

LA INGENIERIA DEL SUELO

Por ALBERTO REGAL
*Profesor del Curso de Caminos y Pavimentos
en la Universidad Católica del Perú*

Cuando el tráfico de automotores, con su intensidad característica, invadió las carreteras sin pavimento o como las llamamos de suelo natural, se observó que en un mismo camino, aparentemente compuesto de los mismos materiales y bajo las mismas condiciones climáticas, se presentaban tramos que se comportaban mejor.

Obtenidas muestras de estos sectores y examinadas, se encontró que los elementos que las formaban correspondían a una combinación que daba, para el conjunto, una máxima densidad. Pero además se comprobó que las partículas finas, especialmente de arcilla, que juegan el papel de ligar la masa, debían llenar ciertas condiciones de calidad. De aquí surgió el capítulo de ingeniería de caminos que enunciamos en seguida.

La "ingeniería del suelo" puede definirse como aquella rama de la ciencia del ingeniero, que estudia el suelo y su comportamiento, considerándolo como un material estructural.

Suelo y subsuelo.

En el lenguaje corriente *suelo* es, simple y llanamente, la superficie continua de la corteza terrestre. *Subsuelo*, todo lo que se proyecta bajo esta superficie.

Para los agricultores, la tierra arable se compone de dos capas superpuestas: la superior, llamada *suelo activo*; y la inferior *suelo virgen* o *suelo inerte*.

Los ingenieros de caminos, con el término de *suelo* se refieren a la definición geológica. Según ésta, *suelo* es, en general, la capa

de material suelto, o mueble, que cubre un piso de roca sólida, siendo resultado de un proceso doble de desintegración y descomposición.

El suelo es, pues, el producto, sobre las rocas, de la acción química del aire, de las lluvias, plantas y bacterias, así como de la influencia de los cambios de temperatura. Como consecuencia, las rocas cambian de carácter, degeneran y se desmenuzan finalmente en el terreno.

La parte superior del suelo, de granos finos, es apta para la subsistencia de la vegetación. es el suelo activo de los agrónomos, y se caracteriza por la presencia de *humus*, proveniente de la descomposición de materias vegetales. Esta es el *suelo propiamente dicho*.

Una primera clasificación de estos suelos es en *livianos* y *pesados*, según que se puedan arar con facilidad o no. Un ejemplo de los primeros, serían los suelos arenosos; de los segundos, los formados por arcillas compactas y tenaces. Debe observarse que esta clasificación no se refiere ni al color, ni a la densidad.

El *subsuelo* es la capa inmediata inferior. Está menos alterada por los agentes atmosféricos; no contribuye, apreciablemente, al sostenimiento de la vida vegetal y, generalmente, no contiene sustancias orgánicas. Siempre es la roca básica que sirve forzosamente de asiento al terreno mueble que constituye el suelo.

El cuadro de la pág. 245 (A. P. Grisi) muestra el proceso general de descomposición del granito por acción de los agentes atmosféricos; siendo el granito, como es bien sabido, un representante típico de la corteza terrestre.

Clasificación geológica de los suelos.

