

Ing. Belisario Maldonado P.

Elementos de Edafología y Edafotecnia

(Continuación)

A) Características resistentes de los suelos, con humedad constante.—1.º Maneras de resistir de los suelos.—a) Cohesión.—b) Fricción. c) Traba mecánica.—2.º Poder portante.—3.º Deformaciones de los suelos.—B) Influencia de la humedad sobre la estabilidad de los suelos.—1.º Cohesión hídrica.—2.º Variaciones volumétricas causadas por el agua.—3.º Floculación de los suelos.—C) Influencia de la consolidación sobre la estabilidad de los suelos.—1.º Explicaciones.—2.º Influencia de la presión de compactación.—3.º Influencia del agua.—4.º Influencia de la temperatura.—5.º Influencia del tamaño y forma de las partículas.—6.º Influencia del tiempo.—7.º Influencia de las sales.—8.º Influencia de la manera de compactar y de la persistencia de la acción compactante.

Capítulo III.—Estabilidad de los suelos

La tierra—el material que forma los suelos—se caracteriza, desde el punto de vista de su estabilidad, porque no la tiene constante. Su capacidad para resistir sin disgregarse los efectos de acciones mecánicas exteriores, depende de un factor esencialmente variable: La humedad actual.

Todo estudio de Estabilidad de Suelos debe constar de tres partes:

A.—Características resistentes de los suelos, aceptando que se mantiene inalterable la humedad;

B.—Variación de las características resistentes de los suelos en función de la humedad.

C.—Variación de las características resistentes con la consolidación.

A.—CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE LOS SUELOS, CON HUMEDAD CONSTANTE.

1.º *Maneras de resistir de los suelos.*

Ya hemos expresado que todas las características de los suelos resultan funciones de las propiedades de sus elementos granulométricos y de la porcentualidad de la mezcla.

La estabilidad de un suelo frente a las acciones exteriores, resulta de tres maneras de reaccionar: La cohesión, la fricción y la traba mecánica.

Cada tipo de elemento granulométrico contribuye a determinar la estabilidad de un suelo, a través de estos tres modos de reaccionar característicos.

A cada tipo de elemento granulométrico corresponde una reacción preponderante entre las tres que se han enumerado. Así, en la arcilla predomina la cohesión; en la arena, la fricción, etc., etc.

a) *La cohesión.*—La cohesión de un sistema de partículas es la fuerza que tiende a mantenerlas unidas, resistiendo a las acciones exteriores. Su valor es un término medio que resulta de múltiples atracciones entre las partículas de diverso orden que existen en los suelos.

La cohesión de los suelos tiene dos orígenes: La atracción molecular y las acciones derivadas del agua superficial. La primera determina la cohesión molecular; y la otra, la cohesión hídrica.

Los más importantes factores capaces de alterar la cohesión son la humedad y el estado de la arcilla. Por otra parte, la cohesión es un fenómeno que depende del factor *contacto*; por lo tanto, su valor es también función de la granulometría y del grado de acomodamiento de las partículas; o sea, de la compactación, que puede medirse comparando el peso específico con el aparente.

La cohesión de un suelo debe medirse con su fatiga de ruptura a la tracción. La medida a base de esta sollicitación permite eliminar la influencia del roce y de la traba mecánica.

La influencia de la cohesión sobre las características resistentes de los suelos se observa claramente en los gráficos que interpretan las experiencias presentadas al Tercer Congreso Panamericano de Carreteras por el profesor Thomas y el suscrito. (Fig. N.º 34).

