

Elementos de Edafología y Edafotecnia

(Continuación)

1.º Generalidades.—2.º Granulometría.—3.º Constantes hídricas.—4.º Especificaciones americanas recientes.

Capítulo II.—Propiedades camineras de los suelos

1.º Generalidades.

Para que un suelo sea capaz de resistir a las solicitaciones que determina el tráfico, es preciso que posea ciertas propiedades, y que las posea en determinada magnitud.

Esas propiedades deben ser tales que proporcionen al suelo:

- a) *Máxima estabilidad.*
- b) *Mínima alteración de sus propiedades resistentes con los cambios climáticos*

El problema fundamental de la Edafotecnia Vial consiste en la determinación cualitativa y cuantitativa de las propiedades que proporcionan a los suelos las características a) y b).

2.º Granulometría.

Granulometría y porosidad son dos magnitudes que están íntimamente relacionadas: un suelo bien graduado permite un máximo relleno de huecos, una mínima porosidad; o, lo que es lo mismo, un máximo peso aparente.

Las propiedades camineras de un suelo son óptimas cuando se alcanza el máximo relleno de huecos, y este máximo se obtiene operando sobre la granulometría.

Un suelo bien graduado se compone de tres tipos de elementos granulométricos:

- a) *Fracción gruesa o esquelética.*—Sobre ella recae directamente la acción de las cargas; y es ella la que las transmite al subsuelo.

b) *Fracción fina o recebo*.—Ocupa los huecos que deja la fracción esquelética. Para que este relleno de huecos sea óptimo, es necesario que haya una relación entre las dimensiones de sus partículas y las de la fracción esquelética; y también entre las cantidades de una y otra fracción.

c) *Fracción cohesiva*.—El material finísimo arcilloso, cuyas propiedades activas ya han sido estudiadas en la Edafología, cubre con una película de espesor variable los agregados inertes y los liga. También la dosis de esta fracción, dentro del suelo, debe ser una función de sus propiedades.

En los suelos existe una relación entre estos factores:

- a) Resistencia mecánica y porosidad.
- b) Porosidad y Granulometría.

La influencia de la porosidad sobre la resistencia mecánica es clara: la fricción interna, la cohesión hídrica y la propia, dependen fundamentalmente del número de contactos entre las partículas; y estos contactos son tanto mayores cuanto menos huecos tiene el suelo.

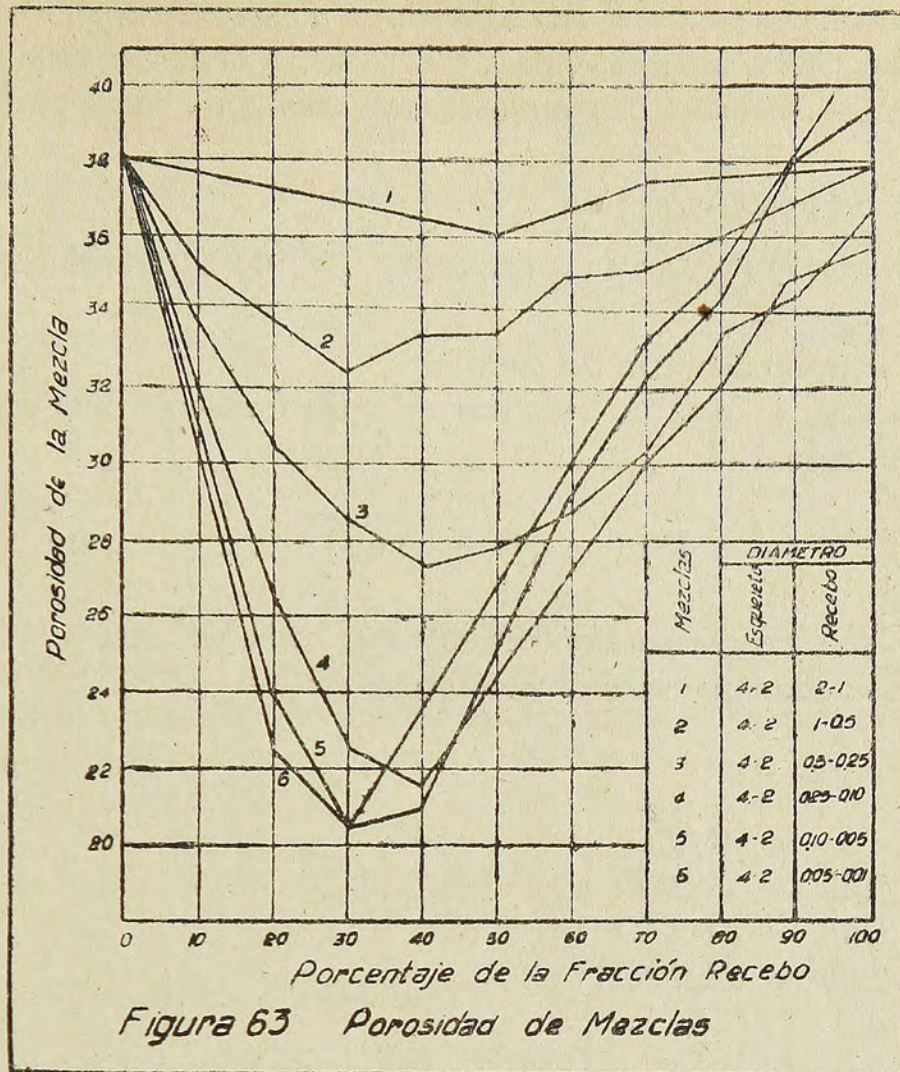
La porosidad de un suelo sin estructura depende de la forma de sus partículas y de su composición granulométrica. En los suelos con estructura, depende también de la forma y volumen de las unidades estructurales.

