

# **C**omparación de la obtención de límites de consistencia de arcillas usando los conos sueco e inglés

*Arreygue-Rocha J.E.<sup>1</sup>, Martínez-Rojas A.<sup>2</sup> Orozco-Calderón M.<sup>3</sup>,  
Equihua-Anguiano L.N.<sup>1</sup> y Chávez-Negrete C.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Civil, <sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Mich; <sup>3</sup>IMP, Veracruz, Ver.

## **Resumen**

Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos blandos son de suma importancia, debido a que a través de éstas se diseñan gran cantidad de infraestructura civil. Para obtenerlas, se requiere, muchas veces, de procesos complicados y costosos. Por esta razón se recurre a correlaciones empíricas que permiten conocer las propiedades índice o mecánicas del suelo, como pueden ser: a través del contenido de agua, del límite líquido, del límite plástico, entre otras. Algunos suelos arcillosos blandos contienen diatomeas, haciéndolos suelos con un comportamiento particular y difícil de caracterizar. Este tipo de suelo se encuentra en gran cantidad en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán; se desconocen sus propiedades y su comportamiento.

En este estudio se presentan los resultados obtenidos del contenido de agua, a través del límite líquido, aplicado a tres tipos de suelos blandos: bentonita, caolín y diatomita, con la finalidad de llevar a cabo una comparación de las propiedades de cada uno de éstos materiales. Las técnicas de laboratorio que se emplearon fueron

la copa de Casagrande, el cono Sueco y el cono Inglés. A partir de los resultados de los conos, se estimó la resistencia no drenada de los materiales. Adicionalmente se comparó la técnica del secado de los suelos con horno de microondas y con horno convencional.

Los resultados que se obtuvieron fueron de tres tipos: el primero se refiere a la clasificación del material, que resultó ser un Limo micáceo o diatomita elástica; el segundo, es el empleo de los conos de penetración para suelos y se consideran como alternativa más fácil y confiable que la técnica tradicional de la copa de Casagrande; en el tercer tipo se verificó la eficiencia del uso de los dos tipos de hornos, encontrando que los resultados son muy similares entre ellos, con la diferencia de que la velocidad favorece el uso del horno de microondas, ya que se ahorra hasta el 90% del tiempo.

**Palabras Clave:** Cono Sueco e Inglés, límites de consistencia, diatomita, caolín, bentonita.

## **Abstract**

Physical and mechanical properties of the soft soils are frequently correlated due to the complexity to obtain those *in situ*. The moisture content and the index properties of the soil as the Liquid Limit and the Plastic Limit are parameters that help to get mechanical soil values among others. Furthermore, for the soft soils there are particular characteristics that provide different behavior of these, for example the case where the soil contains diatomites, which have been few studied around the world. In this study, three types of soft soils were analyzed: bentonite, kaolin and diatomite from the Lake of Patzcuaro, Michoacán. First of all, particular studies for each type of the soil were carried out and then combinations among those were developed. The laboratory techniques that were used were the Swedish fall cone and the Fall cone with a cone angle of 30 degrees and 80g of mass (British method), as well as using the Casagrande cup method, in order to get its main soil index properties and compare results obtained through the different applied techniques. The soils were drying using a microwave and in the conventional oven, this allowed determining the water content, that allows estimate the undrained shear strength by the of the fall cone penetration tests. Finally, an analysis of the results obtained from the application of the different techniques on the most studied soils (bentonite, kaolin) with the behavior of the Patzcuaro diatomite are presented and discussed.

**Keywords:** Swedish fall cone, English fall cone, consistency limits, diatomite, kaolin and bentonite.

## 1. Introducción

Los suelos generalmente se pueden clasificar en suelos finos y suelos gruesos; los suelos finos, a su vez, se pueden clasificar como cohesivos o no cohesivos (Das, 2014). Por tal motivo se han establecidos técnicas para determinar la clasificación de los suelos para los propósitos específicos de la ingeniería. A este respecto diferentes clasificaciones fueron propuestas en el pasado y día con día se han implementado otras técnicas, como la aplicación del cono sueco o del cono inglés, entre otras (Das, 2014). La clasificación de un suelo se realiza basándose en su composición granulométrica y sus características de plasticidad que está representada por los límites de consistencia (Normas: ASTM D2487-17, ASTM C136/C136M-19).