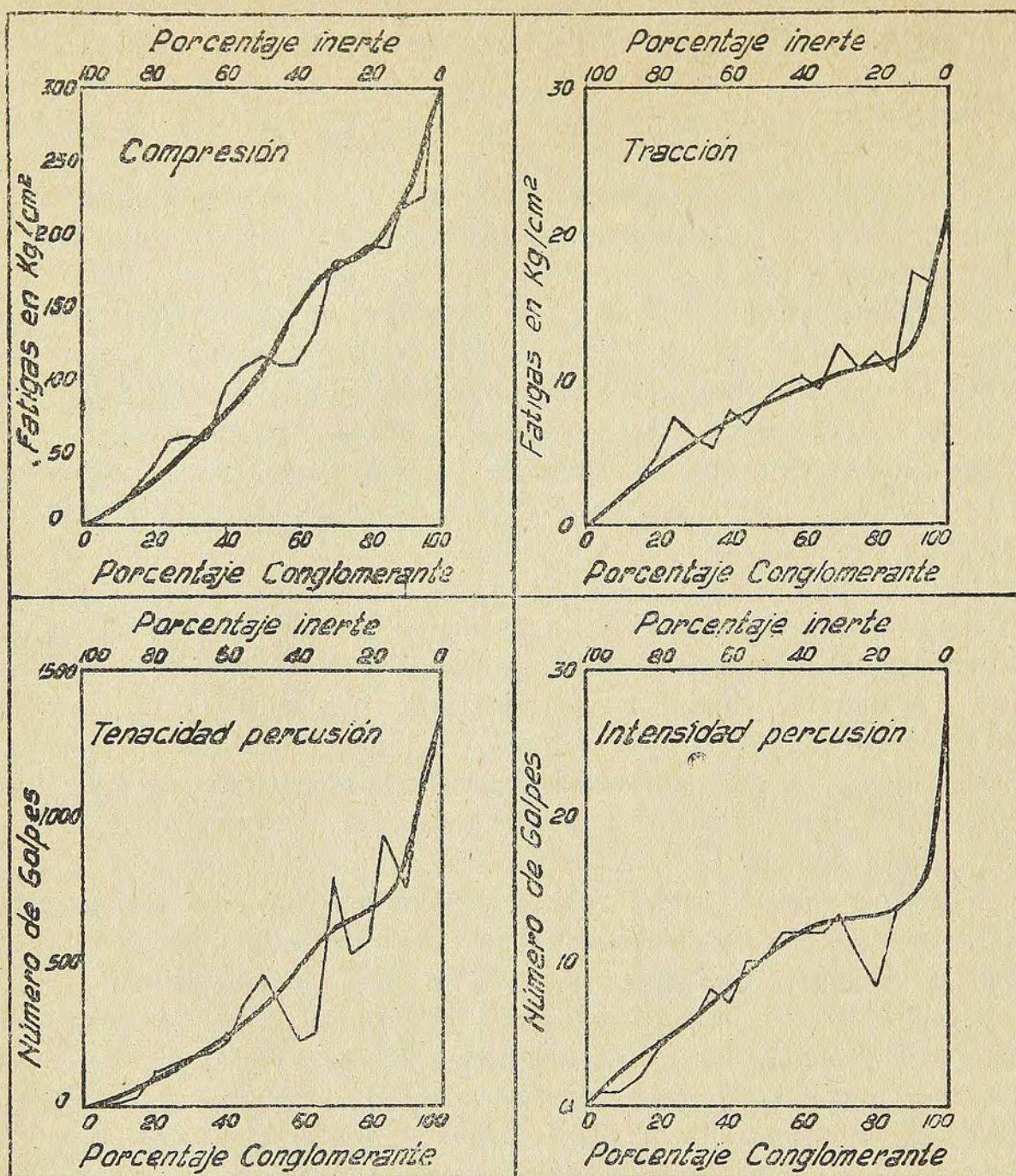


Figura 34

Dichas experiencias consistieron en someter a pruebas de resistencia, probetas preparadas con mezclas de arcilla y arena. Estas probetas se confeccionaron humedeciendo el material, y sometiéndolo a presión dentro de moldes. Después se secaban al aire libre durante 48 horas, y en el horno de 110 grados, durante 24. Finalmente se enfriaban en secadores y se sometían a los diversos ensayos.

El cuadro que va a continuación, resume las experiencias hechas en compresión, tracción y percusión; y los gráficos que se adjuntan, las interpretan. (Fig. N.º 34).

RESULTADOS EN PROBETAS PREPARADAS CON PRESIÓN DE COMPACTACIÓN
DE 202,72 Kg/cm²

PROBETAS		FATIGAS EN KG/CM ²		PERCUSIÓN N.º GOLPES	
Arcilla	Arena	Comprensión	Tracción	Tenacidad	Intensidad
100	0	297,2	22,8	1.394	22
95	5	226,1	16,6	1.130	16
90	10	221,0	17,8	755	14
85	15	188,7	10,6	1.919	13
80	20	193,1	11,6	570	8
75	25	181,0	10,6	518	11
70	30	180,6	12,4	775	13
65	35	130,4	9,2	245	12
60	40	109,8	10,2	225	12
55	45	109,2	9,6	340	12
50	50	114,2	8,6	445	10
45	55	105,7	6,8	360	10
40	60	93,7	8,0	230	7
35	65	57,4	5,2	190	8
30	70	60,1	6,1	170	6
25	75	50,7	7,4	146	5
20	80	37,6	4,9	108	4
15	85	28,5	3,4	41	2
10	90	10,1		7	1
5	95	6,6		1	1
0	100				

b) *La fricción.*—Si se quiere hacer resbalar un cuerpo de peso P sobre una superficie del mismo material, es preciso vencer cierta reacción que no se produciría si el plano de resbalamiento sólo opusiera a la fuerza P una reacción igual y contraria. Puesto que existe una determinada fuerza f máxima que es contrarrestada por el roce de la superficie, debe existir también una reacción H del plano, igual a f (Figura 35).

El hecho se explica aceptando que cuando un esfuerzo f, creciente, trata de hacer resbalar el cuerpo de peso P, en la superficie de resbalamiento, la reacción abandona la perpendicular; y forma con ella un ángulo ϕ creciente, de modo que H siempre resulte igual a f. Esto ocurre hasta que se alcanza cierto ϕ máximo. Si f crece aún, H no puede aumentar más, y se produce el movimiento.

La fuerza H, llamada reacción de roce, vale:

$$H = P \cdot \operatorname{tg.} \phi$$

ϕ es un ángulo característico para cada material; y su tangente, r, es el llamado coeficiente de fricción.

La medición del ϕ o del r de un material es una operación sencilla: Si un cuerpo de peso P se coloca sobre un plano inclinado que se está levantando lentamente, el ángulo que forma el plano con la horizontal cuando el cuerpo empieza a resbalar, es el ángulo ϕ de fricción. La demostración de esto surge de inmediato de la figura 36. Tratándose de materiales granulados—suelos—el ángulo de fricción puede obtenerse haciendo montoncitos de material suelto con el máximo talud y sin presión. Cuando el talud no puede aumentar más, porque los granos siguientes resbalan y caen, se obtiene el ángulo de fricción. (Figura 37).

c) *Traba mecánica.*—La traba mecánica de un suelo resulta de la acción de palanca con que reaccionan sus elementos granulométricos, frente a las acciones exteriores.

