

Elementos de Edafología y Edafotecnia

(Continuación)

E) Caracterización de los suelos.—Cap. II Medidas edafológicas: a) Generalidades.—b) Peso aparente.—c) Peso específico.—d) Relación de vacíos.—e) Porosidad.—f) Granulometría.—g) Humedad higroscópica actual.—h) Humedad higroscópica máxima.—i) Humedad pelicular.—j) Agua capilar.—k) Equivalente de humedad.—l) Equivalente de humedad por centrifugación.—m) Límite líquido.—n) Límite plástico.—o) Índice de plasticidad.—p) Coeficiente de plasticidad.—q) Límite de contracción.—r) Razón de contracción.—s) Contracción volumétrica.—t) Contracción lineal.—u) Determinación del pH.—v) Mojado preferencial.—w) Floculación.—x) Compactación.—y) Asentamiento.—z) Desintegración bajo agua.

E.—CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS.

a) *Propiedades*

El material térreo que compone los suelos, es una mezcla de los elementos cuyas propiedades fundamentales se terminan de estudiar.

Las características de cada suelo dependen de las propiedades de los elementos componentes, y de la porcentualidad de la mezcla.

Se acostumbra a caracterizar los suelos atendiendo a las siguientes propiedades: Color, textura, estructura, consistencia, compactación, cementación y carácter químico.

b) *Color*

El color de los suelos puede ser: Negro, pardo oscuro, pardo rojizo, pardo grisáceo, gris parduzco, etc. En general, colores grises pardos.

La coloración de un suelo resulta de la mezcla de cuatro colores típicos de sus elementos: negro, blanco, rojo y amarillo.

El color negro, que es corriente en el primer manto de un perfil, proviene del humus. El negro es tanto más intenso cuanto mayor es la alcalinidad del suelo.

También puede deberse el color negro a la presencia de minerales, tales como el grafito, la magnetita o el bióxido de manganeso.

Con el color blanco contribuyen en los suelos: Las calizas, yeso, eflorescencias salinas y arenas cuarzosas de suelos muy lavados.

Los colores rojo y amarillo son característicos del óxido de Fe y de otros minerales cristalinos. El amarillo puede también deberse al azufre (S), derivado de la destrucción química del yeso (CaSO_4).

Otra característica importante de los suelos relativa a su color, es su repartición dentro de la masa terrosa. Desde este punto de vista, un suelo puede ser:

1.º *Uniforme*, cuando el color se mantiene sensiblemente invariable en todo el suelo.

2.º *Veteado*, cuando en el suelo de un color, hay manchas de otro color.

3.º *Marmóreo*, cuando hay dos o más colores entremezclados.

4.º *Manchado*, cuando los colores se distribuyen en forma de manchas.

5.º *Punteado*, cuando los colores se distribuyen en forma de puntos.

6.º *Listado*, cuando las tierras coloreadas forman listones.

7.º *Jaspeado*, cuando los colores se distribuyen como en el jaspe.

En edafotecnia, el color es un antecedente de cierta importancia, porque es un índice de determinadas propiedades del material térreo.

Colores claros indican suelos muy lavados, que contienen calizas, o con exceso de arena.

Tintes oscuros pudieran delatar el humus; los ocres, acumulación de coloides; los rojizos, óxido de fierro.

Los colores veteados pueden ser un índice de malas condiciones de drenaje.

c) *Textura*

Se puede hablar de «*textura elemental*» y de «*textura real*» de un suelo.

La *textura elemental* expresa el tamaño y la porcentualidad de las partículas térreas: Lo que hemos llamado granulometría. La *textura real* agrega a esto, la consideración de la forma como se agrupan las partículas.

La clasificación de los suelos por *textura*—*elemental* o *real*—ha sido objeto de múltiples críticas. Ahora tengo el agrado de presentar una nueva clasificación y nomenclatura que, a juicio del autor, serán de utilidad.

Desde el punto de vista de su *textura elemental*, cada suelo va a quedar representado por una fórmula porcentual de tres elementos: Mortero, grava fina y grava gruesa.

En estas fórmulas, si la suma de los tres porcentajes es cien, el suelo no tendrá piedras. Si es menor de cien, lo que falta será el material pedregoso.

Mediante esta notación, todo suelo va a poder ser representado como un punto dentro de un triángulo de Feret, cuyas coordenadas sean: Porcentaje de grava gruesa, porcentaje de grava fina y porcentaje de mortero. (Si hay piedras, habrá que reducir los valores porcentuales, aceptando que ellas han sido retiradas).

La fórmula no está completa aún: Es preciso agregar la naturaleza del mortero. Ella será expresada mediante una palabra o frase corta, y abreviada con letras.

Las abreviaciones y palabras designarán mezclas de arena, limo y arcilla, cuya composición sólo podrá variar dentro de límites especificados.

El cuadro que sigue, y el gráfico adjunto, definen la clasificación y nomenclatura de los morteros de suelo. Los gráficos han sido confeccionados a base del triángulo de Feret, con coordenadas porcentuales de arena, limo y arcilla. Cada tipo de mortero definido en los gráficos, tiene propiedades específicamente distintas de los otros. Ellas serán estudiadas más adelante.

GRUPOS DE MORTEROS	NOTACIÓN	ARENA		LIMO		ARCILLA	
		Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Morteros arcillosos (Arcilla 30% a 100% Arena 0% a 70% Limo 0% a 70%)	A Arcilloso	0	50	0	50	50	100
	AB Arcillo-limoso	0	20	50	70	30	50
	AC Arcillo-arenoso	50	70	0	20	30	50
	AM Arcilloso-medio	0	50	0	50	30	50
Morteros limosos (Limo 50% a 100% Arena 0% a 50% Arcilla 0% a 30%)	B Limoso	0	20	80	100	0	20
	BM Limoso-medio	0	50	50	80	0	20
	BA Limo-arcilloso	0	30	50	80	20	30
Morteros arenosos (Arena 50% a 100% Limo 0% a 50% Arcilla 0% a 30%)	C Arenoso	80	100	0	20	0	20
	CM Arenoso-medio	50	80	0	50	0	20
	CA Areno-arcilloso	50	80	0	30	20	30
	Z ÓPTIMO	70	85	10	20	5	10
Morteros de textura media (Arena 20% a 50% Limo 20% a 50% Arcilla 0% a 30%)	M Medio	30	50	30	50	0	20
	MA Medio-arcilloso	20	50	20	50	20	30

Haciendo uso de la nomenclatura propuesta para los morteros; y aceptando para representar a las gravas finas la letra g, y a las gruesas la letra G. la fórmula edafológica:

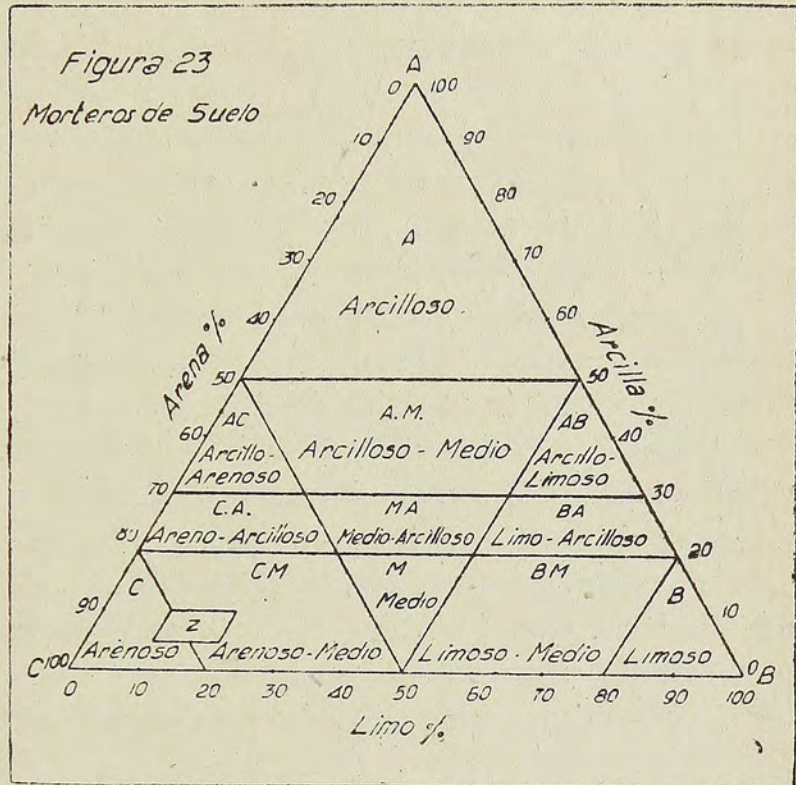
$$Z_{33} \ g_{40} \ G_{27}$$

simbolizaría un suelo sin piedras (porque los subíndices suman cien) compuesto de 33% de mortero óptimo, 40% de grava fina y 27% de grava gruesa.

$$BA_{22} \ g_{60} \ G_{10}$$

contendría 8% de piedras, 10% de grava gruesa, 60% de grava fina, y 22% de mortero limo-arcilloso.

La textura elemental no es suficiente para individualizar un suelo; por lo cual puede afirmarse que las fórmulas expuestas no son completas. Falta el factor «forma de conglomeración del sistema térreo», que puede expresarse señalando los valores



de dos constantes hídricas: El índice de plasticidad (I) y el límite líquido (L).

Estas dos constantes se determinan, no sobre el mortero de suelo, sino sobre lo que hemos llamado suelo fino (S), que, como sabemos, es lo que pasa por el tamiz de cuarenta mallas.