La prueba de penetración usando el cono es un método de laboratorio relativamente reciente que se ha vuelto muy popular durante las últimas cuatro décadas (Fig. 1). Se considera que Goldmann (1665) fue el primero en utilizar esta técnica. El primer penetrómetro, sin embargo, fue desarrollado en Suecia alrededor de 1935, por la compañía Borros y patentado hasta 1942 (Massarsch, 2014).



*Figura 1.-* Equipo de penetración, cono Sueco (Mindiamart®).

Debido a que hay diferentes tipos de conos, Emami y Monfared (2012) estudiaron los efectos de varios parámetros como el ángulo del ápice, su diámetro, la sobrecarga, la rugosidad de la superficie, etc. Koumoto y Houlby (2001) describieron la teoría y la práctica de la prueba analizando el mecanismo de penetración del cono en una arcilla, penetrando una cierta profundidad en un tiempo de cinco segundos. Además definieron el límite líquido (LL) como el contenido de agua " $\omega$ ", estableciendo que en una cápsula de arcilla, un cono 60° y 60 grs. en caída libre, pueda penetrar 10 mm.

Altintas (2013) realizó un estudio donde se utilizaron quince conos de penetración con diferentes características y pesos, empleando dos tipos de arcilla. Analizó la relación entre el contenido de agua " $\omega$ " y la penetración, obteniendo que la penetración de los conos estuvo en el rango de 8.99 a 28.23 mm y que, al considerarse la correlación de cada cono con su peso constante, la penetración disminuye mientras el ángulo de la punta aumenta.

Christaras (1991) hizo una comparación entre el método de la copa de Casagrande (CCG) y el penetrómetro de caída (cono) con el objeto de determinar el LL, estableciendo que los dos métodos arrojan resultados similares y cuya similitud es mayor en los suelos más finos (entre 0.06 y 0.002 mm) especialmente en arcillas puras. En este caso los valores de la CCG fueron inferiores a los valores obtenidos con el penetrómetro; argumentó que una profundidad de penetración del cono de caída inferior a 10 mm podría disminuir esa divergencia.

Hrubesova (2016) comparó el método de la CCG y el cono de penetración inglés (CI) en la obtención del LL analizando una arcilla bentonítica (alta plasticidad). Los resultados de laboratorio mostraron que el LL de la bentonita basado en la prueba de penetración de cono (con una penetración de 20 mm) fue significativamente menor en comparación con el LL de la CCG; concluyó que la prueba del CI con una penetración de 20 mm, proporciona un valor significativamente menor del LL en comparación con el método de la CCG.

Spagnoli (2012), obtuvo una correlación basada en los resultados de pruebas experimentales aplicadas a arcillas puras. Hizo una comparación de métodos para determinar el LL, empleando la CCG y el CI (norma BS 1377, de 1990). Actualmente los conos de caída son ampliamente conocidos en gran parte del mundo, por lo que es el estándar aceptado para encontrar el LL en muchos países.

Hagerty et. al. (1990), hicieron una comparación de resultados de secado entre el horno de microondas (HMO) y el horno convencional (HC). Mostraron que el uso

cuidadoso de un horno de microondas produjo valores de contenido de humedad muy cercanos a los obtenidos por un HC. Los HMO ofrecen un medio para secar muestras de suelo más rápidamente que el secado estándar en hornos de convección.

En México, Mendoza (1996) analizó los métodos alternativos, centrando su investigación en determinar el contenido de agua de suelos con secado en horno microondas (HMO) y el LL de suelos con el cono sueco. Realizó una comparación entre la CCG y el cono sueco (CS), estudiando diversos suelos representativos, cuyos valores de LL alcanzan hasta el 400%. Las pruebas fueron realizadas por varios laboratoristas a fin de conocer la influencia que tienen los resultados cuando lo hacen diferentes personas experimentadas. Los suelos fueron secados en un HC y a la vez en un HMO, demostrando que el secado en microondas resulta ser muy conveniente (Mendoza, 1991). Así mismo mencionó otros tipos de conos de penetración, como es el caso del CI, donde determinó que su uso es sencillo y tan confiable como la técnica de la CCG. Desde hace tiempo se han aportado resultados que abonan a la pertinencia y conveniencia de utilizar los conos de penetración, sin embargo, su uso en nuestro país no se ha generalizado (Orozco y Mendoza, 2000).