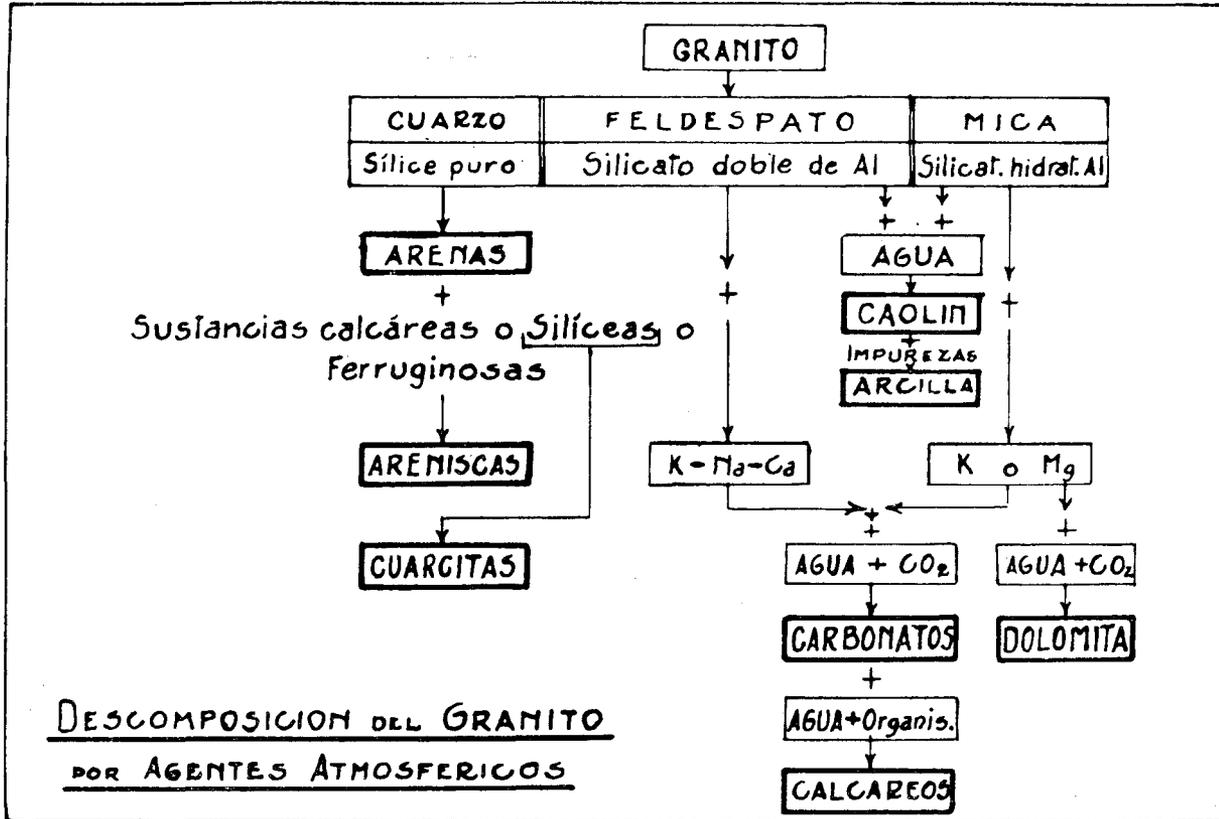
El suelo que permanece exactamente en el mismo lugar donde se ha formado, se llama *sedentario*; y aquel, que ha sido trasladado, por erosión, *transportado*.

Estos suelos se subdividen en la forma que indicamos a continuación; pero como lo que más nos interesa es la nomenclatura, es suficiente con que demos algunos ejemplos típicos.

Suelos sedentarios:

Residual.

Cumuloso.



Suelos trasportados:

Coluvial.

Aluvial.

Aeolio.

Glacial.

Residual: gravas residuarias, arenas, arcillas, gneiss.

Cumuloso: turba, cieno y, parcialmente, suelo de los pantanos.

Coluvial: masa o fragmentos de rocas desprendidos, acumulados en la base de una costa acantilada o en la pendiente de una prominencia. Material de derrumbe.

Aluvial: depósitos de grava y arena que una corriente de agua hace pasar de una quebrada secundaria a una principal. Depósitos en los bajos fluviales. Depósitos producidos por pantanos.

Aeolio: material trasportado por el viento. Dunas. En parte, loess.

Glacial: material de morenas, detritus glaciales acumulados. Depósitos bajos de ventisqueros.

Nomenclatura complementaria.

A la ya dada debemos agregar la siguiente.

Taperal, significa una de las tres condiciones que indicamos en seguida:

a) un subsuelo muy denso, tal como arcilla compacta;

b) una capa cementada en el suelo, donde aguas superficiales han precipitado una masa aglutinante de sílice, carbonatos, óxidos de hierro, etc.; y

c) acarreo glaciares de arcilla.