La traba mecánica puede obtenerse haciendo medidas de esfuerzo de corte, en

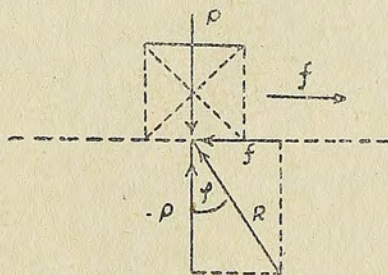


Figura 35

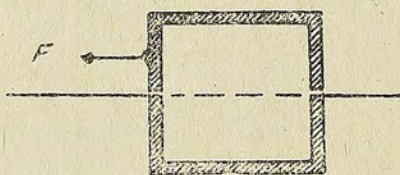


Figura 38

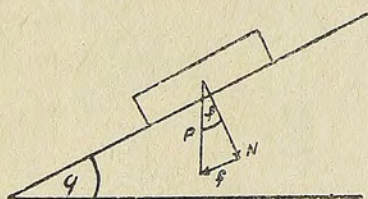


Figura 36

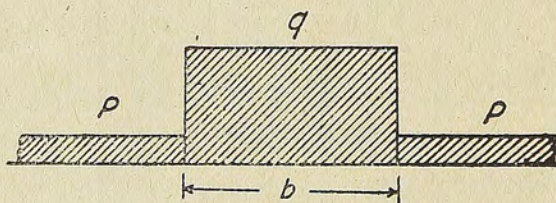


Figura 39

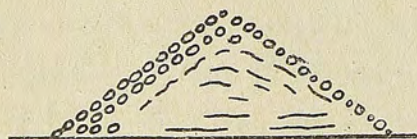


Figura 37

un aparato como el que se diseña en figura N.º 38. Sea un suelo de sección w cargado con un peso P . Su ángulo de fricción sea ϕ , su cohesión, c ; y su traba mecánica, t .

Llamemos F al esfuerzo horizontal que rompe el suelo por cizalle:

$$F = P \cdot \operatorname{tg} \phi + cw + tw$$

$$t = \frac{F - Pr}{w} - c$$

2.º Poder portante.

El poder portante de un suelo es una función de su traba mecánica, fricción y cohesión.

Se define el poder portante, como la capacidad de un suelo para mantener su estabilidad bajo la acción de las cargas exteriores. Puede obtenerse analíticamente como una función de la cohesión, fricción, traba mecánica y condiciones de aplicación de las cargas. En Edafotecnia se ha preferido el empleo de valores índices, tales como:

a) *Valor comparativo de soporte*, que ha sido definido por el Bureau of Public Roads como «la carga por pulgada cuadrada necesaria para la penetración de un décimo de pulgada».

b) *Modulo de reacción*.—Según Westergaard, es la carga, en libras por pulgada cuadrada, necesaria para deformar en una pulgada una subrazante perfectamente elástica.

c) *Ensayo de consistencia*.—Según Terzaghi, se hace con una muestra de suelo de forma cilíndrica, que se coloca en una máquina de impactos equipada con un dial micrométrico que sirve para medir la deformación en función del tiempo.

d) *Ensayos de resistencia*.—Cualquier ensayo de resistencia es un índice del poder de soporte de un suelo.

Expresemos ahora analíticamente el poder de soporte de un suelo, en función de sus características resistentes elementales: cohesión, fricción y traba mecánica. Sean (ver figura):

q , poder portante del suelo, en Kg/cm².

P , Sobrecarga del suelo en los alrededores del sitio donde se mide q .

g , Peso aparente actual del suelo.

b , Ancho de la superficie cargada.

c , Cohesión del suelo.

f , Angulo de fricción.

t , Traba mecánica.

ϕ , $45^\circ - f/2$

$$q = \frac{P}{\operatorname{tg}^4 \phi} + \frac{gb}{4\operatorname{tg} \phi} \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^4 \phi} - 1 \right) + \frac{2(c+t)}{\operatorname{tg} \phi \operatorname{sen}^2 \phi}$$

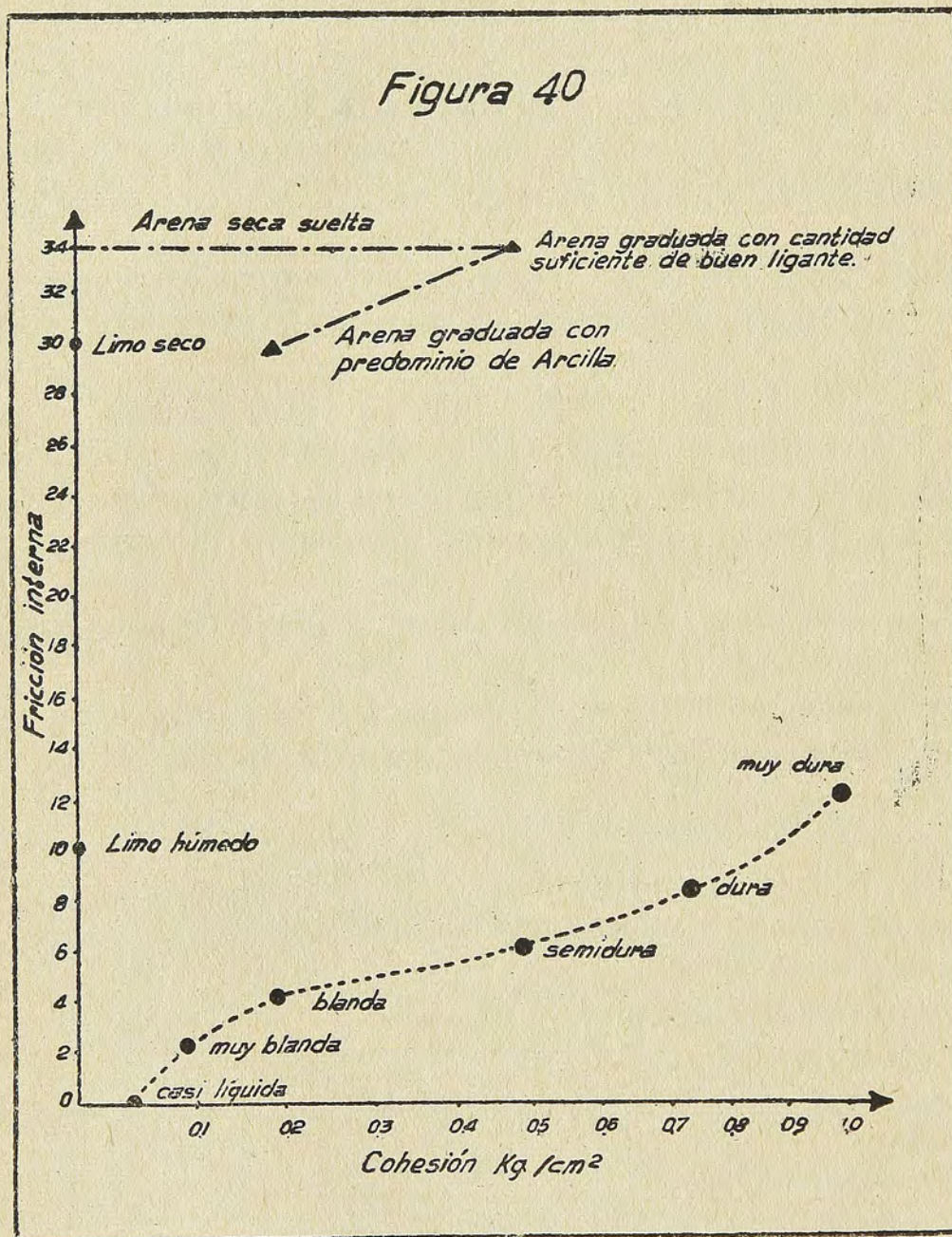
En esta fórmula, q representa una carga límite, bajo la cual, pequeños incrementos de la carga, determinan pequeñas deformaciones; y sobre la cual, a pequeños incrementos de la carga, corresponden grandes aumentos de las deformaciones.