Para simbolizar la textura real de un suelo será preciso, pues, agregar tres datos a la fórmula edafológica de la textura elemental, que hemos expuesto. Ellos son:

Porcentaje de suelo fino.....	S
Índice de plasticidad.....	I
Límite líquido.....	L

En estas condiciones, la fórmula:

$$M_{30} \ g_{45} \ G_{25} \ -S_{20} \ I_{12} \ L_{34}$$

representa un suelo sin piedras, con 30% de mortero medio, 45% de grava fina y 25% de grava gruesa. El suelo fino—que es el 20% del total—tiene límite líquido 34, e índice de plásticidad 12.

Las características generales de los morteros clasificados según su textura son las que siguen.

Mortero arenoso.—Material granulado suelto. Los granos son visibles y se notan al tacto. Al estado seco no es posible obtener un bloque por simple manipuleo. Ello es posible al estado húmedo; pero el bloque se rompe con facilidad.

Mortero limoso.—Textura muy fina. Al estado seco, el polvo da al tacto la sensación de palpar harina. Cohesión insignificante; ello se manifiesta, porque los terrones pueden deshacerse fácilmente con la presión de los dedos. Al estado húmedo son fangosos, En ellos es posible manipular bloques que no se rompen, tanto secos como húmedos. No son plásticos.

Mortero arcilloso.—Suelos de textura finísima, cuyas propiedades dependen del estado de la arcilla, definido por su pH; o mejor, por la naturaleza y cantidad de los iones adsorbidos. Los morteros arcillosos que contienen arcilla floculada, tienen propiedades parecidas a los morteros limosos. Los que contienen arcilla no floculada, forman al secarse terrones muy duros. Son muy plásticos. Con ellos, al estado húmedo, es posible confeccionar por amasado, cintas largas y flexibles.

Mortero medio.—Poco áspero al tacto. Tiene cierta plasticidad. Al estado seco puede manipularse un bloque sin peligro de rotura, siempre que se proceda en forma cuidadosa. Al estado húmedo no se precisan precauciones.

Morteros: Arcillo-arenoso, Arcilloso-medio y Arcillo-limoso.—Estos morteros tienen propiedades comparables a las del arcilloso. También sus propiedades son funciones del estado de la arcilla, definido por su pH.

Morteros: Areno-arcilloso, Limo-arcilloso y Medio-arcilloso.—Al estado húmedo son plásticos. Con los dedos pueden manipularse cintas bastante delgadas, pero poco resistentes, pues no soportan el peso propio. Al secarse, forman terrones duros. En general, sus propiedades dependen del estado de la arcilla, definido por su pH.

Mortero Arenoso-medio.—La arena se nota al tacto; pero tienen alguna cohesión debido al limo y a la arcilla que contienen. Los terrones secos se deshacen fácilmente bajo la presión de los dedos. Al estado húmedo es posible la confección de bloques capaces de soportar el manipuleo sin peligro.

Mortero Limoso-medio.—Propiedades intermedias entre las del mortero limoso y las del medio.

Mortero óptimo.—Este mortero, cuya representación gráfica aparece como una incrustación entre los morteros arenoso y limo-arenoso, tiene propiedades intermedias. Sus constantes físicas (ver más adelante el capítulo correspondiente) son: Límite líquido entre 14 y 25. Índice de plasticidad no superior a 8. Límite de contracción, entre 14 y 20. Humedad equivalente de centrífuga, menor que 15.

d) *Estructura.*

La estructura de los suelos expresa la disposición de los aglomerados de partículas, A continuación se copia la nomenclatura que J. Gollan toma de Villa y del Bureau of Public Roads.

1. *Arenosa.*—Agregación nula o mínima.
2. *Migajosa.*—Agregados de varios tamaños—hasta 2 cm.—y forma irregular; textura porosa o cavernosa.
3. *Farinácea.*—Agregados menores de cinco milímetros de forma irregular y consistencia mediana a débil.

4. *Granujienta*.—Agregados de dos a tres milímetros; por lo general, de forma toscamente esférica y consistencia dura.
5. *Granular*.—Agregados hasta de dos centímetros de forma subangular a redondeada y consistencia media. Según la textura, se subdivide en:
 - a) *Granular fina*. Agregados menores de 5 m/m.
 - b) *Granular gruesa*. Agregados entre 5 y 20 m/m.
6. *Globular*.—Agregados de 5 a 40 milímetros, redondeados y más o menos compactos. Consistencia media a fuerte.
7. *Terronulosa*.—Agregados de dos a diez centímetros, de forma irregular y consistencia media a fuerte. Según su textura se subdivide en:
 - a) *Terronulosa fina*. Agregados de 2 a 3 cm.
 - b) *Terronulosa media*. Agregados de 3 a 6 cm.
 - c) *Terronulosa gruesa*. Agregados de 6 a 10 cm.
8. *Terronosa*.—Agregados mayores de 8 cm. De forma irregular, angulosa y consistencia más o menos fuerte. Según su textura se subdivide en:
 - a) *Terronosa fina*. Agregados de 8 a 12 cm.
 - b) *Terronosa media*. Agregados de 12 a 20 cm.
 - c) *Terronosa gruesa*. Agregados mayores de 20 cm.
9. *Tabular*.—Tendencia a la agregación en losas o bancos.
10. *Hojosa*.—Tendencia análoga en capas más finas.
11. *Crustiforme*.—Agregados extendidos sobre todo paralelamente a la superficie; pero de grueso y contornos irregulares.
12. *Columnar*.—Agregados extendidos en sentido vertical, formando columnas más o menos gruesas.
13. *Prismática*.—Agregados que también tienen su mayor dimensión en el sentido vertical, pero generalmente más angostos, y limitados por caras planas. Estos prismas suelen fragmentarse en sentido transversal. A este tipo pertenece el canutillo, característica del horizonte de acumulación de coloides en ciertos suelos arenosos.
14. *Reticulado*.—División en secciones regulares de cinco a seis lados, separadas por rajaduras de espesor capilar. Generalmente es una estructura superficial.
15. *Puposa*.—Agregados en forma de muñequilla (irregulares y de consistencia fuerte), característicos de los horizontes de acumulación caliza, en su parte superior, o en las superficies de exposición.
16. *Vesicular*.—Agregados conteniendo cavidades redondeadas y lisas, como formadas por burbujas gaseosas.
17. *Sin estructura*.—No puede anotarse la distribución de los agregados.
18. *Hardpan*.—El Hardpan es un horizonte de acumulación endurecido por cementación, que no se ablanda por humedecimiento. Es impermeable y limita terminantemente el movimiento de las aguas o de las raíces hacia abajo. (Si la capa es dura y se ablanda con el agua, no se trata de Hardpan).
19. *Arcilla compacta*.—Horizonte duro e impermeable. No está cementado con sustancias insolubles como el Hardpan; y por esto se ablanda bajo la acción del agua.
20. *Glei*.—Horizonte inferior o capa de acumulación de sedimentos abandonados por el agua subterránea en los suelos turbosos con nivel freático próximo.

e) *Consistencia.*

La consistencia expresa el grado de cohesión de los agregados y se aprecia por la resistencia que ofrecen a la deformación o a la rotura. Según su consistencia, los norteamericanos clasifican los suelos en la siguiente forma:

1.º *Quebradizo.*—El suelo se rompe al golpearlo, presentando fracturas netas y limpias.

2.º *Muelle.*—Partículas débilmente ligadas que se las separa con facilidad. Hay porosidad y falta de tendencia a la compacción.

3.º *Plástico.*—Masa que se deforma sin romperse, y se la puede manipular como masilla.

4.º *Blando.*—Material que fácilmente se deforma o rompe con los dedos.

5.º *Viscoso.*—Material que al estado húmedo se adhiere.

6.º *Friable.*—Material desmenuzable en terrones por la acción de los dedos.

7.º *Firme.*—Moderadamente duro y algo resistente a la deformación o rotura.

8.º *Duro.*—Resistente a la deformación o rotura. Imposible de romper con los dedos.

9.º *Tenaz.*—Muy resistente a la rotura. Como la tenacidad al estado seco coincide, generalmente, con la viscosidad al estado húmedo, los términos viscoso y tenaz suelen ser empleados como sinónimos. Debe tenerse presente que el primero de estos términos se refiere a la adhesividad y el otro a la cohesión.

10. *Espeso.*—Resistente a la rotura y deformación. Esta es la consistencia que corresponde a un horizonte firme y tenaz que tiende a impermeabilizarse.

11. *Cerrado.*—Horizonte compacto, impermeable y tenaz, Generalmente plástico.

12. *Correoso.*—Resistente a la rotura, tenaz. Horizonte de fácil perforación que exige mucha fuerza para sacar el barreno.

f) *Compacción.*

Es la condición que resulta del acomodamiento de las partículas y de la disminución de los espacios vacíos. Se la determina por la resistencia que ofrece un suelo a la penetración de un instrumento con punta.

Según su compacción, los suelos pueden clasificarse como sigue:

1.º *Impenetrable.*—Resistente a la penetración del agua, aire y raíces.

2.º *Endurecido por cementación.*—(Ver más atrás).

3.º *Flojo.*—Material muy poroso formado por partículas o agregados, sueltos o con cohesión muy débil.

4.º *Caseoso.*—Más o menos elástico; deformable sin romperse; rompible con poco esfuerzo. Típica de ciertos suelos coloidales cuando están muy húmedos.

5.º *Compacto.*—Suelo denso, firme, cohesivo, duro, pero sin cementación. Muy resistente a los esfuerzos tendientes a romper o deformar. Según el grado en que existan estas propiedades, puede hablarse de suelos ligeramente compactos, compactos y muy compactos.

g) *Cementación.*

La cementación mide la ligazón entre las partículas y agregados de partículas por medio de materiales cementantes tales como la arcilla coloidal, hidrato de hierro y de aluminio, carbonato de calcio, etc.