Humus, es la sustancia carbonosa, producida por la descomposición de organismos.

Cieno, es material generalmente negro, finamente granulado, que se encuentra en los pantanos y consistente en limos finos mezclados con materias carbonosas provenientes de vegetales descompuestos.

Légamo, mezcla terrosa de arcilla y arena con más o menos materia orgánica.

Limo, partículas minerales depositadas naturalmente, que pueden carecer de características coloidales, entre ellas la plasticidad de arcilla, etc.; pero que son muy finas para clasificarse como arena.

El limo debe pasar malla 200. Contiene usualmente mucha arcilla y generalmente no necesita ser distinguida de ésta. El limo se encuentra en depósitos en los bajos de los ríos tranquilos y caudalosos y en sus deltas, de donde ha sido lavada y arrastrada la arcilla; pero el limo soporta mejor que la arcilla la acción atmosférica.

Grava y arena.

No existe fundamento científico para establecer una línea de separación entre la grava y la arena, o entre la arena y el limo.

La grava consiste en cantos más o menos redondeados, provenientes de fragmentos de rocas.

La sustancia mineral más común en las gravas es el cuarzo; pero las hay de granito, gneiss, cuarcita, calcedonia, arenisca, pizarra, esquistos pizarrosos, etc. De la misma manera, hay arenas cuyos granos pueden estar constituidos en parte por yeso, conchas, calcitas, magnetita, granate y otros minerales densos y pesados, y fragmentos de roca que son también de composición mineral compleja.

La línea divisoria entre la grava y arena, de que hablábamos al principio, pues, no puede trazarse sino sobre la base del tamaño de los granos, o como se dice, sobre base granulométrica.

Circunstancia importante que anotar es la de que, en general, los granos de arena gruesa, en la clasificación que damos más adelante, son más o menos redondeados, y que la arena fina, presenta granos más angulosos.

Arcilla.

No es mineral sino, usualmente, lodo plástico, finamente graduado; también, una mezcla de numerosos y diferentes minerales en diversos estados de descomposición.

La arcilla básica es la arcilla pura o *caolin*, que es el mineral que da plasticidad a la mezcla; pero las arcillas puras son muy raras. Las impurezas más comunes son arena, carbonato de cal, de magnesita, dolomita, siderita, limonita; se presentan también en proporciones variables feldespato, laminillas de mica, hornoblendas, pirita, yeso, marcasita y los productos de descomposición de estas sustancias.

En el campo, la plasticidad puede ser apreciada moldeando arcilla entre los dedos; el ingeniero adquiere así una experiencia personal muy valiosa para formar su concepto caminero. La presencia de la arena gruesa puede ser determinada pulverizando la arcilla con los dedos; y la arena muy fina, tomando una pequeña porción en la lengua, sintiéndose entonces la asperosidad de los granos finos.

Si una arcilla contiene carbonato de cal, cualquier ácido vertido sobre ella causa efervescencia.

El color rojo, gris o verde de una arcilla se debe probablemente al hierro; pero el gris y el negro pueden estar ocasionados por carbón. Los sulfitos acusan su presencia por un color de latón cuando la arcilla es pulverizada y estudiada con lente de bolsillo; cuando la arcilla es refregada, vigorosamente, entre dos piezas de acero se percibe el olor del azufre.

Solución coloidal.

Soluciones cristalinas o moleculares, son las que tienen en suspensión partículas de dimensiones menores que un milésimo de micrón (un micrón, como se sabe, es la milésima parte de un milímetro). Estas partículas no pueden ser analizadas microscópicamente; pasan el papel de filtro y presentan los fenómenos de *difusión y diálisis*.

Difusión, es la mezcla rápida de dos líquidos. Diálisis, es la difusión a través de una membrana.

Soluciones coloidales, son las que llevan en suspensión partículas comprendidas entre un milésimo y un décimo de micrón. No pueden ser analizadas por el microscopio; pero son visibles al ultramicroscopio. No pasan el papel de filtro y no presentan los fenómenos de difusión y diálisis.

