

### **3.- INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULAS Y APLICACIONES.**

#### **3.1. Clasificación de un suelo**

Durante los primeros desarrollos de la mecánica de suelos los ingenieros confiaron fuertemente en la experiencia pasada, y encontraron conveniente clasificar suelos, de tal forma que la experiencia ganada con un tipo particular de suelo, pudiera ser usada para evaluar la conveniencia suelos similares para cualquier propósito específico, y para indicar propiedades o métodos indicados de tratamiento. Así, el concepto de clasificación de suelo se eleva de manera importante en los primeros desarrollos de la mecánica de suelos, aun en la actualidad independientemente de técnicas analíticas que han tenido lugar los ingenieros geotécnicos confían mucho en la experiencia pasada y en los sistemas de clasificación de suelo que se constituyen en ayudas invaluable, particularmente los suelos que son usados en la forma remodelada tal como los que se emplean en rellenos o terraplenes.

Para describir los diferentes materiales que aparecen en las exploraciones es necesario contar con una clasificación convencional de los tipos de suelos. El sistema a adoptar debe ser lo suficientemente detallado para que incluya todos los depósitos naturales excepto los mas raros y, aun así, debe ser razonable, sistemático y conciso. Este tipo de sistema resulta necesario si se desean obtener conclusiones útiles basadas en los estudios de tipo de materiales. Al no contar con una sistema de clasificación, las informaciones publicadas basadas en el tipo de suelo, o las recomendaciones de diseño o construcción pueden resultar confusas y serían muy difícil aplicar la experiencia adquirida a diseños futuros. Además, a menos que se adopte un sistema convencional de nomenclatura, las interpretaciones conflictivas de los términos empleados pueden provocar confusiones conducentes a un proceso de comunicación ineficiente.

Para que resulte adecuado para este propósito básico, cualquier sistema de clasificación debe satisfacer las siguientes condiciones:

- A) Debe incorporar en forma descriptiva a términos breves pero ilustrativos para el usuario.
- B) Las clases y subclases deben quedar definidas por parámetros razonables cuya medición cuantitativa sea relativamente fácil.
- C) Las clases y subclase deben permitir agrupar los suelos con que impliquen propiedades de ingeniería similares.

La mayor parte de las clasificaciones divide a los suelos en tres grupos principales: Gruesos, finos y orgánicos. Las principales diferencias entre las características de esos grupos se muestran en la tabla 3.1.

*Clases principales de suelos para ingeniería*

	<i>Gruesos</i>	<i>Finos</i>	<i>Orgánicos</i>
Tipos de suelos inclusivos	Piedra Grava Arena	Limo Arcilla	Turbas
Forma de la partícula	Redondeada a angular	Laminado	Fibroso
Tamaño de la partícula o grano	Grueso	Fino	—
Porosidad o relación de vacíos	Baja	Alta	Alta
Permeabilidad	Alta	Baja a impermeable	Variable
Cohesión interparticular	Carente a muy baja	Alta	Baja
Fricción interparticular	Alta	Baja	Carente a baja
Plasticidad	Carente	Baja a alta	Baja a moderada
Compresibilidad	Muy baja	Moderada a muy alta	En general muy alta
Velocidad de compresión	Inmediata	Moderada a baja	Moderada a rápida

**Tabla 3.1**

En Gran Bretaña las normas y recomendaciones tanto para la identificación en el campo para la clasificación detallada pueden encontrarse en la publicación BS 5930 Site Investigation (1981). Cuando se dispone de mas datos, como pruebas de laboratorio, y en especial cuando se trate de usar el suelo para construcciones, se recomienda en uso del sistema Británico de Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (tabla 3.2).

INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS Y APLICACIONES

Tabla 3.3 Sistema británico de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería

Grupos de suelos (véase la nota 1)		Subgrupos e identificación de laboratorio				Finos (% interior a 0.06 mm)	límite líquido %	Nombre	
Las GRAVAS y ARENAS pueden clasificarse como GRAVA arenosa, ARENA con grava, etc. cuando sea apropiado		Símbolo del grupo (véase las notas 2 y 3)	Símbolo del subgrupo (véase la nota 2)	Finos (% interior a 0.06 mm)	límite líquido %				
SUELOS GRUESOS Más del 50% del material grueso es mayor a 0.06 mm	GRAVAS Más del 50% del material grueso es grava (mayor a 2 mm)	GRAVA ligeramente limosa o arcillosa	G	GW GP	GW GPg	0 5		GRAVA bien graduada GRAVA mal graduada/uniforme/graduación con interferencias	
		GRAVA limosa	G-F	G-M	GWM	5		GRAVA limosa bien/mal graduada	
		GRAVA arcillosa	G-F	G-C	GWC	15		GRAVA arcillosa bien/mal graduada	
		GRAVA muy limosa	GF	GM	GPL	etc.	15		GRAVA muy limosa se subdivide como GC GRAVA muy arcillosa (arcilla de plasticidad baja intermedia alta muy alta, plasticidad extremadamente alta)
		GRAVA muy arcillosa	GF	GC	GCL GCI GCH GCV GCE	etc. 35			
	ARENAS Menos del 50% del material grueso es arena (menor a 2 mm)	ARENA ligeramente limosa o arcillosa	A	S	SW SP	SW SPg	0 5		ARENA bien graduada ARENA mal graduada/uniforme/graduación con interferencias
			ARENA limosa	A-F	S-M	SWM	5		ARENA limosa bien/mal graduada
		ARENA arcillosa	A-F	S-C	SWC	15		ARENA arcillosa bien/mal graduada	
		ARENA muy limosa	AF	SM	SML	etc.	15		ARENA muy limosa: se subdivide como SC
		ARENA muy arcillosa	AF	SC	SCL SCI SCH SCV SCE	etc. 35		ARENA muy arcillosa (arcilla de plasticidad baja intermedia, alta, muy alta, extremadamente alta)	
SUELOS FINOS Menos del 50% del material grueso es menor a 0.06 mm	LIMOS y ARCILLAS Menos del 50% del material grueso es menor a 0.06 mm	LIMO con grava	FC	MG MLG	etc.			LIMO con grava, se subdivide como CG	
		ARCILLA con grava (véase la nota 4)	FC	CLC CIG CHG CVG CEG		<35 35 a 50 50 a 70 70 a 90 >90		ARCILLA con grava de baja plasticidad de plasticidad intermedia de plasticidad alta de plasticidad muy alta de plasticidad extremadamente alta	
	LIMO arenoso (véase la nota 4)	MS	MLS	etc.				LIMO arenoso, se subdivide como CLS	
		ARCILLA arenosa	CS	CLS	etc.			ARCILLA arenosa, se subdivide como CG	
	LIMO (SUELO M)	M	ML	etc.				LIMO, se subdivide como C	
		ARCILLA (véase las notas 5 y 6)	C	CL CI CH CV CE		<35 35 a 50 50 a 70 70 a 90 >90		ARCILLA de plasticidad baja de plasticidad intermedia de plasticidad alta de plasticidad muy alta de plasticidad extremadamente alta	
	SUELOS ORGANICOS	La letra descriptiva "O" se agrega después del símbolo del grupo o subgrupo		Se sospecha que el constituyente importante es materia orgánica. Ejemplo MMO				LIMO orgánico de alta plasticidad	
	TURBA	Pt - Las turbas son suelos en los que predominan restos vegetales, pueden ser fibrosos o amorfos							

- Nota 1 El nombre del grupo de suelo siempre debe anotarse al describirlo, complementando si es necesario, con el símbolo del grupo, aunque en algunas aplicaciones (por ejemplo, secciones longitudinales) puede ser conveniente usar el símbolo del grupo como única identificación
- Nota 2 Cuando no se han usado métodos de laboratorio para la identificación, el símbolo del grupo o del subgrupo debe anotarse entre paréntesis, por ejemplo (GC)
- Nota 3 Se puede usar la designación suelos finos o FINOS, F, en vez de LIMO, M, o ARCILLA, C, cuando no es posible o necesario diferenciarlos
- Nota 4 CON GRAVA, cuando más del 50% del material grueso es del tamaño de grava. ARENOSO, cuando más del 50% del material grueso es del tamaño de arena
- Nota 5 EL LIMO (SUELO M), M, es el material que se grafica por abajo de la línea A y tiene un intervalo restringido de plasticidad con relación a su límite líquido, y una cohesión relativamente baja. Los suelos finos de este tipo incluyen materiales limpios del tamaño del limo y polvo de roca, suelos micáceos y diatomáceos, piedra pómez y suelos volcánicos, así como los que contienen halocita. El término alternativo "suelo M" evita confusiones con materiales de tamaño predominantemente de limo, el cual solo forma parte del grupo. Los suelos orgánicos generalmente se grafican por debajo de la línea A en la carta de plasticidad, cuando se designan como LIMO ORGANICO MO
- Nota 6 La ARCILLA, C, es un material que se grafica por arriba de la línea A y es totalmente plástico con relación a su límite líquido

Reproducido de BS 5930 1981 Site investigations, con permiso de la British Standards Institution

Tabla 3.2

Como los depósitos de suelo son infinitamente variados, no ha sido posible crear un sistema universal de clasificación de suelos para diferenciarlos en grupos y subgrupos sobre la base de todas sus propiedades índice importantes. Sin embargo, se han ideado procedimientos útiles basados en una o dos propiedades características. Algunos de estos sistemas han llegado a generalizarse tanto entre los trabajadores de los diversos campos en los que intervienen los suelos, que es necesario que el ingeniero posea al menos un conocimiento general de los mismos. Al mismo tiempo, es indispensable tener presente que ningún sistema describe adecuadamente ningún suelo para todos los objetos que percibe la ingeniería. En la realidad, muchos sistemas ignoran las propiedades ms importantes del punto de vista del ingeniero especialista en cimentaciones.

Sistemas basados en la textura. Como el tamaño de las partículas es probablemente la característica más evidente de un suelo, es natural que los primeros sistemas de clasificación se hallan basado en la granulometría, en realidad se han sugerido muchos de estos sistemas. En la figura 3.2 se muestran varios de los más comunes. El MIT y el Unificado son los más usados por los especialistas en cimentaciones; el sistema AASHTO por los ingenieros de caminos y el sistema Unificado por los ingenieros encargados de presas y aeropistas.