El grado de cementación se aprecia por la resistencia a la desintegración dentro del agua. Según su cementación los suelos pueden clasificarse en:

1.º *Firmemente cementados.*—Material muy duro y resistente a la rotura. Cuando se le rompe, resultan fragmentos muy duros y con fracturas irregulares.

2.º *Endurecido.*—Producto cementado duro que no sufre ablandamiento por humedecimiento. Requiere un gran esfuerzo para romperlo, asemejándose a una roca.

3.º *Débilmente cementado.*—Material que se rompe con facilidad. Puede ser de dos tipos: Con fractura más o menos neta y sin fractura neta.

h) *Carácter químico.*

El carácter químico de un suelo se expresa designando los cuerpos químicos modificables con rapidez que existen dentro de su estructura estable:

1.º *Turba reciente.*—Abundante materia orgánica más o menos alterada en medio anaerobio (Materia orgánica vegetal). Color pardo.

Se reconocen aun las fibras y restos vegetales.

2.º *Turba madura (Muck).*—Alteración más avanzada. Color negro. Pocos residuos vegetales y abundantes materias minerales.

3.º *Mantillo.*—Acumulación de residuos orgánicos más o menos descompuestos. Capa superficial en los bosques.

4.º *Suelo salado.*—Presencia más o menos importante de sales neutras: Na Cl.—Na₂ SO₄.—Na NO₃.

5.º *Suelo salado alcalino.*—Acumulación de carbonato sódico, solo o con otras sales.

6.º *Suelo alcalino no salado.*—No hay sales, pero en el complejo coloidal arcillo-húmico domina la adsorción de cationes alcalinos, principalmente sodio. pH mayor que 7.

7.º *Suelo ácido.*—No hay sales. El complejo coloidal arcillo-húmico no está saturado por bases. Particularmente pobre en calcio adsorbido. Reacción ácida más o menos fuerte. pH menor que 7.

8.º *Suelo calcáreo.*—Presencia más o menos abundante de carbonato de calcio, revelable por la intensidad de efervescencia, cuando se trata el suelo con ácido clorhídrico en solución decinormal.

Capítulo II.—Medidas Edafológicas

A.—GENERALIDADES.

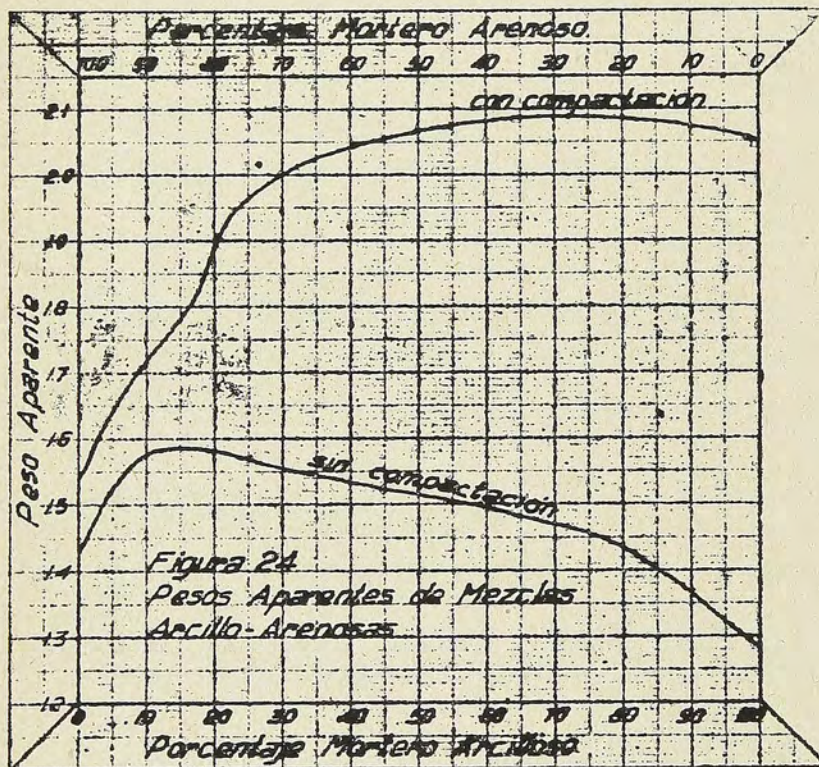
Toda ciencia que se precie de tal, tiene su sistema propio de medidas; nacido, no tanto a causa del interés de sus cultores por formar tienda aparte, como por las necesidades que se hacen sentir durante su desarrollo.

La Edafología tiene un sistema propio de medidas, cuyo origen debe buscarse en lo que en ella hay de original con respecto a otras disciplinas. Lo que en ella hay de origina en esto: Estudio de sistemas granulométricos.

B.—PESO APARENTE.

La composición de los suelos — a base de granos—determina en ellos que el peso de la unidad de volumen no coincida con el peso específico de los materiales constituyentes, sino que sea menor. Esto se debe que los granos siempre dejan entre ellos un determinado porcentaje de vacíos.

El peso aparente, que es el peso de la unidad de volumen de un suelo, varía



con sus condiciones de compactación, con su granulometría, con su estado físico químico y con su humedad. El gráfico que se adjunta (Figura N.º 24) demuestra la influencia de los dos primeros factores. Corresponde a experiencias hechas en la Escuela de Ingeniería con probetas fabricadas con mezclas de arcilla y arena.

La medida del peso aparente cuando el material está suelto, se hace determinando el peso P de la tierra contenida en un recipiente de volumen V:

$$g = P/V$$

Si el suelo está compacto el volumen se determina sumergiendo el bloque en un líquido que no lo moje (Mercurio).

C.—PESO ESPECÍFICO.

El peso específico de un suelo mide el peso de la suma de los volúmenes netos de sus partículas cuando esta suma es uno.

Mas atrás se ha visto que los suelos se componen de partículas de distinta naturaleza, a las cuales corresponden distintos pesos específicos. En un suelo, esta característica es, por lo tanto, un valor medio, que podría obtenerse promediando entre los que corresponden a cada tipo de partículas.

El peso específico de un suelo se mide con el picnómetro, haciendo las siguientes operaciones.

- 1.º Obtener el peso P' del picnómetro vacío
- 2.º Determinar el peso P'' del picnómetro vacío junto con la muestra de tierra (Previamente secada).

3.º Obtener el peso P''' del picnómetro lleno de bencina de peso específico Q .

4.º Sacar parte de la bencina del picnómetro, y sustituirla por la tierra. Extraer las burbujas de aire, volver a llenar con bencina y pesar. Sea P'''' el peso.

El peso de la tierra es: $P'' - P'$

El peso de la bencina es: $P''' - P'$

El peso de la bencina y de la tierra: $P'''' - P'$

El peso de la tierra en exceso sobre el de la bencina desalojada es:

$$(P'''' - P') - (P''' - P') = P'''' - P'''$$

El peso de la bencina que ocupa igual volumen que la tierra es:

$$(P'' - P') - (P'''' - P''')$$

Y el volumen de esa bencina, o sea el de la tierra:

$$\frac{(P'' - P') - (P'''' - P''')}{Q}$$

De donde resulta que el peso específico de la tierra es:

$$G = \frac{P'' - P'}{(P'' - P') - (P'''' - P''')} Q$$

D.—RELACIÓN DE VACÍOS.

Se llama relación de vacíos, E , de un suelo, a la razón entre su volumen de vacíos V' y la suma de los volúmenes de sus partículas, V'' .

$$E = V' / V''$$

La relación de vacíos puede expresarse en función de los pesos aparentes y específicos de los suelos.

En efecto, el volumen de vacíos, V' , es la diferencia entre el volumen total del suelo, V , y el volumen V'' de sus partículas:

$$V' = V - V''$$

De aquí resulta:

$$E = V/V'' - 1$$

Ahora bien, el volumen total, es la razón entre el peso total Q , y el peso aparente g :

$$V = Q/g$$

El volumen total de las partículas es la razón entre el peso total Q y el peso específico G del suelo:

$$V'' = Q/G$$

De aquí resulta:

$$E = G/g - 1$$

E.—POROSIDAD,

Se llama porosidad al porcentaje en volumen de poros de un suelo, con relación a su volumen total.

$$P = \frac{V'}{V' + V''} 100$$

$$P = \frac{\frac{V'}{V''}}{\frac{V'}{V''} + 1} 100$$

Pero

$$E = \frac{V'}{V''}$$

de donde:

$$P = \frac{E}{1 + E} 100$$

En esta expresión puede substituirse E por su valor en función de g y G :

$$E = G/g - 1$$

de donde:

$$P = (1 - g/G) 100$$

F.—GRANULOMETRÍA.