Los coloides están dotados, además, del movimiento llamado Browniano, que, entre otras teorías, se puede explicar como el estado de movilidad, visible al ultra-microscopio, debido a que cada partícula posee una carga eléctrica que le proporciona repulsión con otras cargadas de la misma electricidad.

Se acostumbra distinguir *solución coloidal* de *emulsión coloidal*. La solución, está formada por partículas sólidas "suspendidas" en

un líquido; mientras que la emulsión, está constituida por "partículas líquidas" suspendidas en otro líquido.

Soluciones gruesas o *mecánicas* son las que llevan partículas mayores de un décimo de micrón. Son visibles al microscopio y no pasan el papel de filtro.

Clasificación granulométrica.

La más aceptada es la siguiente:

Grava, partículas retenidas por la malla N° 10 (2 mm de abertura).

Arena gruesa, partículas que pasan la malla N° 10 y son retenidas por la malla N° 40 (0.42 mm de abertura).

Arena fina, partículas que pasan la malla N° 40 y son retenidas por la malla N° 270 (0.05 mm de abertura).

Limo, partículas entre 0.05 y 0.005 mm de diámetro.

Arcilla, partículas más finas que 0.005 mm de diámetro.

Coloides, partículas más finas que 0.001 mm de diámetro.

El agua en los suelos.

Puede estar en tres condiciones:

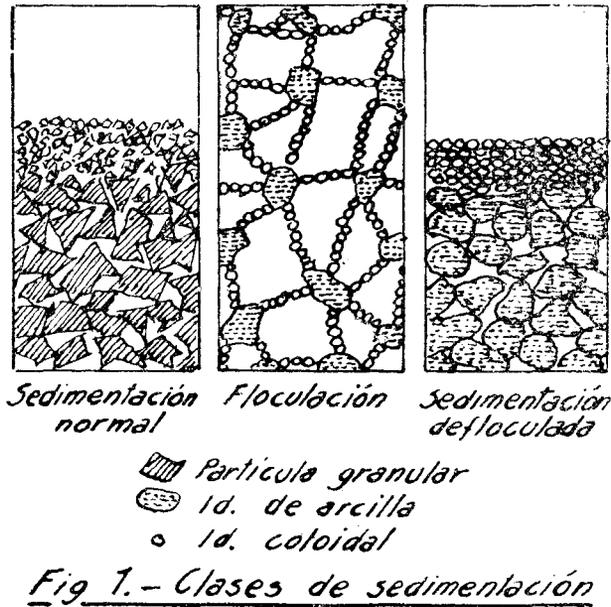
1° *agua libre*, llamada también agua gravitacional, porque tiende a bajar constantemente de nivel; se encuentra en los poros de los suelos cuya dimensión no alcanza a la de los tubos capilares. Como tiende a descender, es el agua que se recoge en los drenajes de los caminos. En estas condiciones, tiene el mismo punto de congelación, ebullición, tensión superficial y viscosidad que el agua común.

En los poros de la arena, el agua está bajo estas condiciones, se escurre fácilmente y el suelo se clasifica por tal motivo, como suelo muy permeable.

2° *agua capilar*, que se encuentra en los poros de los suelos, cuya dimensión es del orden de los tubos capilares. Aparentemente no obedece a la acción de la gravedad; en lugar de bajar de nivel, tiende a subir hasta una determinada altura. Se congela cuando la temperatura llega a -4° C.

El agua contenida en los suelos de limo, arcilla, etc., se halla en estas condiciones, y de aquí que se denominen suelos capilares a los mismos.

3º *agua absorbida*, que se encuentra adherida y rodeando a las partículas de los suelos con una película de espesor variable. La zona exterior de estas películas tiene características similares a la del agua libre; pero la zona interior, es decir, la película que está junto a la superficie de las partículas tiene características especiales; su punto de congelamiento es de 78° C, por la gran presión a que se halla; el punto de ebullición es mucho más elevado que el del agua libre así también como la tensión superficial y la viscosidad. Generalmente el espesor de la película interior es del orden del cen-



tésimo de micrón, se observa generalmente en las partículas coloidales y se denomina *agua sólida*. La gran resistencia que ofrecen los terrones de arcilla, por ejemplo, a ser desmenuzados, se atribuye a la tensión que proporciona esta agua.