Las relaciones a) y b) han sido estudiadas empíricamente, analizando materiales de las mejores secciones de caminos existentes (Estudios del Bureau of Public Roads).

También tenemos ahora un procedimiento analítico para establecer esta relación, que se debe al profesor V. V. Ojotín.

La función porosidad—resistencia mecánica se estableció ensayando a la compresión probetas absolutamente secas, compuestas de 10% de arcilla y 90% de material inerte. El material inerte se descompuso en dos fracciones: fracción esquelética, de diámetro comprendido entre D y $1/2 D$; y fracción recebo, de diámetro comprendido entre d y $1/2 d$.

Las experiencias se realizaron haciendo variar la razón d/D ; y la proporción del recebo con respecto al material esquelético (manteniendo constante el 10% de arcilla). Los resultados se llevaron a gráficos semejantes al de la Figura N.º 63, que permitieron formular las siguientes leyes:



1.º La mínima porosidad se obtiene cuando el diámetro de la fracción recebo es $1/16$ del diámetro de la fracción esquelética:

$$d = 1/16 D$$

2.º La mínima porosidad se obtiene cuando la proporción en peso del recebo óptimo es $3/7$ de la fracción esquelética:

$$R = 3/7 E$$

- 3.º La porosidad de una mezcla de dos fracciones (esquelética y recebo) no aumenta por agregado de fracciones intermedias a condición de que cada una de esas fracciones intermedias tenga también su correspondiente recebo y de que las relaciones entre diámetros y cantidades en los nuevos pares de fracciones, sean las mismas que en el par original.
- 4.º La porosidad de una mezcla se mantiene próxima del mínimo, cuando su recebo óptimo ($d = 1/16 D$) existe en una proporción en peso no mayor que $2/3$ ni menor que $1/4$.
- 5.º La mezcla óptima caminera se obtiene en suelos que satisfacen estas leyes y cuya curva granulométrica es sensiblemente continua; es decir, en suelos que tienen fracciones intermedias.

Conocidas estas leyes, cabe ahora buscar una expresión analítica de la función granulométrica que las interprete. Para ello, vamos a dividir el suelo en fracciones. Cada fracción se compondrá de materiales cuyo diámetro mínimo será la mitad del máximo.

Las fracciones sucesivas serán:

$$D \text{ a } (1/2)D; (1/2)D \text{ a } ((1/2)^2D; (1/2)^2D \text{ a } (1/2)^3D; \text{ etc.}$$

D, es el máximo diámetro del suelo.