Sistema de clasificación	Tamaño de los granos en mm						
	100	10	1	0.1	0.01	0.001 0.0001	
U S Bureau of Soils, 1890-95		Grava		Arena	Limo	Arcilla	
Atterberg, 1908		Grava	2	Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla
MIT, 1931		Grava	2	Arena	Limo	Arcilla	
U S Dept. Agr., 1938		Grava	2	Arena	Limo	Arcilla	
AASHTO, 1970		Grava	2	Arena	Limo	Arcilla Coloides	
Unificado 1953	75		2	Arena	Limo	0.002 0.001	
ASTM 1967	75		4.75	Arena	Finoastilmo y arcilla		

Comparación de varios sistemas comunes de clasificación granulométrica.

Fig. 3.2

Para clasificar un suelo usamos sistemas basados en la granulometría, por lo común construyendo la curva granulométrica y calculando los porcentajes en pesos de las partículas dentro de cada intervalo de tamaño especificado en el sistema; así, un suelo que tiene mezclado granos de varios tamaños pueden describirse como “3 por ciento de grava, 46 por ciento de arena, 17 por ciento de limo, y 34 por ciento de arcilla, de acuerdo con la clasificación del MIT.”

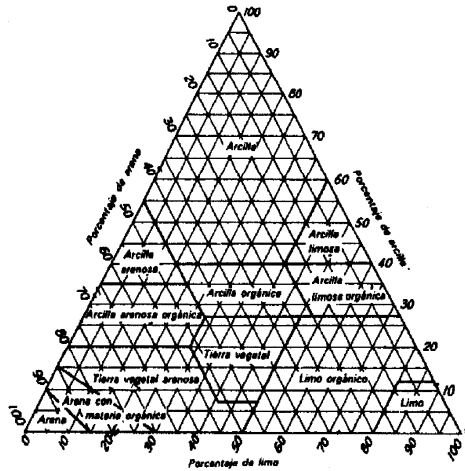


fig. 3.3

En el sistema de clasificación granulométrica que usan los científicos del Departamento de Agricultura de los E.U., se especifican solo tres ordenes de tamaños de las partículas y se excluye el material mayor de 2.00 mm. Por lo tanto los porcentajes de arena, limo y arcilla pueden representarse en un diagrama triangular como el mostrado en la figura 3.3 después que se han determinado estos porcentajes en una muestra dada, el punto que representa esta composición mecánica se localiza en el diagrama triangular y se le da el suelo el nombre asignado al área en que está situado el punto. Si el suelo contiene una cantidad importante de material mayor de 2.0 mm, se añade el nombre correspondiente un adjetivo adecuado, “con grava” o “con boleos”. Aunque el diagrama triangular no revela otras propiedades del suelo aparte de la distribución granulométrica, se usa con mucha profusión por los individuos que

trabajan en el campo de la agricultura y de la ingeniería de carreteras. Desafortunadamente, el nombre correspondiente obtenido del diagrama no expresa correctamente las características físicas del suelo. Por ejemplo, algunas partículas del tamaño de las arcillas son menos activas que las otras, un suelo al que se le da el nombre de arcilla basándose en un criterio de tamaños puede tener propiedades físicas que son más comunes en el limo.

El sistema de la AASHTO. Hacia 1928, el Bureau of Public Roads presentó un sistema de clasificación de suelos que se usa mucho en la Ingeniería de vías terrestres. Este sistema divide a los suelos en 8 grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8. Como se consideró que el mejor suelo para ser usado en la subrasante de una carretera es un material bien graduado compuesto principalmente de arenas y gravas, pero que contenga una pequeña cantidad de excelentes cementantes arcillosos, a este material se le dio el nombre de A-1. Los suelos restantes se agruparon en orden decreciente a su grado de calidad. El sistema ha sufrido muchas modificaciones. Al principio, ni los porcentajes de los diferentes fracciones de tamaños, ni las características de plasticidad de la fracción de arcilla estaban especificados definitivamente.

En 1945, se hizo una amplia modificación del sistema de Public del Roads por un comité de ingenieros de caminos para el Highway Research Board. En 1949, y de nuevo, en 1966, fueron adoptadas modificaciones por la American Association of State Highway Officials, y el método se conoce como sistema de la AASHTO. Las características de los diferentes grupos y subgrupos y el procedimiento de la clasificación se da en la tabla 3.3. En el sistema de la AASHTO los suelos inorgánicos se clasifican en 7 grupos que van de A-1 al A-7, éstos a su vez se dividen en 12 subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8. Cualquier suelo que contenga material fino se identifica además por su índice de grupo; cuanto mayor sea el índice, peor es el suelo.

**Clasificación de Suelos y de Mezclas de Agregados  
de Suelos de la American Association of State  
Highway Officials.  
Título AASHTO M-145**

Clasificación General*	Materiales Granulares (35% o menos pasan la malla No. 200)						Materiales Limo Arcillosos (Pasan más del 35 por ciento la malla No. 200)					
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7		
Clasificación Por Grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5, A-7-6	
Análisis granulométrico %												
que pasa:												
No. 10	50 máx			40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	
No. 40	30 máx		50 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín	
No. 200	15 máx		25 máx	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	
Características de la fracción que pasa la malla No. 40												
Límite líquido	6 máx			N.P. + 10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	
Índice de plasticidad												
Tipos usuales de los materiales con componentes importantes	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Arena y grava limosas o arcillosas.			Suelos limosos		Suelos arcillosos			
Clasificación general como subrasante	De excelente a buena						De regular a mala					

\*Procedimiento de clasificación. Teniendo presentes los datos de prueba necesarios, procédase de izquierda a derecha en el cuadro; se encontrará el grupo correcto siguiendo un proceso de eliminación. El primer grupo de la izquierda que corresponda con los datos de la prueba es la clasificación correcta. El grupo A-7 se subdivide en A-7-5 o A-7-6, según el límite plástico. Para  $w_p < 30$ , la clasificación es A-7-6; para  $w_p > 30$ , A-7-5.