Sedimentación. — Floculación.

El proceso de sedimentación en los suelos se puede presentar bajo tres aspectos.

a) en *forma normal*, es decir, cuando las capas están sedimentadas de acuerdo con el tamaño de las partículas, y por consiguiente, en relación con su peso; en la zona inferior las de mayor tamaño, arenas, después el limo y, finalmente, las arcillas y coloides.

b) *floculación*, cuando las partículas coloidales se reúnen en forma de copos, y abrazando a las partículas de dimensión mayor se precipitan al fondo. La floculación se realiza cuando se presentan proporciones acentuadas de coloides y bajo ciertas condiciones electrolíticas.

c) *sedimentación defloculada*, en la cual se ha roto la estructura cavernosa de la floculación y se ha producido una sedimentación similar a la normal; pero con mayores vacíos.

Los dibujos de la fig. 1 (Hogentogler) representan gráficamente estas tres clases de sedimentación.

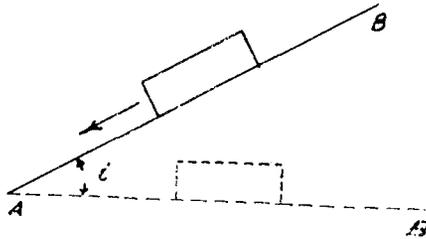


Fig 2

Fricción y cohesión en los suelos.

Supongamos un cuerpo sobre un plano horizontal AB, si no actúa una fuerza exterior el cuerpo permanece en reposo.

Haciendo girar el plano AB, alrededor del punto A, llega un momento en que el cuerpo se pone en movimiento. En esta posición, la tangente del ángulo i corresponde al *coeficiente de fricción* o *rozamiento* entre la superficie de apoyo del cuerpo y el plano AB. Si el cuerpo es de forma esférica, la tangente de i , que

produce la rodadura, se denomina *coeficiente de rodadura* y es para un mismo material, mucho menor que el coeficiente de rozamiento.

Las principales leyes que rigen la fricción y que estudia la *Mecánica Racional* son: en que es proporcional a la presión de las superficies en contacto, y que varía con la naturaleza de estas superficies y su estado (lubricación).

La *cohesión* de un conjunto de partículas es la resultante de las fuerzas que tienden a mantenerlas en contacto, y es independiente de la presión externa que actúa sobre el conjunto. Estas fuerzas pueden estar constituidas por la atracción molecular de las partículas llamada *cohesión superficial* o *verdadera*; o provocadas por la existencia de una película superficial de agua u otro material más viscoso y entonces se denomina *cohesión lubricante* o *capilar*.

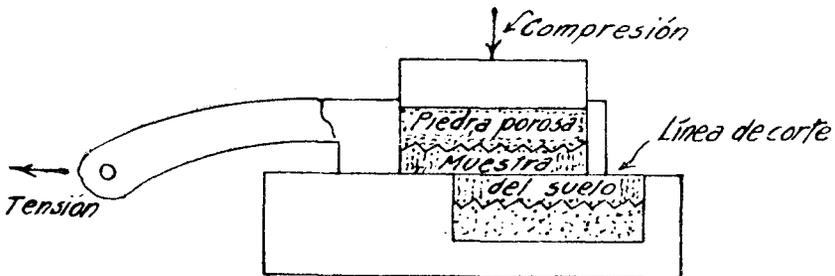


Fig 3.- Dispositivo para determinar la fricción y cohesión

Cuando las partículas son sueltas, como en la arena y el limo por ejemplo, la cohesión verdadera es nula y la capilar es tan infima que un pequeño exceso de agua es suficiente para anularla.