El porcentaje en peso de cada una de estas fracciones, será expresado como una serie de la forma:

$$P; —; qP; —; q^2P; —; q^3P; \dots \text{ etc.}$$

La suma de estos porcentajes, naturalmente, debe ser cien.

La relación entre diámetros y porcentajes es:

Fracción	Porcentaje
D a $(1/2)D$	P
$(1/2)D$ a $(1/2)^2D$	qP
$(1/2)^2D$ a $(1/2)^3D$	q^2P
$(1/2)^3D$ a $(1/2)^4D$	q^3P
.....	
.....	
$(1/2)^nD$ a $(1/2)^{n+1}D$	q^nP

Analicemos el cuadro que se termina de leer. Desde el punto de vista de sus diámetros, las fracciones están totalmente definidas. No ocurre lo mismo con los porcentajes, cuya expresión incluye dos cantidades desconocidas: q y P, que calcularemos aplicando las leyes que terminamos de conocer.

Consideremos una fracción cualquiera, cuyo diámetro es $(1/2)^kD$, y cuyo diámetro mínimo es $(1/2)^{k+1}D$. De acuerdo con la primera ley, el recebo óptimo es aquél cuyo diámetro es 16 veces menor que el del esqueleto; o sea:

$$1/16 [(1/2)^kD \text{ a } (1/2)^{k+1}D] = (1/2)^{k+4}D \text{ a } (1/2)^{k+5}D$$

Según el cuadro de la página anterior, el porcentaje de la fracción esquelética es:

$$p' = q^kP$$

y el relleno óptimo correspondiente debe ser:

$$p'' = q^{k+4}P$$

Ahora bien, de acuerdo con la segunda ley, el porcentaje de recebo en la mezcla óptima debe ser 3/7 del porcentaje de material esquelético; por lo tanto:

$$q^{k+4}P = 3/7 q^kP$$

De donde se obtiene:

$$q = 0,81$$

El valor de P puede ser calculado sobre la base de que la suma de los porcentajes de las fracciones debe ser cien:

$$P + qP + q^2P + q^3P + q^4P \dots + q^{n-1}P + q^nP = 100$$

Sumando:

$$\frac{P(q^n - 1)}{q - 1} = 100$$

Vemos que el valor de P, depende del tamaño relativo de las menores partículas del suelo (con relación al tamaño máximo), tamaño que está definido por n.

Si se acepta que este tamaño es despreciable, n puede considerarse infinito, y entonces la suma queda:

$$\frac{P}{1 - q} = 100$$

De donde, introduciendo el valor de q:

$$P = 19$$

Aplicando los valores de P y q en las series, resulta la composición granulométrica:

Fracción	Porcentaje
D a (1/2)D	= 19 %
(1/2)D a (1/2) ² D	0,81 · 19 = 15,4
(1/2) ² D a (1/2) ³ D	0,81 ² · 19 = 12,5
.....	
.....	
(1/2) ⁿ⁻¹ D a (1/2) ⁿ D	0,81 ⁿ⁻¹ · 19 =

De este cuadro se obtiene inmediatamente la curva granulométrica acumulativa del material:

Diámetro D	Porcentaje en peso de material de diámetro inferior a D
D	100,00
(1/2)D	81,00 (100,00 — 19,00)
(1/2) ² D	65,60 (81,00 — 15,40)
.....	
.....	

En la misma forma se pueden obtener las curvas granulométricas que definen los límites de buen comportamiento de los suelos (Porosidad aceptable). Para ello, basta con introducir en las fórmulas las condiciones de la cuarta ley:

$$q' = \sqrt[4]{1/4}$$

$$q'' = \sqrt[4]{2/3}$$

$$q' = 0,71$$

$$q'' = 0,90$$

Los correspondientes valores de P son:

$$P' = \frac{29}{1 - 0,71^n}$$

$$P'' = \frac{10}{1 - 0,90^n}$$

Daremos ahora a n un valor finito. Sea éste:

$$n = 16$$

Introduciendo este valor en las fórmulas que definen los valores de P

$$P' = 29$$

$$P'' = 12,28$$

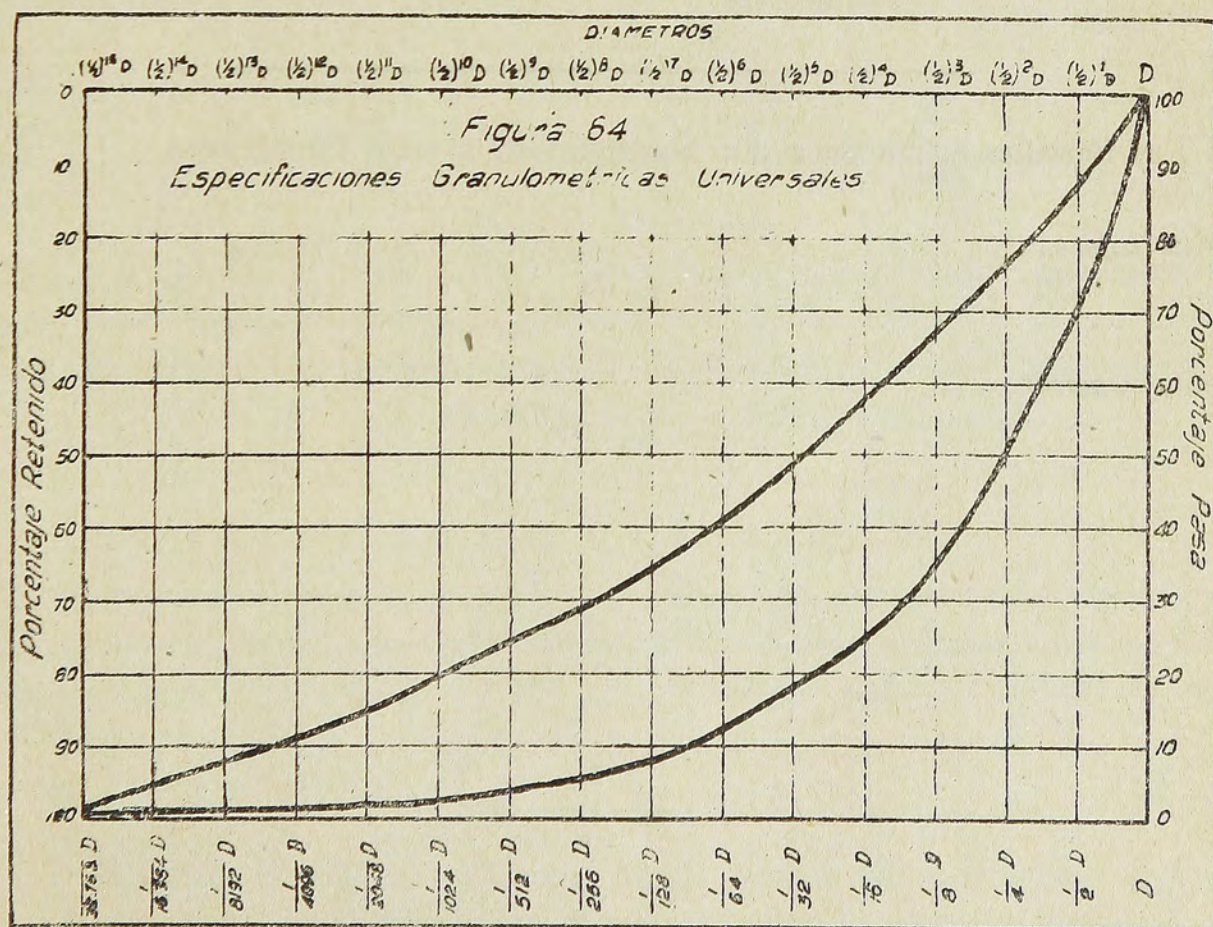
Repitiendo para este nuevo sistema de valores los cálculos hechos para obtener la granulometría de la mezcla óptima, resultan las siguientes curvas granulométricas límites, que pueden servir como especificaciones camineras:

Tanto el cuadro que va a continuación como los gráficos que lo interpretan son absolutamente generales: Poniendo valor al máximo diámetro D, se obtienen de inmediato las curvas granulométricas límites correspondientes a cualquier tamaño máximo.

En los gráficos basta con cambiar la escala de las abscisas para obtener las especificaciones límites de cualquier material.