Cabe mencionar que Mendoza y Orozco (2001) son los pioneros y posiblemente los únicos en realizar estudios con los conos de penetración para la determinación del LL de suelos en México, a pesar de la influencia en otros países donde la CCG ha quedado prácticamente obsoleta.

Desde hace tiempo en México se ha empleado la técnica de la CCG para determinar el LL, aun sabiendo que esta prueba suma factores que influyen en su determinación. Lo anterior, se fundamenta en el hecho que existen normas que respaldan el uso de esta técnica, entre ellas está la ASTM D4318-17. Así también se refleja en la normativa establecida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) que es aplicada para el diseño de la infraestructura nacional y en las grandes obras que elabora la CFE. En ese sentido México es uno de los países en el que el cono de penetración no se ha implementado como prueba estandarizada en sus laboratorios y del que se puede sacar un gran provecho técnico.

Por lo anteriormente expuesto este trabajo se centra en la comparación de las técnicas CCG, CS y CI, para obtener los límites de consistencia (LL, LP, CL, CV), utilizando suelos finos con altos contenidos de diatomea (del Lago de Pátzcuaro),

debido a que estos suelos han sido poco estudiados y pueden ser de utilidad en el mejoramiento de suelos en las obras civiles.

## **2. Metodología**

Para la determinación de las propiedades índice de los materiales (ver Figura 2), se siguió el siguiente proceso:

### **2.1. Límite Líquido**

La obtención del LL en suelos se hace aplicando la norma ASTM D4318-17, la cual hace énfasis en el uso de la CCG a través del método simplificado. En este trabajo también se emplea la técnica del CI basado en la norma BS 1377 británica. El material es colocado en un recipiente cilíndrico para ser penetrado 10 mm, con un cono de dimensiones y masa normalizada, en un lapso de 5 segundos. En este trabajo el LL se obtuvo con el método de la CCG y los conos de penetración sueco e inglés; el secado del material se hizo con un HC y con un HMO. Todas las pruebas se prepararon y aplicaron en forma simultánea.

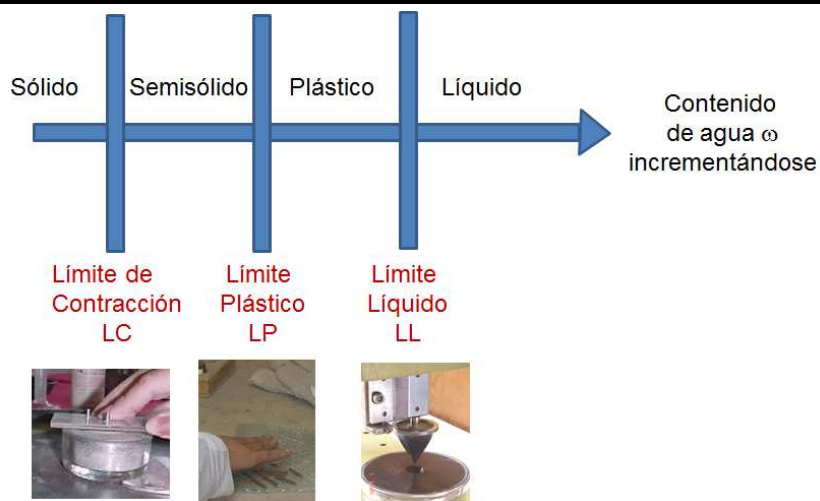
### **2.2. Límite plástico**

Para obtener el límite plástico (PL) se tienen dos técnicas: el método convencional (MC) (propuesto por Atterberg) que se basa en la norma ASTM D4318-17 y el cono de penetración (método de doble peso) que corresponde a la norma británica (BS 1377).

### **2.3. Límite de contracción**

Los límites de contracción LC se midieron con dos técnicas: la primera fue el límite de contracción lineal (CL) y, la segunda, la contracción volumétrica (CV), las dos están respaldadas por la norma ASTM D427-04.

*Comparación de la obtención de límites de consistencia de arcillas usando los conos sueco e inglés*



*Figura 2.* Límites de consistencia para los suelos finos.

