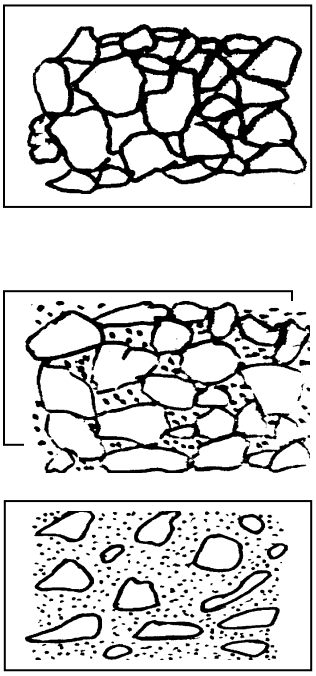
3. ESTRUCTURA DEL SUELO Y GRANULOMETRÍA

3.1 Características y estructura de las partículas minerales.

3.1.1 Relaciones fino – agregados



Los agregados sin finos, como los talus, presentan contacto grano a grano, el peso volumétrico es variable, es muy permeable. Estos materiales no son susceptibles a las heladas, presentan estabilidad alta cuando están confinados y estabilidad baja en estado no confinado. No es afectable por condiciones hidráulicas adversas y es de compactación difícil.

Los agregados con finos suficientes, presentan densidad más alta, contacto grano a grano e incremento de la resistencia mecánica. Son resistentes a la deformación, poseen mayor peso volumétrico y su permeabilidad es menor. Son susceptibles a las heladas. Relativa alta estabilidad (confinado o no confinado). No muy afectable por condiciones hidráulicas adversas. Compactación difícil.

Los agregados con gran cantidad de finos, es el caso de materiales coluviales: no se presenta el contacto grano a grano; los granos están dentro de una matriz de suelo fino; en este estado disminuye el peso volumétrico, son de permeabilidad baja, son susceptibles a las heladas, presenta baja estabilidad (confinado o no), y es afectable por condiciones hidráulicas adversas. No se dificulta su compactación.

Figura 3.1 Depósitos de suelos transportados

3.1.2 Principales propiedades demandadas por el ingeniero.

El ingeniero civil debe identificar las propiedades de los suelos con el fin de evaluarlos en el momento de realizar las obras y lograr unas condiciones estables que garanticen la durabilidad y la estabilidad de las estructuras. Estas propiedades son evaluables en laboratorio.

1. **Estabilidad volumétrica:** Se refiere a lograr suelos con volúmenes constantes, frente a la aplicación de cargas o debido a los agentes como el agua o el secado. Los cambios de humedad afectan la estabilidad volumétrica y son las causas del levantamiento de pavimentos, la inclinación de postes, la rotura de tubos, los asentamientos de muros y la inestabilidad de taludes. La figura 3.2 presenta un talud conformado por suelo arcilloso, inestable por el secado.

2. **Resistencia mecánica:** Los suelos tienen una resistencia mecánica que permite la estabilidad de las estructuras que soporta o de los taludes. La humedad reduce la resistencia, mientras que

la compactación o el drenaje la eleva. La disolución de cristales (arcillas sensitivas), baja la resistencia.

Figura 3.2 El suelo de la corona del talud es inestable: la contracción y el agrietamiento inducidos por el secado del sol y el viento, hasta la deshidratación del suelo lo hace perder su funcionalidad. (Carlos E Escobar P)

3. **Permeabilidad:** Es la capacidad de un suelo de permitir el paso de un fluido a través suyo. La permeabilidad baja estimula el incremento de presión de poros y es un factor detonante de deslizamientos. Por otra parte, el flujo de agua a través del suelo permeable, de cohesión baja, puede originar la tubificación, el arrastre de partículas sólidas y la erosión interna del suelo.

4. **Durabilidad:** Es la capacidad que tiene el suelo de resistir a la acción del medio ambiente que lo rodea, (figura 3.2) o de la meteorización física o química; de la abrasión o de cualquier otro proceso de deterioro. El intemperismo, la erosión y la abrasión amenazan la vida útil de un suelo, como elemento estructural y funcional.

5. **Compresibilidad:** Es la propiedad de un suelo relacionada con su susceptibilidad a disminuir su volumen cuando es sometido a cargas. Afecta la permeabilidad, altera la magnitud y sentido de las fuerzas inter-partícula, modificando la resistencia del suelo al esfuerzo cortante. Los suelos poco compresibles son susceptibles a sufrir desplazamientos.

Las anteriores propiedades se pueden modificar o alterar de muchas formas: por medios mecánicos al compactar el suelo, la instalación de subdrenaje, medios eléctricos, cambios de temperatura o adición de estabilizantes (cal, cemento, asfalto, sales, etc.).

Componente / Propiedad	Arena		Limo	Mica		Carbonato		Sulfato		Caolinita	Illita		Montmorillonita		Materia orgánica	Alofano
Permeabilidad seco	ma	Problema cuando es uniforme	b	m	La biotita es más problemática	m	son solubles en ácidos	m	Ataca al cemento	b	mb	Cuidado con la salinidad	mb	Cuidado con la salinidad	ma	m
Permeabilidad humedo	ma		a	a		m		m		b	mb		mb		ma	ma
Estabilidad volumétrica	ma		a	a		ma		ma		a	b		mb		a	m
Plasticidad cohesión	b		mb	b		b		b		m	b		ma		m	ma
Resistencia seco			a	a		a		a		m	a		ma		b	m
Resistencia humedo			mb	m		a		a		b	m		mb		mb	b
Compacatción óptima	a		m	mb		ma		ma		b	m		mb		mb	ma

