

Construcción de aeropuertos

Características y análisis de terrenos

Por FRANCISCO LOPEZ PEDRAZA, Ingeniero Aeronáutico.

GENERALIDADES.—La superficie del terreno de un aeropuerto debe servir, unas veces, para su utilización directa como zona de aterrizaje y despegue de aviones, y otras como soporte o cimiento de los pavimentos especiales de las pistas. Tanto en un caso como en otro debe tener el terreno resistencia suficiente para absorber las cargas transmitidas por las ruedas de las aeronaves, y en el primero deberá, además, poseer una superficie estable y compacta, sin los inconvenientes de la mayoría de los terrenos naturales, tales como la disgregación en polvo en tiempo seco y la formación de barro en época de humedad.

La estabilidad, lo mismo que la capacidad de absorción de cargas, depende, en su mayor parte, del grado de humedad del terreno; hasta tal punto que un suelo con distintos grados de humedad posee características completamente diferentes, necesitando poseer el grado conveniente en todas las épocas para su mejor comportamiento como firme. Así, por ejemplo, en una playa y en la zona más alejada del agua, en que la humedad del terreno es muy poca, el suelo se hunde bajo la acción del pie de un hombre, y el viento levanta polvo por carecer el terreno de cohesión suficiente; en la zona bañada por las olas, en que la cantidad de agua es muy grande, también cede el terreno bajo el pie, formándose barro; existiendo una zona intermedia, mojada por las olas y por absorción capilar, que tiene un grado de humedad tal, que, además de ser completamente estable, absorbe las cargas de manera que llegan a no hacerse perceptibles las huellas del pie. En la playa de Daytona, en Florida, corren los automóviles más potentes del mundo en lucha por la velocidad.

El conocimiento de cómo se comportan los terrenos, y las formas de variar sus cualidades naturales para obtener productos de resistencia y estabilidad suficientes, es imprescindible para el proyecto de un aeropuerto; ello nos conduce, no solamente a cifras de costo más bajas, sino también al conocimiento exacto de la manera de comportarse los suelos bajo la acción de los agentes atmosféricos y de las cargas, y, por tan-

to, a la posibilidad de construcción del aeropuerto dentro de una economía.

TÉRMINOS EMPLEADOS EN LA IDENTIFICACIÓN DE TERRENOS.—Los terrenos han sido clasificados de varias maneras: atendiendo a sus características geológicas, físicas y químicas; haciendo resaltar las diferentes clasificaciones, el modo de comportarse con relación a los fines para que están hechas.

Es posible establecer una relación entre las diferentes clasificaciones; pero se hace difícil y, verdaderamente, no conduce a ningún resultado práctico, ya que solamente nos puede dar una idea de cómo se comportan los terrenos, y esto no basta en nuestro caso.

Así, por ejemplo, atendiendo a sus características químicas y físicas, de acuerdo con la finura de los terrenos, éstos se pueden clasificar en: gravas-arenas, arenas finas, arenas margosas, arcillas arenosas, margas fangosas, margas arcillo-arenosas, margas arcillo-fangosas, margas arcillosas, fangos, arcillas fangosas y arcillas.

En esta clasificación, los comprendidos entre las arenas margosas y las margas arcillosas son los que dan mejores resultados, por conseguir una superficie más estable y de mayor resistencia.

Por otra parte, los terrenos se componen de diferentes elementos, los cuales contribuyen a dar al conjunto una cierta estabilidad y cohesión, aportando cada cual sus propiedades.

De esta manera, las arcillas y limos actúan como aglomerantes, ligando las partículas de arena a las cuales rodean y formando la mezcla entre ellas el mortero, que une, a su vez, los elementos de gravas. La perfecta proporción entre unos y otros elementos podría ser la base de clasificación de los terrenos; pero esto no basta, por los diferentes resultados a que conducen los mismos elementos en diferentes estados. Así, los terrenos tienen muy diferentes características si las arcillas que contienen son o no coloidales y si los limos tienen o no materia orgánica.

El modo único, hoy día, de identificar los suelos y de llegar al conocimiento exacto de la manera de comportarse, es por medio del análisis de su composición granulométrica y del conocimiento de sus constantes físicas y de su resistencia, las cuales, naturalmente, dependen de sus composiciones químicas y de su formación geológica; pero, bastando las primeras, prescindiremos de la relación que guardan con las segundas.

Una composición granulométrica y unas constantes físicas convenientes definen la propiedad de mantenerse los suelos con el grado de humedad necesario para su estabilidad, tanto en tiempos secos como húmedos.

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA.—Los granos que contiene un terreno se clasifican por su tamaño en la siguiente forma:

- Grava gruesa, mayor de 4,76 mm.
- Grava fina, de 4,76 a 2 mm.
- Arena gruesa, de 2 mm. a 0,25 mm.
- Arena fina, de 0,25 a 0,05 mm.
- Limo, de 0,05 a 0,005 mm.
- Arcillas, menor del 0,005 mm.
- Arcillas coloidales, menor de 0,001 mm.

No quieren estos nombres decir que la composición química de los granos corresponda a la clasificación empleada; la razón de su nombre es, en algunos casos, arbitraria, y solamente corresponde, en otros, al mayor % de las materias que las componen.

Los análisis de composición granulométrica constan de dos partes: la primera se refiere a los tamaños de granos mayores de 0,074, y su composición se halla por medio de un tamizado de las muestras tomadas del terreno; el estudio de los granos más finos se hace por medio de la velocidad de sedimentación de las partículas sumergidas en un líquido.

Los tamices principales, empleados para los análisis granulométricos de las partículas mayores de 0,074 mm., son los especificados en la tabla I.

El ensayo se efectúa tomando una muestra de terreno de 6,5 kgs. de peso, que, una vez desecada convenientemente en una estufa a 110°, se hace pasar por los tamices mayores del número 10, viendo así el tanto por ciento retenido en cada tamiz.

De la cantidad que pasa por el tamiz número 4 se apartan 800 grs., que se colocan en un recipiente metálico de 15 × 20 × 30 cms., con un aliviadero en su parte superior. Sobre el recipiente se añade agua de un modo continuo,

T A B L A I
TAMAÑO DE MALLA EN TAMICES EMPLEADOS EN ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS

Número del tamiz	Dimensiones de la malla en mm.
2"	50,80
1 1/2"	38,10
1"	25,40
3/4"	19,05
1/2"	12,70
3/8"	9,52
4	4,76
10	2,00
20	0,84
40	0,42
100	0,14
140	0,10
200	0,074

hasta que la que salga por el aliviadero sea completamente transparente, y este agua se hace caer sobre el tamiz número 200. El material retenido en este tamiz se agrega a lo que queda en el recipiente, y por desecación y peso se ve la cantidad que pasa por el tamiz número 200. El material del recipiente se pasa entonces por los tamices comprendidos entre el número 4 y el número 200, con lo cual se sabrá lo retenido en cada tamiz.

Para el análisis de las partículas de tamaño menores de 0,074 mm. se emplea la ley de Stokes, que llevada a su forma más corriente es:

$$V = \frac{2}{900} \left(\frac{G_s - G_L}{\eta} \right) \left(\frac{P}{2} \right)^2$$

o bien

$$D = \sqrt{\frac{1.800 \eta V}{G_s - G_L}}$$

en la que V es la velocidad de sedimentación en centímetros por segundo de las partículas de tierra de diámetro D milímetros que están en suspensión en un líquido; η es la viscosidad del líquido en granos-segundo-cm², y G_s y G_L los pesos específicos de la partícula de terreno líquido.

La aplicación de esta ley es sólo valedera para la sedimentación en agua de partículas comprendidas entre diámetros de 0,2 mm. a 0,0002 milímetros, ya que para tamaños más pequeños llegan a resultar afectados por movimientos Brownianos, que no les permiten sedimentarse; pero siendo coloides las partículas de tamaño inferior, y comportándose de igual manera en los terrenos que el resto de los coloides, no interesa su conocimiento más a fondo. Además, en la aplicación de la ley de Stokes hay que hacer

unas hipótesis, a saber: a), que la suspensión de partículas en el líquido es uniforme al empezar a hacer el ensayo; b), que las partículas de tierra están separadas por distancias infinitas; c), que el diámetro del recipiente empleado para la suspensión y sedimentación es muy grande, para que el menisco hidráulico formado en las paredes no tenga influencia en las medidas; d), que los granos son esféricos. En la práctica no se realiza ninguna de estas hipótesis; pero los errores producidos son despreciables, debiendo llamarse al diámetro de granos "diámetro equivalente", para estar en la realidad.

El análisis se efectúa recogiendo el agua con la materia en suspensión que ha pasado por el tamiz número 200, y echándola en un recipiente cilíndrico de cristal, se le deja sedimentar convenientemente. Si llamamos V_1, V_2, V_3, \dots , las velocidades de sedimentación halladas por la ley de Stokes, de las partículas de diámetro D_1, D_2, D_3, \dots , al cabo de un cierto tiempo todas las partículas de tamaño D_1 quedarán por debajo de la altura $H_1 = V_1 t$, quedando también debajo de H_1 las partículas de diámetro D_2, D_3 , etcétera, con la concentración que tenían al empezar el ensayo. Las partículas de tamaño D_2 quedarán por debajo de $H_2 = V_2 t$, y así sucesivamente. Por encima de estas alturas quedarán los granos de tamaño menores con las mismas concentraciones iniciales (fig. 1).