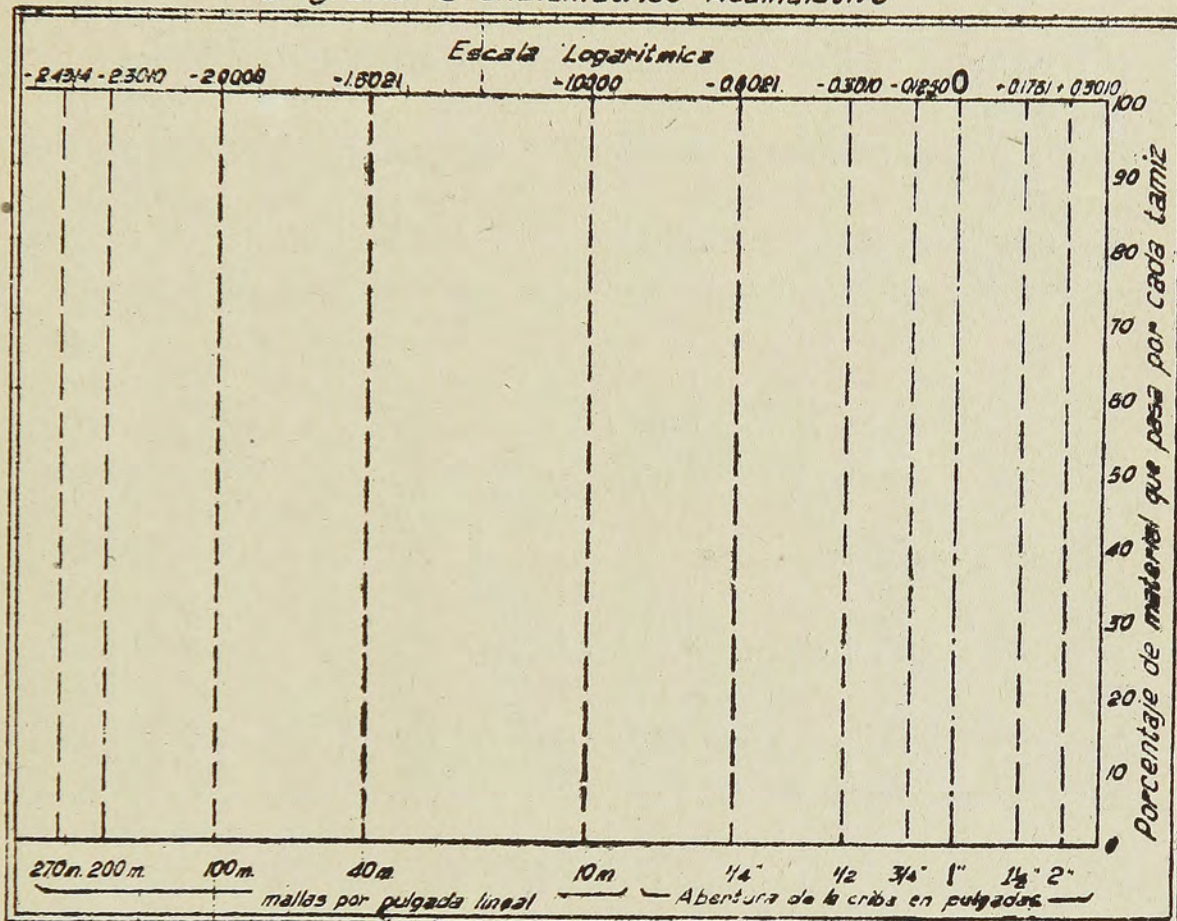
Se entiende por granulometría de un suelo a la función característica de él cuyas variables son:

- a) Diámetro de las partículas (D).
- b) Porcentaje en peso de las partículas existentes en el suelo cuyo diámetro es inferior a D .

Para nuestros fines, no interesa la expresión algebraica de esta función. Nos basta con los cuadros de valores y con su expresión geométrica.

La expresión geométrica de la función granulométrica de un suelo—su curva granulométrica—se dibuja colocando en abcisas los diámetros y en ordenadas los porcentajes

Figura 25
Diagrama Granulométrico Acumulativo



Los diámetros que interesan en Edafología o Edafotecnia, varían de uno hasta 35,000 micrones; y los puntos característicos de la curva están muy próximos al principio y muy separados al final de ella; de modo que ninguna escala lineal sería útil en el eje de abcisas. Una escala logarítmica soluciona satisfactoriamente este problema (Ver Figura N.º 25).

Conocida la granulometría de un suelo, es posible clasificar sus partículas en la forma detallada en página 340 («Anales» de Octubre-Noviembre).

Arcilla coloidal.....	%
Arcilla no coloidal.....	%
Limo.....	%
Arena fina.....	%
Arena gruesa.....	%
Grava fina.....	%
Grava gruesa.....	%
Piedras.....	%

En Edafotecnia suele substituirse el gráfico de la función granulométrica, por el triángulo de Féret, en donde cada suelo queda representado, no por una curva, sino por un punto. Naturalmente, el suelo queda en esta última forma menos especificado que en la primera.

El triángulo de Féret es un triángulo equilátero, cada uno de cuyos lados se gradúa en 100 divisiones, numeradas en el mismo sentido. (Se acostumbra a usar el sentido contrario al de los punteros del reloj, como en otras disciplinas científicas).

Cada lado del triángulo es un eje de un sistema de coordenadas porcentuales; y cada punto dentro de él, representa a una determinada mezcla de tres componentes, cuyos porcentajes se miden en cada uno de los tres ejes coordenados. (Los lados del triángulo).

El sistema de coordenadas se funda en la siguiente propiedad de los triángulos equiláteros:

Sea un triángulo equilátero ABC (Fig. 26), en el cual dibujamos un punto P cualquiera. Por el punto P, tracemos paralelas a los tres lados del triángulo. Sean ellas:

$$P_l // AB$$

$$P_m // BC$$

$$P_n // CA$$

La tesis del teorema es:

$$P_l + P_m + P_n = AB = BC = CA$$

Prolonguemos la paralela P_n hasta cortar el lado AB en r; y la paralela P_l hasta cortar el lado BC en q.

Tenemos:

$$\sphericalangle r P_l = \#$$

$$\sphericalangle \frac{Ar}{P_{rm}} = \sphericalangle \frac{IP}{r m P} = \sphericalangle r P m = 60^\circ$$

Triángulo $r P m$ equilátero

$$\sphericalangle \frac{P_m}{P_{nq}} = \sphericalangle \frac{r m}{P_{qn}} = \sphericalangle n P q = 60^\circ$$

Triángulo $n P q$ equilátero

$$P_n = P_q$$

$$m B q P \#$$

$$P_q = m B$$

$$P_n = m B$$

$$IP + mP + nP = Ar + rm + mB$$

$$IP + mP + nP = AB = BC = CA$$

Por lo tanto, si los tres lados del triángulo se gradúan entre cero y cien, como en el gráfico de Féret, cada punto podría representar una mezcla de tres componentes, cuyos porcentajes se medirían en los trazos paralelos a los lados: P_l, P_m y P_n.

En Edafotecnia se acostumbra definir un suelo, en el triángulo de Féret, por sus componentes: Agregado grueso, Agregado fino y Conglomerante.

Una definición más completa de un suelo, desde el punto de vista granulométrico, podría darse mediante dos triángulos de Féret: en el primero se colocaría el mortero de suelo, con sus coordenadas: arena, limo y arcilla. En el segundo se colocaría el suelo completo—deducidas las piedras—con sus coordenadas, mortero de suelo, grava fina y grava gruesa.

Esta definición gráfica de los suelos se combinaría con el uso de las fórmulas edafológicas de que hablamos más adelante y serviría en cálculo de Estabilización de Suelos.

La granulometría de un suelo se obtiene por tamizado: el suelo se seca previamente, y luego se pasa por el juego de cribas: 2" .— : 1 $\frac{1}{2}$ " .— 1" .— . 3/4" .— .

$\frac{1}{2}$ " .— : 1/4" .—Lo que queda retenido en cada criba se pesa, y se calcula su porcentaje con respecto al total de la muestra. Conocidos los porcentajes retenidos por diferencia se calculan los que pasan.

El material más fino puede obtenerse por dos procedimientos, el que llamaremos «de batalla», y el procedimiento areométrico.

El procedimiento areométrico, que se aplica al material que pasa diez mallas, se funda en el hecho de que si un suelo se dispersa en agua y luego se deja decantar, la velocidad de decantación que corresponde a cada tamaño de partículas, varía según una función que Stokes ha deducido teóricamente, aceptando forma esférica para las partículas.

Conocida esta función, es posible calcular la dimensión máxima de las partículas en suspensión en cada instante. En efecto, sean:

d, Diámetro máximo, en milímetros, de las partículas en suspensión.

n, Coeficiente de viscosidad del líquido.

L, Distancia en centímetros que recorren sedimentándose las partículas de diámetro d, en un tiempo T, expresado en minutos.

G, Peso específico de las partículas.

G', Peso específico del líquido.

$$d = \sqrt{\frac{30 nL}{980 (G - G') T}}$$

El porcentaje de partículas en suspensión en cada instante se obtiene por lectura directa en el areómetro, el cual se calibra con un suelo de determinado peso específico, y a una temperatura definida. Al operar con otros suelos y temperaturas, es preciso introducir factores correctivos.

Las casas que fabrican estos instrumentos, los entregan en la actualidad con abacos en los cuales se consultan todos los factores correctivos, y que entregan de inmediato la granulometría del suelo estudiado.

En Edafotecnia no es necesario recurrir al areómetro para obtener la granulometría de un suelo: basta con hacer uso del procedimiento de batalla, de más fácil aplicación:

El material se pasa por los cribas de 2" hasta 1/4", y luego por el tamiz N.º 10.

El mortero de suelo se clasifica en seguida por decantación de la arena y del limo en un recipiente que contiene agua amoniacal: que se vacía y llena periódicamente—cada 8 minutos—dejando el concho que se ha producido en el período de reposo. En esta forma, la arcilla—que a los ocho minutos de reposo—todavía está en suspensión, se separa del material más grueso. Finalmente, la arena y el limo se clasifican por tamizado.

G.—HUMEDAD HIGROSCÓPICA ACTUAL.

Se obtiene pesando el suelo que ha estado expuesto al aire y secándolo luego en el horno de 103-105° hasta peso constante. La diferencia de pesos, dividida por el peso del suelo seco, da en tanto por uno la humedad higroscópica actual.

La medida de la humedad higroscópica actual es necesaria cuando se quieren abreviar ciertos ensayos que exigen el conocimiento del peso seco: se trabaja entonces con la muestra secada al aire (con su humedad higroscópica de equilibrio), se mide su higroscopicidad, y se calcula el peso seco de la muestra, multiplicando el peso húmedo por el factor correctivo que se calcula en lo que sigue: Sean:

P', Peso de la muestra con la humedad higroscópica de equilibrio.