La fórmula es muy clara en el sentido de mostrar la influencia que sobre el poder portante ejercen las acciones exteriores y las características del material resistente:

El poder de soporte aumenta con:

- a) La cohesión.
- b) La reacción de roce.
- c) La traba mecánica.
- d) El peso aparente (La consolidación).
- e) La superficie de aplicación de la carga.

Los gráficos que se adjuntan muestran la influencia de los factores resistentes elementales sobre el poder portante.



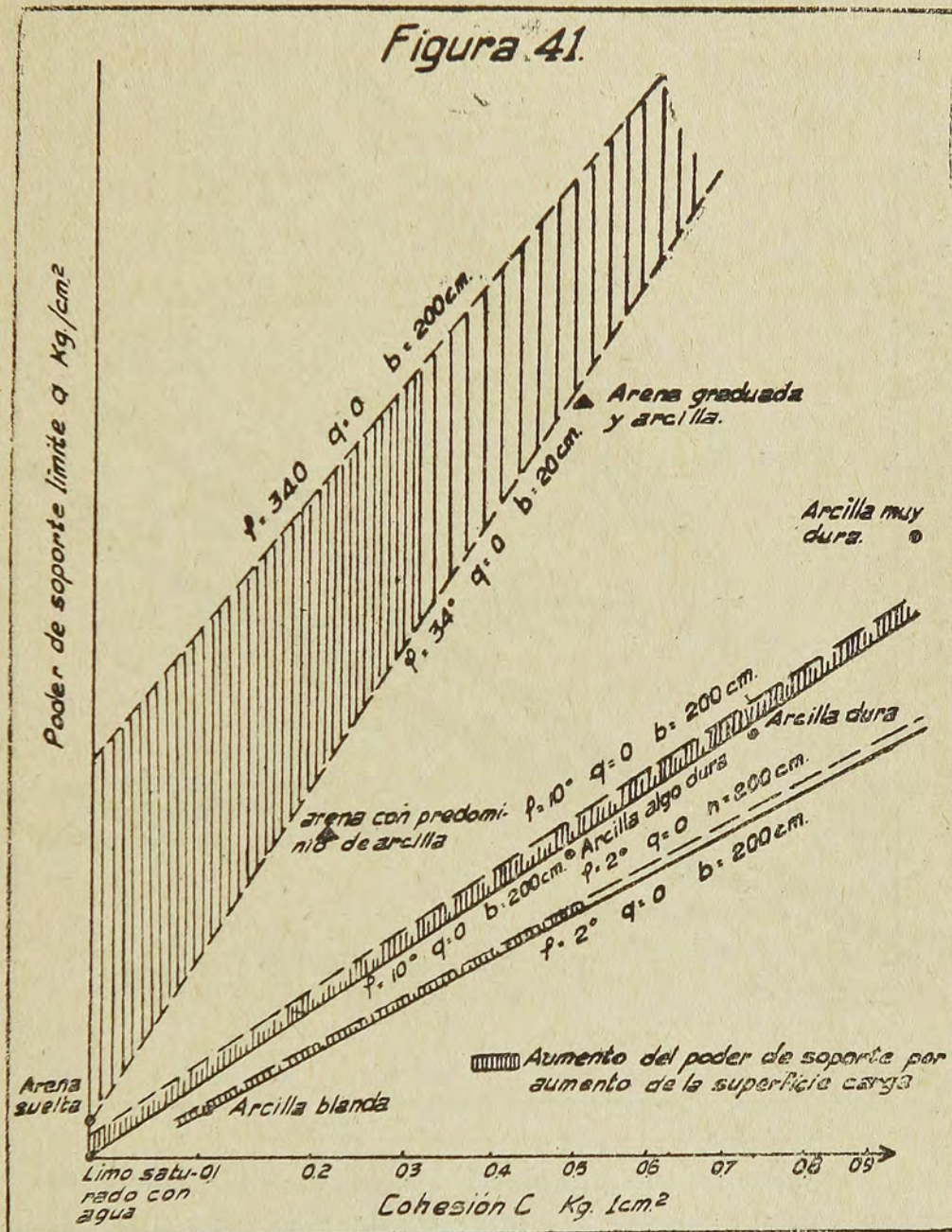
El primero (Figura 40) sólo muestra la relación entre la cohesión y la fricción interna de algunos suelos. Se ve que a cada material corresponde una curva característica, al variar su humedad. Materiales parecidos deben tener curvas próximas. Es posible, entonces, limitar dentro del gráfico, zonas que correspondan a cada uno de los tipos de mortero de suelo que se estudiaron en el primer capítulo.