El resto del análisis se puede hacer por dos procedimientos:

- 1.º Por medio de la pipeta, y
- 2.º Por medio del densímetro.

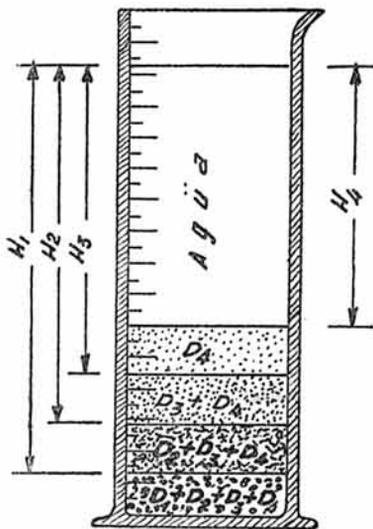


Figura 1.

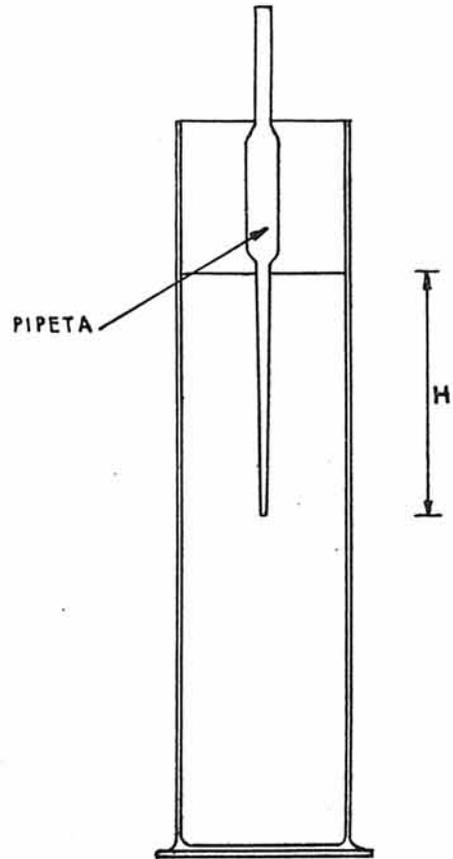


Figura 2.

1.º *Por el método de la pipeta.*—Por medio de una pipeta se coge (fig. 2) un cm^3 de líquido, con la concentración inicial, y al cabo de un tiempo se coge un centímetro cúbico de líquido de la altura H_1 . Estas concentraciones se desecan por evaporación; la relación

$$\frac{\text{Peso de partículas a profundidad } H_1}{\text{Peso de partículas de concentración inicial}} \times 100$$

nos dará el tanto por ciento en peso de partículas del tamaño inferior a D_1 . Haciendo lo mismo para la altura H_2 se averigua el tanto por ciento de granos menores D_2 , y así sucesivamente.

Este método tiene el inconveniente de que requiere balanzas muy precisas para hacer un buen análisis.

2.º *Por medio del densímetro.*—Se mide con un densímetro la densidad de la suspensión a una altura H y esta altura H (fig. 3).

Si llamamos:

V al volumen de la suspensión en cm^3 ,

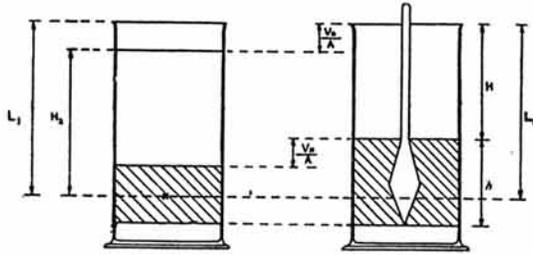


Figura 3.

W al peso en gramos de todas las partículas de la suspensión inicial contenidas en el volumen V ,

W_D al peso en gramos de las partículas menores que D que contiene V ,

γ_s peso por unidad de volumen del sólido, γ_w γ_o peso por unidad de volumen del agua a 4° , tendremos:

Peso por cm^3 de partículas mayores de $D = W \frac{W_D}{V}$.

Volumen por cm^3 de partículas mayores de $D = \frac{W_D}{V \gamma_s} = \frac{W_D}{V \gamma_o G_s}$.

Volumen del agua por $cm^3 = 1 - \frac{W_D}{V \gamma_o G_s}$.

Peso del agua por $cm^3 = \left(1 - \frac{W_D}{V \gamma_o G_s}\right) \gamma_o G_L$.

Peso total del cm^3 :
 $= \frac{W_D}{V} + \left(1 - \frac{W_D}{V \gamma_o G_s}\right) \gamma_o G_L$.

Peso específico de la suspensión:
 $= \frac{W_D}{V \gamma_o} + \left(1 - \frac{W_D}{V \gamma_o G_s}\right) G_L =$
 $= \frac{W_D}{V \gamma_o G_s} (G_s - G_L) + G_L$. [1]

$W_D = \frac{\text{Peso específico de la suspensión} - G_L}{G_s - G_L} \cdot V \gamma_o G_s$.

En esta fórmula hay que hacer las correcciones siguientes:

a) *Corrección debida a la temperatura.*—Si son distintas las temperaturas de calibración del densímetro y las de medición, hay que hacer correcciones debidas al cambio de peso específico del líquido y a la variación de volumen de la ampolla del densímetro.

Si llamamos r_c la lectura del densímetro; a la temperatura T_c de calibración; G_c al peso es-

pecífico del agua a la misma temperatura, y G_{L+s} al peso específico de la suspensión a esa temperatura, tendremos:

$$G_{L+s} = r_c G_c = [1 + (r_c - 1)] [1 + (G_c - 1)] =$$

$$= (1 + r_c - 1 + G_c - 1) + (r_c - 1)(G_c - 1),$$

en la que despreciando el último término, por ser muy pequeño, tendremos:

$$G_{L+s} = r_c + G_c - 1. \quad [2]$$

Llamando r_T a la lectura del densímetro, a la

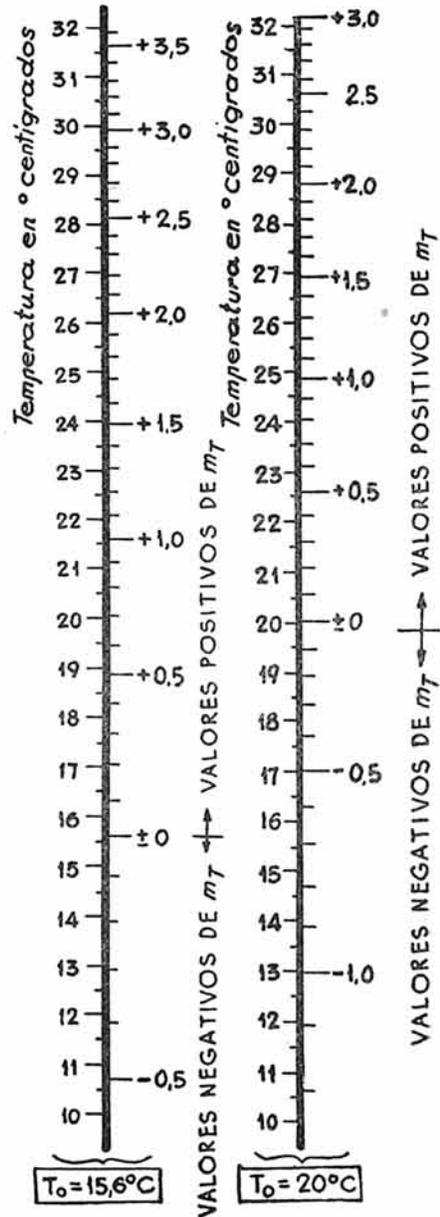


Figura 4.

temperatura T de la suspensión, V al volumen de la ampolla a la temperatura de calibración, y ε al coeficiente de dilatación del cristal = 25×10^{-6} , tendremos:

$$\begin{aligned} \frac{r_c}{r_T} &= \frac{V}{V + V \cdot \varepsilon (T - T_c)} = \\ &= \frac{1}{1 + \varepsilon (T - T_c)} \approx 1 - \varepsilon (T - T_c), \end{aligned}$$

y por ser $\varepsilon (T - T_c)$ muy pequeño,

$$r_c = r_T - r_T \varepsilon (T - T_c) \approx \varepsilon (T - T_c), \quad [3]$$

por variar r_T entre 1,03 y 0,995.