Tabla 3.3

El índice de grupo se calcula con la fórmula:

$$\text{índice grupo} = (F - 35) (0.2 + 0.005(wl - 40)) + 0.01 (F - 15) (Ip - 10) 1.14$$

en la que:

F= porcentaje del suelo que pasa por la malla No. 200, expresado como número entero.

wl= límite líquido

Ip= índice de plasticidad

El índice de grupo siempre se reporta aproximándolo al número entero más cercano, a menos que su valor calculado sea negativo, en cuyo caso se reporta como cero. El índice de grupo se agrega a la clasificación de grupo y subgrupo. Por ejemplo, un suelo arcilloso que tenga un índice de grupo de 25, puede clasificarse como A-7 -6 (25).

Sistema Unificado. El sistema de clasificación de suelos que más usan los ingenieros especialistas en cimentaciones en Norteamérica en la actualidad, fue elaborado por Arthur Casagrande para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Primero se le llamó sistema de clasificación para aeropistas (CA), siendo su objeto original servir de ayuda en el proyecto y construcción de la aeropistas militares durante la segunda guerra mundial. Después de la guerra fue adoptado con pequeñas modificaciones por el Cuerpo de Ingenieros y por el Bureau of Reclamation de los E.U. con el nombre de Sistema Unificado. En 1969, el Sistema Unificado fue adoptado por la American Society For Testing and Materials como método estándar de clasificación de suelos para obras de ingeniería, designándose con la norma ASTM D-2487.

De acuerdo con el Sistema Unificado, los suelos de grano grueso se dividen en:

1. - Grava y suelos gravosos; símbolo G.
2. - Arenas y suelos arenosos; símbolo S
3. - Las gravas y las arenas se dividen separadamente en cuatro grupos:
  - a. Bien graduadas, material relativamente limpio; símbolo W.
  - b. Material bien graduado con excelente cementante arcilloso; símbolo C.
  - c. Mal graduadas, material relativamente limpio, símbolo P
  - d. Materiales Gruesos con finos no comprendidos en los grupos anteriores; símbolo M •

Los suelos finos se dividen en tres grupos:

1. - Suelos limosos inorgánicos y suelos arenosos muy finos; símbolo M
2. - Arcillas inorgánicas; símbolo C
3. - Limos y arcillas orgánicas; símbolo O



Cada uno de estos tres grupos de suelos finos se subdividen de acuerdo al límite líquido en:

- a. Suelos finos con límite líquido de 50 o menos; es decir, de baja a mediana compresibilidad; símbolo L
- b. Suelos finos con límite líquido mayor que 50; es decir, de elevada compresibilidad; símbolo H.

Suelos con elevada proporción de materia orgánica, usualmente fibrosos, como la turba y los fangos de muy alta compresibilidad, no se subdividen y se colocan en un grupo; su símbolo Pt, basándose en la clasificación a simple vista. Las características correspondientes a los diferentes grupos se dan en la tabla 3.4.

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos bajo el punto de Vista de la Ingeniería  
Título D-2487 de la ASTM

Divisiones principales	Símbolos del grupo	Nombres típicos	Criterios para la clasificación
Suelos de partículas gruesas Más del 50% en retención en la malla No. 200	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	$C_u = D_{60}/D_{10}$ Mayor que 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3
	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	No satisfacen ambos criterios para GW
	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.	Los límites de Atterberg quedan abajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4.
	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A" y el índice plástico es mayor que 4
	Suelos de Gravel Fino 50% o más para la malla No. 200	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos
SP		Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos	No se satisfacen ambos criterios para SW
SM		Arenas limosas, mezclas de arena y limo	Los límites de Atterberg quedan abajo de la línea "A", o el índice plástico es menor que 4.
SC		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	Los límites de Atterberg quedan arriba de la línea "A" y el índice plástico es mayor que 4
Suelos de Gravel Fino 50% o más para la malla No. 200		ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, limos arenosos o arcillas ligeramente plásticas
	CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas dobles	
	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
	MH	Limos inorgánicos, limos viscosos o distensivos, limos elásticos	
	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas frías	
	OH	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad	
	P	Turba y otros suelos altamente orgánicos. Identificación visual o manual	

Tabla 3.4

Debido a que la granulometría es un dato que requiere la total alteración de la masa térrica para su obtención, ninguno de los sistemas acabados de analizar clasifica al suelo de manera fiel, de acuerdo a como se encuentra en la naturaleza. Siendo las propiedades originales las que determinan el comportamiento del suelo durante y después de la construcción, ninguno de los sistemas de clasificación puede servir más que como un punto de partida para la adecuada descripción de los suelos, en las condiciones en las que se encuentran en el campo. Sin embargo, aun con estas limitaciones, gran parte de la información que se refiere a las características generales de un suelo puede inferirse como consecuencia de una clasificación adecuada, dentro de uno de los sistemas descritos bajo los subtítulos anteriores. El ingeniero que trabaja con suelos y cimentaciones debe memorizar los detalles de cuando menos el sistema de clasificación técnico que parezca más adecuado en el campo de su actividad debe entrenarse constantemente en la identificación correcta del suelo en el campo, comparando sus descripciones de las muestras de suelo "in situ" con los resultados correspondientes del laboratorio. Debido a que todos los sistemas de clasificación que se acaban de examinar son de uso común, conviene estar familiarizado completamente con cada uno de ellos.