## 2.4. Clasificación de suelos

Para conocer la clasificación del suelo se empleó la carta de plasticidad y los límites de consistencia, aplicando dos normas: el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ASTM D2487-00 y la norma BS 5930. Cabe resaltar que en este trabajo se emplearon dos formas para el secado de las muestras: el HC y el HMO, con el objeto de comparar los resultados obtenidos de cada uno de los hornos.

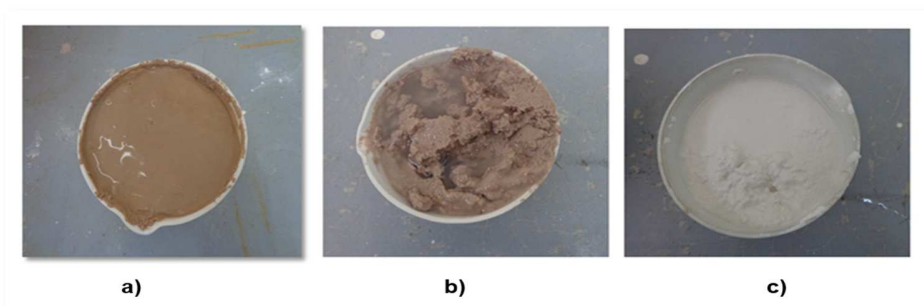
## 3. Resultados

Los suelos empleados para este estudio se describen enseguida: la diatomita se obtuvo de la localidad de Erongarícuaro, que se ubica al sur del Lago de Pátzcuaro en Michoacán (Fig. 3). Este suelo corresponde a la secuencia lacustre que se acumuló en el lago, donde alterna con arcillas, arenas volcánicas, limos y grandes desarrollos de diatomeas. Estudios realizados por Garduño et. al., (2002) reporta que al sur de la isla de Janitzio se tienen diatomitas con espesor de más de 20m, las cuales fueron datadas en 40,000 años, además se observó que en la Isla de Jarácuaro los sedimentos lacustres están plegados y levantados más de 30m. El caolín y la bentonita fueron obtenidos de forma comercial; la pureza del caolín fue del 95%.



*Figura 3.* Localización de la zona de muestreo.

Para la preparación de las muestras se separó el material cribado por la malla No. 40 (0.425 mm), en porciones de 300 gramos por espécimen. Enseguida cada muestra se saturó durante 48 horas aproximadamente, quedando como se aprecia en la Figura 4.



*Figura 4.-* Muestras saturadas, a) Diatomita, b) Bentonita y c) Caolín.

Para cumplir con el propósito del estudio se hicieron varias pruebas experimentales. Se caracterizó la diatomita (del sur del Lago de Pátzcuaro, Michoacán), la bentonita y el caolín. Se realizaron mezclas de estos materiales, planteando las siguientes combinaciones: diatomita-bentonita, diatomita-caolín y bentonita-caolín, con diferentes proporciones. El material base siempre fue la diatomita, por ser un material poco analizado y poco empleado. Las mezclas utilizadas se presentan en

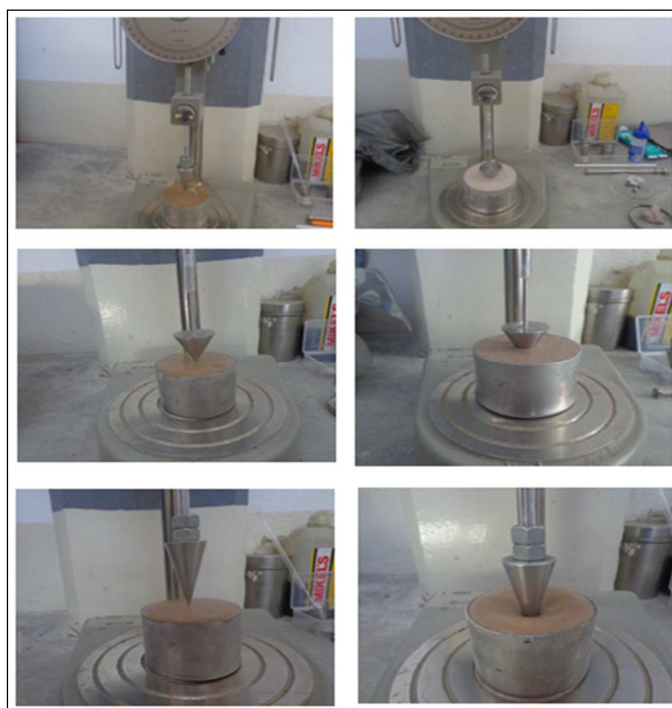


*Comparación de la obtención de límites de consistencia de arcillas usando los conos sueco e inglés*

la Tabla 1; los ensayos A, B y C fueron el material puro y las seis restantes están combinadas, el valor indica el porcentaje que se empleó para cada caso.