Llevando el valor de (3) a la ecuación (2), tendremos:

$$G_L + s = r_T - \varepsilon (T - T_c) + G_c - 1,$$

y, por tanto, de la ecuación (1) podemos sacar

$$\begin{aligned} r_T - \varepsilon (T - T_c) + G_c - 1 &= \\ &= \frac{W_D}{V \gamma_0 G_s} (G_s - G_L) + G_L, \\ W_D &= \frac{V \gamma_0 G_s}{G_s - G_L} [(r_T - 1) + \\ &+ (G_c - G_L) - \varepsilon (T - T_c)]. \end{aligned}$$

El término $(G_c - G_L) - \varepsilon (T - T_c)$ depende solamente de la temperatura de calibración y de la temperatura del ensayo, por lo que conviene hacer ábacos, como se indican en la figura 4, en los cuales se lee directamente el valor de

$$\frac{M_T}{10^3} = (G_c - G_L) - \varepsilon (T - T_c).$$

Es corriente expresar la lectura del densímetro por H, I cuando el peso específico es 1,0111. Si se llama a esa lectura R_H , tendremos:

$$R_H = (r_T - 1) \cdot 10^3;$$

y haciendo el volumen de la suspensión de 1.000 centímetros cúbicos, resulta:

$$W_D = \frac{\gamma_0 G_s}{G_s + G_L} (R_H + M_T). \quad [4]$$

b) *Corrección por el menisco formado alrededor de la varilla del densímetro.*—En la práctica es imposible hacer la lectura R_H (fig. 5), por lo que se lee R'_H , resultando

$$R_H = R'_H + C_m.$$

c) *Corrección debida a los agentes dispersi-*

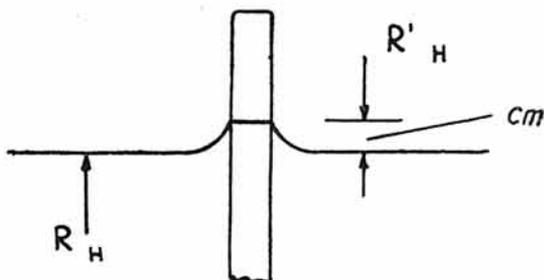


Figura 5.

vos.—La mayor dificultad que presentan estos ensayos es la debida a la adhesión entre las partículas de arcilla que se aglomeran en forma de grumos, al mismo tiempo que una gran parte de los granos quedan flotando en la superficie de la vasija por efectos capilares. Para evitar ambas cosas se agrega al agua un agente de dispersión, tal como el oxalato sódico; pero de esta manera se aumenta el peso específico del líquido. La corrección a hacer en este caso es la debida a la diferencia entre la densidad del agua y la densidad de la solución del oxalato sódico, diferencia que es de signo contrario a la corrección debida al menisco, compensándose ambas en algunos casos. Si llamamos C_a a esta corrección, y tomamos $G_L = 1,10$, lo que puede hacerse sin error sensible, tenemos que la ecuación (4) se convierte en

$$W_D = \frac{G_s}{G_s - 1} (R_H + M_T + C_a),$$

siendo

$$R_H = R'_H + C_m;$$

y expresando en %, tendremos:

$$\begin{aligned} \% \text{ en peso de los granos menores de } D &= \frac{W_D}{H} \times 100 = \\ &= \frac{100}{H} \times \frac{G_s}{G_s - 1} [R_H + M_T + C_a]. \quad 5 \end{aligned}$$

d) *Corrección debida al aumento de nivel en la vasija por la introducción del densímetro en el líquido.*—Al introducir el densímetro en el líquido aumenta el nivel en la vasija, debido al volumen desplazado por la ampolla del densímetro; por tanto, a la altura H medida en el densímetro, hace falta hacerle una corrección para encontrar la altura real H_R , que es la que han recorrido las partículas en su sedimentación.

Llamando L longitud de la ampolla.

V_H volumen de la ampolla.

A el área de la sección transversal de la vasija (fig. 3).

$$H_R + \frac{V_H}{A} = H + \frac{h}{2} + \frac{1}{2} \frac{V_H}{A};$$

de donde

$$H_R = H + \frac{1}{2} \left(h - \frac{V_H}{A} \right). \quad [6]$$

Empleo de ábacos.—Para evitar operaciones enojosas se puede emplear en todo el análisis el ábaco de la figura 6 de la siguiente manera: Conocido el peso específico del terreno se toma en la escala *S*, y la temperatura en la escala *T*; la recta que los une nos dará en la escala *B* el valor de

$$B = \frac{1.800 \eta}{G_s + G_L}.$$

En la escala *R_H* se toma la lectura del densímetro, y en la *t* el tiempo transcurrido desde el comienzo del ensayo; la recta que une estos dos nos dará a conocer la velocidad de sedimentación, en la escala *V*, y, uniendo *V* con *B*, la escala *D* nos hará conocer el diámetro $D = \sqrt{VB}$ de tamaño de granos.

Por otra parte, conocida la temperatura de ensayo por los ábacos (fig. 4), se averigua *M_T*, y, midiendo también *C*, la ecuación (5) nos da el % de partículas menores de *D*.

Curvas de composición granulométrica.—Conociendo por los análisis anteriores los % en peso de los granos menores de un cierto diámetro, *D*—hallados, bien por tamizado o por la ley Stokes—se traza la curva (fig. 7), de composición granulométrica, indicando las abscisas el tamaño de granos en escala logarítmica y las ordenadas los % en peso de granos menores de *D*.

PLASTICIDAD DE LOS TERRENOS.—Se llama plasticidad a la propiedad que presentan los terrenos de poder deformarse sin romperse y sin presentar resistencia elástica.

Las arcillas tienen esta propiedad en grados variables, y la explicación más satisfactoria de la misma se debe al profesor Goldschmidt. Según éste, las partículas de arcilla son de forma escamosa, de tamaño muy pequeño, y actúan como condensadores, con carga negativa en su superficie. Las moléculas bipolares de agua se orientan (fig. 8) con sus polos positivos dirigidos hacia la arcilla, ejerciendo la atracción eléctrica una cierta cohesión en una gruesa capa de agua que rodea los granos de arcilla, y que se conoce con el nombre de "agua solidificada". Goldschmidt demostró: 1.º, que las mezclas de

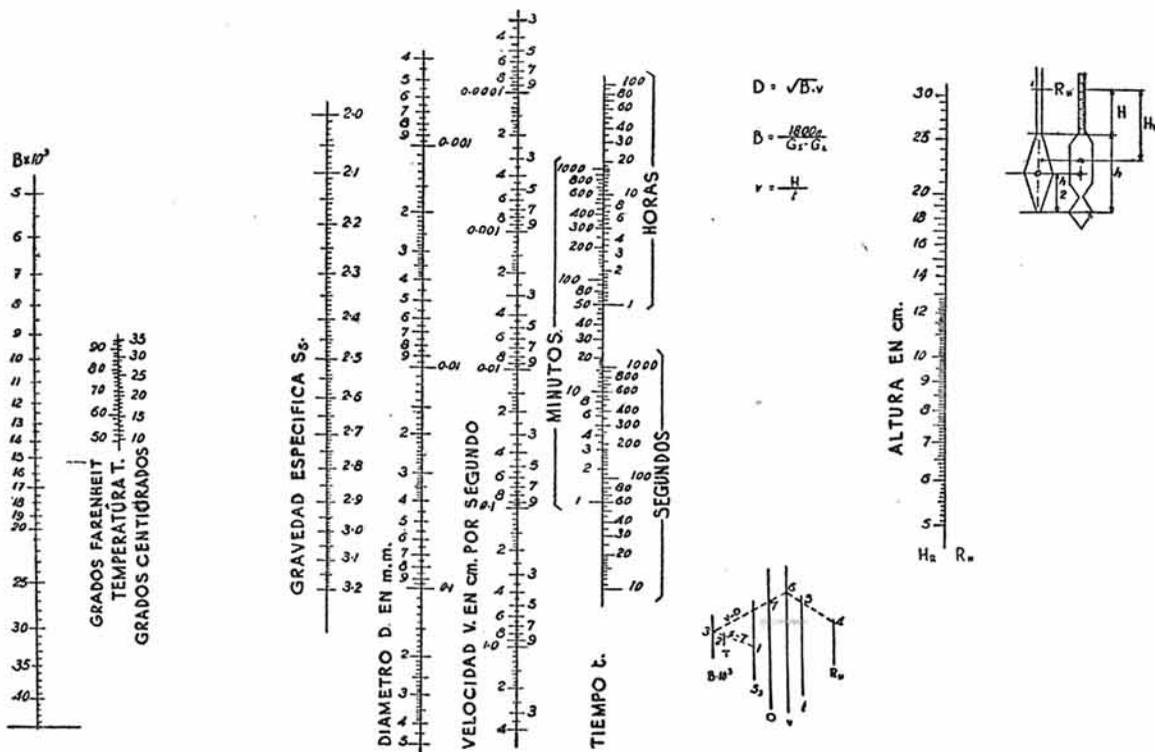


Figura 6.

ANALISIS MECANICO DE TIERRAS

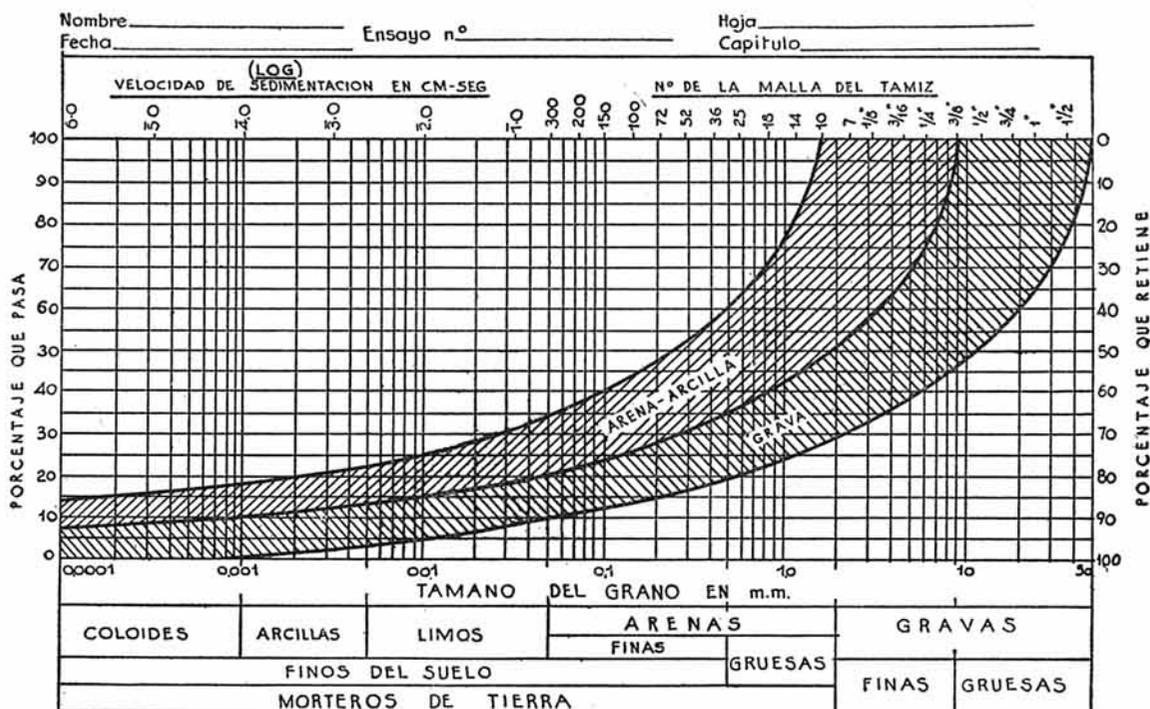


Figura 7.

