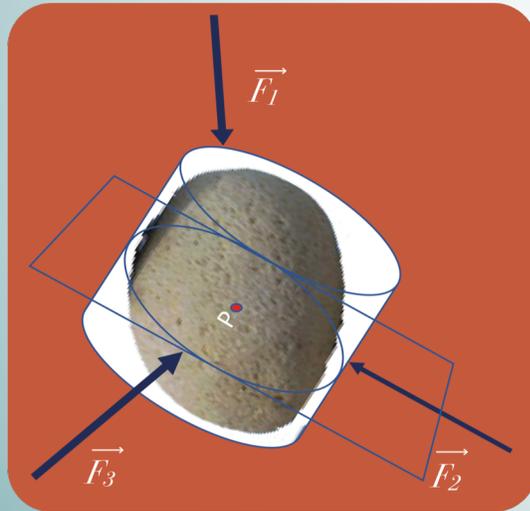


Caracterización geomecánica de suelos y rocas

Tema 9 Relaciones entre granulometría y volumen de un suelo



Alberto González Díez

Patricio Martínez Cedrún

DPTO. DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA
(CITIMAC)

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

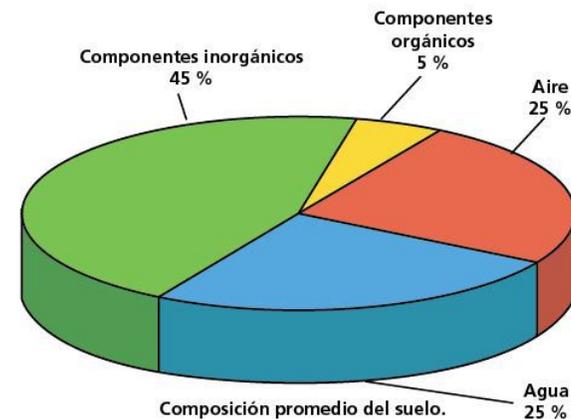


Fases del suelo

En el suelo se distinguen tres fases:

- **Sólida:** Formada por partículas minerales del suelo.
- **Líquida:** Generalmente agua (específicamente agua libre), pueden existir otros líquidos de menor significación.
- **Gaseosa:** Principalmente oxígeno y dióxido de carbono, si bien pueden estar presentes otros gases como vapores de sulfuro, anhídridos carbónicos, etc.

<https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/composicion-y-clasificacion-de-los-suelos-1293271.html>



(Ortega, 2014)

Propiedades elementales. Parámetros de estado

La fase líquida y gaseosa constituyen el total de los vacíos del suelo.

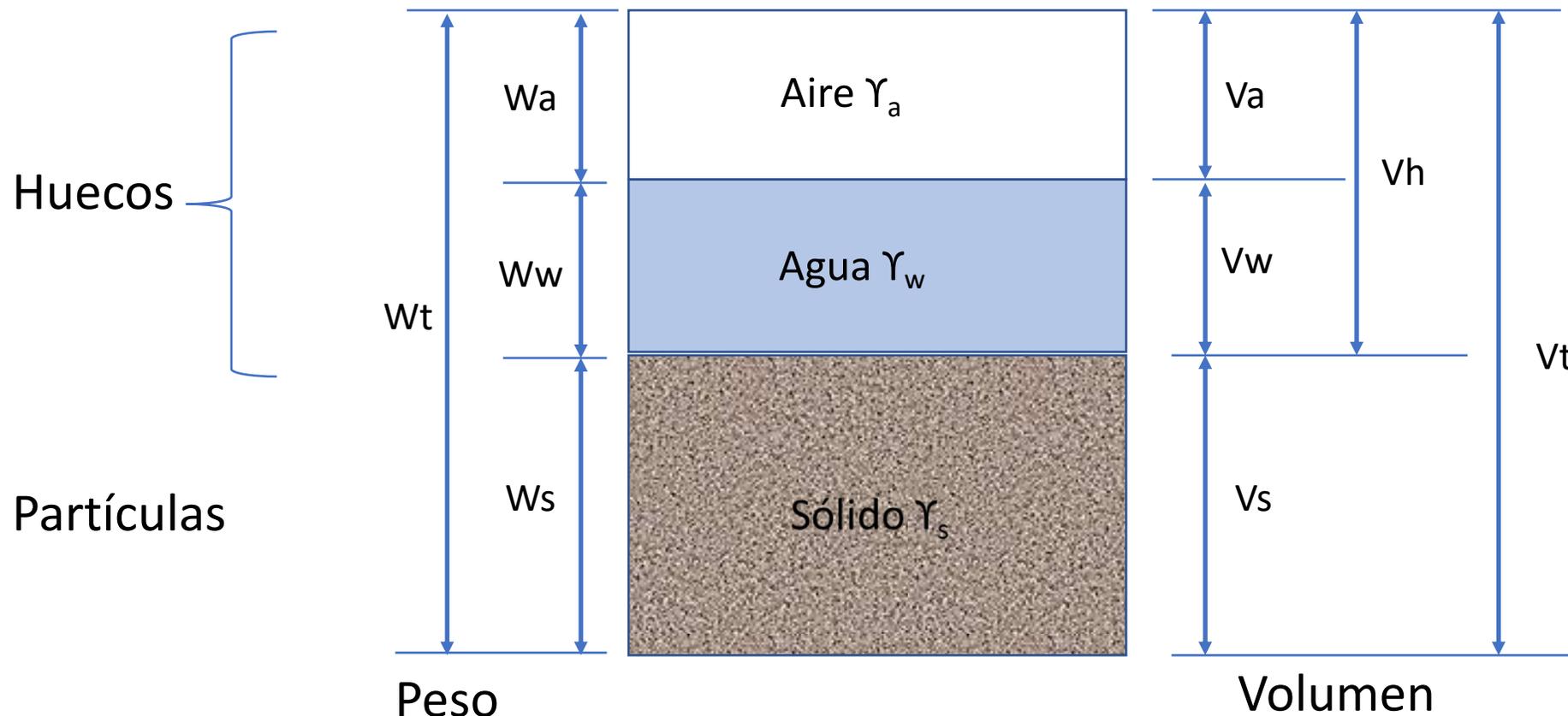
Un suelo está saturado cuando todos los huecos están ocupados por agua. Los suelos que se encuentran bajo el nivel freático normalmente presentan esta condición.