En el caso de que las partículas tengan cohesión verdadera, como por ejemplo las arcillas, entonces ésta se suma a la capilar o lubricante, cuando se le agrega pequeña cantidad de agua.

Por medio del aparato de laboratorio, cuyo esquema damos en seguida, se han determinado experimentalmente la fricción y la cohesión de los materiales que forman los suelos.

Suelos compresibles y elásticos.

Se acostumbra clasificar los suelos en inestables, compresibles y elásticos, en función de su comportamiento cuando sufren la acción de una carga externa.

Suelos *inestables* son aquellos en los cuales, aplicada la carga, se produce un movimiento de descenso acompañado de desplazamientos laterales.

Compresibles, cuando el movimiento de descenso se produce sin desplazamiento lateral ostensible; la contracción se hace a expensas de pérdida de aire o agua contenida en los poros del suelo.

Elásticos, son los suelos en los cuales una vez desaparecida la carga externa, tienden a recuperar su volumen primitivo.

Aplicaciones.

Para concluir el bosquejo que hemos desarrollado vamos a dar, esquemáticamente, algunas aplicaciones a la ingeniería del suelo de los principios y teorías establecidas.

Características de los materiales típicos.—Una de estas aplicaciones es la exposición de las cualidades de los materiales básicos de la clasificación granulométrica, que hemos dado.

Grava, desarrolla alta fricción interna; es de cohesión y capilaridad nula; muy permeable; no es compresible, ni elástica y por consiguiente no es expansiva.

Arena gruesa, posee fricción interna; de cohesión nula; muy permeable; no es compresible ni elástica y por lo tanto no es expansiva.

Arena fina, tiene fricción interna; es de cohesión nula y de capilaridad pequeña; como los materiales anteriores, no es compresible ni elástica y en consecuencia no es expansiva.

Limo, tiene poca fricción interna. En los suelos bien graduados rellena los vacíos de la arena, actuando como material de apoyo y en cierto modo comunica fricción al conjunto haciéndolo más estable. Tiene poca cohesión y gran capilaridad; es compresivo y expansivo; queda compacto cuando está seco y se expande cuando el agua capilar vence a la cohesión.

Arcilla, no presenta fricción interna, pero tiene alta cohesión; posee capilaridad muy acentuada y es muy expansiva.

Coloides, tienen alto poder de retención de agua cuando están floculados; son muy compresibles y en consecuencia expansivos; tienen alta cohesión cuando no están floculados; no presentan fricción interna.

Caracterización de un suelo.—Las teorías y compilación de datos experimentales, revisados, tienen entre otros objetos, establecer las normas de los estudios e investigaciones de campo y gabinete a fin de clasificar el suelo, en el que está actuando el ingeniero, en la categoría correspondiente en que se han agrupado las diversas clases de suelos y que sirven de tipo para la técnica respectiva de construcción y conservación.

En otros términos, los suelos que se pueden presentar, se han agrupado en tipos a cada uno de los cuales corresponden determinados procedimientos de construcción y conservación. De tal manera, que si un ingeniero a cargo de la construcción de un camino, por ejemplo, sabe a qué tipo teórico puede asimilarse el tramo de camino en el que está actuando, puede orientarse sobre los mejores procedimientos de construcción.

En la actualidad, y mientras no hayan estudios nacionales, se acepta en muchos países la clasificación del Bureau of Public Roads de Estados Unidos, de 1930, la cual establece dos conjuntos, llamados A y B.

En el conjunto A están comprendidos los suelos de composición homogénea; en el B, los de composición heterogénea.

El conjunto A se subdivide en 8 grupos llamados A_1 hasta A_8 ; el conjunto B, en tres grupos, B_1 a B_3 .

Según la dimensión de las partículas predominantes los suelos A_1 , A_2 y A_3 son arenosos; los A_4 y A_5 , limosos; y los A_6 , A_7 y A_8 , arcillosos.

Realizado el ensayo granulométrico de un suelo, para catalogarlo se han construido diagramas similares al de la Fig. 4 (Hogentogler) que corresponde a la clasificación de suelos constituidos por arena, arcilla y limo.