arcilla con líquidos monopolares no tienen plasticidad alguna; 2.º, que las mezclas de arenas cuarzosas con líquidos bipolares no tienen plasticidad para tamaños de granos menores de 0,2 micras, y que con tamaño mucho menores la plasticidad es apenas perceptible; 3.º, las partículas de mica de tamaño menores de 0,2 micras presentan en sus mezclas con líquidos bipolares una plasticidad apreciable.

Es decir, que la plasticidad es tanto mayor cuanto más arcilla tienen los terrenos y cuanto más pequeño es el tamaño del grano.

MEDIDA DE LA PLASTICIDAD.—LÍMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG.—La plasticidad de un terreno se puede medir por el contenido de agua del mismo en el estado que se considere.

Define Atterberg un gran número de consistencias de terrenos del siguiente modo:

- 1.º Estado líquido, en el que las partículas están en suspensión en el agua.
- 2.º Estado semilíquido, en el que el terreno tiene consistencia viscosa.
- 3.º Estado plástico, en el que presenta la cohesión correspondiente a la plasticidad.

- 4.º Estado semisólido.
- 5.º Estado sólido.

Estos estados y el punto de separación de unos y otros los define Atterberg por medio de:

- a) Límite líquido o límite de fluidez.
- b) Límite plástico.
- c) Límite de contracción.



Figura 8.

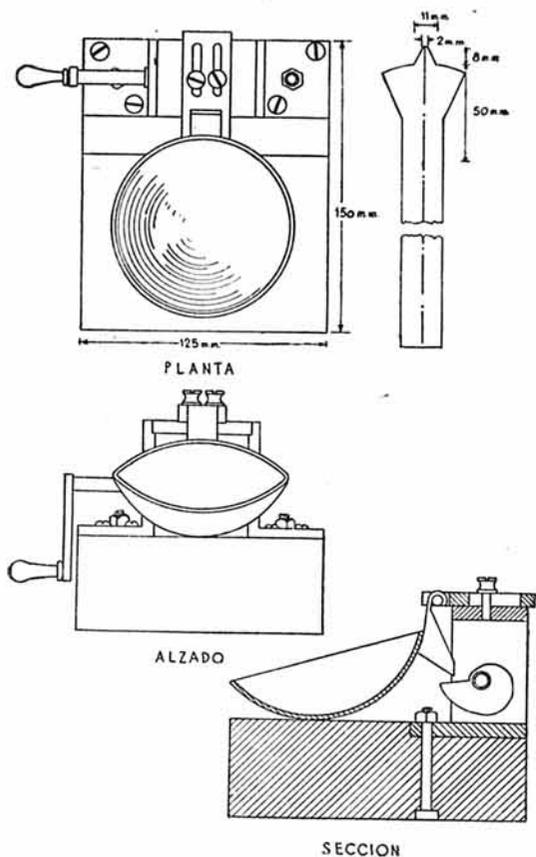


Figura 9.

a) *Límite líquido o límite de fluidez.*—(LL). Se define como la cantidad máxima de agua que puede contener un terreno conservándose en estado plástico. Este límite marca la separación entre el estado plástico y semilíquido, y se mide por medio del aparato de A. Casagrande, que consiste (fig. 9) en una cazoleta, que se rellena con 100 ó 200 gramos de mezcla de terreno con agua, y por un sencillo mecanismo se deja caer varias veces desde la altura de un centímetro sobre una base de ebonita.

En la muestra se traza una ranura de 2 milímetros de espesor y un centímetro de altura, la cual, al cabo de 25 golpes, debe cerrarse en una longitud de un centímetro. El ensayo se realiza por tanteos, empleando más o menos cantidad de agua hasta que se obtenga la mezcla en las condiciones exigidas. Hecho esto se pesa la muestra y se deseca en una estufa a 110°, volviéndola a pesar; por la diferencia entre el peso con agua y el peso en seco tendremos el tanto por ciento en peso, al que se llama límite líquido.

El límite líquido varía en cantidades enormes,

aumentando cuando es mayor la cantidad de arcilla y de productos orgánicos. Así, las arcillas llegan a tener un límite líquido de 80 por 100; las margas, del 25 al 40 por 100; las arenas, del 20 por 100, y los terrenos orgánicos, hasta el 250 por 100.

b) *Límite plástico.*—Se define por la cantidad de agua que admite un terreno en el punto de paso de estado sólido al plástico. Corresponde éste a la mezcla con la mínima cantidad de agua necesaria para que pueda hacerse con la palma de la mano un cilindro de 3 mm. de diámetro sin romperse. Para averiguarlo se coloca la muestra, con bastante cantidad de agua, sobre un papel secante, y se le va haciendo rodar con la mano hasta que se rompe; en este momento se pesa, con lo que se verá el % de agua que indica el límite plástico.

Índice de plasticidad.—(I-P). Se llama así a la diferencia que existe entre los límites líquidos y plásticos.

Está ligado este índice de plasticidad con el valor del rozamiento interno del terreno o ángulo de rozamiento, que mide la resistencia al esfuerzo cortante del terreno.

Los límites líquidos y plásticos y el índice de plasticidad dan una idea clara de los suelos. En tipos de terrenos ligeros y desmenuzables el índice de plasticidad es bajo; en cambio, en arcillas untuosas el valor de este índice es alto, pudiéndose llegar sólo con el índice de plasticidad a una primera clasificación en: a), arcillas pesadas, de $IP > 20$; b), arcillas con limo, de IP entre 10 y 20; c), arcillas arenosas y arenas arcillosas, limos, arenas, etc., etc., de IP menor de 10.

c) *Límite de contracción.*—(L-C). Se define éste como la cantidad máxima de agua que puede retener un terreno cuando, al perderla, el cambio de volumen que experimenta es inapreciable; es decir, que indica la cantidad de agua con la que el terreno adquiere un volumen mínimo. Corresponde este límite al punto de paso del estado semisólido al sólido, y se determina midiendo el volumen de la muestra, que se deseca primero al aire y luego a 125°, hasta tener peso constante. Su contracción será:

$$R = \frac{\text{Volumen inicial} - \text{volumen final}}{\text{Volumen inicial}} \times 100.$$

Haciendo varias pruebas de diferentes cantidades de agua, llegaremos a obtener el límite de contracción, viendo la cantidad de agua que contiene la prueba $R = 0$.

Analizando la curva de contracción de un suelo, se ve (fig. 10) que a partir de un cierto punto (en este caso del 12 al 14 por 100) el volumen varía de una manera apreciable, y este es el punto que se toma como límite de contracción. Dicho límite de contracción varía en los terrenos del 0 al 30 por 100.

PERMEABILIDAD DEL TERRENO.—La permeabilidad del terreno está definida, como en otros materiales, por el agua que pasa por unidad de superficie y de tiempo, a través de una probeta, sometiéndola a un gradiente hidráulico unidad. Se ha demostrado que esta permeabilidad varía inversamente con la suma de las superficies de las partículas por unidad de volumen. Esta superficie es tanto mayor cuanto más pequeños son los granos y cuando menos se aproximan a la forma esférica.

En los análisis de terrenos se puede medir la permeabilidad por medio de la humedad centrifuga y por la humedad del campo.

La humedad centrifuga HC.—Es la cantidad de agua en % del suelo seco que contiene una mezcla, saturada previamente y sometida durante una hora, en una máquina centrifugadora, a una aceleración de 1.000 g. El agua tiende a escapar por la fuerza centrifuga y por la compresión entre las partículas, oponiéndose a ello la capilaridad y la impermeabilidad. Da, por tanto, la humedad centrifuga una idea de la permeabilidad del campo, ya que a menor humedad centrifuga corresponden suelos más permeables. Las arcillas, coloides, etc., etc., retienen una gran cantidad de agua en prueba.

La humedad del campo H. E. C.—Se define como la proporción mínima de agua—en % en peso del suelo seco—que debe tener un te-

rreno para que no absorba una gota de agua en un corto espacio de tiempo. Se mide mediante una cápsula de terreno húmedo, en la que se deposita la gota, y se observa si es absorbida en menor tiempo de 30 s. Se continúa agregando gotas hasta que tarde 30 s. en absorberla; en este momento se mide el % de agua contenida en la cápsula, que es la que indica la humedad del campo.