ESPECIFICACIONES GRANULOMÉTRICAS OBTENIDAS
POR EL MÉTODO ANALÍTICO

LÍMITES		
Diámetro	Inferior	Superior
D	100,00	100,00
$(1/2)D$	87,72	71,00
$(1/2)^2D$	76,67	50,40
$(1/2)^3D$	66,73	35,78
$(1/2)^4D$	57,78	25,40
$(1/2)^5D$	49,73	18,03
$(1/2)^6D$	42,47	12,81
$(1/2)^7D$	35,95	9,10
$(1/2)^8D$	30,08	6,46
$(1/2)^9D$	24,80	4,59
$(1/2)^{10}D$	20,04	3,26
$(1/2)^{11}D$	15,72	2,32
$(1/2)^{12}D$	11,83	1,65
$(1/2)^{13}D$	8,32	1,17
$(1/2)^{14}D$	5,17	0,83
$(1/2)^{15}D$	2,32	0,59



CURVAS EXPERIMENTALES

Las instituciones camineras de diversos países han observado y experimentado con mucho interés el comportamiento de los suelos desde el punto de vista granulométrico.

Los resultados de estos estudios se han traducido en gráficos, que fijan los límites de máxima eficiencia; límites que se aproximan mucho a los que dedujimos analíticamente más atrás.

Los estudios más interesantes en esta materia son los realizados en Norte América, porque resumen un mayor número de casos experimentados u observados. A continuación anoto las especificaciones correspondientes a calzadas de grava, con material de una pulgada como máximo diámetro:

CONSTITUYENTE	PORCENTAJES	
	Mínimos	Máximos
Arcilla.....	2	6
Limo.....	6	11
Arena fina.....	12	18
Arena gruesa.....	10	20
Grava fina.....	27	45
Grava gruesa.....	43	—

Las fórmulas edafológicas que corresponden a estos límites son:

Límite inferior;

$$Z_{30} \quad g_{27} \quad G_{43}$$

Límite superior:

$$Z_{55} \quad g_{45} \quad G_0$$

Las especificaciones correspondientes a la calzada de arcilla y arena son:

CONSTITUYENTE	PORCENTAJES	
	Mínimos	Máximos
Arcilla.....	5	10
Limo.....	10	20
Arena fina.....	20	40
Arena gruesa.....	20	30
Grava fina.....	45	—

Las fórmulas edafológicas correspondientes a estos límites son:

Límite inferior

$$Z_{55} \quad g_{45} \quad G_0$$

Límite superior:

$$Z$$

En todas estas fórmulas, la composición del mortero varía dentro de límites estrechos:

Arena.....	70%	a	73%
Limo.....	17%	a	20%
Arcilla.....	7%	a	10%

Puede observarse, pues, que en la composición de las calzadas estabilizadas de mejor rendimiento, sólo tienen cabida una insignificante variedad de morteros óptimos Z. Esto es lógico: Sólo tienen cabida aquellas variedades cuya composición les permite calzar dentro de las curvas de mínima porosidad.

Para terminar, cabe hacer algunas observaciones relativas a la porosidad. Las mezclas buenas graduadas tienen porosidad menor que 5. Valores medios son los que fluctúan entre 5 y 20. Los suelos con porosidad mayor que 20 son malos.

3.º Constantes hídricas.

a) *Índice de Plasticidad*.—El índice de plasticidad más conveniente en los suelos de uso caminero, ha sido objeto de extensos estudios en varios países.

Así, los norteamericanos fijan para las calzadas de grava, un índice de plasticidad comprendido entre 4 y 12; y para las de arcilla-arena, uno cuyos límites son 3 y 9.

En Chile, el señor Oscar Tenhamm, haciendo observaciones a lo largo del país, ha establecido una fórmula que da el índice de plasticidad óptimo, en función de la granulometría y de la pluviosidad. Ella es aplicable a calzadas con base estabilizada y buenas condiciones de drenaje:

$$I = A (a/5 + b/10 + c/15)$$

I..... Índice de Plasticidad Optimo.

a..... Porcentaje de material mayor que 3/4 de pulgada y menor que 1 1/2 pulgadas.

b..... Porcentaje de material retenido en 10 mallas; y menor que 3/4 de pulgada.

c..... Porcentaje de material retenido en 200 mallas; y que pasa por 10 mallas.