P'', Peso de las partículas secas.

P''', Peso del agua higroscópica.

H, Humedad higroscópica (Valor porcentual).

$$P' = P'' + P'''$$

$$H = 100 \cdot P''' / P''$$

$$P''' = HP'' / 100$$

$$P' = P'' + HP'' / 100$$

$$P' = P'' (1 + H/100)$$

$$P'' = P' \frac{100}{100 + H}$$

$$P'' = K P'$$

$$K = \frac{100}{100 + H}$$

El factor K permite, pues, conocer el peso seco P'' de una muestra que, con un porcentaje de agua H , pesa P' .

H.—HUMEDAD HIGROSCÓPICA MÁXIMA.

Se determina del mismo modo que la actual; pero colocando la muestra dentro de un ambiente con humedad relativa 99%. Se emplea para esto el aparato de Mitscherlich, que es un recipiente de vidrio, de gran diámetro, tapado, provisto de manómetro y termómetro. Por medio de una bomba puede dársele la presión que se desee.

Dentro del recipiente, sobre un trípode, hay un receptáculo de gran base y pequeña altura, sobre el cual se coloca la muestra. El ensayo se hace colocando agua en el fondo del recipiente. La muestra se pesa periódicamente hasta que su peso no aumente. Después de seca se calcula el porcentaje de humedad con respecto al suelo seco.

I.—AGUA PELICULAR.

La humedad pelicular máxima puede obtenerse por varios métodos.

Método de las altas columnas.—Este método consiste en inundar una columna de suelo contenida en un tubo de vidrio de altura suficiente. Cuando el agua termina de fluir de la boca inferior del tubo, estableciéndose el equilibrio, se extraen muestras de suelo húmedo a distintas alturas del tubo, y se les determina la humedad. En seguida se construye con estos valores la curva Humedad—altura que es semejante a la de la figura 27, y se procede a separar en ella el agua capilar de

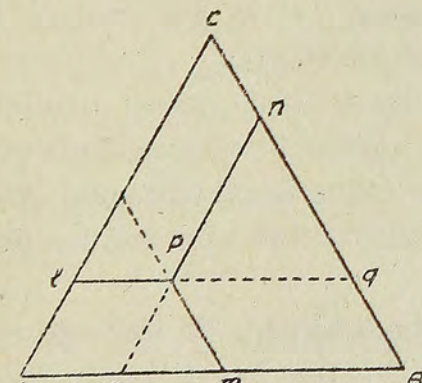


Figura 26 Triángulo de Feret Porcentaje de Humedad

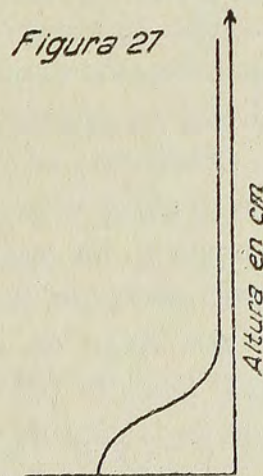


Figura 27

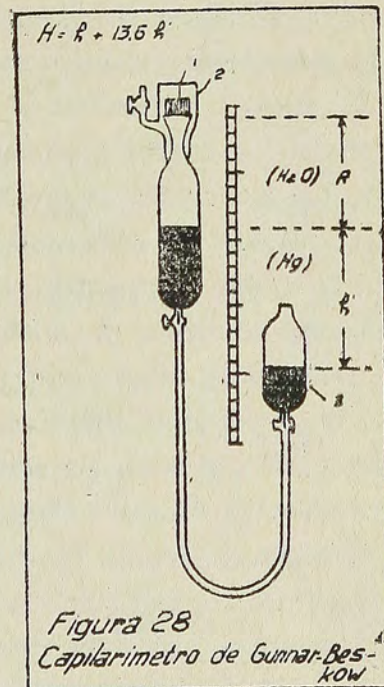


Figura 28 Capilarímetro de Gunnar-Beskov

la pelicular. Se acepta que la parte inferior de la curva (el pie) es el agua capilar; y que la parte de la curva que es asintótica con respecto a un eje vertical, representa al agua pelicular.

El método de las altas columnas no sirve en los suelos arcillosos porque exigiría grandes alturas de la columna de vidrio.

Método de la Máquina Centrifugadora.—Haciendo variar la aceleración centrífuga entre cero y 70,000 veces la aceleración de gravedad, es posible obtener curvas de humedad semejantes a las obtenidas por el método de las altas columnas. En estas curvas, el sector comprendido entre 18,000 y 70,000 g, es característico, y señala el sector correspondiente a la humedad pelicular. De aquí se desprende un método para medir esta constante sin necesidad de dibujar la curva: se centrifuga el suelo durante dos minutos con una aceleración centrífuga de 70,000 g. Después se pesa, se seca, se vuelve a pesar y se calcula el porcentaje de humedad con respecto al suelo seco.

Método de Batalla.—El suelo, humedecido hasta el estado de barro, se coloca entre treinta hojas de papel secante (15 a cada lado) y se comprime a razón de 65 Kg/cm². Después de cinco minutos se saca el suelo de entre los papeles y se le determina el porcentaje de humedad. Este método no es preciso en los suelos arenosos.

J.—AGUA CAPILAR.

Ya hemos visto como el agua capilar puede determinarse por el método de las altas columnas o por el método de la centrifugación. Conoceremos ahora algunos procedimientos para la determinación de la altura de levantamiento capilar en los suelos.

Método de los tubos.—En los suelos arenosos y limosos, que no tienen grandes alturas de levantamiento capilar, se usan tubos de vidrio de tres a cinco centímetros de diámetro y de cincuenta a cien centímetros de altura. Es conveniente que los tubos estén constituidos por anillos de cinco centímetros de altura, con el objeto de que sirvan también para estudiar las curvas de humedad.

El suelo por ensayar se coloca en el tubo de modo que quede repartido uniformemente. La extremidad inferior se ata con gaza y se sumerge cinco milímetros en agua. La altura de ascensión capilar se observa periódicamente de modo que sea posible conocer la velocidad de la ascensión capilar.

En suelos compactos, la altura de ascensión capilar puede determinarse cortando una columna de suelo, y estudiando en ella el fenómeno.

Cuando la altura capilar es grande; o cuando no se puede perder tiempo en hacer observaciones directas, se emplean los aparatos que se llaman capilarímetros. Todos ellos son muy parecidos; de modo que será suficiente la presentación del capilarímetro de Gunnar-Beskow; que tomo de un estudio sobre agua edáfica hecho por el ingeniero Alejo Kashirski (Figura N.º 28).

La muestra del suelo se pone en la cápsula 1, sobre una capa de arena gruesa y papel secante. Las dimensiones de la cápsula son: diámetro: 2 a 2,5 cm.. Altura, 2 a 3 cm. La muestra se pone por capas y con compactación suave. La cápsula preparada se coloca dentro del recipiente 2. El recipiente 2 contiene agua y más abajo mercurio. El tubo 2, conectado con el 3 por medio de una manguera, constituyen un manómetro con el cual mediremos la altura de ascensión capilar. Cuando

la muestra está preparada, se levanta el tubo 3 hasta que el agua toque la parte inferior de la tierra.

Alcanzado este punto, se detiene la ascensión del recipiente 3 y se espera a que la muestra se sature de agua capilar. Y ahora empieza la medida propiamente dicha de la altura de ascensión capilar: el recipiente 3 se empieza a bajar lentamente, por etapas de 4 cm. y deteniéndose al final de ellas entre tres y cinco minutos. El descenso continúa hasta que se rompen los meniscos. En ese momento se anota la diferencia de nivel del mercurio en los dos vasos y se calcula la altura de ascensión capilar: es la columna de agua más 13,6 veces la columna de mercurio.

El capilarímetro entrega la altura de ascensión capilar sin complicar el fenómeno con el agua pelicular:

K.—EQUIVALENTE DE HUMEDAD.

El equivalente de humedad es el porcentaje mínimo de agua, con respecto al peso del suelo seco, contenido por una muestra cuando deja de absorber una gota de agua que cae sobre ella.

El ensayo se hace sobre una muestra de suelo fino humedecida, sobre la cual se deja caer gota a gota el agua. Cuando una gota no es absorbida por el suelo y queda en forma de una mancha brillante sobre la superficie alisada de la muestra, se ha alcanzado la humedad equivalente del suelo.

La medida se hace pesando una parte de la muestra, secándola hasta peso constante, y calculando el porcentaje de agua que contiene con respecto al suelo seco.

El equivalente de humedad tiene un significado distinto según sea la clase de suelo que se estudia.

En las arenas, el agua deja de penetrar cuando los poros están llenos. El equivalente de humedad expresado en tanto por uno, coincide en este caso con la constante ya estudiada «Relación de Vacíos», dividida por el peso específico del suelo.

En efecto, sean:

H, el equivalente de humedad, medido en tanto por uno:

V', el volumen de poros, que coincide con el volumen de agua contenida en el suelo de humedad H.

V'', el volumen de partículas del suelo.

G, el peso específico del suelo.

P', el peso del agua contenida en el suelo de humedad H.

P'', el peso del suelo seco.

E, la relación de vacíos.

$$H = \frac{P'}{P''}$$

$$H = \frac{V'}{V'' G}$$

$$E = V'/V''$$

$$H = E/G$$

En los suelos expansivos sin cohesión, el equivalente de humedad tiene otro significado: el agua deja de penetrar cuando la tensión capilar se anula (Ej., el limo).

En los suelos cohesivos tales como la arcilla, el agua deja de penetrar cuando la superficie se transforma en una capa impermeable.