Este grado de humedad determina, en cierta aproximación, la cantidad de agua que puede ser absorbida por el terreno en caso de lluvia. Da con ello idea, no sólo de la permeabilidad, sino de la mayor o menor facilidad para la formación del barro, ya que si la humedad del campo es mayor que el límite plástico, el suelo se convertirá en barro, y si es menor se conservará sólido.

Composición de los terrenos, deducida de la plasticidad, permeabilidad y relación entre las diferentes constantes.—Del conocimiento de las constantes físicas halladas anteriormente se puede deducir en algunos casos la presencia de ciertos componentes del terreno y su forma.

Así, cuando:

1.º $IP = 0$ y $LL = 10$ a 14 , las arenas son redondeadas.

2.º $IP = 0$ y $LL = 30$ a 35 , las arenas son angulares.

3.º $LL > 35$, $IP \approx \frac{LL - 14}{1,06}$ y $L.C = \frac{218 - LL}{10,4}$ indica la existencia de coloides activos.

4.º $LC = \frac{LL + 26}{1,24}$ indica la presencia de micas y diatomeas.

5.º $HC \approx \frac{LL - 14}{0,25}$ los terrenos son muy coloidales.

Por medio de las figuras 11, dadas por Plumber y Dove, se puede averiguar también la presencia de ciertos elementos en los terrenos, conociendo sus constantes físicas.

CLASIFICACIÓN DEL TERRENO PROPUESTA POR LA U. S. "PUBLIC ROADS ADMINISTRATION".—De acuerdo con los análisis anteriores, propone la "Public Roads" la clasificación de los terrenos en ocho grupos, del A-1 al A-8, con arreglo a las siguientes características:

Grupo A-1.—Suelos arenosos con algo de arcilla; de composición granulométrica muy regu-

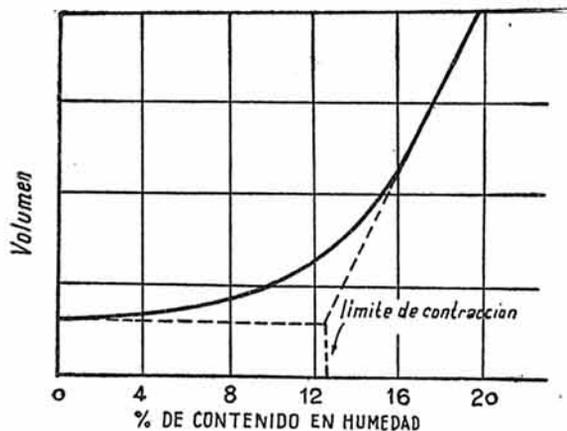


Figura 10.

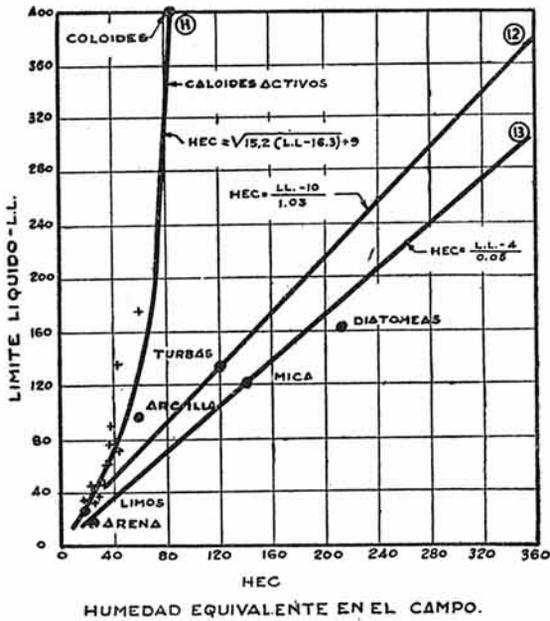
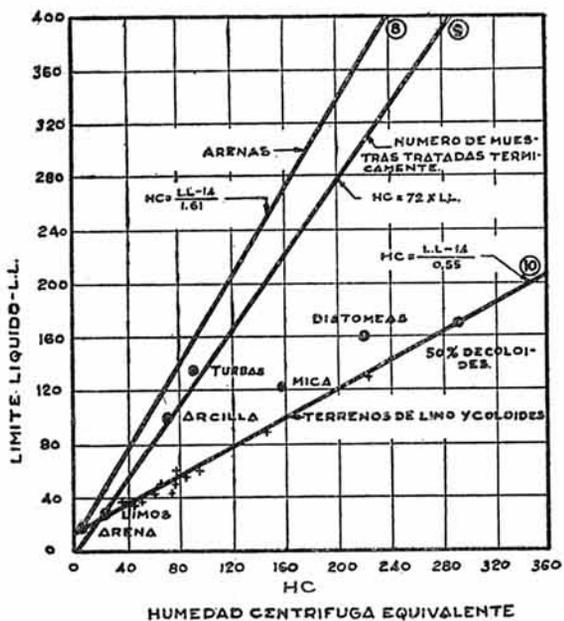
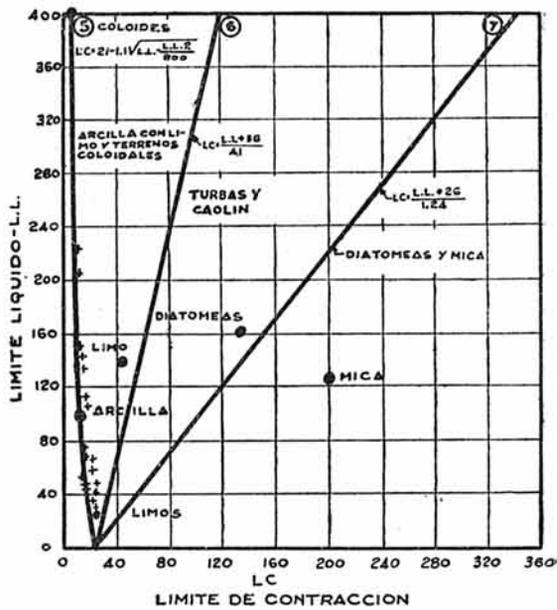
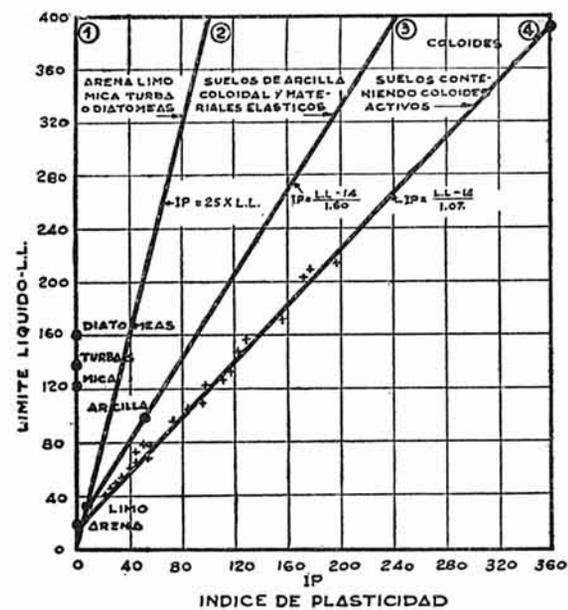


Figura 11.

lar y bien graduada; muy estables bajo presiones de cargas con cualquier grado de humedad; prácticamente impermeables, admitiendo excelente consolidación. Se encuentran difícilmente en estado natural.

Grupo A-2.—Suelos arenosos con algo de arcilla, de composición gránulométrica con graduación inadecuada, dominando los finos. Son

estables con algo de humedad; las variedades viables se pulverizan completamente secas; en cambio, las otras son muy estables con sequedad. Se reblandecen con altas cantidades de agua y se compactan bien como firmes cuando su proporción en gravas es muy fuerte. De permeabilidad variable, admiten buena consolidación con tractores y rodillos de goma.

Grupo A-3.—Suelos arenosos sin arcillas; compuestos, por tanto, de grava, arenas y limos. Tienen poca estabilidad bajo la acción de cargas, pero no resultan afectados por la humedad. Se comportan regularmente como firmes, bien como cimientos, y admiten buena consolidación con tractores y rodillos de goma.

Grupo A-4.—Suelos caracterizados por un gran predominio de limo y muy poca cantidad de arcilla; pierden la estabilidad rápidamente con el agua; no son utilizables como firmes, y

como cimientos se comportan de regular a mal. Son muy permeables y admiten una regular consolidación con apisonadora.

Grupo A-5.—De características análogas a los anteriores, teniendo, además, en su composición arcilla coloidal y materia orgánica. Se hunden bajo la acción de cargas, no debiendo utilizarlos ni como firmes ni como cimientos. Admiten muy poca consolidación con apisonadoras.

