

GUIA DE LABORATORIO ¹

I. LIMITES DE ATTERBERG

I.1 Generalidades

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, USCS).

Fueron originalmente ideados por un sueco de nombre Atterberg especialista en agronomía y posteriormente redefinidos por Casagrande para fines de mecánica de suelos de la manera que hoy se conocen.

Para obtener estos límites se requiere remoldear (manipular) la muestra de suelo destruyendo su estructura original y por ello es que una descripción del suelo en sus condiciones naturales es absolutamente necesaria y complementaria.

Para realizar los límites de Atterberg se trabaja con todo el material menor que la malla #40 (0.42 mm). Esto quiere decir que no solo se trabaja con la parte fina del suelo (< malla #200), sino que se incluye igualmente la fracción de arena fina.

I.2 Definiciones

- a) **Contenido de humedad (w):** Razón entre peso del agua y peso del suelo seco de una muestra. Se expresa en porcentaje:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100$$

donde:

W_w : peso agua

W_s : peso suelo seco

- b) **Límite Líquido (w_L ó LL):** contenido de humedad del suelo en el límite entre el estado semi-líquido y plástico.
- c) **Límite Plástico (w_p ó LP):** es el contenido de humedad del suelo en el límite entre los estados semi-sólido y plástico.
- d) **Índice de Plasticidad (IP):** es la diferencia entre los límites líquido y plástico, es decir, el rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene plástico:

$$IP = L_L - L_P$$

¹ Apuntes Laboratorio CI44A, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

I.3 Equipo

1. Máquina de Casagrande (referencia: norma ASTM N° D 4318-95a)
2. Acanalador (misma referencia)
3. Balanza de sensibilidad 0.1g
4. Varios: espátula de acero flexible, cápsulas de porcelana, placa de vidrio, hormo regulable a 110°, agua destilada.

I.4 Procedimiento y Cálculo

a. Preparación del material.

Se utiliza únicamente la parte del suelo que pasa por la malla # 40 (0.42 mm). Se procede a agregar o retirar agua según sea necesario y revolver la muestra hasta obtener una pasta semi-líquida homogénea en términos de humedad.

Para los limos y suelos arenosos con poco contenido de arcilla el ensayo se podrá realizar inmediatamente después de agregar agua, siguiendo el procedimiento indicado en letra b. Para los limos arcillosos será necesario conservar la pasta aproximadamente 4 horas en un recipiente cubierto. Para las arcillas este tiempo deberá aumentarse a 15 o más horas para asegurar una humedad uniforme de la muestra.

b. Determinación del límite líquido.

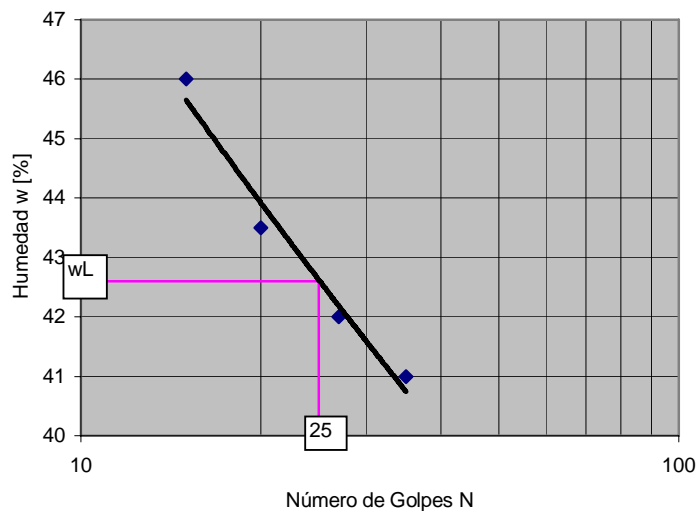
En la práctica, el límite líquido se determina sabiendo que el suelo remoldeado a $w = w_L$ tiene una pequeña resistencia al corte (aprox. 0.02 kg/cm²) de tal modo que la muestra de suelo remoldeado necesita de 25 golpes para cerrar en ½ pulgada dos secciones de una pasta de suelo de dimensiones especificadas más adelante.

