

1.1.3 Comparación entre el sistema AASHTO y el USCS

Para estos sistemas tradicionales de clasificación podemos encontrar las siguientes conclusiones:

- Ambos sistemas están basados en la textura y la plasticidad del suelo.
- Ambos sistemas dividen los suelos en dos categorías mayores:
 - el grano grueso y fino, separado por la malla N° 200.
- AASHTO considera grano fino cuando más del 35% pasa por la malla N° 200.
- USCS considera grano fino cuando más del 50 % pasa por la malla N° 200.
- El suelo de grano grueso que tiene cerca de 35% de granos finos, tendrá comportamiento de material de grano fino, pues hay suficiente cantidad de finos que llenan vacíos entre los granos gruesos.
- En este aspecto (de estabilidad), AASHTO parece ser el más apropiado.
- En obras donde abunda la arcilla se pretende, a veces, estabilizarla con piedra: 1kg de piedra más 1 kg de arcilla = 2 kg de arcilla (mirando el uso vial).
- AASHTO usa la malla N° 10 para separar la grava de la arena.
- USCS usa la malla N° 4.
- La malla 10, como límite de separación, es el límite más alto aceptado para arena. Se usa en tecnología del concreto y en tecnología de las bases de carreteras.
- USCS separa bien los suelos gravosos de los arenosos.
- AASHTO no los separa bien.
- Grupo A-2 del AASHTO, en particular, contiene una gran variedad de suelos.
- Símbolos como GW, SW, CH del USCS describen mejor las propiedades del suelo.
- Símbolos A describen muy poco.
- Suelos orgánicos: OH, OL, y Pt son previstos en el USCS, no así en el AASHTO.

1.2. Ensayos de caracterización – Propiedades elementales de los suelos

1.2.1 Granulometría

La granulometría indica la distribución por tamaños de partículas de un suelo determinando la curva granulométrica por tamizado en columna de tamices de la serie normalizada. Los tamices que se emplean se acoplan de manera que van disminuyendo sus aberturas de arriba abajo. La muestra se deposita en el tamiz superior y se somete el conjunto de tamices a la acción de un agitador mecánico o por medio de agitación manual por parte del personal del laboratorio en el que se realiza el ensayo (Tabla 1).

El análisis granulométrico es un ensayo de identificación del que no se obtendrán índices que expresen cuantitativamente las propiedades mecánicas de un suelo. La granulometría junto con otros ensayos pondrán de manifiesto desde un punto de vista cualitativo, cuando dos suelos son similares y cabe esperar un comportamiento semejante.

Tabla 1. Denominación y abertura de tamices para gradaciones

Designación y abertura en mm	Designación del tamiz ASTM	Abertura en mm ASTM
125	5	127
100	4	101,6
80	3	76,2
63	2,5	63,5
50	2	50,8
40	1,5	38,1
32	1,25	31,7
25	1	25,4
20	3/4	19,1
16	5/8	15,9
12,5	1/2	12,7
10	3/8	9,52
8	5/16	7,93
6,3	1/4	6,35
5	Nº 4	4,75
4	Nº 5	4
3,2	Nº 6	3,36
2,5	Nº 8	2,38
2	Nº 10	2
1,6	Nº 12	1,68
1,25	Nº 16	1,19
1	Nº 18	1
0,8	Nº 20	0,84
0,63	Nº 30	0,59
0,5	Nº 35	0,5
0,4	Nº 40	0,42
0,32	Nº 50	0,297
0,25	Nº 60	0,25
0,2	Nº 70	0,21
0,16	Nº 80	0,177
0,125	Nº 120	0,125
0,1	Nº 140	0,105
0,08	Nº 200	0,074
0,063	Nº 230	0,062
0,05	Nº 270	0,053
0,04	Nº 325	0,044

De acuerdo con Bañón (1999) son de interés los siguientes parámetros:

- Diámetro eficaz (D_{10}): Abertura del tamiz por la que pasa el 10% de partículas del suelo. Juega un importante papel en el valor de la conductividad hidráulica del suelo.