ma: muy alto, a: alto, m: moderado, b:bajo, mb:muy bajo

Tabla 3.1 Propiedades ingenieriles de los componentes del suelo

3.1.3 Estructura de los suelos – Fábrica textural y estructural del suelo.

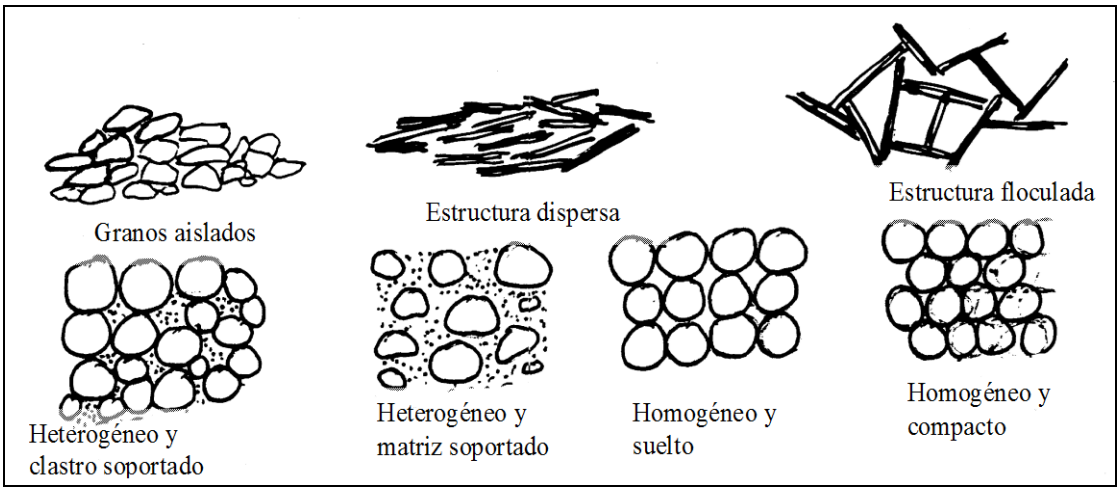
La estructura primaria en su estado natural es la disposición y el estado de agregación de los granos, lo que depende del ambiente de meteorización, en el caso de los suelos residuales, o del ambiente de deposición en el caso de los suelos transportados. El resultado es fábrica textural que hereda el suelo.

Otras discontinuidades en la masa, por ejemplo, los pliegues o las fracturas, por actividad de la tectónica, el vulcanismo, etc., o las que marcan ciclos de actividad geológica (planos de estratificación, disolución, alteración, etc.), son la estructura secundaria y constituyen aspectos estructurales a mayor escala; esta es la fábrica estructural que hereda el suelo (relictos).

En el proceso de sedimentación, las partículas sólidas están sometidas a fuerzas mecánicas y eléctricas. Las primeras afectan todas las partículas (ambientes turbulentos, gravedad, etc.) y las segundas a las partículas finas (atracción, repulsión y enlaces iónicos, en medios acuosos). Cuando dominan fuerzas de atracción eléctrica, se produce la floculación y cuando dominan las de repulsión, las partículas se separan formando suelos dispersivos. La temperatura y concentración iónica influyen en la incidencia del medio acuoso de la sedimentación.

El suelo puede fallar por los granos minerales (falla por la fábrica textural), o por la liga de los granos minerales (falla por la fábrica estructural).

Así, la estructura primaria puede ser:



ORIGEN	Textura		Fabrica no orientada			Fabrica orientada		
	Calse	**Grano**	**Entrelazada**	**Cementada**	**Consolidada**	**Foliada**	**Cementada**	**Consolidada**
ÍGNEO	Cristalina	Fino	Basalto					
		Grueso	Granito					
	Piroclástica	Fino		Toba				
		Grueso		Aglomerado				
METAMÓRFICO	Cristalina	Fino	Hortels			Pizarra		
		Grueso	Mármol			Gneis		
	Clástica	Fino	Milonita			Flonita Protomilonita		
		Grueso	Brecha					
SEDIMENTARIO	Grano-cristalina	Fino	Caliza Oolitica					
		Grueso						
	Clástica	Fino		Limolita Calcárea	Arcillolita		Lutita Calcárea	Lutita Arcillosa
		Grueso		Conglomerado Calcáreo	Conglomerado Arenoso		Lutita Cuarzosa	Lutita Arenosa

Tabla 3.2 Textura y fábrica de materiales rocosos.

3.1.4 Tipos de falla por discontinuidades en roca

La geotecnia incluye el estudio de la estabilidad de taludes. Uno de los aspectos más importantes es identificar los mecanismos de falla de los taludes. Las fallas más comunes en suelos son: la **falla circular** ocurre en taludes conformados por suelos o por masas de roca intensamente fracturada; la **falla traslacional** es más frecuente en suelos que reposan sobre una roca o un suelo más compacto y estable; la **falla planar** ocurre a través de discontinuidades o diaclasas, cuando el buzamiento es menor al del talud y mayor al ángulo de fricción; la **falla en cuña** ocurre cuando dos familias de discontinuidades producen cuñas, con línea de cabeceo buzando más suave que el talud. La **falla por volteo** se presenta cuando el buzamiento casi vertical o contrario; el **pandeo por fricción plástica y el pateo** ocurren cuando los bloques de roca se disponen paralelos a la pendiente y pierden el talón. En masas con mecanismos de falla planar o de cuña, la fricción que se desarrolla a lo largo del plano puede sostener los bloques inestables y en el caso de las cuñas cuando las discontinuidades están poco inclinadas. Recuérdese que los suelos residuales heredan las debilidades de la roca y estas se denominan "relictos". Las discontinuidades en los macizos rocosos forman relictos y las masas pueden fallar por los planos heredados de la fábrica estructural.

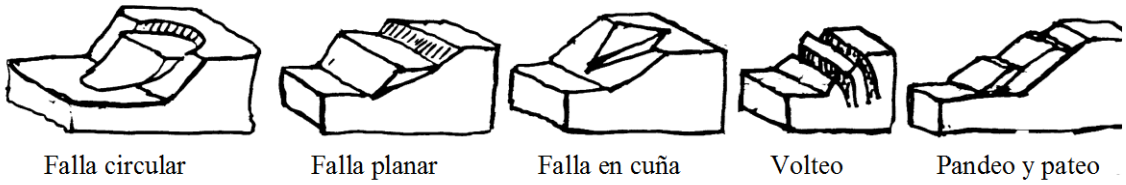


Figura 3.4 Tipos de fallas por discontinuidades en taludes construidos sobre macizos rocosos.

3.1.5 El contexto para facilitar el texto geotécnico

La mecánica de suelos exige actividades de campo que incluyen las campañas de prospección de suelos, incluyendo la toma de muestras, visitas para verificar el estado de las áreas a intervenir, la identificación de los rasgos geotécnicos como grietas, contactos, cambios de suelos, aprovechando los escarpes y los taludes aledaños al sitio de estudio. Las observaciones de campo deben anotarse en forma apropiada, incluyendo además, los datos de localización, la fecha y el ejecutor, entre otros, tales como los que siguen a continuación que son importantes y fundamentales para el éxito del trabajo:

Profundidad del suelo, los espesores y la localización de los contactos referenciados a la superficie del suelo permiten configurar el arreglo de los suelos, los planos de contacto y las condiciones que favorecen o no la estabilidad de una estructura.

Color. El color del suelo incluyendo diversos colores (abigarrado), cuando se contamina o cuando existen vetas permiten una clasificación por comparación y hacer la localización de los estratos de suelo.

Inclusiones. Los suelos tienen inclusiones de carbonatos, hierro, raíces, materia orgánica, etc. Estas inclusiones le pueden disminuir la calificación como un suelo que hace parte de la cimentación de una estructura.

Tipo de perfil. La exploración del suelo se puede realizar por medio de sondeos (exploración indirecta con la toma de muestras), apiques y trincheras (exploración directa y la toma de muestras), o mediante la revisión de los taludes o escarpes cuando se trata de escarpes dejados por un deslizamiento.