Grupo A-6.—Suelos caracterizados por su composición a base de arcilla sin gravas. Son

TABLA II
CARACTERISTICAS DE SUELOS DE LA CLASIFICACION DE "PUBLIC ROADS"

GRUPO	A.1.	A.2		A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
		DELEZNABLE	PLASTICO						
PROPIEDADES GENERALES DE ESTABILIDAD	MUY ESTABLE EN TODAS LAS EPOCAS	ESTABLE EN SECO	ESTABLE	IDEAL PARA CAPAS PROTEGIDAS DE LA HUMEDAD	SATISFACTORIO CUANDO ESTA SECO. PIERDE ESTABILIDAD HUMEDO Y CON EL HIELO.	DIFICIL DE COMPACTAR. ESTABILIDAD MUY DUDOSA.	BUENA ESTABILIDAD CON COMPACTACION APROPIADA.	BUENA ESTABILIDAD CON COMPACTACION APROPIADA	INESTABLE HASTA IMPERMEABILIZARSE. NO ADMITE CARGA
CARACTERISTICAS	FRICCIÓN INTERNA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	VARIABLE	VARIABLE	BAJA	BAJA
	COHESION	ALTA	BAJA	ALTA	NINGUNA	VARIABLE	BAJA	ALTA	BAJA
	CONTRACCION	POCA	INSIGNIFICANTE	MUCHA, POBREMENTE GRADUADA.	INSIGNIFICANTE	VARIABLE	VARIABLE	BASTANTE	BASTANTE
	DILATACION	NINGUNA	NINGUNA	ALGUNA	LIGERA	VARIABLE	ALTA	ALTA	BASTANTE
		NINGUNA	NINGUNA	ALGUNA	LIGERA	BASTANTE	ALTA	ALTA	BASTANTE
CONTENUTURA	GRADUACION GENERAL	GRADUACION UNIFORME DE C Y FIROS, BUEN AGLUTINANTE	GRADUACION POBRE AGLUTINANTE	GRADUACION POBRE AGLUTINANTE INFERIOR.	MATERIAL CRUESO SOLO SIN AGLUTINANTE	ARENA FINA LIMO POCO COHESIVO Y ARCILLAS DILATABLES	MICA Y DIATOMEAS	ARCILLAS COHESIVAS IMPERMEABLES	ARCILLAS PERMEABLES DRENABLES
	LIMITES	ARENA %	70-89	55-80	75-100	55 MAX.	55 MAX.	55 MAX.	55 MAX.
		LIMO %	10-20	0-45	0-45	(*)	ALTO	MEDIO	MEDIO
		ARCILLA %	5-10	0-45	0-45	(*)	BAJO	BAJO	30 MIN.
CONSTANTES FISICAS	LIMITE LIQUIDO	14-35**	35 MAX	35 MAX	ER % *	20-40	35 MIN	35 MIN	
	INDICE DE PLASTICIDAD	4-9 **	S.P. * 5 %	3-15	S.P. * %	0-15	0-60	10 MIN	
	HUMEDAD EQUIVALENTE EN EL CAMPO	NO ESENCIAL	NO ESENCIAL	NO ESENCIAL	NO ESENCIAL	30 MAX	30-120	30 MAX	
	CONTENIDO EQUIVALENTE EN HUMEDAD	15 MAX	12-25	25 MAX	12 MAX	NO ESENCIAL	NO ESENCIAL	NO ESENCIAL	
	LIMITE DE CONTRACCION	14-20	15-25	25 MAX	NO ESENCIAL	20-30	30-120	6-14	
	RELACION DE CONTRACCION	1.7-1.9	1.7-1.9	1.7-1.9	NO ESENCIAL	1.5-1.7	0.7-1.5	1.7-2.0	
	CAMBIO DE VOLUMEN	0-10	0-6	0-16	NINGUNA	0-16	0-16	17 MIN	
	CONTRACCION LINEAL	0-3	0-2	0-4	NINGUNA	0-4	0-4	5 MIN	
CARACTERISTICAS DE COMPACTACION.	TECADO MAXIMO AGUA EN LIBRAS POR PIE CUBICO	130 MIN	120-130	120-130	120-130	110-120	80-100	80-110	
	HUMEDAD OPTIMA	9	9-12	9-12	9-12	12-17	22-30	17-26	
	COMPACTACION MAX. A EXIGIR EN EL CAMPO % AGUA MAX. EVAPORACION EN LIBRAS POR PIE CUBICO	90	90	90	90	95	100	100	
	ESPESOR TOTAL REQUERIDO PARA CIMENTACION FIRME O PAVIMENTO EN PULGADAS	0-6	0-6	2-8	0-6	9-18	9-24	12-24	

* % QUE PASA POR EL TAMIZ N° 200 DE O A 10.

** 3 CUANDO SE USA COMO RELLENO PARA SUPERFICIES DELGADAS EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL LIMITE LIQUIDO NO ESCUDERAN DE 6 Y 25

*** S.P. = SIN PLASTICIDAD.

estables sin agua, y su empleo no conviene ni como firmes ni como cimientos, admitiendo muy poca consolidación.

Grupo A-7.—Compuestos de arcillas, con parte coloidal y materia orgánica. No conviene su empleo ni como cemento ni como firme, admitiendo una malísima consolidación. Los vehículos dejan al pasar las huellas marcadas.

Grupo A-8.—Caracterizado por su composición de arcillas y limos con mucha materia orgánica; son muy inestables y no se pueden emplear ni como firmes ni como cimientos, no admitiendo, además, consolidación de ninguna clase.

El resto de características se especifican en la tabla II.

CLASIFICACIÓN DEL TERRENO PROPUESTA POR "U. S. ENGINEERS".—Diferenciándose demasiado los grupos de la anterior clasificación y precisándose muchos ensayos para poder llegar a la identificación de un suelo, la "U. S. Engineers" ha propuesto la indicada en las tablas III y IV, marcándose en la clasificación la característica que poseen los diferentes terrenos.

Como auxiliar de las tablas puede servir el

ábaco de la figura 12, dado a conocer por la "U. S. Engineers", y los de la figura 13, dados por Plummer y Dove.

CLASIFICACIÓN DE SUELOS DEL C. A. A.—La "Civil Aeronautic Administration" ha adoptado para la clasificación de los suelos diez grupos, del E-1 al E-10, los cuales tienen las siguientes características:

E-1.—Terrenos compuestos casi exclusivamente de gravas y arenas, careciendo de estabilidad si no tienen un cierto grado de humedad; de cambio de volumen inapreciable y poca permeabilidad, sirviendo perfectamente como cimientos de cualquier clase de firme.

E-2 y E-3.—Compuestos de materiales bien graduados, desde gruesos a finos, teniendo en su mezcla una conveniente proporción de aglomerante; altamente estables, y no tienen prácticamente cambio de volumen. Soportan perfectamente las cargas y se comportan muy bien empleándolos como firmes.

E-3 y E-4.—Compuestos de gravas, arenas y aglomerantes, pero dominando en éstos las arcillas, por lo que se comportan peor que los firmes anteriores. Son altamente estables con poca

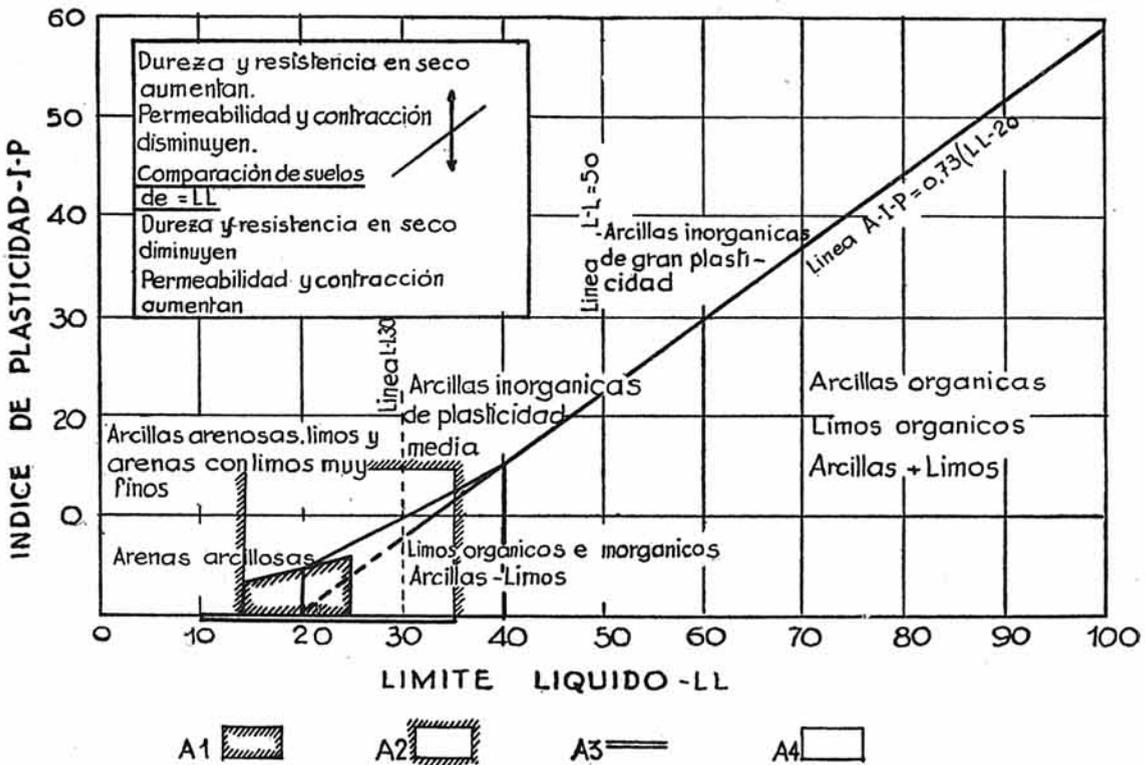


Figura 12.