A grosso modo podemos observar que los morteros arcillosos se aproximan al eje de abscisas (porque su fricción interna es relativamente baja). Al variar la humedad el punto representativo del mortero dibuja en el gráfico una curva, próxima al eje

de abscisas, que se va alejando de ambos ejes al disminuir la dosis de agua (por aumento de la cohesión y, en menor escala, de la fricción).

El limo y la arena puros—que se caracterizan por su escasa cohesión—tienen sus puntos representativos próximos al eje de ordenadas.

Las mezclas de limo o arena con arcilla—que tienen fricción y cohesión—ocupan en el gráfico lugares intermedios.

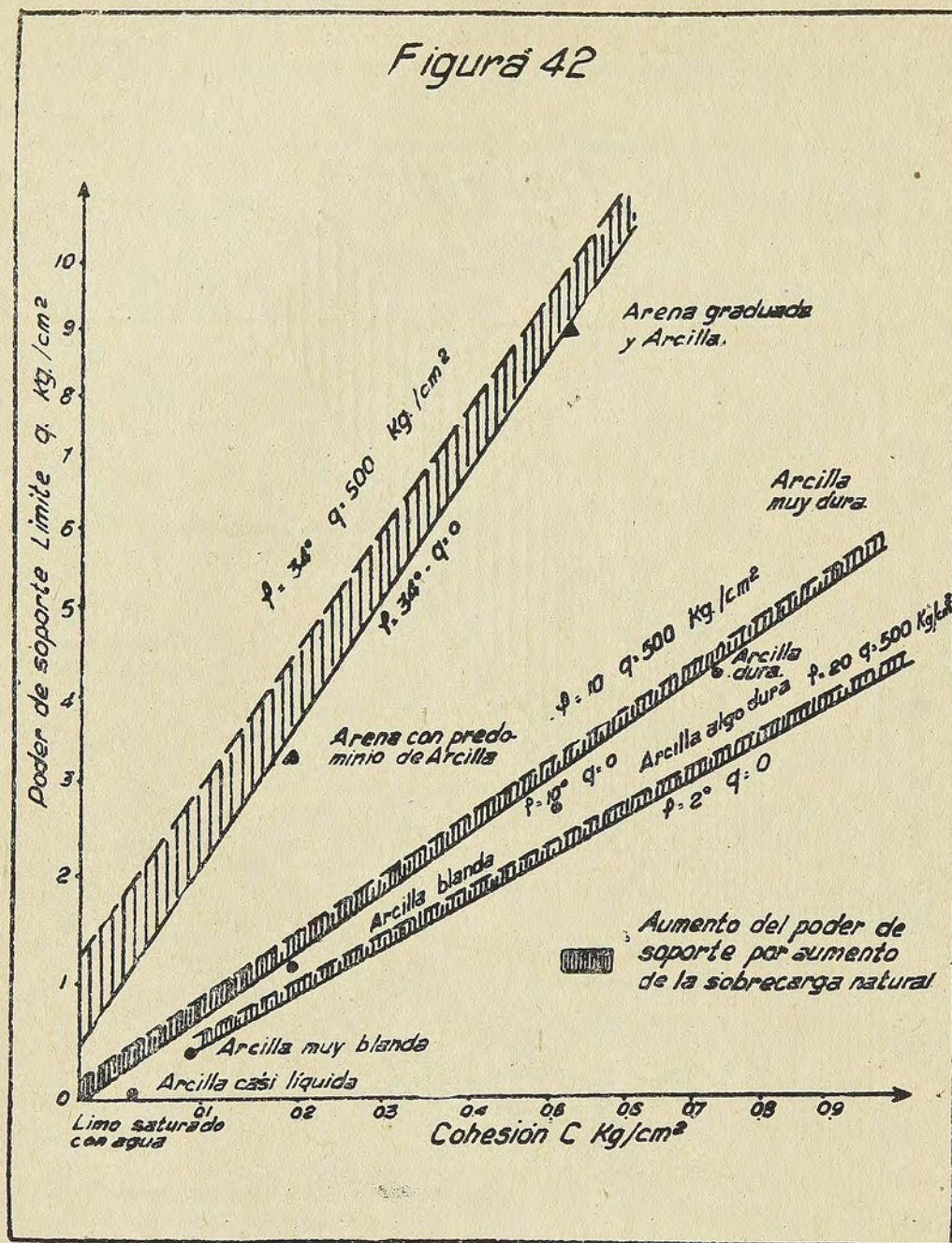


El segundo gráfico, con cohesión en abscisas y poder portante en ordenadas, (Figura N.º 41) ha sido hecho con el objeto de mostrar la influencia que ejerce sobre el poder de soporte la superficie de carga. Se observa que el aumento del poder portante producido por iguales aumentos de la superficie de carga, es considerable en las arenas, bastante menor en el limo y muy pequeño en las arcillas.