Presencia del nivel freático. La profundidad a la cual aparece el nivel freático. El nivel freático tiene fluctuaciones en los inviernos y los veranos. La identificación de capas de suelo más impermeables, es de gran utilidad para configurar los modelos físicos necesarios para el modelado de un talud.

Presencia de humedad. Profundidades del suelo con humedades altas, principalmente en los cambios litológicos o cerca de manantiales de agua permiten trazar estrategias para realizar el control y conservar estables la humedad y la estabilidad de un suelo.

Geología. El tipo de roca y las formaciones en la región son el soporte de los suelos, sus orígenes y su evolución por los procesos de alteración y meteorización.

Aguas superficiales. La presencia de aguas concentradas que contribuyen a la erosión o a los deslizamientos cuando se pueden incorporar al suelo por las grietas, los caudales, la coloración del agua (óxidos de hierro), la turbidez, cuando se presenta erosión interna, entre otros.

Erosión. Tipo de erosión. La erosión es una causa de la pérdida de funcionalidad del suelo como estructura que integra un proyecto y es síntoma de la baja resiliencia frente al cambio climático.

Vegetación. Tipo de vegetación, la vegetación contribuye a localizar zonas húmedas. Además es un elemento que integra la solución a los problemas de taludes de ingeniería.

Presencia de deslizamientos. Los procesos de inestabilidad existentes. Los mecanismos de falla, las áreas afectadas por los movimientos y las causas de los procesos son indicadores de los tipos de problemas que se deben abordar en la ingeniería.

Uso y manejo del suelo. Si son pastos, cultivos o áreas duras. Es necesario localizar las áreas de cultivos limpios y semilimpios en laderas pendientes, las áreas protegidas con vegetación nativa, los procesos denudativos asociados con el fin de integrar la vegetación dentro de las soluciones.

Textura y consistencia. Identificar si el suelo es arenoso, arcilloso, entre otros, es soporte para resaltar las cualidades o dificultades que pueden generar estos suelos: los suelos limosos y arenosos son susceptibles a erosión, mientras que los suelos arcillosos son más resistentes a la erosión, pero dificultan el subdrenaje por tener permeabilidades muy bajas.

Micro relieve en los suelos. Identificar el estado de los contacto entre suelos, anomalías del relieve.

3.1.6 Definiciones

Sensibilidad: O susceptibilidad de una arcilla, es la propiedad por la cual, al perder el suelo su estructura natural, cambia su resistencia, haciéndose menor y su compresibilidad, aumenta.

Tixotropía: Propiedad que tienen las arcillas, en mayor o menor grado, por la cual, después de haber sido ablandada por manipulación o agitación, puede recuperar su resistencia y rigidez, si se deja en reposo, y sin cambiar el contenido de agua inicial.

Desagregación: Delesnamiento o desintegración del suelo. Cuando se daña su estructura al experimentar ciclos de humedecimiento y secado por calor y viento.

Muestra inalterada: Calificación de valor relativo, para un espécimen de suelo tomado con herramientas apropiadas, retirado del terreno con los cuidados debidos, transportado, conservado y llevado al aparato de ensayo, de manera que pueda considerarse que las propiedades del suelo natural, que se desean conocer en la muestra, no se han modificado de manera significativa.

Muestra alterada: Espécimen con su estructura disturbada. Se emplea para verificar la continuidad de un estrato de suelo y son útiles para realizar ensayos de plasticidad, granulometría, humedad natural, entre otros.

Suelo grueso-granular: Son los suelos conformados por partículas de mayor tamaño: guijarros, gravas y arenas. Su comportamiento está gobernado por las fuerzas de gravedad.

Suelos fino-granulares: Son aquellos conformados por limos y arcillas. Su comportamiento está regido por fuerzas eléctricas, fundamentalmente.

Suelos pulvurulentos: Son suelos no cohesivos, o suelos gruesos, pero limpios (sin finos); es decir, grueso-granulares limpios.

Arcillas Vs limos: En estado seco o húmedo, tiene más cohesión la arcilla. La arcilla seca es dura mientras el limo es friable o pulverizable. Húmedos, la arcilla es plástica y el limo poco plástico. Al tacto, la arcilla es más suave y a la vista el brillo más durable.

3.1.8 Suelos especiales.

En la mecánica de suelos se presenta, con frecuencia, suelos con comportamientos que ameritan ensayos especiales, para determinar algunas propiedades que pueden afectar las estructuras cimentadas en ellos.

Suelos expansivos: La expansión se explica por adsorción de agua, dada la deficiencia eléctrica del suelo, su alta superficie específica y su capacidad catiónica de cambio. Los problemas que ocasionan están vinculados con las altas presiones y grandes deformaciones por el hinchamiento

que sufre el suelo. Son expansivos algunas veces los suelos clasificados como limos inorgánicos de plasticidad alta (MH), las arcillas de plasticidad alta (CH), con límites líquidos mayores de 50%.

Solución a los problemas por expansión de suelos: La solución para controlar la expansión de estos suelos, es colocar una carga que aplique una presión mayor a la presión máxima de expansión del suelo; otra alternativa es conservar la humedad natural (ω) constante, aislando el volumen expandible. Mantener la humedad final del suelo con la humedad natural (drenando). Disminuir la presión de expansión, bajando la capacidad catiónica, con Ca^{++} y Mg^{++}. Reemplazar el suelo, traspasar la capa problemática por medio de pilotes a fricción negativa. En la haloisita, la cal no es buena, pero al calentarlo a 60 °C pasa a ser caolinita.

Suelos dispersivos: En estos suelos ocurre una defloculación de las arcillas. El fenómeno químico es propio de suelos salinos, cuando, por presencia de sodio se desplaza el agua recién venida y adsorbida, para romper los enlaces.

La verificación del potencial dispersivo se hace contando iones disueltos de Na^{+}, Mg^{++}, Ca^{++} y K^{+} y comparando, con el total de sales, en términos de concentración.

El efecto de la dispersión es la erosión interna o tubificación, y la pérdida de resistencia del suelo por destrucción de su estructura.

En un ensayo de erodabilidad, todos los suelos dispersivos son erodables. Los suelos dispersivos son sódico-cálcicos y la solución a los problemas es incorporar cal viva para neutralizar el Na^{+}. Se presentan en el Huila y Guajira (ambientes áridos y suelos marinos).

Suelos colapsables: Los limos originados en suelos de cenizas volcánicas son colapsables, especialmente cuando son remoldeados; el límite líquido (LL) de las cenizas volcánicas es muy alto y sus enlaces iónicos son débiles. Los suelos de origen eólico -las cenizas tienen algo de eso- son susceptibles, el agua (pocas veces) y el sismo, en casos de licuación, hacen colapsar el suelo.