Damos ahora las características principales de los grupos de suelos.

Conjunto A. — Suelos arenosos. — Grupo A_1 .—El material básico está bien graduado, tiene partículas gruesas y finas; el aglu-

tinante, arcilla, es de buena calidad. Bajo la acción de las cargas es muy estable, aunque las condiciones de humedad del suelo sean malas.

Grupo A₂.—Material básico formado por partículas gruesas y finas, pero con mala graduación. Arcilla no buena, acompañada de materias orgánicas, coloides floculados y otros materiales que comunican a los suelos propiedades elásticas. Cuando este suelo

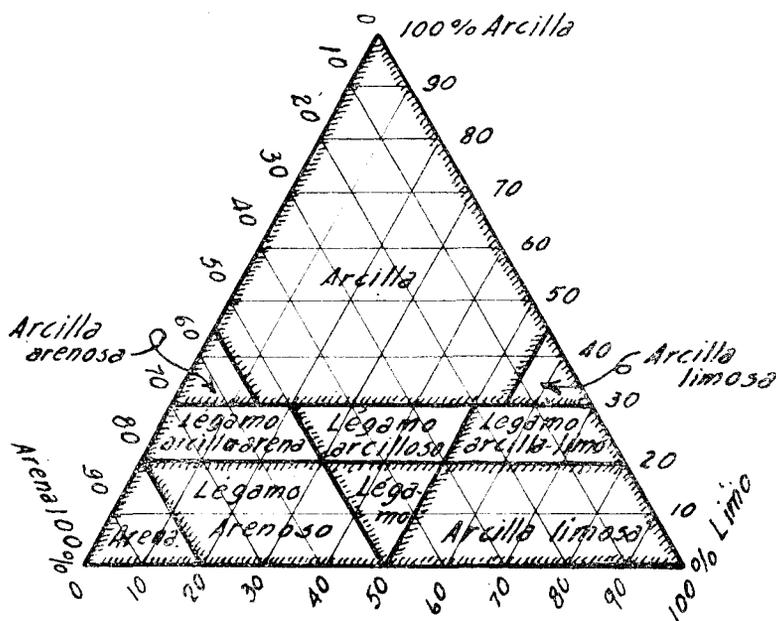


Fig 4. - Diagrama para clasificación granulométrica

está ligeramente húmedo es muy estable. Se torna muy polvoriento después de una sequia prolongada. Además, es capaz de absorber gran cantidad de humedad por capilaridad.

Grupo A₃.—Formados por arena suelta. No tienen aglutinante. Cuando adquieren pequeños porcentajes de humedad se vuelven estables, pero cuando ésta se incrementa la inestabilidad es bien pronunciada. Son suelos muy permeables y no son capilares. No se

expanden ni se contraen en proporciones perjudiciales y las temperaturas bajas no los afectan.

Suelos limosos. — Grupo A₄.—Conjunto de suelos con presencia de limo en cantidad predominante y sin material grueso. Son suelos capilares y tienen una tendencia muy marcada para absorber agua y retenerla en cantidad suficiente como para perder su estabilidad. En estado seco y húmedo presentan una superficie firme y las ruedas de los vehículos dejan muy poca huella. Por ser suelos capilares son afectados en forma perjudicial por las temperaturas bajas. Estos suelos son expansivos, aumentan de volumen produciendo rajaduras en las pavimentos.

Grupo A₅.—Similar al anterior, pero con arcilla, materias orgánicas, coloides, etc., que comunican a los suelos propiedades elásticas. Bajo la acción de las cargas, estos suelos se comprimen y recobran su volumen primitivo tan pronto dejan de actuar las cargas. Son muy elásticos, por consiguiente son inapropiados para la construcción de macadams.