En Edafotecnia tiene importancia la relación entre esta constante y el límite plástico, porque en la naturaleza, poco más o menos, es la humedad equivalente la que el terreno absorbe de las lluvias; y si esta humedad es mayor que la del límite plástico, el suelo no tendrá estabilidad en tiempo de lluvias.

L.—HUMEDAD EQUIVALENTE POR CENTRIFUGACIÓN.

Este ensayo se ha hecho clásico en los laboratorios edafotécnicos; y sus resultados son ya de utilidad.

La humedad equivalente de centrífuga de un suelo, es el porcentaje de humedad, referido al peso del suelo seco, que contiene una muestra saturada de agua después de haber sido sometida durante una hora a una aceleración centrífuga equivalente a mil veces la de gravedad.

El ensayo se hace con cinco gramos de suelo fino, que se introducen en un crisol de Gooch, en cuyo fondo se coloca previamente un papel de filtro húmedo de peso P' . La cápsula se coloca dentro de un recipiente con agua, de modo que ésta penetre por el fondo por capilaridad.

Cuando se observa agua libre en la superficie de la muestra, se saca el crisol del recipiente y se coloca en una cámara húmeda durante 12 horas.

Al cabo de este tiempo, se saca el crisol de la cámara, se retira de la superficie de la muestra el agua libre, y se centrifuga luego de acuerdo con la definición. En seguida se realizan las siguientes operaciones:

- 1.º Obtener el peso P'' del crisol con la muestra centrifugada.
- 2.º Secar el crisol con la muestra hasta peso constante. Sea P''' este peso.
- 3.º Obtener el peso P'''' del crisol vacío.
- 4.º Obtener el peso P''''' del papel filtro seco.

El peso del agua de la muestra centrifugada es:

$$(P'' - P') - (P''' - P''''')$$

El peso de la muestra seca es:

$$P''' - (P'''' + P''''')$$

La humedad equivalente de centrífuga HC, es, por lo tanto:

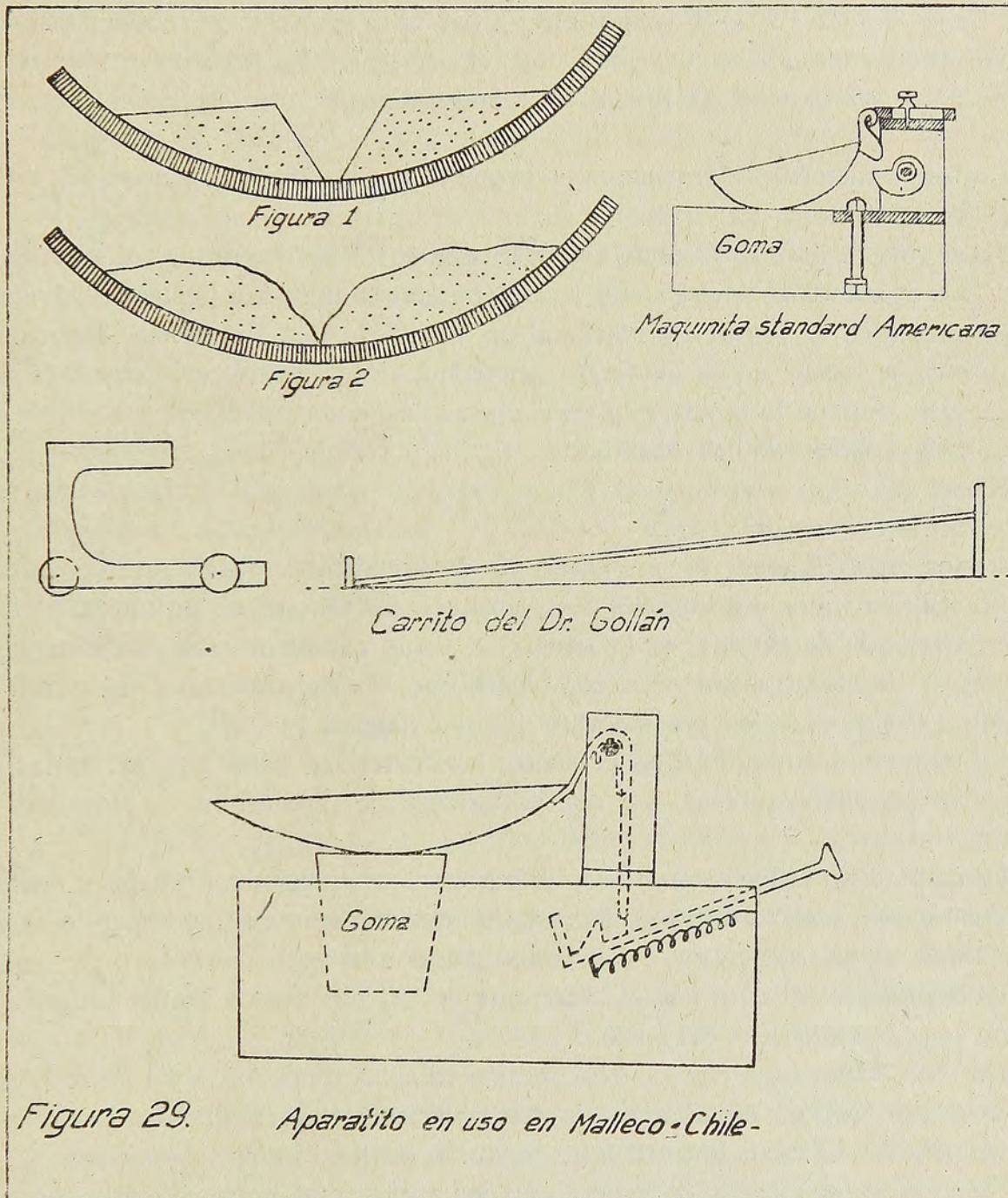
$$HC = \frac{(P'' - P') - (P''' - P''''')}{P''' - (P'''' + P''''')} 100$$

Más atrás hemos estudiado la interpretación de la humedad centrífuga. En Edafotecnia, esta constante se relaciona con otras que estudiaremos luego, con el

objeto de formarse juicio sobre el comportamiento de los suelos frente a determinados agentes.

M.—LÍMITE LÍQUIDO,

El límite líquido de un suelo es el porcentaje mínimo de humedad, referida al



peso del suelo seco que contiene una muestra de suelo fino cuando empieza a fluir bajo la acción de 10 golpes propinados de acuerdo con condiciones standard.

Hay varios procedimientos para determinar el límite líquido: el del Bureau of Public Roads, el de la Dow Chemical Cy, el del Dr. Gollan, etc.

El método original, el del Bureau of Public Roads, consiste en lo siguiente: Sobre una cápsula como la de la primera figura de la lámina 29 se colocan treinta gramos aproximadamente de suelo fino humedecido. Después de amasar con

una espátula hasta conseguir una distribución uniforme de la humedad, se divide la pasta en dos porciones mediante un acanalador de forma y dimensiones standard. En seguida, manteniendo la cápsula en una mano, se le dan diez golpes suaves con la palma de la otra; de modo que la incisión quede constantemente perpendicular a la dirección del golpe.

Si después del último golpe los bordes inferiores de la incisión están juntos, como en la figura 2 de la lámina 29, la humedad de la muestra es la que corresponde al límite líquido. Si los bordes no se juntan, falta agua; entonces es preciso agregársela, amasar de nuevo y repetir los golpes. Si los bordes se juntan antes del décimo golpe, sobra agua; es preciso en tal caso agregar suelo seco y volver a repetir.

Los otros métodos, sólo son una mecanización del original, tendientes a standardizar las condiciones del ensayo.

En la misma lámina 29 se incluyen los esquemas de dos de las máquinas más corrientes: la standard americana y la que ha ideado el doctor Josué Gollan (hijo), que se emplea en la Dirección Nacional de Vialidad de la República Argentina.

Ambas se basan en la caída por gravedad, desde una altura standard de la cápsula que contiene la muestra; y en el choque de ella contra una superficie elástica de propiedades también standard.

Existe aún otro aparatito—el llamado «punch» en el cual el choque es producido por la acción de un resorte.

Todos estos dispositivos presentan un inconveniente: exigen muchas circunstancias standard, que son difíciles de realizar en los talleres de provincias. El suscrito ha tratado de eliminar la influencia de estas circunstancias, mediante el uso sistemático de muestras patrones, combinado con el empleo de una maquinita realizable en cualquier taller, por modesto que sea (Figura N.º 29).

La maquinita cuyo esquema presento, puede ser realizada con las variaciones que exijan las circunstancias, ya sea tratándose de dimensiones o de calidad de los materiales.

La calibración se hace con muestras patrones de suelos finos de baja, media y alta plasticidad. Las condiciones de trabajo pueden obtenerse modificando la altura de caída, el número de golpes, o ambas cosas a la vez.

El significado del dato que se determina con el nombre de Límite Líquido, varía con las características del suelo.

En las arenas—que no tienen cohesión ni son expansivas—el Límite Líquido señala la cantidad de agua necesaria para lubricar las partículas hasta un grado tal que permita su escurrimiento bajo la acción de los 10 golpes standard.

En el limo, la mica y, en general, en los suelos que no tienen cohesión, pero que son expansivos, el límite líquido corresponde a la cantidad de agua necesaria para anular la forma de cohesión que se produce por el contacto superficial y por la capilaridad; permitiendo el escurrimiento de las partículas bajo la acción de los diez golpes standard.

Los suelos expansivos y con cohesión propia tienen un límite líquido que corresponde a la cantidad de agua necesaria para anular la cohesión propia y las otras formas de cohesión, permitiendo a las partículas escurrir bajo la acción de los diez golpes standard.

N.—LÍMITE PLÁSTICO.