Suelos orgánicos: El primer producto de estos materiales es la turba, que es materia orgánica en descomposición. Por su porosidad y estructura, tiene alto contenido de humedad, baja resistencia, alta compresibilidad e inestabilidad química (oxidable). Deben evitarse como material de fundación y como piso para rellenos. El humus es de utilidad económica y ambiental, por lo que debe preservarse.

Suelos solubles: La disolución se presenta en suelos calcáreos (calizas – yesos);

$$Ca\,CO_3 + H_2O + CO_2 \xrightarrow[\text{el ácido carbónico}]{} Ca\,(OH)_2 + H_2CO_3$$

El ácido carbónico producido ataca de nuevo los carbonatos del suelo, por lo que es recomendable aislar la estructura del flujo de agua.

3.1.9 Recolección de muestras en el terreno

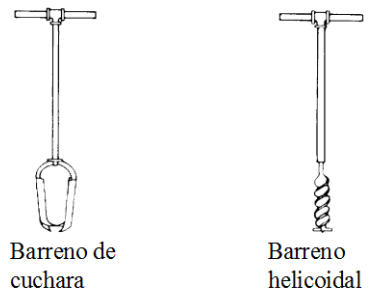


Figura 3.5 Equipo para exploración manual

Equipo:

Barreno manual, motorizado o equipo de perforación.

Varillas de extensión.

Bolsas para muestras y recipientes para contenido de humedad.

Llaves inglesas para articular las varillas de extensión del barreno.

Decámetro para localizar perforaciones, para medir los espesores de los estratos de suelos y la profundidad del nivel freático.

Formato para el registro del sondeo.

Lápiz y borrador.

Objetivo: Conseguir muestras de suelo, en un sondeo manual. Las muestras recuperadas pueden ser alteradas o de bolsa en forma inalterada por medio de tubos shelby o pared delgada. Las muestras se deben identificar al vincularlas al sondeo y reportar la profundidad a la que fue extraída.

El objetivo del trabajo de campo es la elaboración de un perfil de suelos para identificar la estratigrafía del terreno (presencia de los perfiles del suelo, su espesor), aprovechando la perforación para identificar la profundidad del nivel freático, la presencia de suelos orgánicos, entre otras observaciones que se realizan en el campo.

Procedimiento: se realiza la perforación y se hace el registro de los suelos encontrados; se toman muestras para humedad por cada metro de perforación, donde cambie el estrato o la apariencia del suelo. Al recuperar las muestras se debe cuidar que no pierdan humedad, y para ello no se debe demorar en conservar herméticas las muestras.

Las muestras se rotulan con los datos suficientes y necesarios para identificar el sito de toma de la muestra, se anota en el formato del registro del sondeo y se guarda en un sitio adecuado, donde no sufra alteración por la pérdida de humedad. Si se encuentra el nivel freático, éste se reporta en el formato del sondeo. Se acostumbra dejar la perforación abierta para verificar el nivel freático el día siguiente.

3.2 GRANULOMETRÍA

3.2.1 Análisis granulométrico.

Proceso de laboratorio que permite determinar la proporción en que participan los granos del suelo, en función de sus tamaños. Esa proporción se llama gradación del suelo.

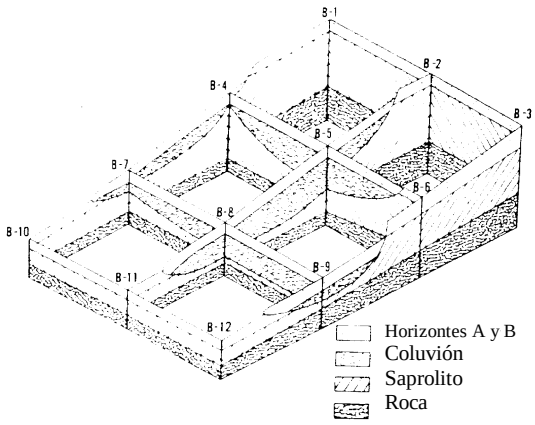


Figura 3.6 Esquema tridimensional de una exploración de suelos.

La gradación por tamaños es diferente al término geológico en el cual se alude a los procesos de construcción (agradación) y la destrucción (degradación) del relieve, por fuerzas y procesos tales como tectonismo, vulcanismo, erosión, sedimentación, entre otros.

3.2.2 Métodos de análisis granulométrico.

La separación de un suelo en diferentes fracciones, según sus tamaños, resulta necesaria para la conocer su competencia y eficiencia, desde la perspectiva geotécnica. Esta acción comprende dos tipos de ensayos: por tamizado para las partículas grueso–granulares (gravas y arenas) y el de sedimentación para la fracción fina del suelo (limos y arcillas); estos últimos, dado su comportamiento plástico, no son discriminables por tamizado.

3.2.2.1 Método del tamizado.

Una vez se seca el suelo en el horno o al aire, se pulveriza, se hace pasar por una serie organizada de tamices, de agujeros con tamaños decrecientes y conocidos, de arriba hacia abajo. El primer tamiz, es el de mayor tamaño y es donde inicia el tamizado. Se tapa con el fin de evitar las pérdidas de finos; el último tamiz está abajo y descansa sobre un recipiente de forma igual a uno de los tamices, y recibe el material más fino no retenido por ningún tamiz.

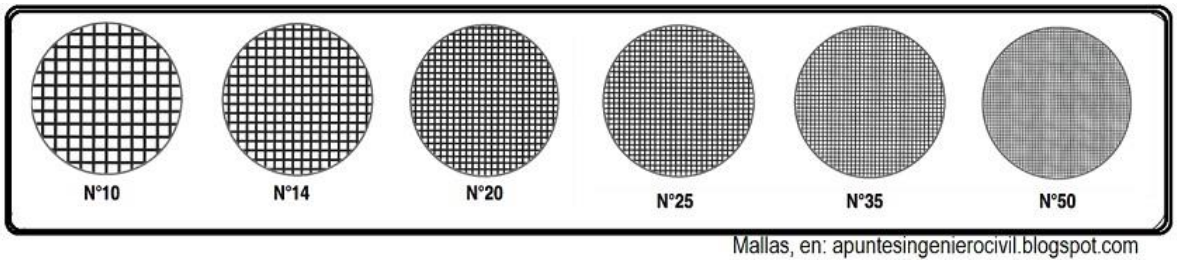


Figura 3.7 Mallas para tamices. En, Blog Apuntes Ingeniería Civil.

Con sacudidas horizontales y golpes verticales, mecánicos o manuales, se hace pasar el suelo por la serie de tamices, de arriba abajo, para luego pesar por separado el suelo retenido en cada malla.