Por el contrario, un suelo es seco cuando todo su volumen está constituido por suelo y hay ausencia de agua.

Las relaciones entre las fases, la granulometría y los límites de Atterberg se utilizan para clasificar los suelos y estimar su comportamiento.

Propiedades elementales. Parámetros de estado

Las relaciones entre volúmenes y pesos de los elementos constitutivos de un suelo definen el estado de compacidad.



Propiedades elementales

En el modelo de fases, se separan volúmenes (V) y pesos (W) así: Volumen total (V_T), volumen de vacíos (V_V), que corresponde al espacio no ocupado por los sólidos; volumen de sólidos (V_S), volumen de aire (V_A) y volumen de agua (V_W).

$$V_t = V_v + V_s$$

$$V_v = V_s + V_w$$

En los pesos, el peso del aire se desprecia, por lo que $W_A = 0$. El peso total del espécimen o de la muestra (W_T) es igual a la suma del peso de los sólidos (W_S) más el peso del agua (W_W):

$$W_t = W_s + W_w$$

Relaciones de volumen

En base a las mismas se determinan las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

Porosidad, n : cociente entre volumen de huecos y volumen total

$$n = \frac{v_h}{v_t}$$

Índice de huecos o de poros, e : cociente entre volúmenes de huecos y de sólidos.

$$e = \frac{v_h}{v_s}$$

Estas dos relaciones se vinculan de la siguiente manera:

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$n = \frac{e}{1+e}$$

Humedad, w : cociente de pesos de agua y sólidos (suele expresarse en tantos por ciento)

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

Grado de saturación, S_r : fracción de poros llenos de agua (suele expresarse en tantos por ciento)

$$S_r = \frac{v_w}{v_h}$$

Densidad relativa, D_r : relaciona el índice de poros actual de un suelo con su máximo y mínimo alcanzables.

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{m_{ax}} - e_{\min}}$$

Cuanto mayor es la densidad, menor es el volumen de huecos y el número de contactos entre partículas es mayor. El rango de valores oscila de 0 a 1.

Peso específico aparente, natural o húmedo, γ : cociente entre el peso total y el volumen total

$$r = \frac{W_t}{v_t} = \frac{W_s + W_w}{v_s + v_h} = \frac{r_s v_s + r_w v_w}{v_s + v_h}$$

Peso específico de las partículas sólidas $\gamma_s = \frac{W_s}{v_s}$

Densidad relativa de las partículas sólidas $G = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$

$$\gamma_w = 9,8 \text{ ó } 10 \text{ KN/m}^3$$

Peso específico del suelo seco, γ_d : peso específico, descontado el peso del agua, es decir, el peso específico aparente que tendría el suelo si extrajéramos su agua sin modificar su volumen total

$$r_d = \frac{W_s}{v_t} = \frac{W_s}{v_t + v_h} = \frac{r_s v_s}{v_s + v_h}$$

Peso específico saturado, r_{sat} : peso específico aparente que tendría el suelo si se saturasen totalmente sus poros sin modificar su volumen total

$$r_{sat} = \frac{w_s + w_w^{st}}{v_t} = \frac{\gamma_s v_s + r_w v_h}{v_s + v_h}$$

En general, una arena constituida principalmente por granos de cuarzo $\gamma_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$. Sin embargo, el valor promedio del peso específico de las arcillas es $2,75 \text{ g/cm}^3$.

Densidad o Peso por Unidad de Volumen de los Suelos Sumergidos

Los cuerpos sumergidos en agua (en este caso los suelos) pesan menos que en el aire, a causa del efecto del empuje hidrostático dado por la ley de Arquímedes. En consecuencia al peso de los granos hay que restarle el peso del volumen de agua que desplaza al sumergirse.

Peso sumergido= $W_s - V_s \cdot \gamma_w$

En consecuencia, la densidad del suelo sumergido será igual al peso del suelo sumergido dividido por el volumen total:

$$\gamma' = \frac{W_s - v_s \cdot \gamma_w}{v_t}$$

Consideraciones de las relaciones fundamentales

Es habitual referirse a los pesos específicos como densidades, aunque se trata de peso y no de masa.

El peso específico de la materia, r_0 , varía relativamente poco (26-27 KN/m³). El del agua, γ_w , es de 10 KN/m³ (más correctamente 9,81 KN/m³) y el del aire se considera despreciable.

El índice de poros de las gravas y arenas oscila entre 0,20 y 0,50. Para los limos y arcillas es entre 0,40 y 1,00.

La humedad natural para suelos secos y duros varía entre el 10-20%, mientras que en suelos blandos oscila entre el 20-40%.

El peso específico seco en suelos blandos o flojos está entre 15-18 KN/m³, mientras que en suelos densos o muy compactados se sitúa entre 19-22 KN/m³.

Textura y estructura del suelo

Textura

Es la proporción relativa de los tamaños de los grupos de partículas (arena, limo, arcilla) que constituyen un suelo. Está relacionada con el tamaño de las partículas minerales.