A..... Coeficiente empírico que es una función de la precipitación pluviométrica local (Figura N.º 65).

Figura 65

AGUA CAIDA
en
m/ms.

COEFICIENTES EN RELACION CON LA
PRECIPITACION PLUVIOMETRICA PARA
LA FORMULA QUE DETERMINA EL INDI-
CE DE PLASTICIDAD OPTIMO

FORMULA PARA DETERMINAR EL I.P.

$$I.P. = A \left(\frac{a}{5} + \frac{b}{10} + \frac{c}{15} \right)$$

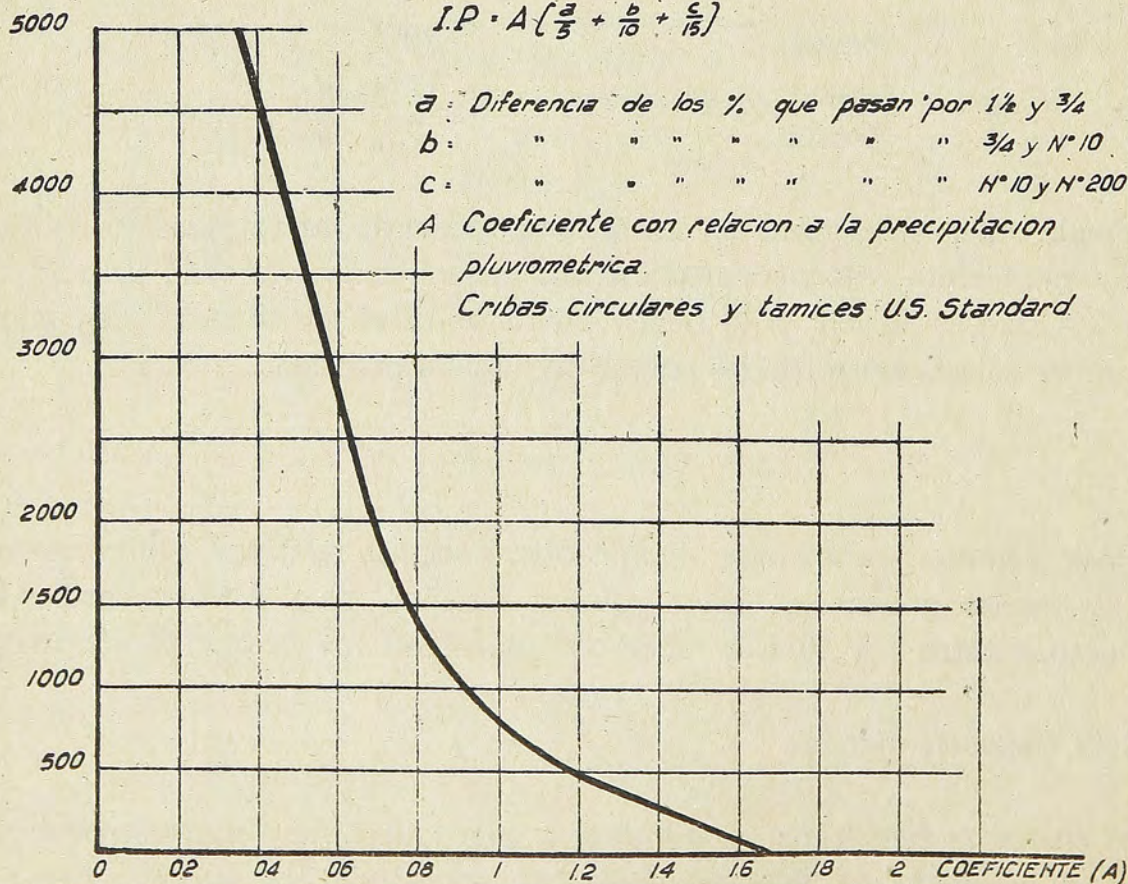
a: Diferencia de los % que pasan por 1/2 y 3/4

b: " " " " " " 3/4 y N.º 10

c: " " " " " " N.º 10 y N.º 200

A Coeficiente con relacion a la precipitacion
pluviometrica.