**TABLA 1**  
*Mezclas de los suelos ensayados en porcentaje.*

<b>Nomenclatura</b>	<b>Suelo</b>	<b>Mezcla (%)</b>
A	Diatomita	100 %
B	Bentonita	100 %
C	Caolín	100 %
D	Diatomita - Bentonita	80 - 20 %
E	Diatomita - Caolín	80 - 20 %
F	Diatomita - Bentonita	60 - 40 %
G	Diatomita - Caolín	60 - 40 %
H	Bentonita - Caolín	70 - 30 %
I	Bentonita - Caolín	50 - 50 %



*Figura 5.- Penetración de los conos Sueco e Inglés a las mezclas analizadas.*

### 3.1. Obtención del Límite Líquido

Para obtener el LL se emplearon dos métodos: el CCG de conos de penetración. Para el segundo método se consideraron el CS (60° y 60g) y el CI (30° y 80g). En la Figura. 5 se muestra todo el equipo utilizado. El secado para ambos casos se hizo a través de los HC y HMO.

**Suelos analizados** Para este estudio se realizaron 251 pruebas distribuidas de la siguiente manera: 111 con la CCG, 73 con el CS y 67 con el CI. Cabe resaltar que al momento de hacer las pruebas se hicieron tres combinaciones. La primera consistió en hacer simultáneamente los ensayos para la CCG y el CS; la segunda con la CCG y el CI; la tercera con la CCG, CS y CI. En la Figura 5 se muestra un momento del proceso ya mencionado.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2. La primera columna indica los suelos (A, B y C son suelos puros, de D a I son las mezclas indicadas en la Tabla 1). Para cada método se emplearon las dos técnicas de secado, arrojando los resultados que aparecen en las columnas respectivas. Se aprecia que la CCG y el secado con el HC, proporcionaron valores más elevados en comparación con los valores de los CS y CI; lo mismo sucedió con los valores obtenidos mediante el secado del HMO. Sin embargo, los resultados entre los conos fueron similares.

**TABLA 2**  
Resultados del Límite Líquido, con los diferentes materiales analizados.

Nomenclatura	Copa Casagrande		Cono Sueco		Cono Inglés	
	HC	HMO	HC	HMO	HC	HMO
A	162.90	162.60	130.80	130.60	139.40	139.20
B	306.70	306.60	231.80	231.80	248.80	249.00
C	45.30	45.90	43.60	43.20	40.10	40.90
D	194.20	194.40	174.00	174.90	171.00	171.60
E	87.00	87.20	80.70	80.00	72.80	72.50
F	181.20	181.00	170.70	170.80	167.70	167.80
G	70.50	70.40	60.10	60.40	57.00	56.70
H	97.50	97.60	77.10	77.40	70.50	70.40
I	61.60	61.70	56.10	56.10	53.80	53.70

### 3.2. Obtención del Límite Plástico

Para este estudio se empleó el método convencional de rolado y únicamente se utilizó el CI con una pequeña modificación a su peso (30° y 240g). El secado se hizo a través de los HC y del HMO. El equipo empleado se muestra en la Figura 6.



*Figura 6.-* Equipo utilizado para obtener el límite plástico a través del cono Inglés.

### Resultados de los ensayos

Para esta experimentación se hizo un promedio de 222 pruebas, de las cuales 111 se hicieron con el método convencional y la misma cantidad se utilizó para el CI con la modificación de su peso. Cabe resaltar que se usaron las mismas mezclas en ambos casos.