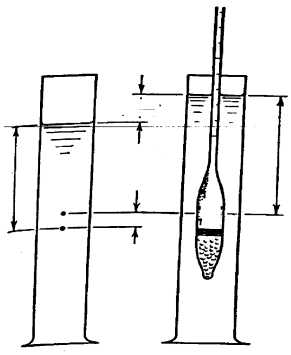


Figura 3.8 Hidrómetro

3.2.2.2 Métodos de sedimentación.

Se puede realizar por dos procedimientos: el método del hidrómetro y el método de la pipeta. Ambos se soportan en las características de la sedimentación de las partículas del suelo en un medio acuoso. Se aplican tales métodos al "suelo fino", es decir, al que ha quedado en el fondo de los tamices y que se denomina "pasa–200", material constituido por limos y arcillas.

a) Método del hidrómetro.

Se toma una probeta con agua, se introduce suelo, se agita hasta lograr una suspensión uniforme; luego se deja en reposo para ir midiendo, con hidrómetro para distintos tiempos transcurridos, la densidad de la suspensión disminuye a medida que las partículas se asientan. La profundidad del densímetro es variable con la densidad de la suspensión (ARQUÍMEDES), es la base para calcular esa distribución de tamaños de granos finos que pasa la malla o tamiz No 200, con ϕ = 0,074 mm. El sistema se calcula con el apoyo de "La Ley de Sotkes", donde:

$$\boxed{v = g * D^2 \frac{\rho_S - \rho_F}{18n}} \qquad \text{cm/sg} \quad (N \approx 100{,}51 D^2) \quad \text{mm} \qquad \textbf{(3.1)}$$

En donde

v = velocidad en cm/seg = constante

n = viscosidad en Poises = gr/cm sg

g = gravedad en cm/seg^2

ρ_S, ρ_F = densidades de los sólidos y la suspensión en gr/cm^3

D = diámetro de una esferita (diámetro equivalente) en cm.

Con la expresión 3.1 se obtiene la del diámetro equivalente D:

$$D = \sqrt{\frac{18n * v}{g(\rho_S - \rho_F}} = \sqrt{\frac{18n * v}{\gamma_S - \gamma_F}} = \sqrt{B * v} = \sqrt{B\frac{H}{t}} \qquad (3.2)$$

Puesto que la viscosidad · y el peso unitario del fluido ($\gamma_F = \delta_F * g$) cambian con la temperatura "T", habría de calcularse B. $B = f_{(T, \gamma S)}$. En la ecuación 3.2, la velocidad v es H sobre t ($v = {}^{H}/_{t}$).

El número N de partículas con ϕ > D, usado en la curva granulométrica, se calcula con la profundidad H del centro del hidrómetro, la que dependerá de la densidad de la suspensión.

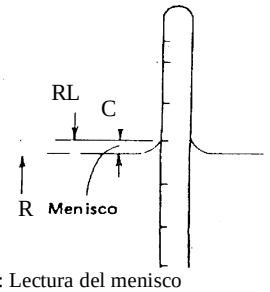
La fórmula 3.1 es valida sí $0{,}2\mu \leq D \leq 0{,}2$mm (sólo limos).

Entonces:

$$N = \frac{G_S(\gamma_F - \gamma_W)}{W_S(G_S - 1)} V * 100 \qquad (\%\,\text{de partículas con } \phi < D = \sqrt{B * v})$$

En donde G_S es la gravedad específica de los sólidos, V es el volumen de la suspensión, W_S es el peso de los sólidos de la suspensión, γ_F es el peso unitario de la suspensión a la profundidad H, γ_W es el peso unitario del agua.

Toda esta situación alude a medidas hechas sucesivamente, después de transcurrido un tiempo t, en el que, a la profundidad H, no existen partículas con diámetro equivalente mayor que D, dado que ellas se han sedimentado (en minutos, horas o días).



RL: Lectura del menisco
R: Lectura real

Figura 3.9 Corrección por menisco

b) Método de la pipeta.

A diferencia del anterior, aquí se deja constante el valor de H. También se parte de una suspensión agua–suelo, uniforme en el instante inicial, que con el tiempo se modifica, dado que las partículas de mayor diámetro se precipitan a mayor velocidad, con fundamento en la Ley de Stokes. A distintos tiempos, desde el inicio, se toman muestras de la suspensión, a una misma profundidad predeterminada (H_0).

De cada muestra obtenida, se determina el peso de los sólidos, contenido por unidad de volumen de la suspensión, lo que constituye la base para el cálculo de la distribución (en proporción) de los tamaños de las partículas finas.

Ajuste por menisco: El agua turbia no deja leer la base del menisco con el hidrómetro. (Figura 3.8)

Se lee R_L y la corrección será $c = R_L - R_{REAL}$, luego $R_{REAL} = R_L - c$ (corregido).

3.3 Curva granulométrica.

Los resultados de los ensayos de tamizado y sedimentación se llevan a un gráfico llamado curva granulométrica.

La fracción gruesa tendrá denominaciones, según el sistema:

SISTEMAS	BRITÁNICO 1	AASHTO 2	ASTM 3	SUCS 4
	ϕ (mm)	ϕ (mm)	ϕ (mm)	ϕ (mm)
Grava	60 – 2	75 – 2	> 2	75 – 4,75
Arena	2 – 0,06	2 – 0,05	2 – 0,075	4,75 – 0,075
Limo	0,06 – 0,002	0,05 – 0,002	0,075 – 0,005	< 0,075 FINOS
Arcilla	< 0,002	< 0,002	< 0,005	

Tabla 3.3. Denominación de suelos, según sistemas de Clasificación.

4: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
3: American Society for Testing and Materials
2: American Association of State Highway and Transportatio Official
1: B S – 5930: 1981

En los suelos grueso–granulares, el diámetro equivalente está referido al agujero cuadrado de la malla; para los finos, al diámetro equivalente de una esfera.

La curva se dibuja en papel semilogarítmico: con una escala aritmética en las ordenadas que permiten identificar los porcentajes, en peso, de partículas con diámetro menor que cada uno de los lados de las abscisas. La escala logarítmica en las abscisas presenta los tamaños de los granos en milímetros. Esta escala, en razón de que los diámetros varían de cm, mm y μ. Esta clasificación es necesaria en geotecnia, pero no suficiente. Se complementa siempre la granulometría con el ensayo de Límites de Atterberg, que caracterizan la plasticidad y consistencia de los finos en función del contenido de humedad.

3.4 Descripción de la gradación.

La forma de la curva de distribución de tamaños de las partículas, indica si los tamaños varían en un rango amplio (curva C) o estrecho (curva B); si el rango tiende a los tamaños mayores del suelo grueso (A) o a los menores de un suelo fino, (C). Si todos los tamaños tienen proporciones en peso relativamente iguales, el rango es amplio y la curva suave, el suelo así será bien gradado como A y C. La mala gradación puede ser por falta de extensión (B) o por discontinuidad. En suelos granulares la gradación expresada numéricamente, se puede determinar con el apoyo del coeficiente de uniformidad C_u y con el coeficiente de curvatura C_c.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad \Rightarrow \text{ bien gradado cuando} \begin{cases} Cu \geq 4 en\, Gravas \geq \text{a 6 en arenas} \\ 1 < Cc < 3 \end{cases}$$

Cuanto más alto sea C_u, mayor será el rango de tamaños del suelo. Los D_i; i = 10, 30, 60, son los tamaños o diámetros de las partículas, para el cual el i% del material es más fino que ese tamaño.