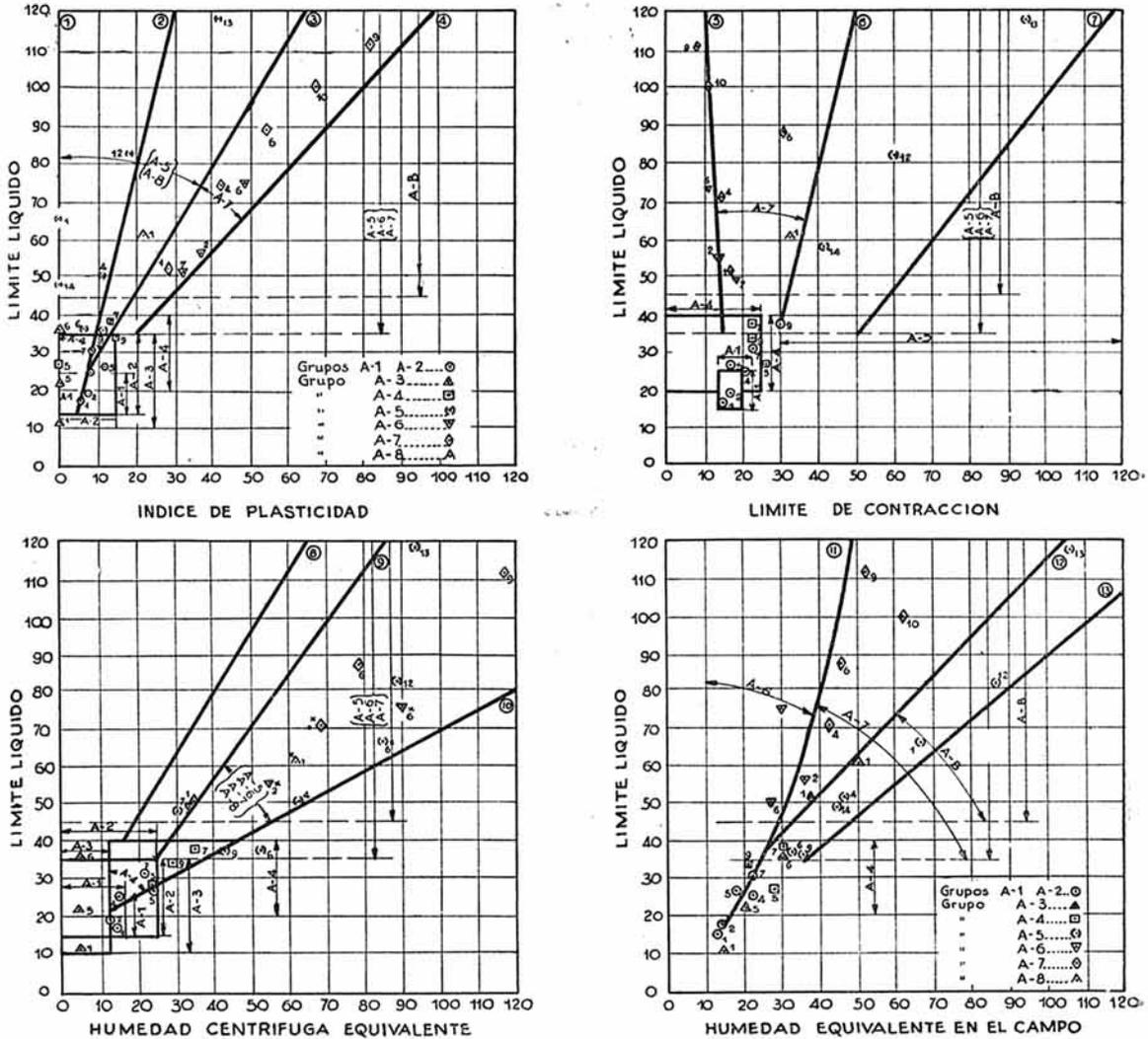


Figura 13.

TABLA III

ESQUEMA GENERAL DE CLASIFICACION DE TERRENOS PARA LA CONSTRUCCION DE AERODROMOS

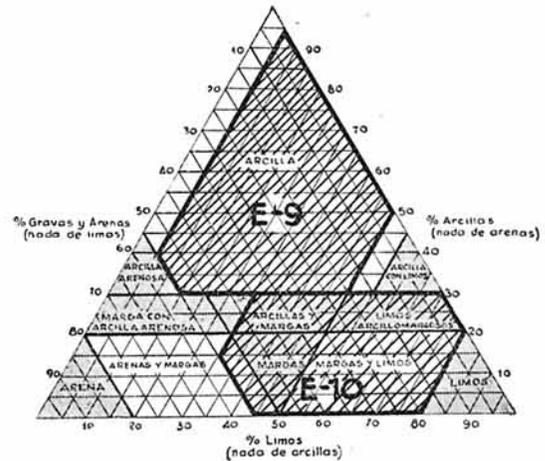
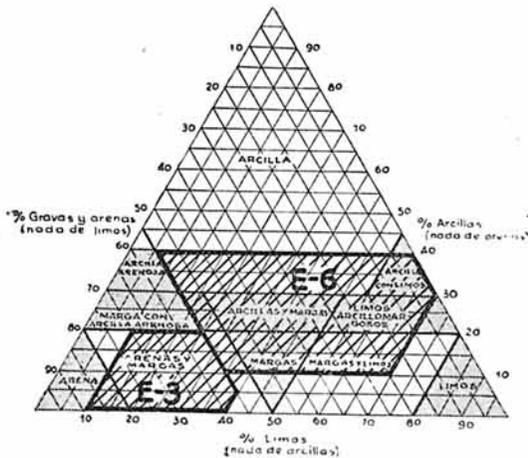
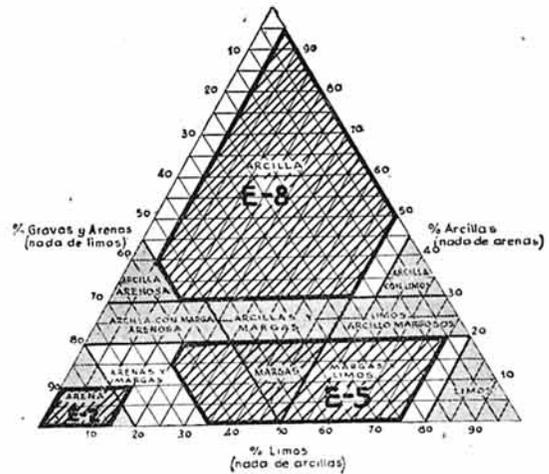
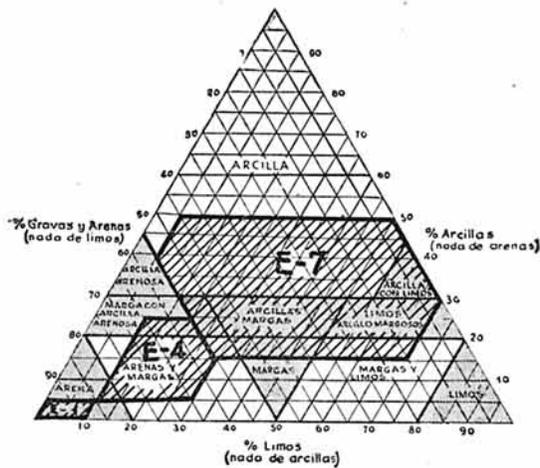
TIPO	NOMBRE	NATURALEZA
Terrenos de granulado grueso	Grava y cascajo.	GW Buena graduación, regularmente limpias.
		GC Buena graduación, arcilla aglomerante.
		GP Pobre graduación, regularmente limpias.
		GE Exceso de finas.
Terrenos de granulado fino	Arenas y areniscas	SW Buena graduación, regularmente limpias.
		SC Buena graduación, arcilla aglomerante.
		SP Pobre graduación, regularmente limpias.
		SE Exceso de finas.
Turba y terrenos muy orgánicos y anegados	Limos, arenas muy finas, polvo de roca.	ML Baja compresibilidad, limo, polvo de roca, arena arcillosa fina.
		MH Alta compresibilidad, limo o arena fina con micáceas y diatomeas.
		CL Baja compresibilidad, plasticidad media, arcillas con arena y limo.
		CH Alta compresibilidad, alta plasticidad, arcillas grasas y pesadas.
		OL Baja compresibilidad, limos orgánicos.
	OH Alta compresibilidad, media o alta plasticidad, arcillas orgánicas.	
	Pt Muy alta compresibilidad.	