Cribas circulares y tamices U.S. Standard



b) *Límite Líquido*.—En general, todas las especificaciones aconsejan no pasar del límite líquido 35, en los suelos destinados a calzadas o a bases de calzada.

Si el suelo es capaz de absorber mucha agua antes de pasar al estado líquido, ello es un índice de la presencia de mica, diatómeas y sustancias de alta capilaridad y esponjosas. He tenido ocasión de observar en Chile suelos de esta clase, tan esponjosos, que su peso aparente era inferior a la unidad (Trumaos del Camino Internacional por Lonquimay).

c) *Humedad Pelicular*.—La humedad pelicular suele alcanzar valores altos en los suelos arcillosos; valores que llegan a ser mayores que la humedad del límite plástico.

Los suelos de esta clase pueden ser perjudiciales en calzadas elásticas; porque, como se recordará, no es necesario que la napa esté próxima para que el agua pueda llegar hasta la superficie y reblandecerla, haciéndola perder su poder de soporte.

De aquí, pues, que cuando la humedad pelicular es mayor que el límite plástico, se corre el riesgo de que napas subterráneas aparentemente no perjudiciales, afecten a la subrazante; y, por lo tanto, a los pavimentos.

d) *Equivalente de humedad*.—Esta constante mide aproximadamente la cantidad de agua que puede absorber un suelo en una lluvia. De aquí se desprende que, si el equivalente de humedad es menor que el límite plástico, la lluvia no hará salir al suelo de su estado sólido; y conservará su estabilidad.

Valores del equivalente de humedad superiores al límite plástico, son en cambio, perjudiciales en los suelos, porque en las lluvias se ponen plásticos y por lo tanto deformables.

e) *Humedad equivalente de centrífuga*.—Si esta constante es menor que el equivalente de humedad, ello significa que el suelo es capaz de mantener sus partículas separadas entre sí. Esta es una característica de los suelos expansivos, que son perjudiciales en caminos.

f) *Límite de Contracción*.—Son valores aconsejables los que fluctúan entre 14 y 20.

4.º *Especificaciones americanas recientes.*

Las últimas especificaciones americanas hacen una diferencia específica entre las características que debe tener la capa de base y la de rodado:

A. CAPAS DE RODADO.

TAMIZ		PORCENTAJES					
Pasan		Tipo A		Tipo B		Tipo C	
1".....		100		100			
3/4".....		—		85	100		100
3/8".....		—		65	100		—
4 mallas.....		—		55	85	70	100
10 m.....	65	100		40	70	35	80
20 m.....	36	90		—	—	—	—
40 m.....	23	70		25	45	25	50
200 m.....	5	25		10	25	8	25

El tipo A es un mortero de suelo; el B, un hormigón de suelo; y el C, un hormigón de suelos con agregados de materiales triturados. En todos ellos la fracción que pasa 200 mallas debe ser menor que $\frac{2}{3}$ del porcentaje de suelo fino; el cual deberá tener un límite líquido menor que 35, y un índice de plasticidad entre 4 y 9.

B. CAPAS DE BASE.

Las capas de base que corresponden a estas superficies de rodado, son las que se especifican en el cuadro que sigue y deben cumplir además con las siguientes condiciones.

La fracción que pasa el tamiz de 200 mallas, deberá representar menos de la mitad de la fracción que pasa 40 mallas, la cual no deberá tener un límite líquido mayor que 25, ni un índice de plasticidad mayor que 6.

TAMIZ		PORCENTAJES							
Pasan		Tipo A		Tipo B'		Tipo B''		Tipo C	
2".....						100			
1 1/2".....						70	100		
1".....				100		55	85		
3/4.....				70	100	50	80		100
3/8.....				50	80	40	70		—
4 m.....				35	65	30	60	70	100
10 m.....		100		25	50	20	50	35	80
20 m.....	55	90		—	—	—	—	—	—
40 m.....	35	70		15	30	10	30	25	50
200 m.....	8	25		5	15	5	15	8	25

(Continuará).