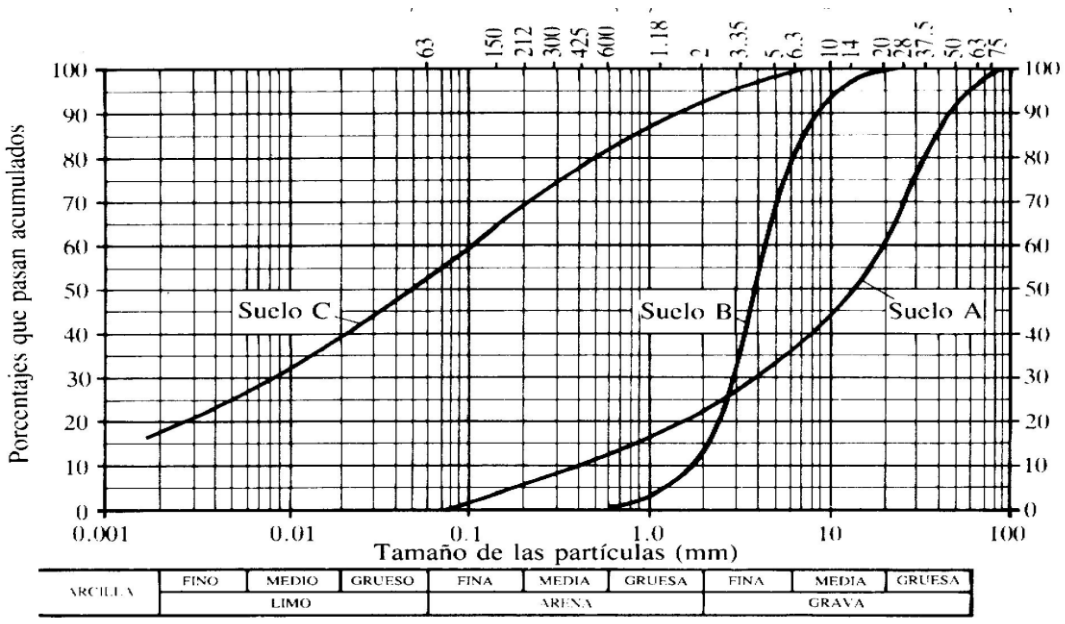


Figura 3.10 Curva granulométrica.

En la figura 3.9, la curva A representa un suelo bien gradado y de grano grueso. La curva B representa un suelo mal gradado, de poca uniformidad (curva parada sin extensión); el suelo C corresponde a una arcilla limosa (suelo fino). Las expresiones T_4 , T_{40} y T_{200} corresponden a la denominación de los tamices o mallas.

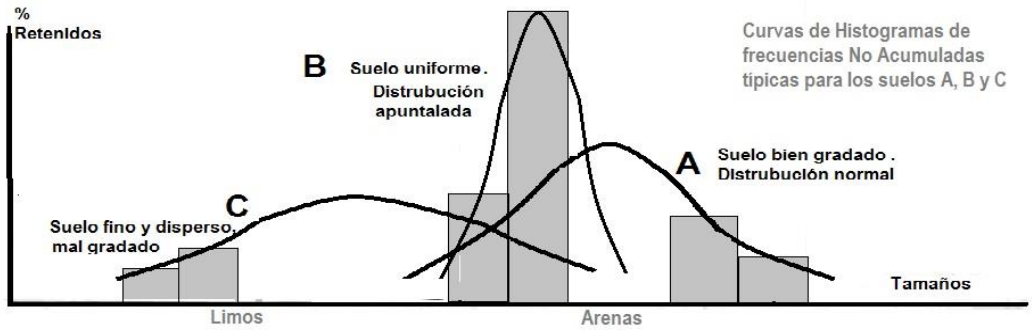


Figura 3.11. Las curvas de distribución de los suelos anteriores, permiten observar que A se ajusta mejor a la forma de la campana de Gauss, mientras B resulta apuntalada y C aplanada.

Tamices. La muestra de suelo se hace pasar a través de un juego de tamices de aberturas descendentes. Esa operación de laboratorio, , se denomina cribado o tamnizaje. El cribado por mallas se usa para obtener las fracciones correspondientes a los diferentes tamaños de partículas que constituyen el suelo; para conocer la fracción de suelo que es menor que cada apertura de tamiz, partiendo de los mayores tamaños, se van tamizando las fracciones de suelo de tamaños cada vez menores, hasta el suelo más fino correspondiente a la malla No 200 (0.074 mm).

La Tabla 3.4, muestra el rango de tamices, con el Tamaño de las Mallas para la Elaboración de la Curva Granulométrica, según el ASTM:

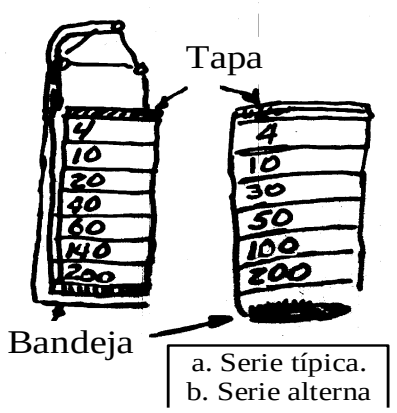


Figura 3.12 Serie de tamices

Designación	ϕ abertura	Designación	ϕ abertura
3 pulgadas	75 mm	N° 16	1180 μ
2 pulgadas	50 mm	N° 20	850 μ
1 ½ pulgadas	37,5 mm	N° 30	600 μ
1 pulgada	25 mm	N° 40	425 μ
¾ pulgada	19 mm	N° 50	300 μ
3/8 pulgada	9,5 mm	N° 60	250 μ
N° 4	4,75 mm	N° 100	150 μ
N° 8	2,36 mm	N° 140	106 μ
N° 10	2 mm	N° 200	75 μ

Tabla 3.4 - Serie de tamices o mallas.

Tabla 3.5- TAMAÑOS DE GRANOS

Denominación de Tamaños	Diámestros dominates	Suelo representativo
Muy gruesos	> 60 mm	Cantos o boleos
Gruesos	60 a 2 mm	Grava
Medianos	2 a 0,06 mm	Arena
Finos	0,06 a 0,002 mm	Limo
Muy finos	< 0,002 mm	Arcilla
Alberto J. Martínez Vargas, 1990		

Ejercicio 3.1

Calificar las curvas anteriores, calculando los coeficientes Cu y Cc.