1	2	3	4		5	6	
			IDENTIFICACION GENERAL				
Divisiones principales	Grupos de terrenos y características.	Simbolos de cada grupo	Resistencia en seco	Otros análisis convenientes	Observaciones y pruebas relacionadas con el material en el campo.	Ensayos para la clasificación (sobre muestras alteradas)	
Suelos de granulado basto.	Suelos de grava y pedregosos.	Grava bien graduada y mezclada; grava y arena; poco o ningún material fino.	GW	Ninguna.	Graduación y forma del grano.	Peso por unidad en seco; proporción de huecos; grado de consolidación, ligazón, estabilidad de los granos, estratificación y características del drenaje; condiciones del agua subterránea; prueba de tráfico; pruebas de carga a tamaño natural o por el método de California.	Análisis mecánico.
		Mezclas de arcilla, arena y grava, bien graduadas con excelente aglomerante.	GC	De media a alta.	Graduación, forma del grano, análisis del aglomerado húmedo y seco.		Análisis mecánico; límites plástico y líquido sobre el aglomerante.
		Gravas mal graduadas y mezclas de arena y grava; poco o ningún material fino.	GP	Ninguna.	Graduación y forma del grano.		Análisis mecánico.
		Grava con finos; grava con mucho limo; grava arcillosa; mezcla de grava, arena y arcilla, mal dosificadas.	GF	De muy ligera a alta.	Graduación, forma del grano, análisis del aglomerado húmedo y seco.		Análisis mecánico; límites plástico y líquido sobre el aglomerante, si se utiliza.
	Suelos de arena y arenosos.	Arenas bien graduadas y arenas pedregosas; poco o ningún material fino.	SW	Ninguna.	Graduación y forma del grano.		Análisis mecánico.
		Mezcla de arcilla y arena bien dosificada; excelente aglomerante.	SC	De media a alta.	Graduación, forma del grano, análisis del aglomerado húmedo y seco.		Análisis mecánico; límites plástico y líquido sobre el aglomerante.
		Arenas mal graduadas; poco o ningún material fino.	SP	Ninguna.	Graduación y forma del grano.		Análisis mecánico.
		Arenas con finos; arena con mucho limo; arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla, mal graduadas.	SF	De muy ligera a alta.	Graduación, forma del grano, análisis del aglomerado húmedo y seco.		Análisis mecánico; límites plástico y líquido sobre el aglomerante, si se aplica.
Suelos de granulado fino conteniendo poca o ninguna cantidad de granulado basto.	Suelos de granulado fino que tienen compresibilidad baja o media.	Limos inorgánicos y arenas muy finas; polvos de roca, arenas pulverizadas finas arcillosas o con limo con ligera plasticidad.	ML	De muy ligera a media.	Análisis húmedo y prueba de vibrado.	Peso por unidad en seco; contenido de agua y proporción de huecos; consistencia, inalterabilidad, pulverización, estratificación, hoyos de raíces, fisuras características de drenaje y agua subterránea; prueba de tráfico; pruebas de carga tamaño natural, a compresión o por el método de California.	Análisis mecánico; límites plástico y líquido, si es posible.
		Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad; arcillas arenosas, arcillas con limo, arcillas magras.	CL	De media a alta.	Análisis del grado de plasticidad.		Límites plástico y líquido.
		Limos orgánicos; arcillas y fangos orgánicos de baja plasticidad.	OL	De ligera a media.	Análisis del grado de plasticidad y olor.		Límites líquido y plástico en su condición natural y después de secado al horno.
	Suelos de granulado fino de elevada compresibilidad.	Micáceos o dictomáceos finos arenosos y suelos con limo; limos elásticos.	MH	De muy ligera a media.	Análisis húmedo y prueba de vibrado y plasticidad.		Análisis mecánico; límites líquido y plástico, si es posible.
		Arcillas inorgánicas de gran plasticidad; arcillas grasas.	CH	Alta.	Análisis del grado de plasticidad.		Límites líquido y plástico.
		Arcillas orgánicas de media o elevada plasticidad.	OH	Alta.	Análisis del grado de plasticidad y olor.		Límites líquido y plástico en condición natural y después de secado al horno.
Suelos orgánicos fibrosos de compresibilidad elevada.	Turba y otros suelos encenagados altamente orgánicos.	Pt	De fácil identificación.		Consistencia, contextura y contenido natural de agua.		

Leyenda para los grupos de símbolos.—C: arcilla; F: finos; G: grava; H: alta compresibilidad; L: compresibilidad baja a media; M: arena muy

E LOS TERRENOS

7 <i>Valor como cimentación cuando no esté sujeto a la acción de heladas</i>	8 VALOR COMO FIRME		9 <i>Efectos de las heladas</i>	10 <i>Contracción, expansión y elasticidad</i>	11 <i>Características del drenaje</i>	12 <i>Características de consolidación y equipo</i>	13 <i>Peso por m³ en lgs. y relación e de huecos</i>	14 <i>Pruebas de carga de California correspondientes a muestras consolidadas en hiemedo</i>	15 <i>Grupos correspondientes a la clasificación de "Public Roads"</i>
	<i>En estado natural</i>	<i>Con tratamiento superficial de betón</i>							
Excelente.	Regular a pobre.	Excelente.	Nulo o muy ligero.	Casi nada.	Excelente.	Excelente; tractor.	$\delta > 2.000$ $e < 0.35$	> 50	A-3
Excelente.	Excelente.	Excelente.	Mediano.	Muy ligera.	Prácticamente impermeable.	Excelente; apisonadora.	$\delta > 2.080$ $e < 0.30$	> 40	A-1
Bueno o excelente.	Pobre.	Pobre a regular.	Nulo o muy ligero.	Casi nada.	Excelente.	Bueno; tractor.	$\delta > 1.840$ $e < 0.45$	25-60	A-4
Bueno o excelente.	Pobre a bueno.	Regular a bueno.	Ligero a mediano.	Casi nada o ligera.	Regular a prácticamente impermeable.	Bueno; esencial una vigilancia estrecha de rodillos de ruedas de goma; tractor	$\delta > 1.920$ $e < 0.40$	> 20	A-2
Excelente a bueno.	Pobre.	Bueno.	Nulo o muy ligero.	Casi nada.	Excelente.	Excelente; tractor.	$\delta > 1.920$ $e < 0.40$	20-60	A-3
Excelente a bueno.	Excelente.	Excelente.	Mediano.	Muy ligera.	Prácticamente impermeable.	Excelente; apisonadora.	$\delta > 2.000$ $e < 0.35$	20-60	A-1
Regular a bueno.	Pobre.	Pobre.	Nulo o muy ligero.	Casi nada.	Excelente.	Bueno; tractor	$\delta > 1.600$ $e < 0.70$	10-30	A-3
Regular a bueno.	Pobre a bueno.	Pobre a bueno.	Ligero a alto.	Casi nada a mediana.	Regular a prácticamente impermeable.	Bueno; esencial una vigilancia estrecha de rodillos de ruedas de goma.	$\delta > 1.680$ $e < 0.60$	8-30	A-2
Regular a pobre.	Pobre.		Mediano a muy alto.	Ligera a mediana.	Regular a pobre.	Bueno a pobre; esencial una vigilancia estrecha de rodillos de ruedas de goma.	$\delta > 1.600$ $e < 0.70$	6-25	A-4 A-6 A-7
Regular a pobre.	Pobre.		Mediano a alto.	Mediana.	Prácticamente impermeable.	Regular a bueno; apisonadora.	$\delta > 1.600$ $e < 0.70$	4-15	A-4 A-6 A-7
Pobre.	Muy pobre.		Mediano a alto.	Mediana a alta.	Pobre.	Regular a pobre; apisonadora.	$\delta > 1.440$ $e < 0.90$	3-8	A-4 A-7
Pobre.	Muy pobre.		Mediano a muy alto.	Alta	Regular a pobre.	Pobre a muy pobre.	$\delta > 1.600$ $e < 0.70$	> 7	A-5
Pobre o muy pobre.	Muy pobre.		Mediano.	Alta	Prácticamente impermeable.	Regular a pobre; apisonadora.	$\delta > 1.440$ $e < 0.90$	< 6	A-6 A-7
Muy pobre.	Inutilizable.		Mediano.	Alta	Prácticamente impermeable.	Pobre a muy pobre.	$\delta > 1.600$ $e < 0.70$	< 4	A-7 A-8
Extremadamente pobre.	Inutilizable.		Ligero.	Muy alta.	Regular a pobre.	No consolidado prácticamente.			A-8



Figuras 14 a 17.

humedad; pero su estabilidad varía con la época del año.

E-5.—Suelos en los que existiendo gravas y arenas, tienen limos en gran proporción y arcillas coloidales en muy poca; de fuertes efectos de heladas.

E-6.—Terrenos con fuerte proporción de arcilla y con muy pocas cantidades de otras materias; son eminentemente cohesivos, cambiando bastante de volumen bajo la acción de la humedad.

E-7 y E-8.—Similares a los anteriores, pero mucho más deformables que los E-6, por contener materias orgánicas, micas, carbonato de cal y demás materias que producen gran inestabilidad.

E-9.—Suelos con mucha cantidad de turbas y abonos orgánicos, lo que los hace muy poco aprovechables en los aeropuertos por su inestabilidad y por la poca carga que pueden soportar.

E-10.—Similares a los E-5, pero peor graduados y con sustancias como mica y diatomas.

Sus características de carga y estabilidad son muy bajas.

El resto de las propiedades de estos suelos se especifican en la tabla V y en los gráficos figuras 14, 15, 16 y 17.

TABLA V
CLASIFICACION DE SUELOS DE C. A. A.

CLASE	Características del material que pasa por el tamiz núm. 10			Características del material que pasa por el tamiz núm. 40		
	Arena %	Limo %	Arcilla %	LL	IP	IC
E-1	> 85	0-10	0-5	< 25	0-6	0-6
E-2	> 75	0-15	0-10	< 25	0-6	0-6
E-3	> 55	10-40	0-20	< 35	0-10	0-10
E-4	> 55	10-30	5-25	< 45	5-15	5-15
E-5	< 65	20-75	0-20	< 45	0-10	0-15
E-6	< 55	5-70	10-40	< 50	10-30	10-30
E-7	< 55	5-70	15-50	< 60	15-40	20-40
E-8	< 55	5-30	30	< 70	20-50	30-50
E-9	< 55	5-30	30	< 80	30-60	40-60
E-10	< 55	30-80	30	> 60	0-25	>