- 1) se deberá iniciar el ensayo preparando una pasta de suelo en la cápsula de porcelana con una humedad ligeramente superior al límite líquido, para lo cual recibirán indicaciones del instructor,
- 2) desmontar y secar la cápsula de la máquina de Casagrande, asegurándose que ella se encuentre perfectamente limpia y seca antes de iniciar el procedimiento,
- 3) montar la cápsula en su posición para el ensayo,
- 4) colocar entre 50 y 70 g de suelo húmedo en la cápsula, alisando la superficie a una altura de 1 cm con la espátula, cuidando de no dejar burbujas de aire en la masa de suelo,
- 5) usando el acanalador separar el suelo en dos mitades según el eje de simetría de la cápsula; para una arcilla, el surco se puede hacer de una vez; los limos pueden exigir 2 o 3 pasadas suaves antes de completarlo, siendo este procedimiento aún más complejo cuando se trata de suelos orgánicos con raicillas,

- 6) girar la manivela de manera uniforme a una velocidad de dos revoluciones/seg; continuar hasta que el surco se cierre en $\frac{1}{2}$ " de longitud; anotar el número de golpes, cuando éste sea inferior a 40,
- 7) revolver el suelo en la cápsula de Casagrande con la espátula y repetir las operaciones 5) y 6)
- 8) tomar una muestra de aproximadamente 5 g de suelo en la zona donde se cerró el surco y pesarla de inmediato para obtener su contenido de humedad, lo que permitirá obtener un punto en el gráfico semi-logarítmico de humedad v/s número de golpes que se describe más adelante,
- 9) vaciar el suelo de la cápsula de Casagrande a la de porcelana (que todavía contiene la mezcla de suelo inicial), continuar revolviendo el suelo con la espátula (durante el cual el suelo pierde humedad) y en seguida repetir las etapas (2) a (8),
- 10) repetir etapas (2) a (9), 3 a 4 veces, hasta llegar a un número de golpes de 15 a 20.

Cálculo de w_L .

Sobre un papel semi-logarítmico se construye la “**curva de flujo**” como se indica en la figura. Los puntos obtenidos tienden a alinearse sobre una recta lo que permite interpolar para la determinación de la ordenada w_L para la abscisa $N = 25$ golpes.



Nota: Método de un punto. Se puede obtener el valor de w_L a través de una sola determinación. Este método es válido para suelos de mismo tipo y formación geológica; se ha observado que tales suelos tienen curvas de flujo de iguales inclinación, en escala semi-log. Se usa la fórmula:

$$w_L = w \times \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \alpha}$$

donde:

α = inclinación curva de flujo (escala semi-log)

N = número de golpes

w = contenido de humedad correspondiente a N.

(valores comunes de $\tan \alpha$: 0.12 a 0.13)

c. Determinación del límite plástico w_P

El límite plástico es el contenido de humedad para el cual el suelo se fractura al ser amasado en bastoncitos de diámetro 1/8" (3 mm) cuando se amasa una pequeña porción de suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa.

- 1) utilizar una porción del material que queda del ensayo del límite líquido,
- 2) en los suelos muy plásticos w_P puede ser muy diferente de w_L ; para evitar excesivas demoras en el ensayo con los suelos muy plásticos, es necesario secar el material al aire durante un cierto tiempo extendiéndolo sobre la placa de vidrio o amasándolo sobre toalla nova; se le puede igualmente colocar sobre el horno (a temperatura baja), al sol, o bien bajo una ampolleta eléctrica; en cualquier caso es necesario asegurarse que se seque de manera uniforme,
- 3) tomar una bolita de suelo de 1 cm³ y amasarla sobre el vidrio con la palma de la mano hasta formar bastoncitos de 3 mm de diámetro,
- 4) reconstruir la bolita de suelo, uniendo el material con fuerte presión de las puntas de los dedos y amasar nuevamente un bastoncito hasta llegar al límite plástico,
- 5) el límite plástico, w_P , corresponde al contenido de humedad para el cual un bastoncito de 3 mm, así formado, se rompe en trozos de 0.5 a 1 cm de largo, si no se está seguro de haber alcanzado w_P , es recomendable amasar una vez más el bastoncito,
- 6) pesar inmediatamente el bastoncito así formado para determinar su contenido de humedad,
- 7) realizar 2 o 3 ensayos repitiendo etapas (3) a (6) y promediar; diferencias entre 2 determinaciones no deberán exceder a 2 %.

II. Análisis Granulométrico

II.1 Definiciones

El análisis granulométrico de una muestra de suelo consiste en determinar la proporción relativa en peso de los diferentes tamaños de granos, definidos por las aberturas de las mallas utilizadas.

