 2007). Servicio geológico mexicano. Inventario físico de los recursos minerales del municipio Charo, estado de Michoacán. Secretaría de desarrollo económico.
- Sowers, G. (1972). Introducción a la mecánica de suelos.
- Spagnoli, G. (2012). Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay. Canadian Journal of soil science, 859-864.
- Sridharan, A. a. (1999). Mechanisms Controlling the Undrained Shear Strength Behaviour of Clays. Canadian Geotechnical Journal, 1030-1038.
- Tarbuck, E., y Lutgens, F. (2000). Ciencias de la Tierra, una introducción a la geología física. España: Prentice Hall.

- Terzaghi, K. a. (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería práctica*. Barcelona: El Ateneo S.A.
- Wood, D., & Wroth, C. (1978). The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils. *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)*, 37.
- Zeevaert, L. (1949). An investigation of the engineering characteristics of the volcanic lacustrine clay deposits beneath Mexico City. Thesis, University of Illinois.

# ANEXOS

## A. FORMATOS DE REGISTRO DE PRUEBAS

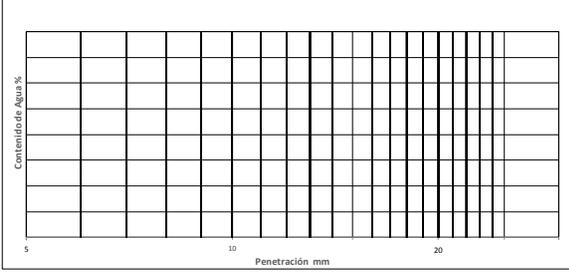
### A.1. Ejemplo secado en HMO

SECADO HORNO DE MICROONDAS				SECADO HORNO DE MICROONDAS			
FECHA: 26/03/18		MÉTODO: CONO SUECO		FECHA: 26/03/18		MÉTODO: COPA CASAGRANDE	
DESCRIPCIÓN: BENTONITA				DESCRIPCIÓN: BENTONITA			
PRUEBA No.	CAPSULA No.	TIEMPO (seg)	PESO (g)	PRUEBA No.	CAPSULA No.	TIEMPO (seg)	PESO (g)
1	45	30	35.8	1	22	30	31.8
		30	34.2			30	30.5
		30	32.5			30	29.7
		30	32.2			30	28.2
		30	32.2			30	28.2
PRUEBA No.	CAPSULA No.	TIEMPO (seg)	PESO (g)	PRUEBA No.	CAPSULA No.	TIEMPO (seg)	PESO (g)
1	23	30	36.7	1	14	30	37.9
		30	35.1			30	36.6
		30	34.2			30	35.1
		30	33.5			30	34.7
		30	33.5			30	34.7
PRUEBA No.	CAPSULA No.	TIEMPO (seg)	PESO (g)	PRUEBA No.	CAPSULA No.	TIEMPO (seg)	PESO (g)
1	54	30	35.4	1	18	30	33.2
		30	34.6			30	32.4
		30	32.1			30	32.1
		30	31.8			30	29.6
		30	31.8			30	29.6
PRUEBA No.	CAPSULA No.	TIEMPO (seg)	PESO (g)	PRUEBA No.	CAPSULA No.	TIEMPO (seg)	PESO (g)
1	19	30	36.1	1	10	30	33.9
		30	35.6			30	32.8
		30	34.2			30	31.9
		30	33.2			30	31.0
		30	33.2			30	31.0



### A.3. Límite plástico

		<b>UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO</b> "FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL"								
OPERADOR:				FECHA:						
DESCRIPCIÓN:										
<b>LÍMITE PLÁSTICO ROLADO CONVENCIONAL</b>										
HORNO DE CONVECCIÓN										
PRUEBA No.	CAPSULA No.	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO			PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA W (%)	
HORNO DE MICROONDAS										
PRUEBA No.	CAPSULA No.	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO			PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA W (%)	
<b>LÍMITE PLÁSTICO CON EL CONO DE PENETRACIÓN INGLÉS</b>										
HORNO DE CONVECCIÓN										
PRUEBA No.	CAPSULA No.	ALTURA INICIAL (mm)	ALTURA FINAL (mm)	PENETRACIÓN (mm)	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA W (%)
HORNO DE MICROONDAS										
PRUEBA No.	CAPSULA No.	PENETRACIÓN (mm)	TIEMPO (min)	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA W (%)	



Contentido de Agua %

Penetración mm

ROLADO CONVENCIONAL	CONO INGLÉS
LP(%) HC	LP(%) HC
LP(%) HMO	LP(%) HMO

A.4. Límites de contracción



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**“FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL”**