- Coeficiente de uniformidad: Determina la uniformidad del suelo. Un suelo con $C_u \leq 2$ se considera uniforme, mientras que un valor de $C_u \geq 10$ indica que se trata de un suelo de una granulometría muy diversa.

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

siendo D_{60} la luz del tamiz por la que pasa el 60 % de partículas del suelo.

- Coeficiente de curvatura o de concavidad: Proporciona información sobre si el suelo está bien o mal graduado. Un suelo bien graduado tiene proporciones equilibradas de arena, limo y arcilla. Si hay tamaños de partícula no presentes estará mal graduado. Un valor cercano a uno indica que el suelo está bien graduado, mientras que valores mucho menores o mucho mayores indican suelos con una granulometría muy diversa. En general los suelos bien graduados se compactan mejor y pueden adquirir permeabilidad y deformabilidad más bajas.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

siendo D_{30} la luz del tamiz por la que pasa el 30 % de partículas del suelo.

En la Foto 1 se pueden apreciar los equipos de laboratorio más comunes para realizar el ensayo de gradación.

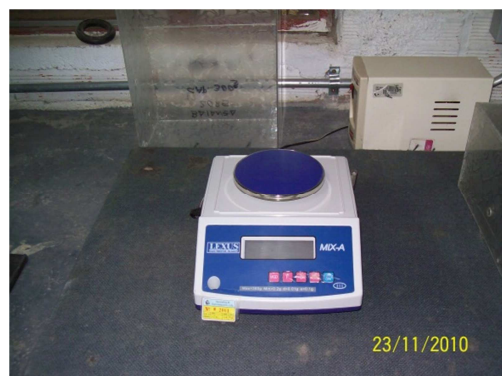


Foto 1. Equipos para realizar gradaciones: Tamices, Horno, bandejas, balanzas

1.2.2 Porosidad e Índice de vacíos

Porosidad (n)

Un suelo es un sistema multifásico: sólido, líquido (agua) y gaseoso (aire). Si el suelo está seco sólo tendrá dos fases (sólido y aire). (Figura 8)

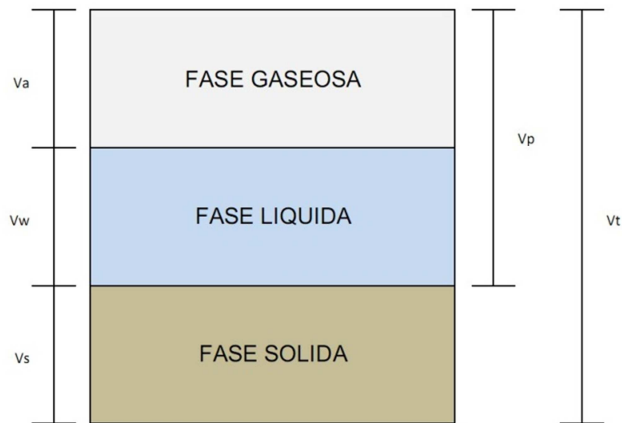


Figura 8. Fases de un suelo

Donde,

- Va: Volumen de aire
- Vw: Volumen de agua
- Vs: Volumen de sólido
- Vp: Volumen de poros
- Vt: Volumen de total

La porosidad es el cociente entre el volumen de poros y el total de un suelo y oscila entre 0 y 1. Estos valores extremos son teóricos.

$$n = \frac{V_p}{V_t}$$

Índice de vacíos (e)

Es el cociente entre el volumen de poros y el de sólidos. Puede ser superior a 1 aunque no es frecuente.

$$e = \frac{V_p}{V_s}$$

de aquí se puede obtener:

$$n = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{V_p + V_s} = \frac{e}{1 + e}$$

1.2.3 Humedad, peso específico y grado de saturación

Contenido de humedad (ω)

Se trata de la humedad gravimétrica.

$$\omega = \frac{W_{H_2O}}{W_s}$$

Siendo W_{H_2O} el peso del agua que contiene el suelo y W_s el peso del suelo seco (peso de las partículas sólidas).