II.3 Equipo

1. Serie de mallas ASTM
2. Balanzas de diferente sensibilidad

Malla	Abertura [mm]
3"	75.0
2 1/2"	63.0
2"	50.0
1 1/2"	37.5
1"	25.0
3/4"	19.0
1/2"	12.5
3/8"	9.5

Malla	Abertura [mm]
# 4	4,750
# 8	2,360
# 10	2,000
# 30	0,600
# 40	0,425
# 50	0,300
# 100	0,150
# 200	0,074

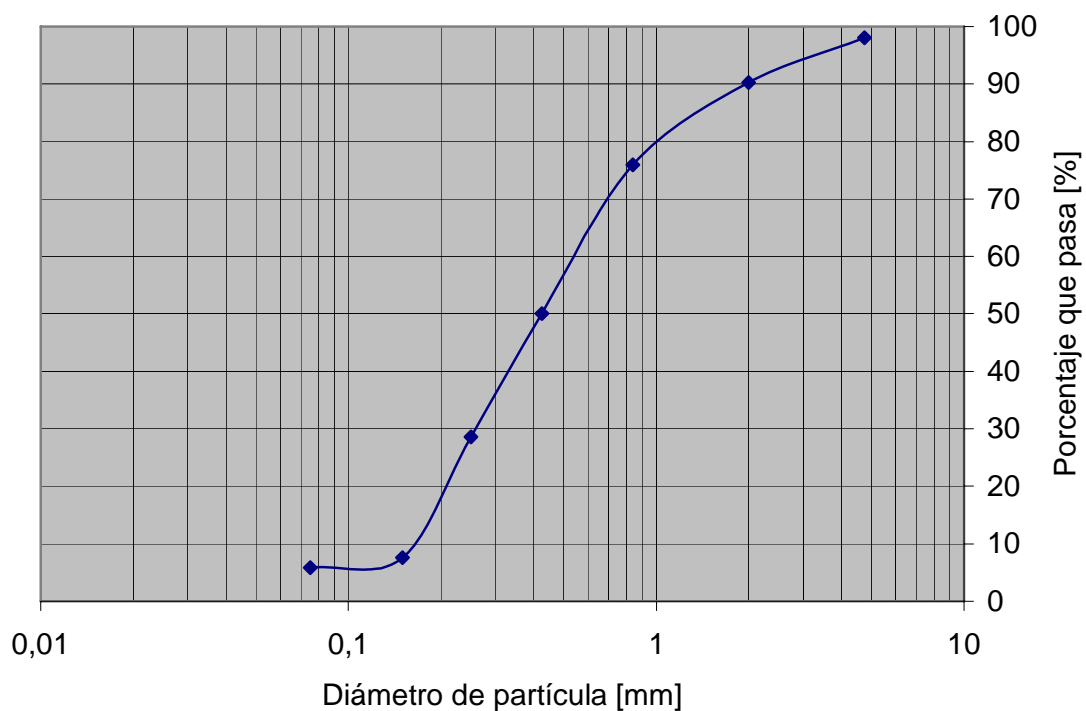
II.4 Procedimiento y Cálculos

- 1) pasar la muestra seca de suelo por la malla 3/8" y separar el material que pasa esta malla, a fin de determinar el porcentaje de finos de forma confiable posteriormente,
- 2) pasar el material retenido en la malla 3/8" por las mallas 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2" y 3/8" y pesar las porciones de material retenido en cada una de ellas,
- 3) mezclar homogéneamente el material que pasó por la malla 3/8" y tomar una muestra representativa según indicación del instructor,
- 4) colocar la muestra obtenida en etapa (3) sobre la malla #200 y lavar el material, utilizando agua común, de tal manera que el agua arrastre los finos haciéndolos pasar por esta malla, hasta que el agua que pasa a través de la malla mantenga su transparencia,
- 5) verter cuidadosamente el residuo, en un recipiente desecador y permitirle sedimentar por un período de tiempo suficiente hasta lograr que el agua en la parte

superficial de la suspensión se vuelva transparente, eliminar esta agua transparente y colocar el recipiente con la suspensión suelo y agua remanentes en el horno para secado,

- 6) al día siguiente, regresar al laboratorio y pesar el residuo secado al horno o, en su defecto, el instructor les entregará otras indicaciones,
- 7) finalmente, pasar la muestra (lavada y seca) por las mallas #4 a la #200, registrando el peso retenido en cada malla.

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en un gráfico semi-logarítmico como el indicado en la figura donde en abscisas se indican los diámetros de partículas y en ordenadas el porcentaje en peso que pasa.



A partir de la curva de distribución granulométrica, se pueden obtener diámetros característicos tales como el D_{10} , D_{30} , D_{60} . El diámetro D se refiere al tamaño de partículas y el subíndice denota el porcentaje de material que pasa. Por ejemplo $D_{10} = 0.15$ mm significa que el 10 % de los granos de la muestra son menores en diámetro que 0.15 mm. El diámetro D_{10} es también llamado diámetro efectivo del suelo.