CURVA	D_{10}	D_{60}	D_{30}		C_u	C_c	Observación
A	0,4	20	4,0	67%>T_4	50,0	2,0	Grava bien gradada
B	1,8	4,4	2,9	67%<T_4	2,40	1,1	Arena mal gradada
C	0,001	0,14	0,009	55%>T_{200}	NO PROCEDE		Suelo fino, ver límites
D	0,005	0,20	0,012	60%>T_{200}	NO PROCEDE		Suelo fino, ver límites

SUCS: Gravas: $C_u > 4$; arenas: $C_u > 6$; T_4 = 4,75 mm; T_{200} = 0,075 mm

Ejercicio 3.2

Dados los pesos retenidos, dibuje la curva de la arena dada.

TAMIZ	ϕ mm	W retenido	% retenido	% que pasa
4	4,75	9,7	1,9	98,1
10	2,00	39,5	7,9	90,2
20	0,840	71,6	14,3	75,9
40	0,425	129,1	25,8	50,1
60	0,250	107,4	21,5	28,6
150	0,150	105,0	21,0	7,6
200	0,075	8,5	1,8	5,9
Bandeja		1,3	X	
		472,1 gr	94,1%	

Muestra seca 500 gr; pérdida por lavado 27,90 gr; total = 472,1 gr ≡ 94,4%.

Porcentaje retenido en el T_4 = (9,7/500)*100 = 1,9 %; porcentaje que pasa = 100 – 1,9 = 91,8 %

Explicación

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,53}{0,15} = 3,5$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} = \frac{0,26^2}{0,15 * 0,53} = 0,85$$

Pobremente gradada y es arena. (% que pasa T4 > 50 %)
Es fina (gran % entre T10 - T40. Es limpia (% pasa 200 < 5%).
Esto según SUCS

Ejercicio 3.3

Se tienen dos materiales α y β que no llenan los requerimientos del constructor. Se encuentra que, para llenarlos, el material α pude aportar los gruesos y β los finos requeridos, si se mezclan. Obtenga una solución que satisfaga las especificaciones dadas en el proyecto.

Solución.

La "fórmula básica" para mezclar dos materiales es P = aA + bB (I)

Siendo: P = % de la mezcla que pasa por un tamiz dado.

A, B = % de α y β que pasan por un tamiz dado.

a, b = % en que α y β entran en la combinación.

Así: - a + b = 1,0 (II)

Luego, llevando II a I P = (1-b)*A + b*B o sea:

P – A = b*(B – A) de donde

$$\boxed{b = \frac{P - A}{B - A}}$$ Y similarmente $$\boxed{a = \frac{P - B}{A - B}}$$ (III)

Malla	¾"	½"	3/8"	T4	T8	T30	T50	T100	T200	
Especificación	100	80/100	70/90	50/70	35/50	18/29	13/23	8/16	4/10	Del constructor
α	100	90	59	16	3,2	1,1	0	0	0	Disponible
β	100	100	100	96	82	51	36	21	9,2	Disponible

Obsérvese que el material α aporta los gruesos y el β los finos.

Se escoge cualquier tamiz (por ejemplo el 8) y un valor P en el rango de las especificaciones (el promedio, P_8 = (35+50)/2 = 42,5%). También se puede acercar este punto al material más

económico o más apropiado, desplazando así la curva de la mezcla, pero se debe verificar que no se salga del rango de las especificaciones.

Siendo A = 3,2%; B = 82%, con (III), a = 0,5; b = 0,5. Entonces:

Malla	**¾″**	**½″**	**3/8″**	**T4**	**T8**	**T30**	**T50**	**T100**	**T200**	
0,5 * α	50	45	29,5	8	1,6	0,6	0	0	0	Para mezclar
0,5 * β	50	50	50	48	41	25	18	10,5	4,6	
Total	100	95	79,5	56	42,6	25,6	18	10,5	4,6	Mezclado

Obsérvese que el nuevo material cumple con lo especificado. Este problema también se puede resolver gráficamente, dibujando las curvas de los dos materiales, e interpolando entre ellas la curva de la mezcla con una proporción constante según los valores deseados de a y b, y dibujando las fronteras de las especificaciones para observar si la mezcla se mantiene adentro de ese rango.

DOCUMENTOS DE SOPORTE ON LINE

Descripción del macizo rocoso: introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterráneas. Suárez Burgoa, Ludger Oswaldo (2014) Descripción del macizo rocoso: introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterráneas. Ludger Oswaldo Suárez Burgoa, Medellín. http://www.bdigital.unal.edu.co/12337

Edafología General. Medina O., Héctor (1969). Memoria sobre las actividades docentes e investigativas en la Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. http://www.bdigital.unal.edu.co/78/

Granulometría. César García Andreu, José Miguel Saval P, Francisco Baeza B, Antonio José Tenza A. (2009). Práctica de Materiales de Construcción. Universidad de Alicante, España. http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Pr%C3%A1ctica%20N%C2%BA%203%20_Granulometria%20I_.pdf

Manual de geología para ingenieros. Duque Escobar, Gonzalo (2003) Universidad Nacional de Colombia, Manizales. - See more at: http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/

Ejercicio 3.4

Dados los pesos retenidos, dibuje la curva granulométrica y determine si el suelo está bien o mal gradado.

P1	1000 gr			
Tamiz	**Diametro (mm)**	**Peso retenido (gr)**	**% Retenido**	**% que pasa**
4	4,75	50		
8	2,36	100		
10	2,00	120		
20	0,85	130		
40	0,425	150		
60	0,25	150		
100	0,15	120		
140	0,106	100		
200	0,075	80		
Total				

Ejercicio 3.5

Dados los pesos retenidos, dibuje la curva granulométrica y determine si el suelo está bien o mal gradado.

P1	10330 gr	P2		9909,7
Tamiz	**Diametro (mm)**	**Peso retenido(gr)**	**% Retenido**	**% que pasa**
2"	50,80	874,8		
1,5"	38,10	310,8		
1"	25,40	706,3		
3/4"	19,05	619,9		
1/2"	12,70	1274		
3/8"	9,53	957,9		
1/4"	6,35	1194		
4	4,75	1034,6		
8	3,36	1524,3		
20	0,85	1070,4		
40	0,425	342,7		
fondo		420,3		
Total				

Ejercicio 3.6

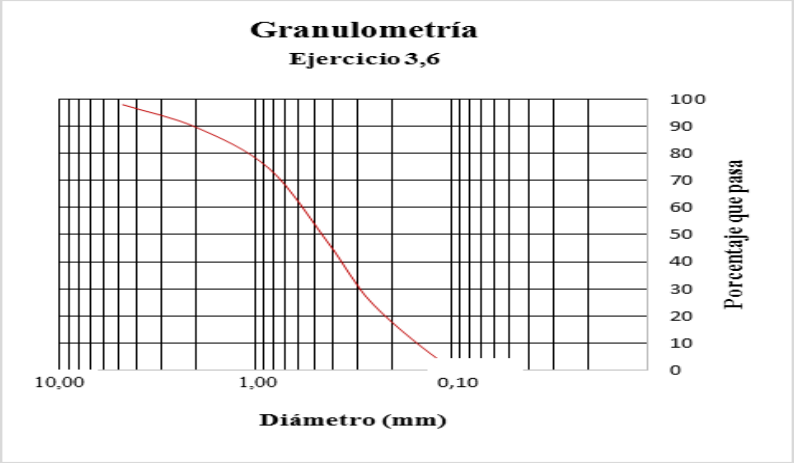
Realizar el ensayo de granulometría a una muestra de 500 gr de una arena limpia y hacer la clasificación.