Peso específico de las partículas sólidas (G_s)

Es el cociente entre el peso de las partículas sólidas y el volumen de partículas sólidas.

$$G_s = \frac{W_s}{V_s}$$

La Tabla 2 muestra valores típicos de Gravedad específica de varios suelos de acuerdo con Djoenaidi (1985) en el libro de Bardet (1997):

Tabla 2. Valores típicos de Gravedad Específica de varios suelos (Djoenaidi (1985) en el libro de Bardet, 1997)

Tipo de suelo		Gravedad específica (G_s)
Inorgánico	Grava	2,65
	Arena gruesa a media	2,65
	Arena fina (limosa)	2,65
	Polvo de piedra, limo arenoso	2,67
Inorgánico	Arena algo arenosa	2,65
	Limo Arenoso	2,66
	Limo	2,67 – 2,70
	Arena Arcillosa	2,67
	Limo arcillo arenoso	2,67
	Arcillas arenosa	2,70
	Arcilla limosa	2,75
	Arcilla	2,72 – 2,80
Orgánico	Limos con trazos de materia orgánica	2,30
	Lodos aluviales orgánicos	2,13 – 2,60
	Turba	1,50 – 2,15

Peso específico seco de un suelo (γ_d)

Es el cociente entre el peso de las partículas sólidas y el volumen total.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

sustituyendo se obtiene:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} = \frac{G_s V_s}{V_t} = \frac{G_s V_s}{V_s + V_p} = \frac{G_s}{1 + e}$$

Peso específico aparente del suelo (γ)

Depende del contenido de humedad del suelo.

$$\gamma = \frac{W_t}{V_t} = \frac{W_s + W_{H_2O}}{V_t} = \frac{W_s}{V_t} + \frac{W_{H_2O}}{V_t} = \gamma_d + \frac{W_s \omega}{V_t} = \gamma_d + \gamma_d \omega = \gamma_d (1 + \omega)$$

Peso específico saturado (γ_{sat})

Es el mayor valor que puede tomar el peso específico saturado y se produce cuando todos los poros están ocupados por agua.

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_{H_2O}}{V_t}$$

Teniendo en cuenta que el peso específico del agua es $\gamma_W = \frac{W_{H_2O}}{V_{H_2O}} = \frac{W_{H_2O}}{V_p}$, se obtiene

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + \gamma_W V_p}{V_t} = \gamma_d + \frac{V_p \gamma_W}{V_t} = \gamma_d + n \gamma_W = \gamma_d + \frac{V_p}{V_t} \frac{W_{H_2O}}{V_p} = \gamma_d + \frac{W_{H_2O}}{V_t} = \gamma_d (1 + \omega)$$

Puesto que, en este caso, el suelo se encuentra en saturación, el contenido de humedad será, ω_{sat} por lo que:

$$\gamma_{sat} = \gamma_d (1 + \omega_{sat})$$

Peso específico sumergido (γ_{sum} o γ')

Se produce cuando un material está por debajo del nivel freático. Se determina como la diferencia del peso específico saturado y el peso específico del agua.

$$\gamma_{sum} = \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma_d + n\gamma_w - \gamma_w = \gamma_d + \gamma_w(n - 1)$$

Grado de saturación (S)

Es la fracción de poros rellena de agua.

$$S = \frac{V_{H_2O}}{V_p}$$

En suelo seco $S = 0$ y en suelo saturado $S = 1$.