Una indicación de la variación o rango del tamaño de los granos presentes en una muestra se obtiene mediante el coeficiente de uniformidad C_U , utilizado en la Clasificación Unificada, USCS, el que está definido como:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

En realidad, debiera llamarse coeficiente de **desuniformidad**, ya que un valor creciente de este parámetro indica que los diámetros D_{60} y D_{10} difieren en tamaño apreciablemente, es decir, el suelo tiene tamaños no uniformes. Sin embargo, esto no asegura la inexistencia de vacíos de gradación, como el que se presenta cuando faltan un cierto tipo de tamaños por completo o solamente existe una muy pequeña cantidad de diámetros de un determinado tamaño. Existe otro parámetro llamado coeficiente de curvatura C_C , el cual mide la forma de la curva entre el D_{60} y el D_{10} , definiéndose de la siguiente manera:

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Valores de C_C muy diferentes de la unidad indican la falta de una serie de diámetros entre los tamaños correspondientes al D_{10} y el D_{60} .

- ***Suelos de grano grueso***

> 50 % queda retenido en la malla # 200 (0.074 mm)

- Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla # 4 (4.75 mm)
 - fracción fina < 5 %: GW, GP según C_U y C_C
 - fracción fina > 12 %: GM, GC según carta de plasticidad
 - fracción entre 5 % y 12 %: Símbolos dobles. Ej: GW-GC, mezcla bien graduada de arena y grava en una matriz arcillosa.
- Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla # 4 (4.75 mm)
 - fracción fina < 5 %: SW, SP según C_U y C_C
 - fracción fina > 12 %: SM, SC según carta de plasticidad
 - fracción entre 5 % y 12 %: Símbolos dobles.

- ***Suelos de grano fino***

> 50 % pasa por la malla # 200 (0.074 mm)

- Carta de plasticidad

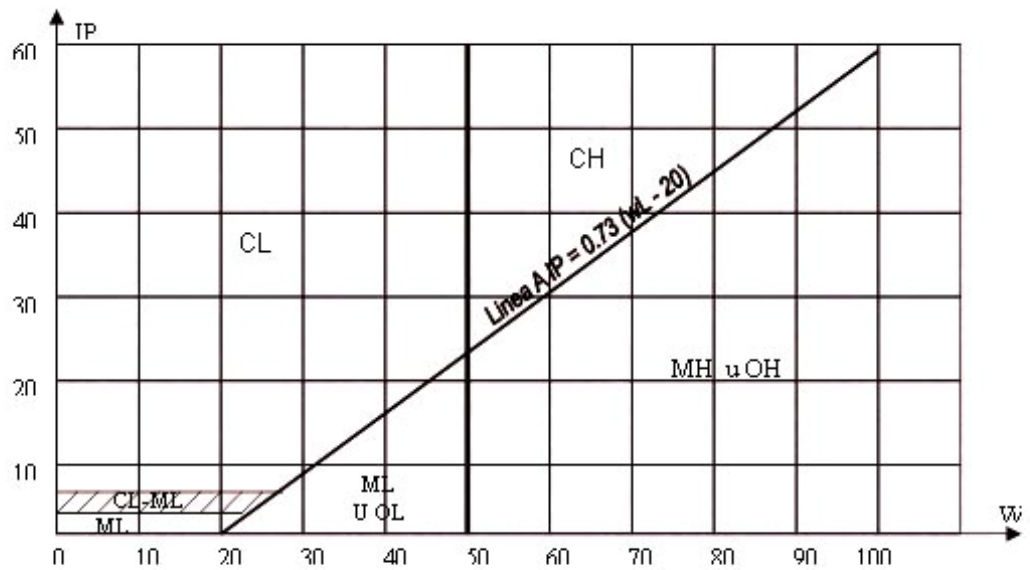


Fig. 5.12 Carta de Plasticidad

III. Bibliografía

1. Lambe, T.W. *Soil Testing for Engineers* Wiley, New York, 1951, Capítulo 3 (Biblioteca Ingeniería Civil)
2. Casagrande, A. *Classification and Identification of Soils. Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 113, p 901, 1948 (Biblioteca IDIEM)
3. Bowles, J.E. *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil* (Biblioteca Ingeniería Civil).
4. ASTM D4318-95a, *Standard Test Method for Liquid Limit, and Plasticity Index of Soils*.
5. ASTM D422, *Test Procedures for Particle-Size Analysis – Mechanical Method*.