Se comprende que estos hechos sólo pueden deberse a la cohesión: Los materiales granulados sueltos pueden resistir mayores cargas por unidad de superficie al crecer esta, porque resbalan con mayor dificultad. No ocurre lo mismo cuando los

suelos resisten preponderantemente por cohesión; caso en el cual el resbalamiento significa la rotura.

El tercer gráfico (Figura N.º 42) tiene por objeto mostrar la influencia ejercida



sobre el poder de soporte por la sobrecarga del suelo en los alrededores del punto cuyo poder portante se estudia. Se observa que en igualdad de condiciones, el aumento experimentado por las arenas es considerablemente mayor que el de las arcillas.

Hasta aquí nos hemos referido a cierta estabilidad que se calculó aceptando que la anchura del suelo cargado es indefinida. Al estudiar la estabilidad de terraplenes—que no tienen anchura indefinida—debe considerarse la posibilidad de que alturas excesivas puedan determinar deslizamientos tales como el que muestra la figura N.º 43.

Résal ha deducido una fórmula que da la altura máxima H , en metros, que corresponde a un terraplén de características resistentes conocidas:

$$H = \frac{(c + t) \operatorname{sen} i \cos f}{g \operatorname{sen}^2 \frac{1}{2} (i - f)}$$

g es el peso aparente; c , la cohesión; t , la traba mecánica; f , el ángulo de fricción; e i , el ángulo del talud.

A continuación se copia un cuadro de aplicación de la fórmula de Résal, que podría interesar en Edafotecnia.

Suelo	Talud	Angulo Talud	Angulo Fricción	Densidad Kg/m ³	Cohesión Kg/cm ²	Altura H m.
Arcilla muy blanda	½ : 1	63°26	2°	1.280	1.000	2,70
	1 : 1	45°00	2°	1.280	1.000	3,90
	2 : 1	26°34	2°	1.280	1.000	7,50
	4 : 1	14°12	2°	1.280	1.000	16,50
Arcilla media dura	½ : 1	63°26	6°	1.440	5.000	1,29
	1 : 1	45°00	6°	1.440	5.000	2,10
	2 : 1	26°34	6°	1.440	5.000	4,65
	4 : 1	14°12	6°	1.440	5.000	16,38
Arcilla dura	½ : 1	63°26	8°	1.600	7.500	1,83
	1 : 1	45°00	8°	1.600	7.500	3,12
	2 : 1	26°34	8°	1.600	7.500	7,65
	4 : 1	14°12	8°	1.600	7.500	39,05
Mezclas	½ : 1	63°26	34°	1.760	5.000	3,12
Arcilla	1 : 1	45°00	34°	1.760	5.000	17,40
y	2 : 1	26°34	34°	1.760	5.000	ilimitada
Arena	4 : 1	14°12	34°	1.760	5.000	ilimitada
Limo arcilloso	½ : 1	63°26	14°	1.600	1.000	0,30
	1 : 1	45°00	14°	1.600	1.000	0,60
	2 : 1	26°34	14°	1.600	1.000	2,16
	4 : 1	14°12	14°	1.600	1.000	ilimitada

Sobre esta materia, los especialistas norteamericanos señores Harold Allen, Ingeniero de Materiales, y L. A. Palmer, Químico del Bureau of Public Roads, presentaron al Tercer Congreso Panamericano de Carreteras (Página 152 del Tomo Primero), un interesante trabajo que resumo en lo que sigue:

Al proyectar un terraplén, debe estudiarse su estabilidad desde dos puntos de vista:

- Capacidad del suelo de fundación por resistir el peso del terraplén.
- Estabilidad al deslizamiento del terraplén.

Un estudio de esta naturaleza supone un conocimiento completo de las características resistentes del suelo de fundación y de los materiales del terraplén, obtenido en el Taller de Resistencia de Materiales.

a) *Suelo de fundación.*—Se admite que al aplicar sobre el suelo de fundación una carga mayor que su máximo poder de soporte, éste falla por cizalle.

Ahora bien, el máximo esfuerzo de cizalle en un punto cualquiera M bajo el terraplén, está dado por la fórmula:

$$S = \frac{zp}{\pi a} \sqrt{\log^2 e \frac{R_1 R_4}{R_2 R_3} + (\alpha_1 - \alpha_3)^2}$$

En la cual, p es la carga por unidad de superficie con que gravita el terraplén sobre el terreno de fundación; e, la base de los logaritmos hiperbólicos; y los demás términos tienen el significado que se les da en el gráfico de la figura N.º 44.