P_1	500	gr

Tamiz No	Diámetro (mm)	Peso retenido gr	Ponderación gr	Peso retenido aiustado gr	Suelo retenido %	% que pasa %
						100,00
4	4,75	9,70	0,57	10,27	2,05	97,95
10	2,00	39,50	2,33	41,83	8,37	89,58
20	0,85	71,60	4,23	75,83	15,17	74,41
40	0,43	129,10	7,63	136,73	27,35	47,07
60	0,25	107,40	6,35	113,75	22,75	24,32
140	0,106	105,00	6,21	111,21	22,24	2,08
200	0,075	8,50	0,50	9,00	1,80	0,28
Fondo		1,30	0,08	1,38	0,28	0,00

Σ_P **472,10** gr 500,00 gr

Δ_S 27,90 gr



Al realizar el ensayo de granulomtría y pesar la muestra retenida en cada tamiz se encuentra que la suma final es 472,10 gr, 27,90 gr menos que el peso inicial de la muestra. Para ajustar la curva se procede al ajuste por ponderación, aumentando al peso retenido en cada tamiz un peso proporcional al peso retenido en cada uno.

$$P_d = \frac{W_R \times \Delta_s}{\Sigma_p}$$

siendo

W_R: Peso retenido en cada tamiz.

P_d: Ponderación

d_{60}	0,574	mm
d_{30}	0,298	mm
d_{10}	0,157	mm

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \qquad C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}}$$

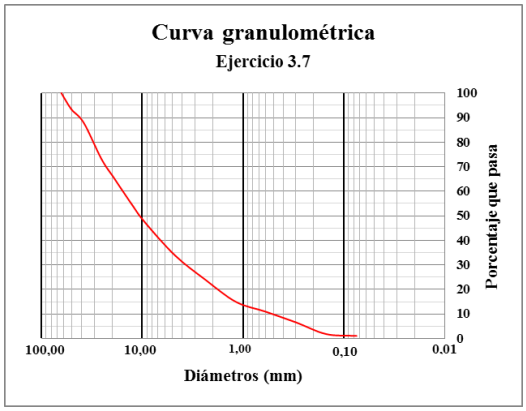
		Condición
C_u	3,7	$C_u>4$
C_c	1,0	$1<C_c<3$

La muestra es una arena limpia mal gradada (SP)

Ejercicio 3.7

Se necesita realizar el ensayo de granulometría de una grava y para ello se llevó al laboratorio una muestra de este material. Realizar la clasificación para determinar si está bien gradada.

Tamiz No	Diametro (mm)	Peso retenido de suelos (gr)	Suelo retenido %	Pasante %
2,5"	63,50	0,00	0,00	100
2"	50,80	320,90	6,44	93,56
1,5"	38,10	281,10	5,64	87,91
1"	25,40	735,00	14,76	73,15
3/4"	19,05	388,20	7,80	65,36
1/2"	12,70	533,00	10,70	54,65
3/8"	9,53	351,90	7,07	47,59
4	**4,75**	**680,80**	**13,67**	**33,92**
8	2,36	497,80	10,00	23,92
16	1,18	446,40	8,96	14,96
30	0,60	198,60	3,99	10,97
50	0,30	217,00	4,36	6,61
100	0,15	238,60	4,79	1,82
200	0,08	37,60	0,76	1,07
Fondo		53,10	1,07	0,00
	$\sum$	**4980,00**		



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

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}}$$

c_u 34,33

c_c 1,85

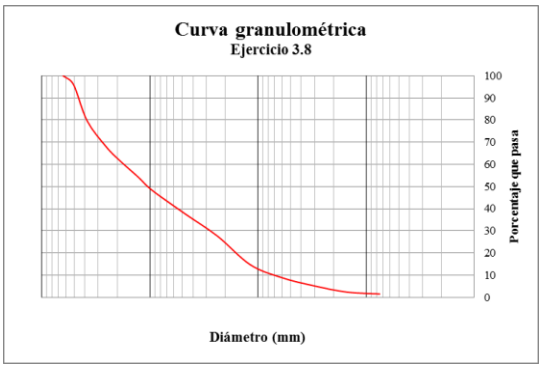
El material es una grava bien gradada (GW)

Ejercicio 3.8

Realizar el ensayo de granulometría de una muestra de una arena contaminada con un suelo fino y clasificarla

Tamiz	Diametro	Peso retenido de material	Porcentaje retenido	Porcentaje que Pasa
No	(mm)	(gr)	%	%
				100
1/2"	12,7	63,6	13,19	86,81
3/8"	9,525	58,2	12,07	74,74
4	4,75	55,7	11,55	63,19
8	2,36	45,7	9,48	53,71
10	2,00	10,3	2,14	51,58
16	1,18	21,5	4,46	47,12
20	0,85	36,2	7,51	44,07
40	0,43	40,2	8,34	35,73
60	0,25	44,1	9,15	26,59
100	0,15	47,8	9,91	16,67
140	0,106	25,4	5,27	11,41
200	0,075	25,7	5,33	6,08
Fondo		7,8	1,62	0,00
∑		**482**		

D_{60}	3,68		
D_{30}	0,29	C_u	40,2
D_{10}	0,09	C_c	0,2



Plasticidad de la fracción que pasa el tamiz No 40

LL	38,5	
LP	21,2	**SUCS**
IP	17,3	**CL**

El material es una arena mal gradada, arena arcillosa (SP-SC)

DOCUMENTOS DE COMPLEMENTO

Manual de geología para ingenieros. Duque Escobar, Gonzalo (2003) Universidad Nacional de Colombia, Manizales. - See more at: http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/

Túneles: Videos y Documentos: https://godues.wordpress.com/2014/01/04/tuneles-videos-y-documentos/

GEOMECÁNICA. Duque Escobar, Gonzalo and Escobar P., Carlos Enrique. Universidad Nacional de Colombia (2016). See more at: http://galeon.com/geomecanica