También puede obtenerse información útil de fuentes que quedan fuera del campo de la ingeniería civil, especialmente de la geología y de la pedología. El especialista en cimentaciones debe conocer cuando menos la terminología de las descripciones de esta dos ciencias.

### **3.2. EL EFECTO GRANULOMETRICO EN LA COMPACTACION.**

Los cambios de humedad, las bajas capacidades carga y los potenciales cambios volumétricos que afectan a los suelos elegidos para alguna aplicación ingenieril pueden resolverse mediante la compactación, la cual reduce los vacíos y por ende la permeabilidad del suelo, aumenta su resistencia al corte y disminuye sus posibilidades de asentamiento.

No todos los suelos responden de igual manera a la energía de compactación, la cual requiere además de un contenido óptimo de la humedad, la suficiente para lograr el empaqueo más íntimo posible de las partículas que constituyen el suelo.

Las granulometrías nos definen suelos gruesos que responden mejor a la compactación, ya que al contar con una gama de tamaños más amplia proveen siempre de material para ocupar los huecos de cualquier tamaño que se vayan formando durante el proceso de compactación. En la figura 3.4 se ilustra lo anterior, un suelo grueso con buena graduación se compacta a mayores que las de baja plasticidad, para alcanzar los mismos grados de resistencia.

Así mismo, los métodos de compactación masivos (vibroflotación, pilas de compactación o consolidación dinámica) con grandes espesores de suelo movilizados, sirven sólo si las curvas granulométricas del suelo al que se le aplicará el proceso quedan dentro del rango indicado en la figura 3.4.

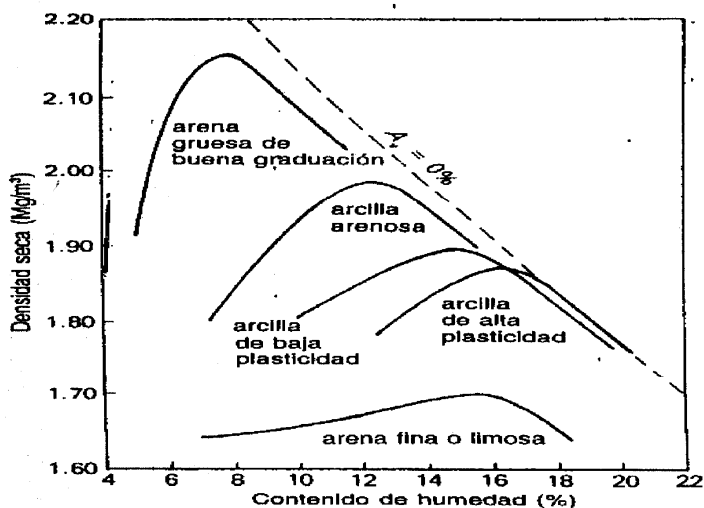


Fig. 3.4

### 3.3 PERMEABILIDAD Y ALTURA CAPILAR

Definición y Ley de Darcy. Se dice que un material es permeable cuando contiene huecos o intersticios continuos. Todos los suelos y todas las rocas satisfacen esta condición. Sin embargo, hay grandes diferencias en el grado de permeabilidad en los diferentes materiales térreos. La cantidad de agua que pasa a través de una roca densa puede ser tan pequeña que puede pasar inadvertida, por que la evaporación evita que se acumule en la cara expuesta; sin embargo, el paso del agua a través de este material puede producir presiones de filtración entre los granos minerales, que pueden ser tan grandes como los que se ejercen en materiales más permeables, que estén bajo el efecto de una carga hidráulica.

El coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) puede definirse como la velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario.

El valor  $k$  se usa como una medida de resistencia al flujo ofrecida por el suelo, y son varios los factores que intervienen:

- a) La densidad del suelo,
- b) La distribución de tamaño de partícula,
- c) La forma y orientación de partículas del suelo,
- d) El grado de saturación / presencia de aire,
- e) El tipo de cationes y el espesor de las capas absorbidas, asociadas con los minerales de arcilla (cuando están presentes) y
- f) La viscosidad del agua del suelo, que varía con la temperatura.

El intervalo de valores de  $k$  es muy amplio y se extiende desde 1000 m/s en el caso de gravas de granos muy gruesos, hasta un valor insignificante en el caso de arcillas.

En los materiales granulares,  $k$  varía en forma aproximadamente inversa con el valor de la superficie específica pero en suelos cohesivos, las relaciones son más complejas. En los suelos de arcilla hay factores importantes como el contenido de humedad y la temperatura,

como también lo es la presencia de fisuras cuando se trata de la permeabilidad de grandes masas.

La tabla 3.5 muestra el intervalo de valores promedio de k para diversos suelos, incluyendo las condiciones de drenaje potencial.