En la fracción arena predominan cuarzo, feldespato, etc; cuarzo, feldespatos, silicatos secundarios se asocian al limo; silicatos secundarios y materia orgánica a la arcilla.

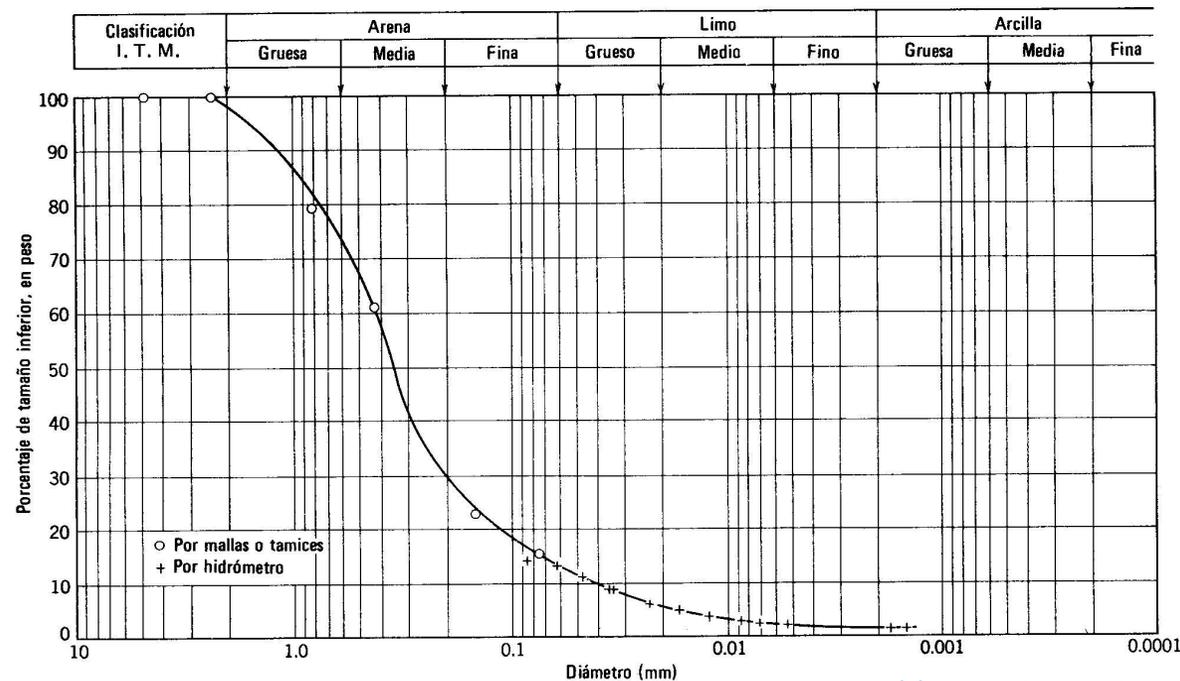
Estructura

Modo en que se organizan las partículas del suelo. Se ordenan en agrupaciones que dan lugar a estructuras diferentes: forma de nuez (partículas irregulares), estructura prismática, estructura laminar, etc.

Granulometría

Indica la distribución o proporción relativa de cada una de las fracciones de las partículas que constituyen el suelo. Las partículas de un suelo son separadas mediante tamices en intervalos de tamaños para determinar la proporción relativa en peso de cada rango de tamaño.

Se representa por la curva granulométrica que emplea los porcentajes retenidos acumulados. Se representa en escala logarítmica de tamaños.



Tipos de suelos

El criterio inicial en la clasificación de los suelos es el tamaño de las partículas.

Denominación	Tamaño (mm)	
Grava G	60	
	Gruesa	0
	Media	6
	Fina	2
Arena S	Gruesa	0,6
	Media	0,2
	Fina	0,06
Limo M	Grueso	0,2
	Medio	0,06
	Fino	0,002
Arcilla C		

Tipos de suelos

Gravas: los granos son observables directamente. No retienen el agua y los huecos entre las partículas son grandes.

Arena: las partículas son observables a simple vista. Con la humedad adquieren cierta cohesión aumentando su resistencia.

Limos: retienen el agua mejor que las gravas y arenas. Si se forma una pasta agua-limo y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se ve cómo el agua se exuda con facilidad. Son relativamente impermeables y en seco muestran reducida resistencia.

Arcillas: partículas planas, tamaño gel, generadas por meteorización química. Son prácticamente impermeables y en presencia de agua son moldeables. En seco muestran una elevada resistencia.

Descripción y clasificación de suelos

-Análisis granulométrico (ASTM D 2487)

- Sirve para establecer cómo se distribuyen los diámetros de las partículas y conocer el porcentaje de partículas que pasan un determinado tamiz.
- La separación entre gravas y arenas es en el tamiz nº4 y entre arenas y limos en el tamiz nº 200.
- Es realizado mediante las normas UNE 103101:1995 y/o ASTM D422-63(2007).
- Separa partículas hasta tamaños de 0,060-0,075-0,080 mm, según la normativa utilizada. Para tamaños inferiores se utiliza el análisis granulométrico de sedimentación.

Parámetros de la curva granulométrica

La curva granulométrica es la expresión gráfica de los resultados de los análisis granulométricos y tiene forma de S.

Para establecer la distribución de tamaño de partículas los valores que más frecuentemente se utilizan son D10, D50 y D90, que son los que interceptan el 10%, 50% y 90% de la masa acumulada.

Coeficiente de uniformidad:

Evalúa la uniformidad del tamaño de las partículas de un suelo.

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

$C_u > 10 \Rightarrow$ Suelo no uniforme \Rightarrow Partículas tamaños variados.