El límite plástico de un suelo es el porcentaje máximo de humedad, referido al peso del suelo seco, que contiene una muestra de suelo fino, cuando al modelarla en cilindros de tres milímetros de diámetro, éstos se rompen en trozos.

La determinación de esta constante se hace tal como lo expresa su definición: Sobre una placa de vidrio se modela el suelo fino humedecido, hasta que los cilindros se conviertan en fideos de tres milímetros de diámetro. Una vez obtenidos estos fideos, se amasan y se modelan de nuevo para que pierdan la humedad que tienen en exceso. La operación se repite hasta que los fideos se quiebran al llegar a tres milímetros. Cuando se ha llegado a esta situación, se determina la humedad de los trozos de cilindros; y esta humedad es el límite plástico.

El límite plástico tiene una interpretación común en todos los suelos: Es el porcentaje de agua que señala el límite entre el estado sólido y el estado plástico; o sea, el estado en el cual la materia se deja amasar.

O.—INDICE DE PLASTICIDAD.

El Índice de Plasticidad de un suelo es la diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico.

Para interpretar el significado del índice de plasticidad, recordemos los de los límites en donde se deduce: El límite líquido señala el paso del estado plástico al estado líquido. El límite plástico separa el estado plástico del estado sólido. El índice de Plasticidad representa, por lo tanto, la gama plástica de un suelo, cuando varía su humedad.

P.—COEFICIENTE DE PLASTICIDAD.

El suscrito ha intentado en repetidas oportunidades introducir este concepto en Edafología, para sustituir el límite plástico, el límite líquido y el Índice de Plasticidad, que son valores no susceptibles de ser introducidos en fórmulas de resistencia de materiales. A continuación copio la parte pertinente de un Estudio sobre Suelos Finos presentado al Tercer Congreso Panamericano de Carreteras por el profesor Thomas y el infrascrito. (Página 133 del primer tomo).

«En cálculos de estabilidad de terraplenes y otros, se ha tenido que considerar la posibilidad de que la arcilla del subsuelo, humedecida por las lluvias o por el agua subterránea, se torne capaz de transmitir en todas las direcciones, las presiones verticales determinadas por el peso de los terraplenes y las sobrecargas correspondientes.

«En efecto, se sabe que la acción de una fuerza P en un cuerpo, cuyas propiedades resistentes son intermedias entre las del agua y las del sólido (ver figura 30), determinan en un punto cualquiera, fatigas de compresión en todas las direcciones imaginables, cuyas intensidades varían según un elipsoide, cuyo centro es el punto.

«Considerando el asunto en un plano transversal normal a la dirección del camino, en un punto cualquiera de él, las intensidades de las fatigas, en cada una

de las direcciones posibles dentro del plano, seguirán una ley elíptica. La elipse, cuyo centro será el punto considerado, tendrá su eje mayor según la vertical. Lógicamente, cuando el grado de humedad de la arcilla varíe entre cero (arcilla seca) y el agua pura, la razón, eje menor dividido por eje mayor, variará entre cero y uno.

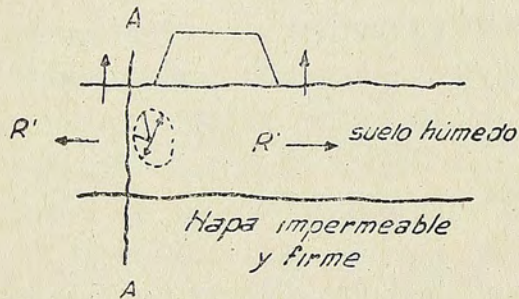


Figura 30 Coeficiente de Plasticidad

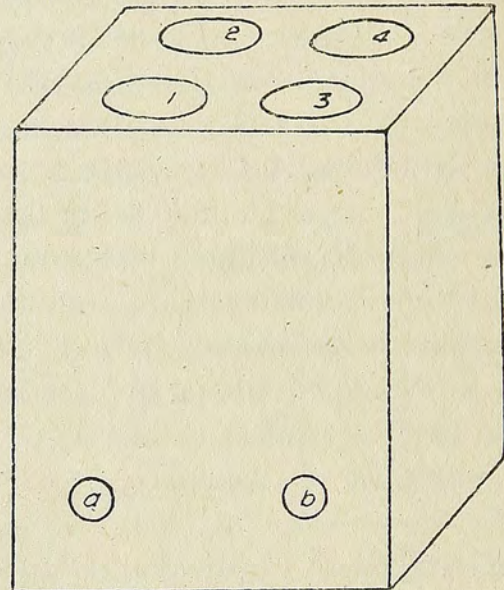


Figura 32. Medida del P.H.

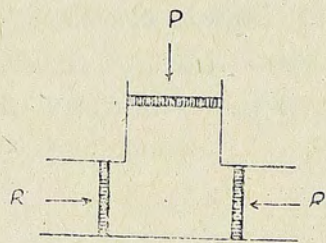


Figura 31

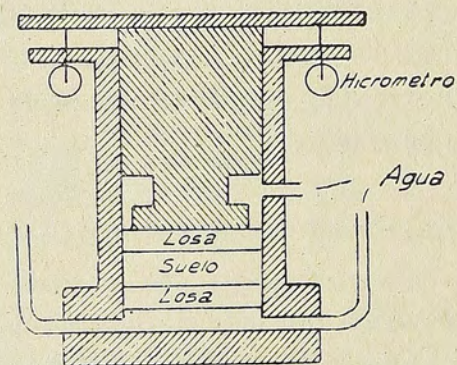


Figura 33 Compresor Terzaghi

«En una sección AA, fuera del terraplén, el conjunto de las fatigas no verticales, determinarán hacia la derecha de AA, una resultante horizontal R' que empujará al suelo.

«Para una humedad cualquiera h, un esfuerzo vertical P, determinará reacciones horizontales R' que se podrán expresar en la forma:

$$R' = KP$$

en donde K será una función de la humedad h, y de otras características que para un determinado material serán constantes:

$$K = f(h)$$

o sea:

$$R' = f(h) P$$

Cada suelo debe tener una función específica K , que puede ser obtenida con el aparatito cuyo diseño aparece en la figura 31.

El límite líquido y el límite plástico serían en esta curva $K = f(h)$, sus puntos críticos y el índice de plasticidad, la zona intermedia.

El coeficiente K sería en los suelos plásticos el coeficiente de plasticidad; y en los otros, el coeficiente de transmisión de esfuerzos normales a la dirección de la carga.

Q.—LÍMITE DE CONTRACCIÓN.

El límite de contracción de un suelo es el porcentaje máximo de humedad, referido al peso del suelo seco, para el cual una muestra de suelo fino no se contrae, cuando la humedad baja de ese límite, y se dilata cuando la humedad sube de él.

El ingenioso procedimiento que sirve para determinar esta constante es el siguiente:

1.º Se toman, aproximadamente, 50 gramos de suelo fino humedecido más o menos hasta límite líquido. El suelo húmedo se coloca en una cápsula de porcelana cilíndrica de 43 por 12 m/m, previamente untada con vaselina. Se toman precauciones para que la pasta quede repartida uniformemente dentro de la cápsula (sin burbujas de aire, p. ej.). La cápsula totalmente llena tiene un volumen V' y un peso P' . Sea P el peso de la cápsula vacía.

2.º La muestra, dentro de la cápsula, se seca al aire libre hasta que su superficie se ponga opaca. A continuación se seca en la estufa de 110 grados hasta peso constante. Sea P'' el peso de la muestra seca.

3.º Se determina el volumen del suelo seco, sumergiéndolo en un recipiente con mercurio, y midiendo el volumen de mercurio desplazado. Sea éste V'' .

El volumen del agua contenida por la muestra es:

$$P' - P''$$

El volumen de la contracción es:

$$V' - V''$$

El volumen del agua evaporada que no dió origen a contracción del suelo es:

$$V = (P' - P'') - (V' - V'')$$

Siendo uno el peso específico del agua, v es también el peso del agua evaporada sin contracción.

El peso de la muestra seca es:

$$P'' - P$$

El límite de contracción es, por lo tanto:

$$L. C. = \frac{(P' - P'') - (V' - V'')}{P'' - P} 100$$

R.—RAZÓN DE CONTRACCIÓN.

Se llama razón de contracción, a la relación que existe entre un cambio de volumen, expresado en porcentaje con respecto al volumen del suelo seco; y el correspondiente cambio del contenido de humedad, arriba del límite de contracción, expresado en porcentaje con respecto al peso de suelo seco. La definición corresponde, naturalmente, al suelo fino.

Esta constante se determina con los datos que sirvieron para el cálculo del límite de contracción.

El cambio de volumen con respecto al volumen del suelo seco es:

$$m = \frac{V' - V''}{V''}$$

La humedad que contenía el suelo, antes de contraerse es, con respecto al suelo seco:

$$\frac{P' - P''}{P'' - P}$$

La variación de humedad hasta el límite de contracción es:

$$n = \frac{P' - P''}{P'' - P} \frac{(P' - P'') - (V' - V'')}{P'' - P}$$

$$n = \frac{V' - V''}{P'' - P}$$

La razón de contracción es:

$$R C = m/n$$

$$R C = \frac{P'' - P}{V''}$$

Observando la fórmula, se ve que la razón de contracción y el peso aparente del suelo seco, coinciden:

$$g = R C$$

S.—CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA.

Se llama contracción volumétrica de un suelo para un determinado contenido de humedad, a la contracción que sufre la unidad de volumen medida en seco, cuando dicha humedad desciende hasta el límite de contracción.