Intervalo de valores de k		
$10^2$		
$10^1$		
1	Gravas limpias	Muy buen drenaje
$10^{-1}$		
$10^{-2}$		
$10^{-3}$	Arenas limpias	
$10^{-4}$	Mezclas grava-arena	Buen drenaje
$10^{-5}$		
$10^{-6}$	Arenas muy finas	
$10^{-7}$	Limos y arenas limosas	Mal drenaje
$10^{-8}$		
$10^{-9}$	Limos arcillosos (>20% arcilla)	
$10^{-10}$	Arcillas sin fisuras	Prácticamente impermeables

TABLA 3.5. Intervalo de valores de k

Desde el punto de vista de la mecánica de ingeniería, el agua subterránea en los suelos puede ser de uno de dos tipos, que se presentan en dos zonas distintas separadas por el nivel freático o superficie freático.

Cuando el agua está por encima de cuerpos de suelos aislados, como la arcilla, que tiene una baja permeabilidad, se presenta un nivel colgado de agua subterránea (fig. 3.5). Cuando un estrato de permeabilidad, el nivel freático no existe como tal.

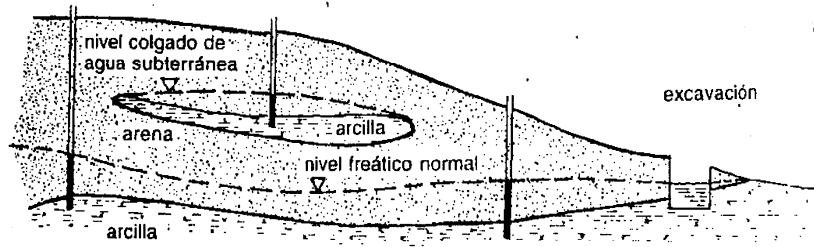


Fig. 3.5.

El agua capilar se retiene por encima del nivel freático mediante tensión superficial, que es una fuerza de atracción que se desarrolla en la interfase o en la superficie entre los materiales de diferentes estados físicos, esto es, líquido/gas, sólido/líquido. Por ejemplo, una superficie agua/aire exhibe una película molecular aparentemente elástica debido a las moléculas de agua subsuperficial (que son más densas que el aire) que desarrollan una mayor atracción que las moléculas de aire. De manera análoga el agua es atraída hacia la interfase sólida debido a la mayor densidad, y por consiguiente mayor atracción de los sólidos.

Considérese un tubo de vidrio de diámetro pequeño en posición vertical(d), cuyo extremo inferior está sumergido en el agua (fig. 3.6).

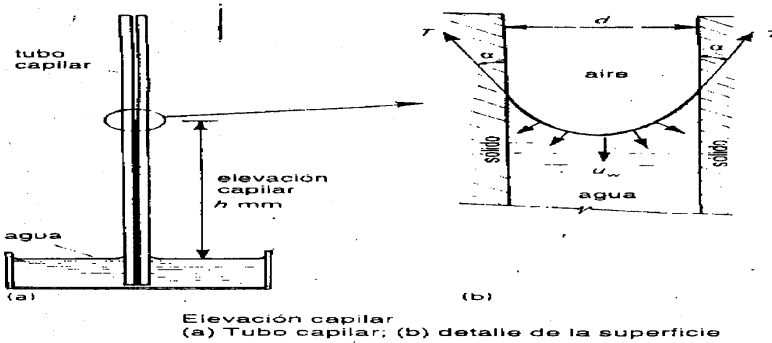


Fig. 3.6

Ascensión capilar,  $h_c = \frac{4T \cos \alpha}{\gamma_w d}$

En forma aproximada para los suelos, considérese:

$T = 0.000074 \text{ kN/m}$        $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$        $\alpha = 0$

y  $d \cong eD_{10}$  [(donde  $D_{10}$ = tamaño efectivo), obtenido de la curva granulométrica]

Con lo que se obtiene,  $h_c \cong \frac{4 \times 0.000074 \times 10^6}{eD_{10} \times 9.81} = \frac{30}{eD_{10}}$

Esta estimación puede mejorarse para tomar en cuenta el efecto de la graduación y de la forma de los granos, tales como granos irregulares y de forma laminar ( Terzaghi y Peck, 1948 ):

$h_c = \frac{C}{eD_{10}}$

donde C= un valor entre 10 y 40mm<sup>2</sup>

Mientras que el valor de  $h_c$  representa la ascensión capilar máxima, el suelo estará solamente saturado con humedad capilar hasta el nivel de saturación capilar (  $h_{cs}$  ).

En la fig.3.7 se muestra la relación aproximada entre la ascensión capilar y el nivel de saturación capilar y el tipo de suelo.