Teniendo en cuenta que $V_{H_2O} = \frac{W_{H_2O}}{\gamma_w} = \frac{W_s \omega}{\gamma_w}$ y que $G_s = \frac{W_s}{V_s}$, obtenemos

$$S = \frac{W_s \omega}{V_p \gamma_w} = \frac{\omega V_s G_s}{V_p \gamma_w} = \frac{(\omega V_s G_s) / V_s}{(V_p \gamma_w) / V_s} = \frac{\omega G_s}{e \gamma_w}$$

1.2.4 Plasticidad (Límites de Atterberg).

Los límites de Atterberg dan información sobre el estado de consistencia o coherencia de las partículas de un suelo. El parámetro que regula el estado de coherencia de un suelo es el contenido de humedad y a medida que ésta disminuye el suelo puede pasar por los estados líquido, plástico, semisólido y sólido, estableciéndose entre ellos los límites líquido, plástico y de retracción. (Figuras 9 y 10). (Márquez, 2006)

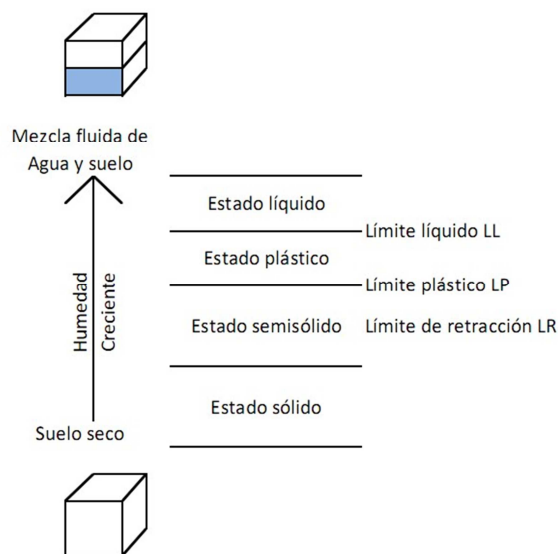


Figura 9. Límites de Atterberg y estados de consistencia de un suelo (Márquez, 2006)

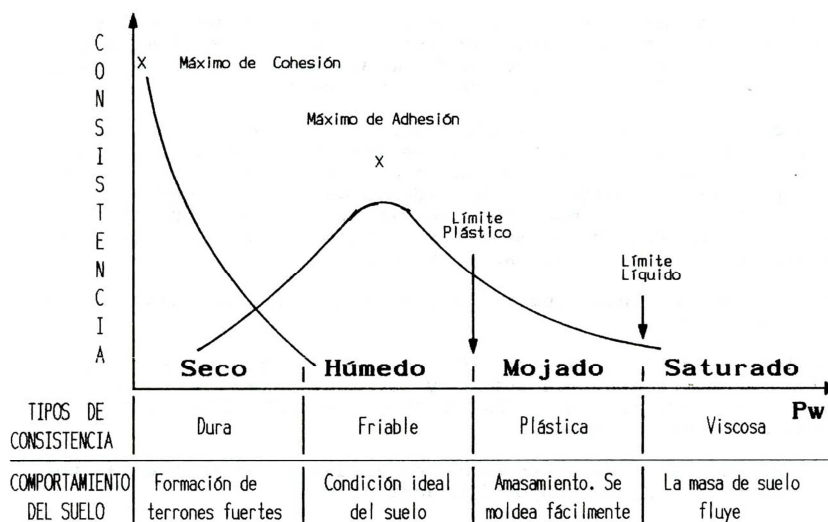


Figura 10. Estados de consistencia de un suelo. (<http://www.monografias.com>, 2010)

Si tomamos un terrón de suelo arcilloso, seco, presenta un estado sólido que hace difícil desmenuzarlo manualmente. Si sobre este terrón hacemos gotear agua, poco a poco, llega un momento en que se aprecia que se hincha, se ha alcanzado el límite de retracción (LR); si continuamos echando agua, el terrón comienza a desmenuzarse pero sin poderse moldear, estamos en el estado semisólido, que finaliza en el momento en el cual se obtiene una masa que se amasa fácilmente sin roturas ni desmenuzamiento. Se ha llegado al límite plástico (LP). Si se sigue añadiendo agua, la masa se va convirtiendo en demasiado moldeable,

estamos en el estado plástico, hasta que la masa fluye, llegando al límite líquido(LL), a partir del cual se está en el estado líquido.