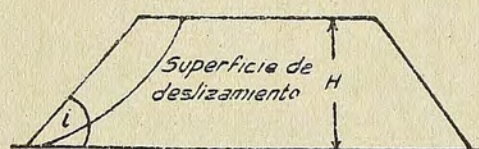


Figura 43

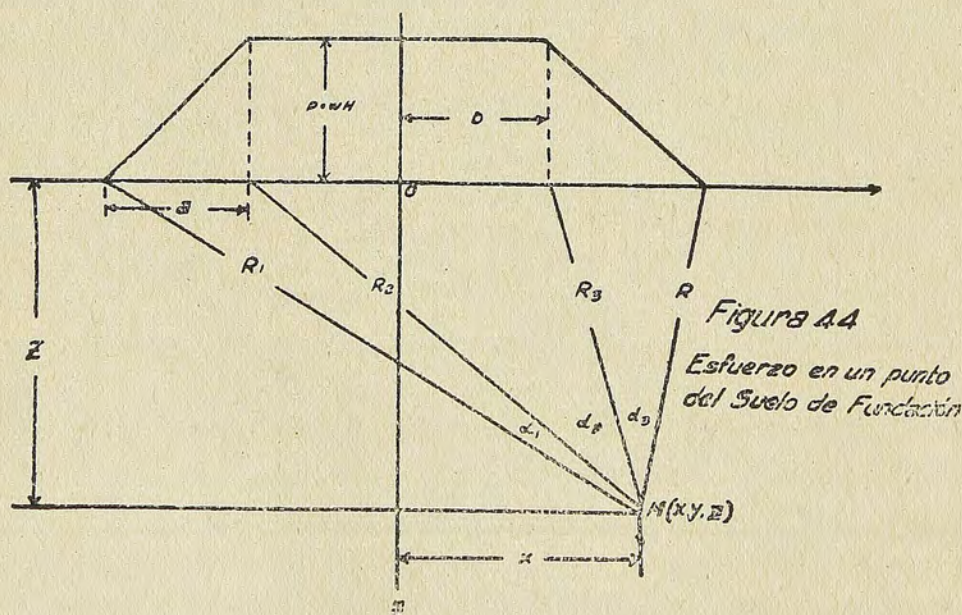


Figura 44

Esfuerzo en un punto
del Suelo de Fundación

Aplicando la fórmula en distintos puntos del subsuelo, es posible dibujar, como en los planos topográficos, curvas de igual fatiga. Es lo que se ha hecho en la figura N.º 45, para el caso de un terraplén en el cual a es igual a b. La fatiga máxima de cizalle tiene en este caso el valor:

$$S = 0,31p$$

y se encuentra en el plano de simetría del terraplén, a una profundidad:

$$z = 1,5a$$

De aquí se desprende que el terraplén debe ser proyectado con un valor $s = 0,3p$, menor que la capacidad de resistencia del suelo de fundación.

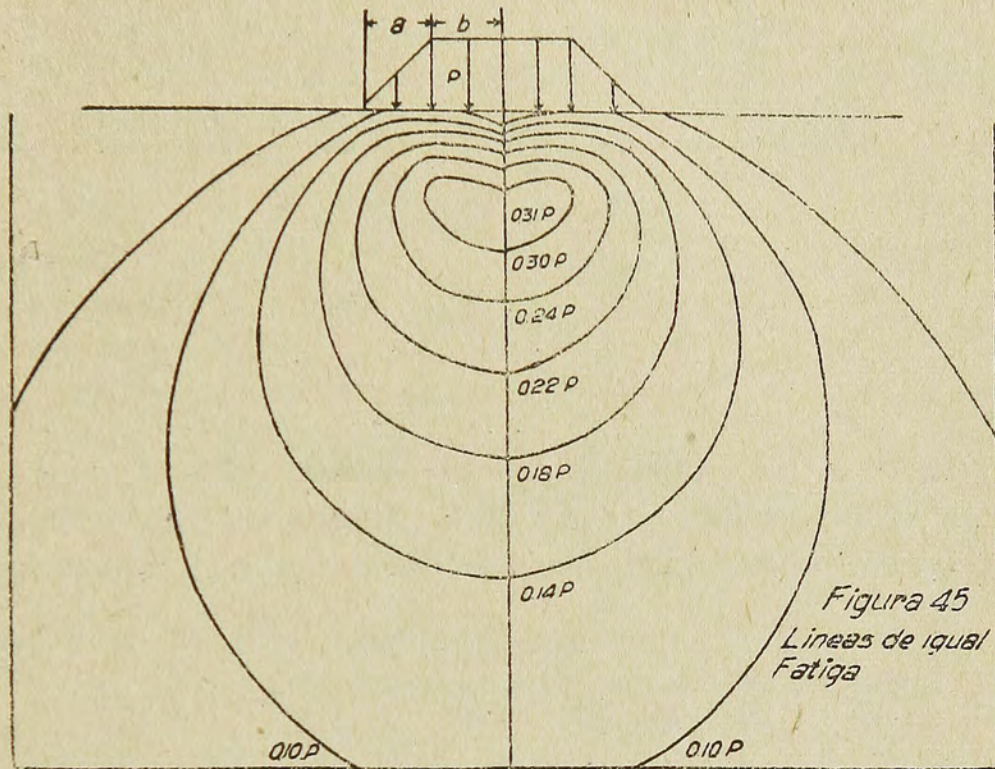


Figura 45
Líneas de igual
Fatiga

Para el cálculo del poder de soporte de un suelo destinado a fundación de terraplén, los autores recomiendan la fórmula de Prandtl:

$$q = c \cotg \phi + wb \cotg \Delta \left[\frac{1 + \sen \phi}{1 - \sen \phi} C^{\pi \tg \phi} - 1 \right]$$

en la cual:

q , es el poder de soporte del suelo de fundación.

c , es el valor unitario de cohesión.

w , es el peso aparente compacto del suelo.

b , es la distancia OD, en el tercer dibujo del gráfico.

ϕ , es el ángulo de fricción interna.