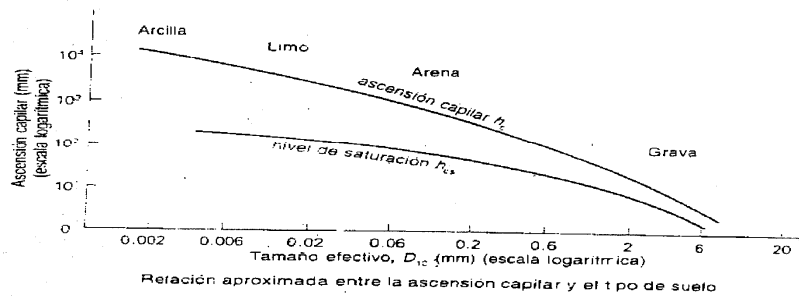


Fig. 3.7



### 3.4 DISEÑO DE FILTROS.

En algunas aplicaciones ingenieriles las estructuras se hallan sometidas a fuerzas de filtración ocasionadas por flujo de agua en su interior, tal es el caso de bordos de tierra ( presas, canales, cortes, etc. ) como el que se muestra en la figura 3.8. Vemos ahí que la línea superior de corriente ha sido abatida con un enrocamiento por fuera del bordo, sin embargo, esta protección pudiera taponarse con los finos que el agua acarrea. Para evitar esto , el enrocado puede a su vez ser protegido con un filtro ( véase el detalle mostrado en la fig. 3.9 ) en el cual se detenga el viaje de esas partículas.

Fig. 3.8



Protección del cuerpo de una presa mediante un enrocamiento.



Fig. 3.9

Para un diseño eficaz del suelo que será empleado como filtro es importante tomar también en cuenta el tipo de suelo que pretende protegerse . Los siguientes criterios son de utilidad para obtener un filtro adecuado:

- A) Se debe descontar el contenido de suelo con tamaño de grano mayor de 19 mm.
- B) El filtro no debe contener material con partícula de tamaño superior a unos 80 mm.
- C) El contenido de finos del material del filtro ( tamaño de partículas menor que 75  $\mu$ m ) no debe exceder del 5% .
- D) La curva granulométrica del filtro debe tener aproximadamente la misma forma que la del suelo .

E) El tamaño D 15 del filtro debe quedar situado entre cuatro veces D 15 del suelo y cuatro veces D 85 del suelo; esto es,  $4 \times D_{15} (\text{suelo}) < D_{15} (\text{filtro}) < 4 \times D_{85} (\text{suelo})$ .

F) El tamaño D85 del filtro no debe ser inferior al doble del diámetro interno de la tubería o a la abertura del tamiz ( cuando sea aplicable)

Para ilustrar el proceso de diseño considérese la curva granulométrica del suelo mostrada en la figura 3.10. Los requerimientos de un filtro graduado para este suelo definen un rango de tamaños de granos que también se indica en la figura. Este rango fue obtenido con ayuda de las reglas anteriores y las siguientes operaciones:

Características granulométricas del suelo	D15 = 0.008mm D85 = 1.50mm	(Punto A) (Punto B)
Características requeridas para el filtro:	D15 > 4 x 0.008 = 0.032mm D15 < 4 x 1.50 = 6.0mm	(Punto C) (Punto D)
	D85 > 2 x 6.0 = 12.0 mm D5 > 75 $\phi$ m D100 < 80mm	(Punto E) (Punto F) (Punto G)

(Suponiendo que la tubería para operaciones de bombeo posee perforaciones de 6 mm.)

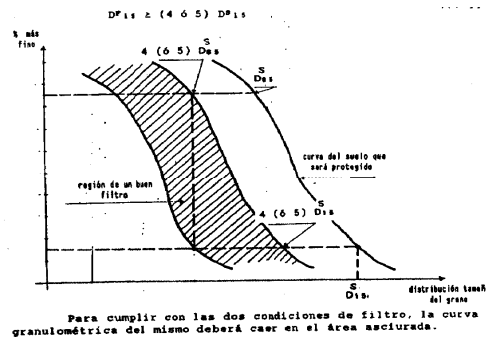


Fig. 3.10

### 3.5 SUSCEPTIBILIDAD A LAS HELADAS

La granulometría de un suelo nos ayuda también a evaluar su susceptibilidad a las heladas, como veremos a continuación .

Los principales efectos de la heladas, que pueden llegar hasta profundidades de un metro en zonas templadas, son los hinchamientos superficiales ocasionados por el incremento de volumen del agua que al transformarse en hielo se eleva al 9%. Durante el deshielo se producen ablandamientos del suelo.

Las presiones ocasionadas por la expansión al congelarse el agua son suficientes para romper superficies pavimentadas o cimentaciones sometidas a carga ligera (viviendas, bodegas, naves pequeñas, etc.). La subrasante de las carreteras también puede verse afectada, al penetrar el agua la superficie porosa dejada por la helada.

En los suelos de granos gruesos, tales como gravas y arenas gruesas ( en los cuales la ascensión capilar es despreciable) la expansión es absorbida por los vacíos, con lo que los aumentos totales de volumen son insignificantes.

En el caso de las arcillas, la permeabilidad es tan baja que la migración de agua hacia la capa congelada será muy lenta como para que se lleguen a formar lentes de hielo. Por tanto, los suelos susceptibles a las heladas tienden a ser aquellos que contienen en forma predominante arenas finas o limos. También es recomendable que siempre que sea posible, el nivel freático se mantenga a cuando menos 600mm por debajo del nivel de formación de hielo.

En una clasificación de diseño para suelos helados propuesta por el U.S.Army Corps of Engineers (1965), se recomienda como guía el porcentaje de granos finos menores que 0.02mm en el suelo, mientras que Croney y Jacobs (1967) primero, y después el Road Research Laboratory (1970) han sugerido una combinación de valores del índice de plasticidad y un

porcentaje de finos menores que 75 $\mu$ m. La tabla 3.6 muestra una clasificación de susceptibilidad a la helada propuesta por Whitton, basada en las fuentes mencionadas y en otras, así como en estudios de laboratorio.