$C_u < 2 \Rightarrow$ Suelo uniforme \Rightarrow Partículas tamaños parecidos.

Diámetro eficaz (D10)

Relacionado con la permeabilidad de las arenas

Corresponde al diámetro máximo de partículas en la fracción que contiene el 10% más fino del suelo.

Coeficiente de curvatura

Es un indicador del equilibrio relativo que existe entre los diferentes rangos de tamaño de partículas del suelo.

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

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)

Los suelos gruesos y los finos son diferenciados por el cribado de la malla No 200. Las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas, en peso, no pasan la malla No 200; en caso contrario, el suelo es fino.

Suelos Gruesos

Las gravas y las arenas se separan con la malla No 4, de manera que un suelo pertenece al grupo G (grava), si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla No 200) no pasa la malla No 4, sino es del grupo S (arena).

A su vez, las gravas y arenas se subdividen en otros grupos: GW y SW (bien graduados), GP y SP (mal graduados), GM y SM (cantidad apreciable de finos no plásticos), GC y SC (cantidad apreciable de finos plásticos).

Suelos Finos

- Limos inorgánicos (M)
- Arcillas inorgánicas (C)
- Limos y arcillas orgánicas (O)

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido en dos grupos. Si éste es menor de 50%, se añade al símbolo genérico la letra L. Los suelos finos con límite líquido mayor de 50% llevan tras el símbolo genérico la letra H.

Los suelos altamente orgánicos, turbas y suelos pantanosos, son extremadamente compresibles y forman un grupo independiente de símbolo Pt.

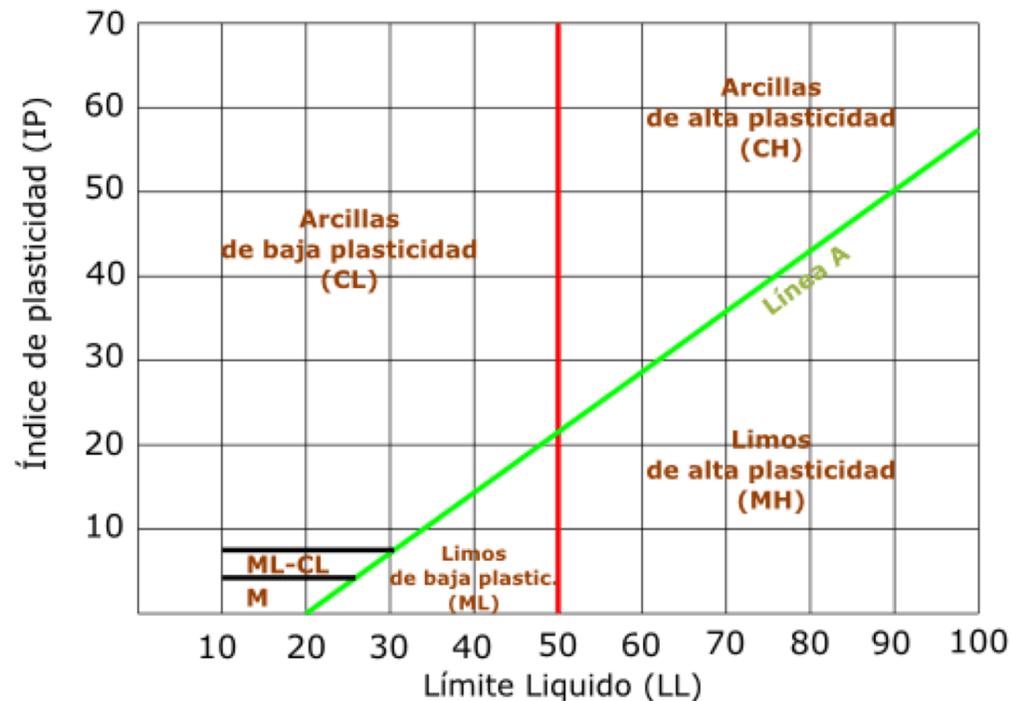
Clasificación de los suelos según ASTM

Descripción		Símbolos de grupo	Criterios de laboratorio			
			Finos (%)	Gradación	Plasticidad	Notas
Grano grueso [Más de 50% de tamaño mayor que la medida del tamiz No. 200 (0.074 mm)]	Gravas [Más de 50% de la fracción gruesa, es retenida por el tamiz n° 4 (4.76 mm)]	Gravas bien escalonadas, gravas arenosas, con escasos finos o sin ellos	GW	0 - 5	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}} < 3$	Símbolos duales si los finos van de 5 a 12% . Símbolos duales si están sobre la línea A, y $4 < I_p < 7$
		Gravas pobremente escalonadas, arenosas, con escasos finos o sin ellos	GP	0 - 5		
		Gravas sedimentarias, gravas arenosas arcillosas	GM	> 12	Por debajo de la línea "A" o $I_p < 4$	
		Gravas arcillosas, gravas arenosas arcillosas	GC	> 12	Por encima de la línea "A" con $I_p > 7$	
	Arenas [Más de 50% de la fracción gruesa, pasa por el tamiz n° 4 (4.76 mm)]	Arenas bien escalonadas, arenas con grava, con pocos finos o sin ellos	SW	0 - 5	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}} < 3$	
		Arenas pobremente escalonadas, arenas con gravas, con pocos finos o sin ellos	SP	0 - 5		
		Arenas sedimentarias	SM	> 12	Por debajo de la línea "A" o $I_p < 4$	
		Arenas arcillosas	SC	> 12	Por encima de la línea "A" con $I_p > 7$	
Grano fino [Más de 50% de tamaño menor que la medida del tamiz No. 200 (0.074 mm)]	Sedimentos y arcillas (Límite líquido inferior a 50)	Sedimentos inorgánicos, arenas finas sedimentarias o arcillosas, con leve plasticidad	ML	Usar diagrama de plasticidad		
		Arcillas inorgánicas, sedimentarias, arenosas de baja plasticidad	CL	Usar diagrama de plasticidad		
		Sedimentos orgánicos y arcillas sedimentarias orgánicas de baja plasticidad	OL	Usar diagrama de plasticidad		
	Sedimentos y arcillas (Límite líquido superior a 50)	Sedimentos orgánicos de alta plasticidad	MH	Usar diagrama de plasticidad		
		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad	CH	Usar diagrama de plasticidad		
		Arcillas orgánicas de alta plasticidad	OH	Usar diagrama de plasticidad		
Suelos altamente orgánicos	Turba y suelos altamente orgánicos	Pt				