Suelos arcillosos. — Grupo A₆.—Suelos con arcilla en cantidad predominante. En estado plástico, cuando son removidos, absorben gran cantidad de agua. Fácilmente llegan al estado líquido introduciéndose en los vacíos de los macadams. Sus deformaciones por acción de las cargas son lentas y los vehículos no dejan mucha huella. Cambian muy fácilmente de volumen al variar su contenido en humedad produciendo rajaduras en los pavimentos.

Grupo A₇.—Suelos con arcilla en cantidad predominante, pero en su composición entran elementos orgánicos, mica, coloides, etc., que le comunican propiedades elásticas. Las ruedas de los vehículos producen mucha huella. Las variaciones de humedad originan cambios de volumen más pronunciados que en el grupo A₆. Son suelos que originan rajaduras en los concretos de cemento, antes y después del fraguado.

Suelos inestables. — Grupo A₈.—Formados por turbas muy blandas o con tierras con cantidades predominantes de materias orgánicas, cienos, etc. Son incapaces de dar un buen soporte a los pavimentos, sin someterlos previamente a un mejoramiento.

Conjunto B. — Grupo B₁.—Grupo de suelos naturales, pero de composición no uniforme, y cuyas características, por consiguiente, cambian rápidamente en pequeños trechos.

Grupo B₂.—Suelos artificiales, como terraplenes, por ejemplo, cuya composición no es uniforme.

Grupo B₃.—Grupo de suelos formados por mezcla de los grupos B₁ y B₂, es decir, suelos naturales y artificiales, por ejemplo rellenos de materiales heterogéneos seguidos de terrenos naturales también de composición no uniforme.

Alberto REGAL.

APENDICE

TRADUCCION DE LA NOMENCLATURA INGLESA, USUAL, DE LA BIBLIOGRAFIA

Chert	Calcedonia
Clay	Arcilla
Drift	Acarreo glacial
Drumlin	Detritus glaciales, amontonados
Esker	Depósito bajo de un ventisquero
Flood plain	Bajo fluvial
Garnet	Granate
Gravel	Grava
Gypsum	Yeso
Hardpan	Taperal
Kaolinite	Caolin
Limestone	Calcita
Loam	Légamo
Muck	Cieno
Mud	Lodo, fango
Peat	Turba
Sand	Arena
Sandstone	Arenisca
Shale	Esquisto pizarroso
Silt	Limo
Slate	Pizarra
Soil	Suelo

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Blanchard, Arthur H.*—American Highway Engineer's Handbook. — New York, 1919.
- Dueñas, Enrique I.*—Qué es el suelo y qué es el sub-suelo. — En IMSI, Vol. XXIII. — Lima, 1921.
- Muñoz Lumbier, Manuel.*—Glosario de voces y frases inglesas usadas en Geología y Geografía Física. — México, 1924.

- Marchesi, José María.*—La nomenclatura de la ciencia del suelo. — En el Bol de la Soc. Geográf. — Madrid, Feb. 1936.
- Grisi, Adolfo P.*—Justificación y organización de los laboratorios de suelos. — La Plata, 1937.
- C. A. Hogentogler.*—Engineering properties of soil. — New York, 1937.

NOTA ADICIONAL

En prensa este artículo nos han llegado las conclusiones del Congreso Pan-Americano de Carreteras, reunido en Santiago de Chile, en Enero del presente año, y que con referencia al Tema: "Estudio de los suelos" son las siguientes:

"El tercer Congreso Panamericano de Carreteras indica la necesidad de estudiar la mecánica de los suelos como uno de los requisitos para el trazo correcto de carreteras y recomienda a los varios países, miembros, de la adopción de los siguientes principios":

"a) La adopción de los métodos de análisis y clasificación de los suelos en uso por el Bureau of Public Roads de los Estados Unidos de América".

"b) El estudio de la mecánica de los suelos y el hacer los ensayos correspondientes de campo y laboratorio, y el intercambio de comunicaciones referentes al asunto entre los diversos países".

"c) El estudio de los suelos simultáneo con el estudio de las otras características necesarias para el trazo correcto de carreteras, y la incorporación de sanos principios de mecánica de los suelos en el trazo y construcción de caminos".