*Susceptibilidades de los suelos y otros materiales a las heladas*

<i>Susceptibilidad a la helada</i>	<i>Suelos gruesos clasificados de acuerdo con el Sistema Inglés de Clasificación de Suelos (tabla 2.3)</i>					
Alta					GWM GPM GWC GPC SWM SPM SWC SPC	GML,I, etc. GCL,I, etc. SML,I, etc. SMC,I, etc
Media				GWM GPM GWC GPC SWM SPM SWC SPC		
Baja		GW GP SW SP				
Despreciable	GW GP SW SP					
	0	3	5	10	15	35

% finos

<i>Otros materiales:</i>	<i>Susceptibilidad</i>	<i>Cuando:</i>
Limos	Medra alta	(TODOS)
Arcillas de plasticidad baja a intermedia, mal drenadas	Baja a alta	IP < 15
bien drenadas	Baja a alta	IP < 20
Creta quebrada	Media a alta	m <sub>sw</sub> > 5%
Calizas quebradas	Baja a alta	m <sub>sw</sub> > 3%
Otras rocas y escoria quebradas	Baja a alta	% de finos > 10%
Esquistos de hullera quemados	Media a alta	
Ceniza pulverizada de combustión	Baja a alta	% de finos > 10%

Tabla 3.6

3.6- ALGUNAS APLICACIONES COMPLEMENTARIAS.

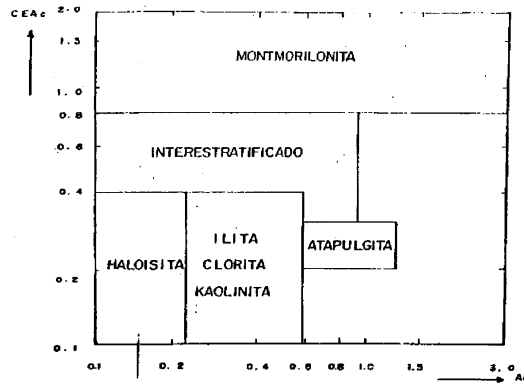
Además de complementar la curva granulométrica, el hidrómetro puede servirnos para determinar el contenido de coloides definidos como partículas menores que 0.002 mm. (2 micras), de gran utilidad en la determinación del contenido mineralógico de una arcilla. El tipo de mineral que constituye una arcilla puede determinarse con ayuda de la gráfica mostrada en la figura, entrando a ella con el valor de la actividad de la arcilla, concepto definido por Skempton como:

$$A_c = I_p / \% \text{ en peso menor que } 2 \mu$$

y con el valor de la actividad de intercambio catiónico  $CEA_c$ , definido como:

$$CEA_c = (L_p) 1.17 / \% \text{ en peso menor que } 2 \mu$$

en las expresiones anteriores ya se dijo lo que significaba el denominador.  $I_p$  y  $L_p$  son el índice plástico, respectivamente.



Naturaleza mineralógica de una arcilla a partir de su actividad  $A_c$  y de su capacidad de intercambio catiónico  $CEA_c$ .

Fig. 3.11

**Presiones de inyección.** De acuerdo con las consideraciones anteriores, la presión durante el inyectado juega un papel importante. En principio, es necesario operar con las presiones más altas que resulten admisibles, para abrir las grietas y penetrar a mayor profundidad. Sin embargo, hay limitaciones sobre este particular, la principal es que no provoque el levantamiento de las formaciones, con pérdida de lechada o daño a la roca. Cambefort ofrece cálculos estimativos de las presiones que son tolerables en masas de roca, aplicando fórmulas de la elasticidad; por ejemplo, concluye que puede operarse con presiones de  $16 \text{ kg/cm}^2$  a partir de 20 m. bajo el nivel del terreno. La técnica norteamericana toma como base el peso propio de la roca y prescribe incrementos de la presión en función de la profundidad, resultando valores de 2 y  $4 \text{ kg./cm}^2$  para los casos antes considerados.

Los partidarios de la aplicación de altas presiones en rocas fisuradas consideran que:

- a) Se abren las grietas finas por deformación de la roca, facilitando la penetración de la mezcla, y
- b) al abatirse la presión, la roca se descomprime estableciendo un buen contacto con el producto inyectado.

**Normas generales.** El tratamiento depende de las características que presentan las grietas o soluciones de continuidad. Cuando estas son de grandes dimensiones, aparecen con arcillas o arenas y gravas. Se plantea entonces el problema de dejar estos materiales o eliminarlos. Esta última operación es difícil y costosa. Se requiere inyectar agua y aire, para provocar el desprendimiento y arrastre del relleno; la limpieza es parcial, de manera que solo en casos muy particulares ha sido recomendado.

En calizas se localizan cavernas de grandes dimensiones; por ejemplo, en las presas Benito Juárez, Oax., La Boca, N. L. Y Presidente Alemán, Oax., el relleno de concreto se hizo previa limpieza con agua a presión; posteriormente, se ejecutaron inyecciones de cemento y agua.

Cuando las grietas que presenta la roca tienen aberturas variables entre 1 cm. y varios decímetros, es usual el tratamiento preliminar a base de una suspensión estable ( arcilla o bentonita, cemento, silicato de sodio y arena fina); se controla la cantidad a inyectar con la presión.