En la Foto 2 se pueden apreciar los equipos de laboratorio más comunes para realizar el ensayo de límites de consistencia.



Foto 2. Equipos para realizar Límites de consistencia.

Para la determinación de los Límites de Atterberg se utiliza solamente la porción de suelo que pasa por el tamiz de 0,40 mm (nº 40 ASTM).

El límite líquido se determina con el ensayo de la cuchara de Casagrande. En el fondo de una cuchara mecánica normalizada se pone una porción de suelo amasado con una cierta cantidad de agua, formando un casquete esférico que se divide en dos partes iguales, con un acanalador normalizado, formando un surco. Se agita la cuchara a razón de dos golpes por segundo, hasta que los bordes del surco en el fondo de la cuchara se unan, y se cuenta el número de golpes para cada diferente porcentaje de humedad. El porcentaje de humedad que corresponde a 25 golpes, es el límite líquido. (Márquez, 2006)

El Límite Plástico corresponde a la menor humedad de un suelo que permite realizar con él pequeños cilindros de 3 mm de diámetro. Si los cilindros se rompen con un diámetro superior a 3 mm, la humedad es inferior al LP y si se rompen con un diámetro inferior, la humedad del suelo supera al LP. (Márquez, 2006)

El Límite de Retracción es el contenido de humedad por debajo del cual, una pérdida de agua por secado, no produce una reducción de volumen de suelo. (Márquez, 2006)

Otro parámetro importante es el Índice de Plasticidad (IP) que es la diferencia entre los límites líquido y plástico e indica el intervalo de humedades

entre las cuales el suelo se comporta como un material plástico, es decir mide la plasticidad del suelo. (Márquez, 2006)

$$IP=LL-LP$$

Un límite líquido alto indica una alta elasticidad del suelo. Un valor muy alto del índice plástico significa una alta probabilidad de hinchamiento. La plasticidad se corresponde con otras propiedades del suelo como son la cohesión, la permeabilidad y la compresibilidad. No interesa que el material tenga plasticidad porque si se aplica una carga el material se deforma. Es recomendable, por tanto, suelos que tengan comportamiento elástico con deformaciones recuperables por lo que conviene que el IP sea pequeño. (Márquez, 2006)

En la Tabla 3 se pueden observar algunos valores típicos de límites de Atterberg para suelos.

Tabla 3. Valores orientativos de los límites de Atterberg (humedad gravimétrica) para diferentes suelos (Márquez, 2006)

Tipo de suelo	Arena	Limo	Arcilla
Límite líquido	15-20	30-40	40-150
Límite plástico	-	20-25	25-50
Límite de retracción	12-18	14-15	8-35

Un parámetro adicional es el Índice de actividad (I_a), el cual corresponde a

$$I_a = IP/\%Finos$$

Los valores obtenidos se clasifican así:

$I_a < 0,75$ Suelos inactivos

I_a entre 0,75 y 1,25 Suelos con actividad normal

$I_a > 1,25$ Suelos activos.

1.2.5 Compactación de Suelos.

La consolidación de un suelo es un proceso natural de disminución de volumen de poros de un suelo, producido por la acción de cargas estáticas durante un período de tiempo amplio. (Márquez, 2006)

La compactación es un proceso mecánico cuyo objetivo es reordenar las partículas del suelo para disminuir el volumen de poros y aumentar la densidad. Consecuentemente se consigue mayor resistencia o capacidad de soporte y menor permeabilidad. Es un proceso fundamental en ejecución de obras como presas de materiales sueltos o terraplenes de caminos o carreteras porque si los materiales no se compactan adecuadamente la resistencia disminuye y hay más probabilidad de que se produzcan fallas. (Márquez, 2006)

De acuerdo con Márquez (2006), los factores que influyen en el proceso de compactación son:

- **Naturaleza y tipo de suelo:** Los granulares consiguen alcanzar mayores densidades que los de textura fina y por tanto tendrán mayor resistencia y capacidad de soporte. Interesan, pues, suelos con altos contenidos en gravas y arenas por su mayor densidad y resistencia.
- **Contenido de humedad:** el ingeniero R. Proctor en el año 1933 demostró que para contenidos de humedad crecientes y una determinada energía de compactación, la densidad lograda aumenta ya que el agua actúa como lubricante entre las partículas del suelo, incrementándose la densidad hasta un cierto punto en el cual al seguir añadiendo agua, la densidad empieza a decrecer; el agua ha dejado de desplazar aire y como es incompresible, empieza a desplazar las partículas de suelo, incrementando el volumen y disminuyendo la densidad. Para cada suelo existe un contenido en humedad que proporciona la máxima densidad seca. Este es el contenido de humedad óptimo que es el que se debe utilizar en obra cuando se va a compactar un suelo. (Figura 11)

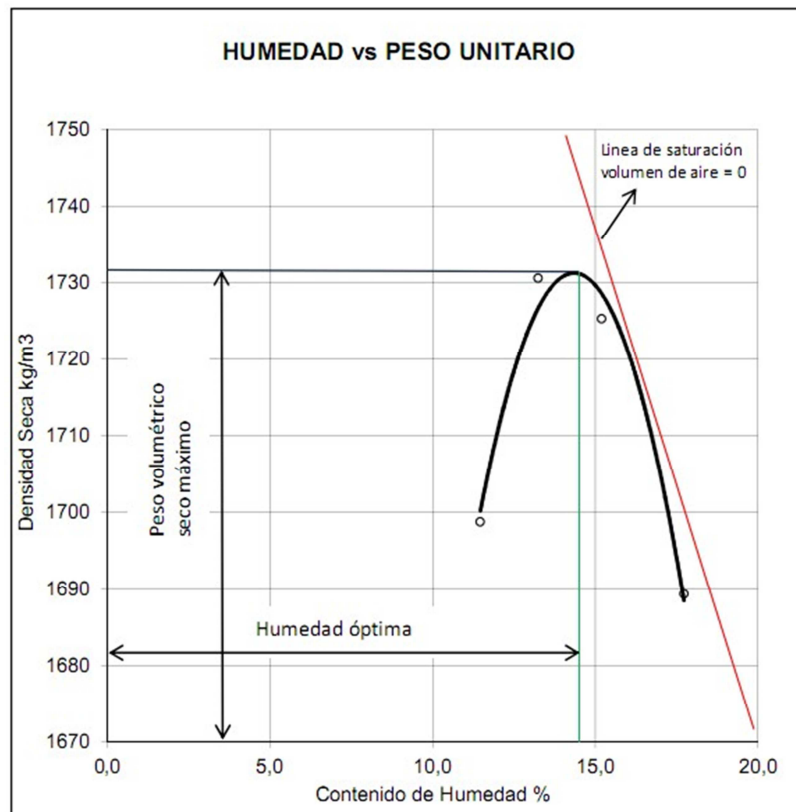


Figura 11. Curva típica de compactación.

En la Tabla 4 podemos apreciar los valores típicos de humedad óptima y densidad seca máxima para algunos tipos de suelos.

Tabla 4. Valores orientativos de humedad óptima y densidad seca máxima de distintos suelos. (Márquez, 2006)

Tipo de suelo	Humedad óptima (%)	Densidad seca (kg/m3)
Arcilloso	20-30	1450-1700
Limo-Arcilloso	15-20	1600-1850
Areno-Arcilloso	8-15	1750-2150

- **Energía y método de compactación empleado:** al aumentar la energía de compactación se obtiene un aumento de la densidad seca máxima y una disminución del contenido óptimo de humedad, lo que produce que la curva Proctor de compactación se traslade hacia la izquierda y hacia arriba. Esta circunstancia que se produce en el ensayo de Proctor modificado, en el cual se emplea una mayor energía de compactación que en el normal, se aprecia en la Figura 12. (Márquez, 2006)