Índice de plasticidad (I_p): intervalo de humedad en que el suelo permanece plástico; es decir, se comporta como un sólido plástico.

$$I_p = W_L - W_P$$

Todos estos parámetros sirven para identificar los suelos limosos y arcillosos con la **Carta de Plasticidad de Casagrande**.



Grupos CL y CH. El grupo CL comprende a la zona sobre la línea A de la carta de plasticidad con $LL < 50\%$ e $IP > 7\%$, mientras que el grupo CH se sitúa arriba de la línea A, definida por $LL > 50\%$.

Grupos ML y MH. El grupo ML comprende la zona inferior de la línea A, con $LL < 50\%$, y la parte superior de la línea A con $IP < 4$. El grupo MH corresponde a la zona inferior de la línea A, definida por $LL > 50\%$.

Los suelos finos que caen sobre la línea A y con $4\% < IP < 7\%$ poseen el símbolo doble CL-ML ya que son considerados casos frontera.

Grupos OL y OH. Las zonas correspondientes a estos dos grupos son los mismos que la de los grupos ML y MH; sin embargo, los orgánicos están siempre próximos a la línea A.

Grupos Pt. Están situados en la carta de plasticidad claramente por debajo de la línea A. El índice plástico normalmente varía entre 100% y 200%.

SISTEMA CLASIFICACION USCS

GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)

Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP	
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3		
	GP			≤ 6	<1ó>3		
	GM		> 12				< 0.73 (wl-20) ó <4
	GC						> 0.73 (wl-20) ó >7
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3		
	SP			≤ 6	<1ó>3		
	SM		> 12				< 0.73 (wl-20) ó <4
	SC						> 0.73 (wl-20) y >7

* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC.

*** respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm

** Si $IP \geq 0.73 (wl-20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $IP > 0.73 (wl-20)$, usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.

En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej: GW-GM en vez de GW-GC.

$$C_U = (D_{60}) / (D_{10})$$

$$C_C = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$$

Consistencia y plasticidad

La consistencia es la capacidad que tiene un suelo de mantener la estabilidad y coherencia. En mecánica de suelos, sólo se utiliza para los suelos finos que, dependiendo del contenido de agua y su mineralogía, fluyen sin romperse.

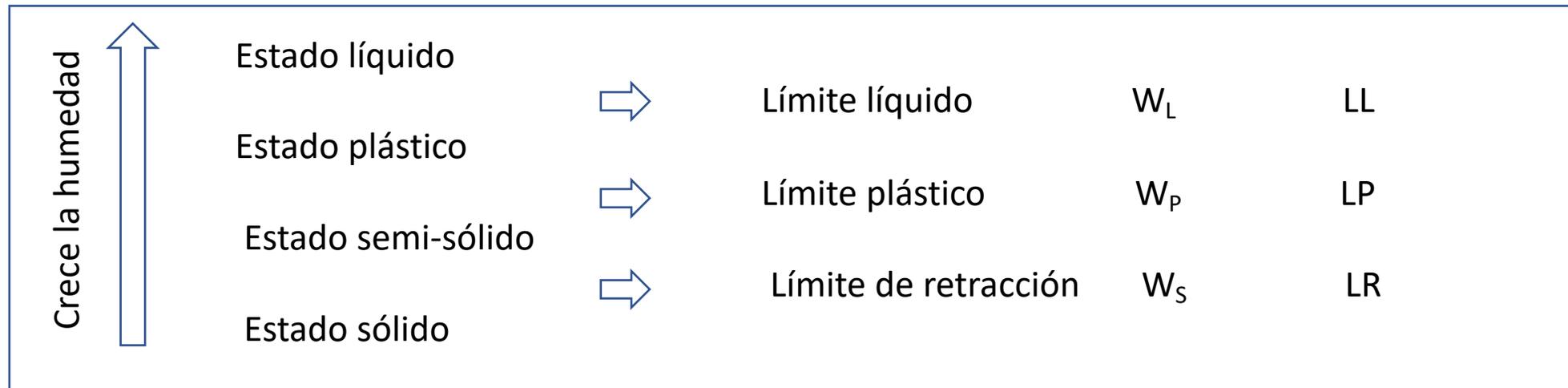
La plasticidad de un suelo es la propiedad que permite resistir deformaciones rápidas, sin cambiar de volumen y sin agrietarse ni desagregarse. Depende del contenido en arcilla y es debida a la deformación de la capa de agua adsorbida alrededor de los minerales, que se desplaza como sustancia viscosa a lo largo de la superficie mineral, controlada por la atracción iónica. La plasticidad en las arcillas, por su forma aplanada (lentejas) y pequeño tamaño, es alta.

Plasticidad. Límites de Atterberg

Para los limos y arcillas la identificación se basa preferentemente en la plasticidad.

Cuando se añade agua a las partículas finas, gracias a su actividad eléctrica se separan unas de otras hasta formar una suspensión cada vez más diluida, pudiendo mostrar diferentes estados de consistencia: desde un sólido frágil hasta un líquido.