Para calcular la coetracción volumétrica, recordemos la definición de la razón de contracción R. C.: Es la relación entre un cambio de volumen ΔV , referido en porcentaje al volumen V del suelo seco; y el cambio del contenido de humedad, arriba del límite de contracción, expresado en porcentaje del peso del suelo seco: $H - L. C.$

$$R. C. = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{H - L. C.}$$

De aquí resulta; llamando C. V. a la contracción volumétrica:

$$C. V. = \frac{\Delta V}{V} = R. C. (H - L. C.)$$

T.—CONTRACCIÓN LINEAL.

Es la contracción unidimensional de un suelo fino, que corresponde al paso de una humedad H hasta el límite de contracción $L. C.$

Sea un suelo cuyo volumen con humedad H es $V + \Delta V$ y cuya arista es $A + \Delta A$. A y V son las dimensiones secas.

$$\Delta V = (A + \Delta A)^3 - A^3$$

De aquí resulta:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3 \Delta A}{A} + 3 \left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A} \right)^3$$

Tratándose de contracciones pequeñas, pueden despreciarse los términos en segundo y tercer grado del segundo miembro. Llamemos C. L. a la contracción lineal $\Delta A/A$:

$$C. V. = 3 C. L.$$

Esta fórmula no es aplicable para valores grandes de contracción. La fórmula que sigue se ajusta más a la realidad. Las contracciones se expresan en tanto por ciento:

$$C. L. = 100 \left(1 - \sqrt{\frac{100}{100 + C. V.}} \right)$$

La razón y el límite de contracción sirven también para calcular aproximadamente el peso específico. Se aplica la fórmula:

$$G = \frac{1}{\frac{1}{R. C.} - \frac{L. C.}{100}}$$

U.—DETERMINACIÓN DEL pH.

El pH de un suelo puede medirse de varias maneras. Explicaré el uso de los indicadores, por el sistema sin tapón, que es sencillo y exacto.

Se preparan primero las soluciones madres de los siguientes compuestos:

m. Nitrofenol.	0,300 gr. para 100 c. c. de agua destilada.
p. Nitrofenol.	0,100 gr. para 100 c. c. de agua destilada.
Gama-Nitrofenol.	0,100 gr. para 400 c. c. de agua destilada.
Alfa-Nitrofenol.	0,100 gr. para 200 c. c. de agua destilada.

En seguida, para preparar la serie de tubos de comparación, se toman porciones de las soluciones madres y se diluyen al décimo—diez por ciento—en agua destilada. (Esto significa que se toman 10 volúmenes de solución madre para 90 de agua destilada).

Se dispone luego una serie de tubos de ensayo de igual calibre y con cuello estrechado, en los cuales se vierten 7 c. c. de una solución decinormal de carbonato sódico. Sobre los tubos se vierten en seguida las soluciones madres diluídas, en la cantidad que se especifica en los cuadros que siguen. Hecho esto, los tubos se cierran a la lámpara y se les marca con una etiqueta que indique el valor del pH.

Todas las medidas necesarias en estas operaciones deben ser hechas con precisión. Los tubos así preparados son los patrones que servirán en la investigación del pH de los suelos o de lo que queramos.

m-Nitrofenol		p-Nitrofenol		Gama-Nitrofenol		Alfa-Nitrofenol	
C.C.	pH	C. C.	pH	C. C.	pH	C. C.	pH
5,2	8,4	4,05	7,0	6,6	5,4	6,7	4,4
4,2	8,2	3,0	6,8	5,5	5,2	5,7	4,2
3,0	8,0	2,0	6,6	4,5	5,0	4,6	4,0
2,3	7,8	1,4	6,4	3,4	4,8	3,4	3,8
1,5	7,6	0,94	6,2	2,4	4,6	2,5	3,6
1,0	7,4	0,63	6,0	1,65	4,4	1,74	3,4
0,66	7,2	0,40	5,8	1,1	4,2	1,20	3,2
0,43	7,0	0,25	5,6	0,74	4,0	0,78	3,0
0,27	6,8	0,16	5,4			0,51	2,8

Los tubos confeccionados en esta forma deben guardarse al abrigo de la luz, para asegurar su duración, que, en estas condiciones es prácticamente indefinida.

La determinación del pH se hace en una cajita de comparación, semejante a la de la figura 32. La técnica, llamada de Walpole, es la siguiente:

En el tubo N.º 1 del comparador se vierten 6 cc. de la solución cuyo pH se busca. Después se le agrega un cc. de la solución madre no diluída del indicador más adecuado. En el tubo N.º 2 se colocan otros 6 cc. de la solución por titular, y un cc. de agua destilada. En el tubo N.º 3 se coloca agua destilada. Finalmente, se busca el tubo patrón que debe ser colocado en el N.º 4, para que no haya diferencia de color entre a y b. El discernimiento de los colores se facilita interponiendo ante los rayos que atravesarán los tubos, un cristal azul.

La medida del pH de un suelo se hace con agua que ha estado en contacto prolongado con el suelo en estudio. (Agua destilada).

V.—MOJADO PREFERENCIAL.

Más atrás se ha hablado de la afinidad en materia de adhesividad. En Edafotecnia es frecuente el tener que discernir si ciertas sustancias, bitúmenes generalmente, tienen más o menos afinidad de adhesividad que el agua respecto a un determinado suelo. El ensayo es muy sencillo: Sólo consiste en tratar el suelo con la sustancia cuya afinidad se discute, y en agitarlo luego con agua, observando si el suelo se queda con el agua o con la otra sustancia.

W.—FLOCULACIÓN.

La floculación de un suelo se estudia observando su manera de sedimentar. Para ello se toma una muestra equivalente a cinco veces el peso específico del material; y se introduce en un probeta graduada, con 45 cc. de agua destilada. Se agita durante dos minutos; y se deja reposar, observando la sedimentación, durante 24 horas.

El volumen neto de las partículas, cuyo peso fué de cinco veces el específico, es cinco centímetros cúbicos; luego, si no hay floculación ni disolución, el volumen del agua y del suelo debe ser 50 c. c. Si es mayor el suelo está floculado; y si es menor, contiene sustancias solubles en agua.

X.—COMPACTACIÓN.

El estudio de la compactación de los suelos importa la medida del máximo peso aparente alcanzable para determinada forma de compactación; y la determinación de lo que se llama «contenido óptimo de humedad» que es la dosis de agua que permite al suelo llegar a su máximo peso aparente.

El ensayo se realiza compactando muestras de diverso contenido de humedad del suelo, en moldes cilíndricos de 10 centímetros de diámetro por 11 cm. de altura, en tres capas. Sobre cada capa se deja caer 25 veces un martillo de 2,5 kg. de peso, desde una altura de 30 centímetros, con una superficie de apoyo circular de 19 centímetros cuadrados.

A las muestras compactadas se les determina el peso aparente y su humedad, de acuerdo con los procedimientos ya estudiados, y se dibuja la curva peso aparente-humedad, que es lo que se precisa.

Y.—ASENTAMIENTO.

Los ensayos de asentamiento se realizan en el compresor de Terzaghi, cuyo diagrama y funcionamiento se dan en lo que sigue.

Se trata de un cilindro que tiene por base una losa porosa, debajo de la cual existe un receptáculo que recoge el agua que pasa a través de ella.

Sobre esta losa se coloca el suelo húmedo en estudio; y sobre él, otra losa porosa.

Finalmente, se monta un émbolo, cuya sección inferior se ha reducido de modo que permita la evacuación del agua a través del orificio que tiene el cilindro.

Sobre el émbolo hay una plataforma, encima de la cual se coloca la carga. Las deformaciones del suelo se leen en micrómetros que acusan el movimiento de la plataforma con respecto al cilindro, que permanece inmóvil.

Las determinaciones que se hacen con este aparato son dos: 1.º Variación de la relación de vacíos con respecto a la carga; 2.º Deformación del suelo con carga constante, en función del tiempo.

La experiencia correspondiente a la primera relación se hace cargando el pistón con pesos cada vez mayores. Después de colocar cada peso, se espera a que termine la deformación, para hacer las anotaciones y aumentar la carga.

El gráfico se confecciona poniendo en abscisas la carga, y en ordenadas la relación de vacíos, que se calcula a base de las deformaciones leídas en el micrómetro.

El asentamiento en función del tiempo se obtiene para una determinada carga, haciéndola gravitar, a través del émbolo sobre el suelo, y anotando las deformaciones sucesivas.

El gráfico se confecciona poniendo en abscisas el tiempo; y en ordenadas, el porcentaje de la deformación experimentada por el suelo, con respecto a la deformación máxima alcanzada con la carga con la cual se experimenta.

Los datos que entrega el ensaye de asentamiento, los elaboraremos al tratar de la Estabilidad de los Suelos.

Z.—DESINTEGRACIÓN BAJO AGUA.

Propongo que la resistencia de un mortero de suelo a desintegrarse dentro del agua, sea medida en la siguiente forma:

1.º El material seco se pasará por el tamiz de diez mallas.

2.º De lo que pase por el tamiz de diez mallas, se tomarán 100 gramos, a los cuales se agregarán diez centímetros cúbicos de agua. Se amasará enseguida con espátula durante cinco minutos, para confeccionar luego tres probetas cilíndricas de una pulgada de diámetro por una de altura, en la máquina standard de preparar probetas para medir la cementación del polvo de roca. La carga que se aplicará al confeccionar la probeta, será de quinientos kilogramos durante treinta segundos.

3.º Las probetas se secarán hasta peso constante y luego se pondrán a enfriar en secadores.

4.º Las pruebas se realizarán colocando cada probeta separadamente en el fondo plano de un vaso cilíndrico de vidrio de tres pulgadas de diámetro, con dos pulgadas de altura de agua. La resistencia de la probeta a la desintegración bajo agua, se medirá por el tiempo en segundos que transcurre desde la sumersión, hasta que ella haya perdido un tercio de su altura.

(Continuará)