**LÍMITES DE CONSISTENCIA**

FECHA: \_\_\_\_\_ OBRA: \_\_\_\_\_  
 OPERADOR: Alondra Martínez Rojas LOCALIZACIÓN: \_\_\_\_\_  
 NÚMERO Y DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: \_\_\_\_\_

---

**LÍMITE LÍQUIDO**

PRUEBA No.	CAPSULA No.	No. DE GOLPES	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA W (%)

---

**LÍMITE PLÁSTICO**

PRUEBA No.	CAPSULA No.	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA W (%)

---

**CONTRACCIÓN LINEAL**

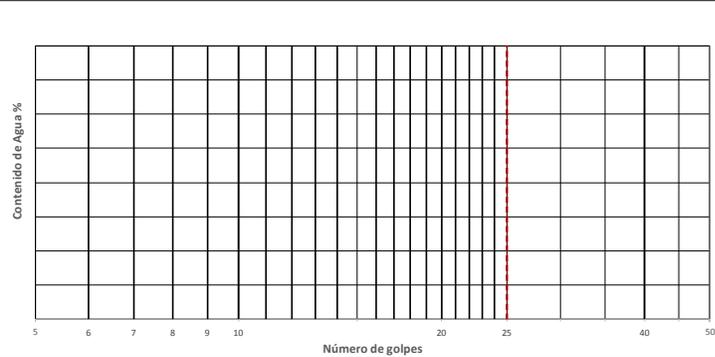
PRUEBA No.	CAPSULA No.	LONGITUD INICIAL (cm)	LONGITUD FINAL (cm)	CONTRACCION LINEAL %

---

**CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA**

PRUEBA No.	CAPSULA No.	VOLUMENES			PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA W (%)
		Vi (cm <sup>3</sup> )	Vf (cm <sup>3</sup> )	CV (cm <sup>3</sup> )						

---



CLASIFICACIÓN SUCS= \_\_\_\_\_

W (%)	
LL (%)	
LP (%)	
IP (%)	
CL (%)	
CV (%)	

## B. DATOS PROCESADOS DE LA RECTA DE REGRESIÓN

### B.1. Cono sueco y copa de Casagrande, HC

#### Estadísticas de la regresión

Error típico	10.12
Coefficiente de correlación $R^2$	0.9857
Observaciones	9
Coefficientes (X)	1.1677
Error típico coef.	0.0253

### B.2. Cono sueco y copa de Casagrande, HM

#### Estadísticas de la regresión

Error típico	10.21
Coefficiente de determinación $R^2$	0.9854
Observaciones	9
Coefficientes (X)	1.1663
Error típico coef.	0.0255

### B.3. Cono Inglés y copa de Casagrande, HC

#### Estadísticas de la regresión

Error típico	14.38
Coefficiente de determinación $R^2$	0.9711
Observaciones	9
Coefficientes (X)	1.2260
Error típico coef.	0.0378

**B.4. Cono Inglés y copa de Casagrande, HMO****Estadísticas de la regresión**

<b>Error típico</b>	<b>14.61</b>
<b>Coefficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	<b>0.97</b>
<b>Observaciones</b>	<b>9</b>
<b>Coefficientes (X)</b>	<b>1.2250</b>
<b>Error típico coef.</b>	<b>0.0384</b>

**B.5. Horno de convección y horno de microondas, LL (%)****Estadísticas de la regresión**

<b>Error típico</b>	<b>0.35</b>
<b>Coefficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	<b>0.9999</b>
<b>Observaciones</b>	<b>35</b>
<b>Coefficientes (X)</b>	<b>0.9997</b>
<b>Error típico coef.</b>	<b>0.0004</b>

**B.6. Rolado convencional y cono Inglés, HC****Estadísticas de la regresión**

<b>Error típico</b>	<b>6.63</b>
<b>Coefficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	<b>0.9021</b>
<b>Observaciones</b>	<b>9</b>
<b>Coefficientes (X)</b>	<b>1.2498</b>
<b>Error típico coef.</b>	<b>0.0440</b>

**B.7. Rolado convencional y cono Inglés, HMO****Estadísticas de la regresión**

<b>Error típico</b>	<b>6.64</b>
<b>Coefficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	<b>0.8983</b>
<b>Observaciones</b>	<b>9</b>
<b>Coefficientes (X)</b>	<b>1.2504</b>
<b>Error típico coef.</b>	<b>0.0441</b>

**B.8. Horno de convección y horno de microondas, PL (%)****Estadísticas de la regresión**

<b>Error típico</b>	<b>0.61</b>
<b>Coefficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	<b>0.9992</b>
<b>Observaciones</b>	<b>18</b>
<b>Coefficientes (X)</b>	<b>1.0024</b>
<b>Error típico coef.</b>	<b>0.0025</b>