Atterberg (1911) establece arbitrariamente tres límites que se definen como la humedad para la cual la arcilla presenta una determinada consistencia.



Límites de Atterberg para los cuatro estados de los suelos finos

Límites de Atterberg

Para poder identificar un suelo fino es preciso realizar los ensayos de Límites de Plasticidad o Límites de Atterberg.

Los límites líquido y plástico se establecen a partir de la fracción del suelo inferior al Tamiz No 40 de todos los suelos, incluyendo gravas, arenas y suelos finos. Estos límites se utilizan con la Carta de Plasticidad para determinar el prefijo M, O, C.

Límite de retracción (W_S): Se define como aquella humedad en la que una mayor pérdida de agua no provoca disminución alguna del volumen del suelo.

Límite plástico (W_P): es la humedad para la cual el suelo pasa de ser un sólido frágil a plástico. Es el mínimo contenido en agua con el que el suelo permanece en estado plástico.

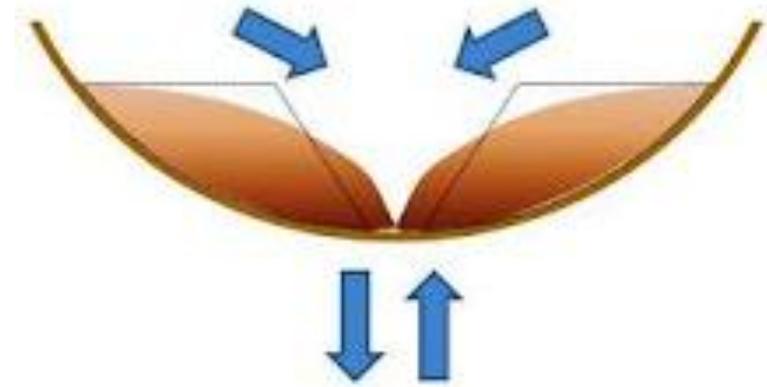
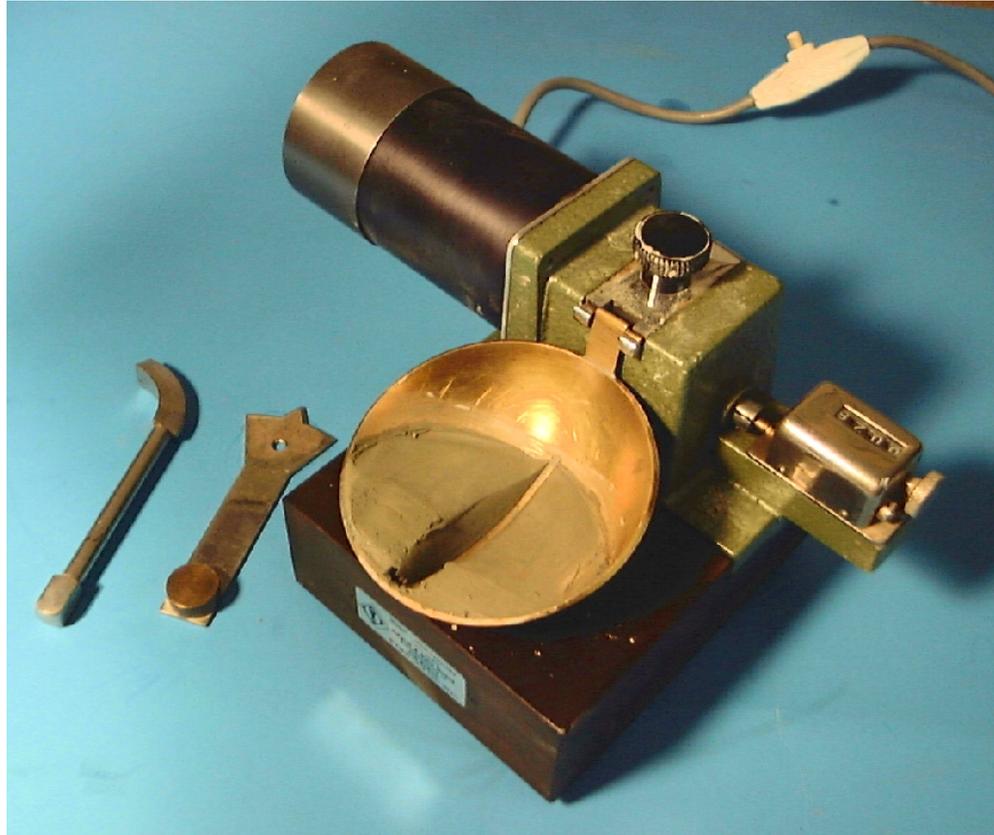
Límite líquido (W_L): Es la humedad para la cual el suelo pasa de ser un sólido plástico a un líquido viscoso; es decir, comienza a fluir bajo su propio peso.

Cuchara de Casagrande

Se trata de un utensilio mecánico cuyas dimensiones y composición están normalizadas, especificadas en la norma UNE 103-103-94.