**TABLA 3**  
*Resultados obtenidos de las pruebas del Límite Plástico.*

Nomenclatura	Método Convencional		Cono Inglés	
	HC	HMO	HC	HMO
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

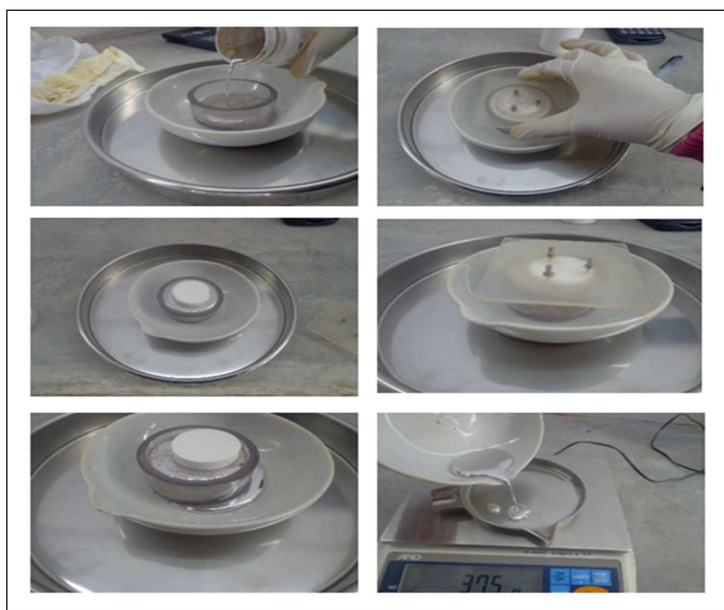
*Comparación de la obtención de límites de consistencia de arcillas usando los conos sueco e inglés*

Los resultados obtenidos del análisis se muestran en la Tabla 3, apreciándose que los valores de la prueba del rolado convencional son mayores que los obtenidos con el CI. En la aplicación de los hornos para el secado, se concluyó que las variaciones de las diferentes mezclas son mínimas.

El empleo del CI (con la modificación de su peso) y del HMO para calcular el PL es aceptable, ya que sus valores pueden ser correlacionados con el método convencional propuesto por Atterberg.

**3.3. Obtención de los Límites de Contracción**

Al igual que en la medición anterior, se realizaron tres tipos de pruebas para este proceso. El material empleado fue el mismo que se utilizó para las pruebas anteriores, cuidando que cumpliera con el contenido de agua de acuerdo a los LL (%) y se usó el CCG. Para los Límites de Contracción Lineal y Volumétrica se tomó una porción del material ya preparado anteriormente, cuidando que su contenido de agua correspondiera al LL (%) del suelo. En la Figura 7 se muestra la etapa.



*Figura 7.- Determinación de la Contracción Volumétrica (%) del suelo.*

### **Resultados de los análisis**

Para este proceso se hicieron un total de 222 ensayos, distribuyéndose de la siguiente manera, 111 para la contracción lineal CL (%) y el resto para contracción volumétrica CV (%). En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

**TABLA 4**  
*Resultados de los Límites de Contracción.*

<b>Mezcla</b>	<b>CL (%)</b>	<b>CV (%)</b>
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

### **Clasificación de los suelos**

Con el objeto de caracterizar los tipos de suelos empleados en este estudio, se aplicó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), considerando los valores de las distintas combinaciones. De cada combinación se hizo una comparación de sus resultados, con el objeto de decidir cuál era la mejor propuesta. Se optó por elegir los resultados obtenidos con el CI por ser más representativos, así como por el secado en el HC.

De acuerdo a los resultados de las combinaciones presentadas en el este estudio, se logró la clasificación del material: limos orgánicos y limos micáceos o diatomáceos elásticos. Estos se ubican en la zona III de la carta de plasticidad, al igual que la diatomita pura.

### **Clasificación Inglesa**

Para esta clasificación se aplicó la norma inglesa, utilizando los valores que se obtuvieron de la prueba del CI con secado en el HC. De acuerdo a los resultados y mostrados en la Tabla 5, se deduce que la clasificación se centra en limos

inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos con plasticidad, que va desde muy alta hasta extremadamente alta.

**TABLA 5**  
*Clasificación Inglesa, CI LP-CI en HC.*

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

#### **4. Discusión**

En este trabajo se presentaron técnicas alternativas a la CCG con el propósito de determinar el LL, el LP y las contracciones lineales de los suelos finos, que son confiables y están basadas en la penetración, por peso propio, de un cono en muestras de arcilla. El LL para el CS (60°/60grs) se define como el contenido de agua que posee un suelo cuando la penetración de este es de 10 mm, en cambio, para el CI (30°/80grs) cuando penetra 20 mm.