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

Cuchara de Casagrande



<http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>

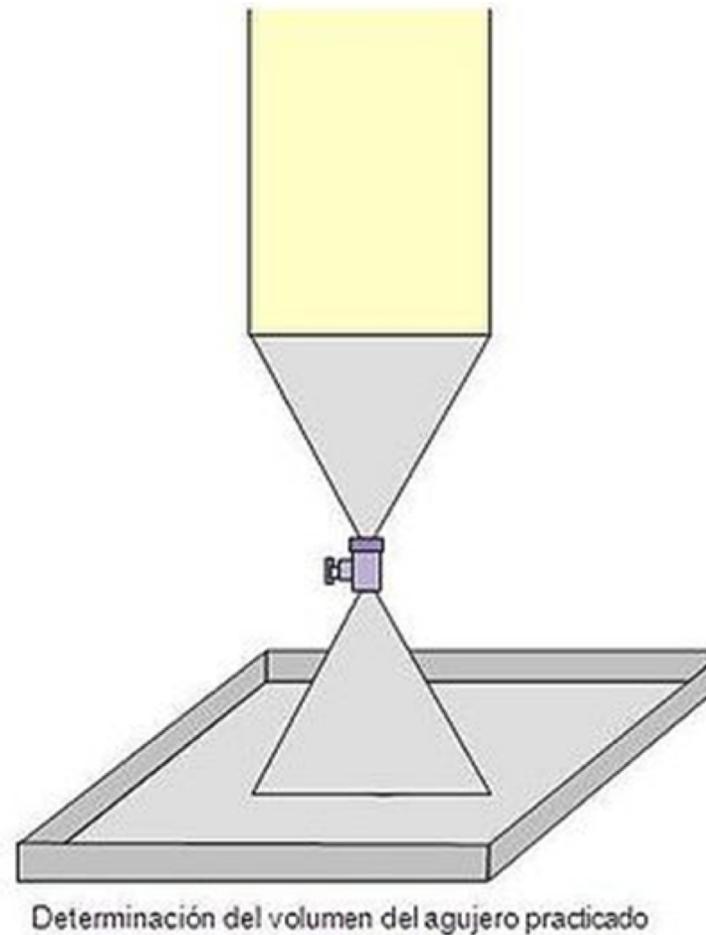
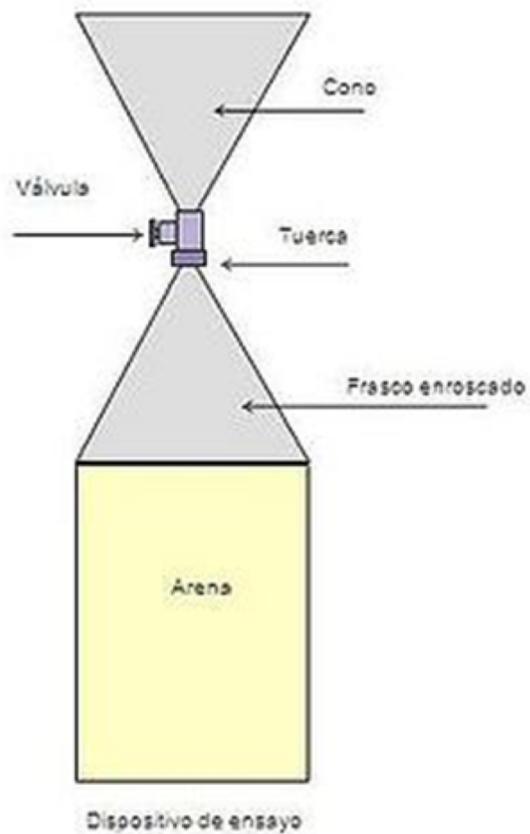
Secuencia para la determinación del límite líquido:

- Tamizado del suelo por el tamiz N°40 de la serie ASTM.
- Amasado de la muestra con agua hasta obtener una pasta fluida.
- Colocación de una porción de la muestra en la cuchara de Casagrande con una altura de 10 mm en el punto de mayor espesor.
- Realización de una ranura con el acanalador dividiendo la muestra en dos partes simétricas.
- Contar el número de golpes (entre 15 mm y 35 mm) para que la muestra se uniera en el fondo de la ranura en una longitud de 13 mm.
- Tomar una porción donde se unieron los bordes y pesar para obtener el peso del suelo húmedo.
- Secado de la muestra y obtención del peso del suelo seco.
- Cálculo del porcentaje de humedad.

Ensayos

Ensayo de densidad in situ

- Este ensayo se utiliza con el fin de conocer y controlar la compactación de terraplenes, bases de viales, etc., también se usa para determinar densidad in situ y porcentajes de contracción o hinchamiento de materiales.
- Consiste en excavar un agujero en función del tamaño máximo de las partículas de suelo (siempre superior a 150 mm de profundidad). Con el material extraído se determina la masa y humedad. A continuación, se determina el volumen del agujero mediante un cono normalizado que contiene arena seca de densidad conocida dejando caer arena hasta que el agujero y el cono se queden llenos hasta la válvula.
- La densidad seca del suelo extraído “in situ” se expresa en gr/cm^3 .



Cono de arena para determinación de la densidad

https://www.construmatica.com/construpedia/AP-013._Determinaci%C3%B3n_In_Situ_de_la_Densidad_de_un_Suelo._M%C3%A9todo_de_la_Arena

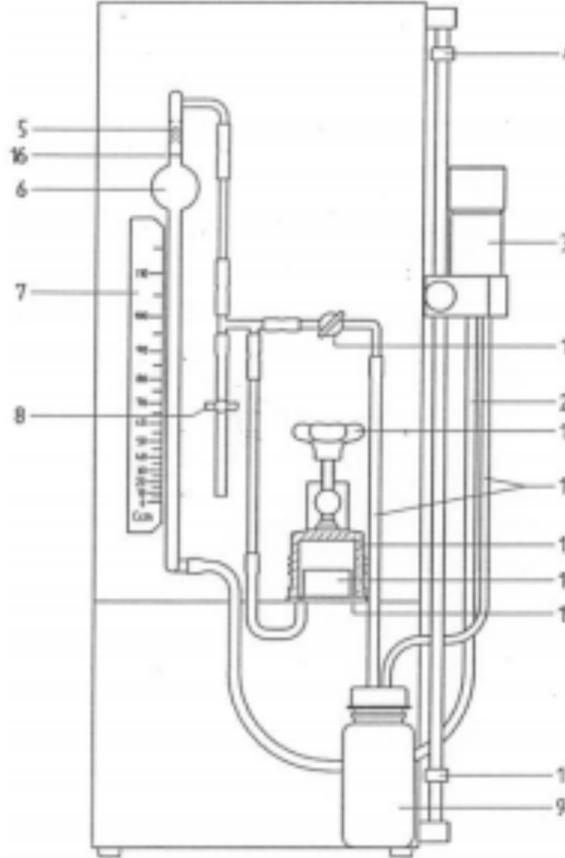
Densidad aparente (D_a)