Para determinar la caracterización del material en este estudio se consideró lo propuesto por Christaras (1991), donde hizo una comparación entre el método de CCG y el penetrómetro de caída (cono), lo que permitió determinar el LL. Se confirma que los dos métodos proporcionaron resultados similares. Por su lado Hrubesova (2016) hizo una comparación entre el método de CCG y el CI, utilizando una arcilla de bentonita. Demostró que el LL de la bentonita en la prueba de penetración de cono, fue significativamente menor en comparación con el LL de CCG.

En el análisis de suelos arcillosos Gronbech et. al., (2011) estudiaron suelos que alcanzaron LL de hasta 350% e LP de hasta 300% de contenido de agua con el método CCG. Con el método del cono de caída se reduce el LL hasta un 43%. Con

esta información, concluyeron que el cono de caída es un método poco seguro para determinar el LL de arcillas altamente plásticas.

Orozco y Mendoza (2000), Mendoza y Orozco (2001) indican que el LL con la CCG es mayor al 20% (para los valores más altos), que el determinado mediante el CS, (norma sueca y con penetración de 10mm); en cambio para el CI es de sólo 15% (en relación a los resultados de la CCG).

Almanza et. al. (2016) ensayaron un suelo de diatomeas del Valle de Toluca (VT) y del Valle de México (VM) con promedios de 170% de contenido de agua para el VT y de 180% para el VM. Estos valores son próximos a los resultados obtenidos de este estudio 162% (CCG), 130% (CS) y 139% (CI), considerándose que el empleo de la CCG, del CS y CI, son una buena alternativa para caracterizar los suelos.

De la misma manera Mendoza y Orozco (1998) examinaron un caolín usando la CCG obteniendo un LL de 48.36% de contenido de agua y con el CI fue de 57.45%. También estudiaron la bentonita registrando el valor de 286.48% con la CCG y con el CI de 196.56% de contenido de agua. Mientras los valores obtenidos en este estudio fueron: para el caolín con la CCG el 45.33% y con el CI el 40.10% de contenido de agua; la bentonita con la CCG con 306.70% y el CI con 248.80% de contenido de agua. Se observa que los resultados entre ambos estudios son muy similares, lo que permite entender mejor el comportamiento de los suelos y su posible uso en la industria.

Así mismo en este trabajo se consideraron las propuestas de Hagerty et. al., (1990) y de Mendoza (1991), sobre el uso del HMO y el HC. En este trabajo se percibió que el uso del HMO reduce el tiempo de ejecución hasta un 90%, además se puede testificar que la obtención del LL con los CS y CI fue posible y sus valores se correlacionaron con los valores obtenidos de las pruebas de la CCG.

## **5. Conclusiones**

De los resultados de este estudio y el de otros investigadores, se demuestra que la penetración del CS permite determinar el LL% de una manera fácil y con resultados igualmente confiables a los que se obtienen con la CCG.

Se analizaron dos técnicas de secado que pueden fácilmente implementarse para determinar el contenido de agua " $\omega$ ". El HMO es una técnica alternativa al HC, es la

que tiene menor dispersión de resultados y la que toma menos tiempo de ensaye. Se percibió que el uso del HMO reduce el tiempo de ejecución hasta un 90%.

El empleo de los conos de penetración para determinar el LL de los suelos, como alternativa a la CCG, resulta más fácil y confiable que la técnica tradicional.

Para este estudio se analizaron tres tipos de suelos (diatomita, caolín y bentonita), además se hicieron mezclas y se probaron a través de la comparación de las técnicas de la CCG, de CS y del CI, llegando a los siguientes resultados:

- Del análisis para determinar el LL se deduce que los valores son muy similares no influyendo el tipo de secado; los resultados se consideran confiables y se pueden aprovechar para realizar cualquier tipo de correlación entre ellos.
- En relación a las mezclas que se propusieron para calcular el LL, se menciona que hubo dos que presentaron valores más altos que el resto, la primera fue diatomita (80%) con bentonita (20%), la segunda de diatomita (60%) con bentonita (40%). Sus valores superan por el doble a las otras mezclas.
- Para calcular el LP se usaron dos técnicas, el Método Convencional (MC) y el CI. Con el MC los resultados en la diatomea pura fueron de 89.10%; con el CI los resultados fueron del 72.64%. En la mezcla de diatomita (80%) con bentonita (20%), se obtuvieron los valores de 82.12% con el MC y de 68.22% con el CI.
- Los resultados del límite de contracción para los suelos puros (diatomita) fueron de 5.00% para la CL y del 129.36% para la CV. Para la bentonita se obtuvo el 48.26% para la CL y el 91.59% para la CV. Para el caolín la CL fue 3.22 % y la CV de 35.04% de contenido de agua.
- Por último, en la clasificación de suelos a través del SUCS, se concluyó que se trata de un Limo micáceo o diatomáceo elástico. Así mismo se empleó la carta de plasticidad de la norma inglesa para corroborar el resultado.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Coordinación de la Investigación Científica por su apoyo para llevar a cabo la presente investigación y agradecen también al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Michoacana de San



Nicolás de Hidalgo por la oportunidad que se les brindó para la realización de todos los ensayos de este trabajo.

## **Referencias**

- Almanza Hernández F., Garfias García E. y Rangel Núñez J. L. (2016). Microscopia de suelos blandos en los Valles de México y Toluca. XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Mérida, Yucatán, pp. 1-4.
- ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM C136/C136M-19 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org, DOI: 10.1520/C0136\_C0136M-19.
- ASTM D 2487-11. Método de ensayo para la Clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema de Clasificación Unificado de Suelos).
- ASTM D4318-17. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils". West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D427-04. "Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method". West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Altintas E. (2013). "An investigation on liquid limit of clays by differently shaped penetration cones". Ekim, IZMIR, 1-24.
- British Standard 1377 (1990). "Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes". British Standards Institution, London.
- British Standard 5930 (1999). "Code of Practice for Site investigations". British Standards Institution, London.
- Crestar's B. (1991). "A comparison of the Casagrande and fall cone". Engineering Geology 131-142.
- Das Braja M., 2014. "Fundamentos de ingeniería geotécnica", Cuarta Edición, Cengage Learning, pp. 228-262.
- Emami M. and 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.
- Garduño Monroy, V. H., Israde Alcántara, I. y Arreygue Rocha, E., (2002). "La inquietante evolución de las cuencas lacustres en zonas volcánicas: un ejemplo, la cuenca de Pátzcuaro, Michoacán". Aporte al proyecto Pátzcuaro. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp. 25-48.

- Gronbech G., Nielsen B. and Ibsen L. (2011). "Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of Casagrande and fall cone apparatus". Geotechnical Conference.
- Hagerty D., Ullrich C. and Denton M., (1990). Microwave drying of floors, Geotechnical Testing Journal, 13, no. 2: 138-141.
- Hrubesova et al. (2016). "Comparison of liquid limit of soils, resulted from Casagrande Test and Modified Cone Penetrometer Methodology Procedia Engineering", Elsevier, 364-370.
- Koumoto T. and Houlsby G. (2001). "Theory and practice of the fall cone test". Geotechnique, 701-712.
- Martínez Rojas, A. (2018). "Caracterización de las propiedades índice de mezclas de suelos finos utilizando diferentes métodos, casos diatomita-caolín y diatomita-bentonita". Tesis de Licenciatura, UMSNH.
- Massarsch K. (2014). "Cone penetration testing - A historic perspective". 3<sup>rd</sup>. 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. (1996). "Determinación del límite líquido de suelos con el cono sueco". Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 81-89.
- Mendoza, L. y Orozco, M. (1998). "Técnicas alternativas para la determinación del Límite Líquido de suelos". Series No. 605 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 37-43.
- Mendoza, L. y Orozco, M. (2001). "Procedimiento rápido y fiable para la determinación del límite líquido de los suelos de grano fino". Geotechnical testing journal, 108-130.
- Orozco, C. M. y Mendoza, L. M. (2000). "Determinación rápida y confiable de contenido de agua, límite líquido y resistencia cortante no drenada de suelos finos". Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Oaxaca, Oaxaca. 53-62.
- Spagnoli, G. (2012). "Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay". Canadian Journal of soil science, 859-864.