- El método del terrón parafinado consiste en atar un hilo al terrón que se pesa en una balanza (P_s), posteriormente se sumerge en parafina hasta que todos los poros queden completamente cubiertos. A continuación se deja secar la muestra y se vuelve a pesar para hallar el peso de la parafina (P_p) con la diferencia entre el peso del terrón parafinado y P_s .
- En una probeta con agua, volumen conocido, se introduce el terrón parafinado y se mide el volumen del agua desplazada (V_d) para después hallar el volumen de la parafina (V_p) que cubre el terrón, con la relación entre P_p y la densidad de la parafina ($0,89 \text{ g/cm}^3$).

$$D_a = \frac{P_s}{v_d - v_p}$$

Porosidad

- Se puede determinar de forma indirecta a partir de la densidad aparente.
- De manera directa se obtiene con el porómetro. Esta técnica se basa en medir el volumen de aire que llena el espacio poroso de una muestra de suelo seco de volumen conocido utilizando una columna de mercurio conectada al cilindro donde se coloca la muestra inalterada.
- Condicionantes:
 - La muestra no puede contener agua en los poros, siendo necesario proceder a su secado.
 - La muestra debe estar a temperatura ambiente.



(1, 2, 3 y 4: dispositivos de control del nivel de mercurio; 5. Válvula antirretorno; 6, 7 y 8. Dispositivos de medida de la altura del mercurio. 9 y 10 . Vaso tubo de expansión. 11, 12 y 13 mecanismo de vacío de aire. 14. Bloque de calibración. 15. Plato de medida.

Porómetro de mercurio y esquema de funcionamiento

Ensayo de hinchamiento

- Este ensayo sirve para determinar las deformaciones que tiene el suelo al tener humedad.
- El ensayo de hinchamiento libre consiste en la humectación del suelo permitiendo la expansión vertical del suelo en una probeta.
- La expansividad se produce en suelos arcillosos.
- Un test similar a la determinación de la presión máxima de hinchamiento es el ensayo de Lambe.
- En el procedimiento es necesario preparar la muestra seca tamizando sobre el tamiz N°40, introducirla en una probeta y echar agua destilada dejándola reposar para medir el volumen de hinchamiento en la probeta.



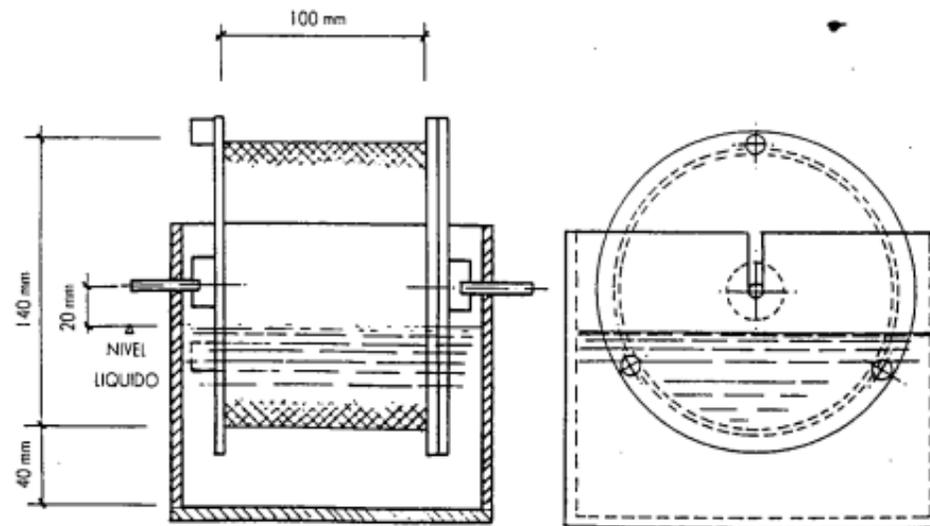
Probeta con la muestra sin agitar



Probeta con la muestra agitada

Ensayo de durabilidad al desmoronamiento

- Este ensayo se realiza para determinar la resistencia de una muestra al debilitamiento y desintegración cuando se somete a dos ciclos normalizados de humedad-sequedad.
- Para el ensayo se utiliza el aparato de alterabilidad Schudes en muestras de rocas blandas (NLT 251/91).



Equipo de ensayos Schudes

Bibliografía

- “Ingeniería Geológica”. González Vallejo et al. Prentice Hall. Madrid. 2002
- Eijkelkamp. 08.60 Operating instructions “Air Pycnometer according to langer”.
- **Enlaces online**
- https://www.academia.edu/43106291/LIBRO_MECANICA_DE_SUELOS_UNINACIONAL_120200519_4880_1flcrwb?email_work_card=view-paper
- <https://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/escolar/composicion-y-clasificacion-de-los-suelos-1293271.html>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Granulometr%C3%ADa>
- <http://www.bdigital.unal.edu.co/53252/11/relacionesgravimetricasyvolumetricasdelsuelo.pdf>