$$\Delta = 45^\circ - \phi / 2$$

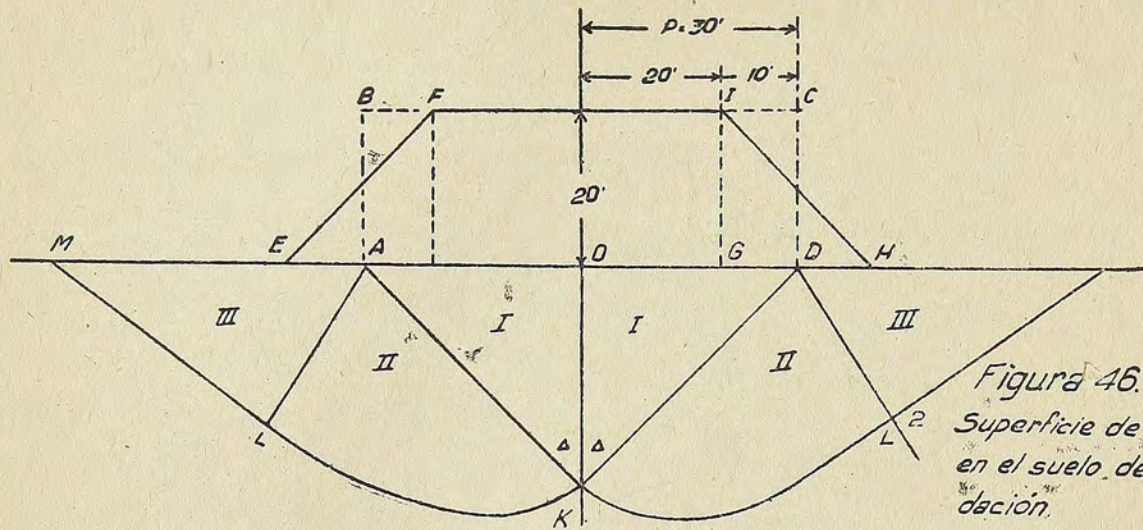
El uso de esta fórmula es sencillo. Si se desea proyectar un terraplén de determinadas dimensiones, se calcula primero el peso del terraplén por unidad de superficie:

$$p = Hw$$

y luego la capacidad de soporte q de la fundación. La razón:

$$F = q : p$$

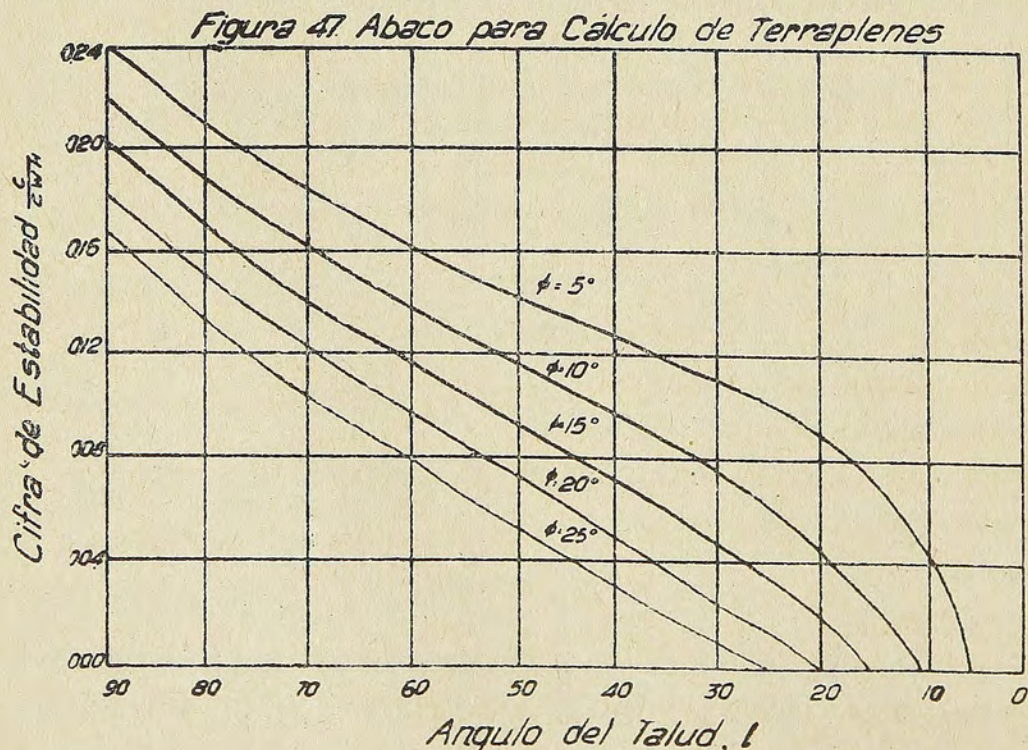
es el coeficiente de seguridad; y se recomienda elegirlo mayor que 1,5.



b) *Deslizamiento*.—La estabilidad de los terraplenes desde el punto de vista del deslizamiento, se estudia haciendo uso de la llamada cifra de estabilidad, que el gráfico adjunto da en función del ángulo de frotamiento ϕ , y del ángulo del talud,

$$\text{CIFRA DE ESTABILIDAD AL DESLIZAMIENTO} = \frac{c}{F w H}$$

En esta fórmula, F es el coeficiente de seguridad; w , el peso aparente compacto de las tierras; c , la cohesión; y H , la altura del terraplén. (Figura N.º 47).

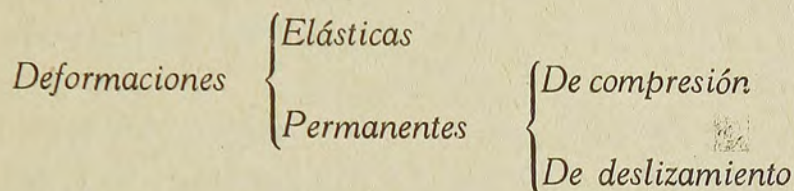


El uso del gráfico para el cálculo de terraplenes es extremadamente sencillo y corto: Si se desea, por ejemplo, construir un terraplén de altura H , con un material

de cohesión c , peso aparente compacto w , y ángulo de fricción ϕ , se procede primero, con estos datos, a calcular la cifra de estabilidad. Con este valor entramos al gráfico, buscando, en la curva del ϕ correspondiente, la abscisa del punto cuya ordenada es la cifra de estabilidad. Esa abscisa nos entrega inmediatamente el ángulo del talud que buscamos.

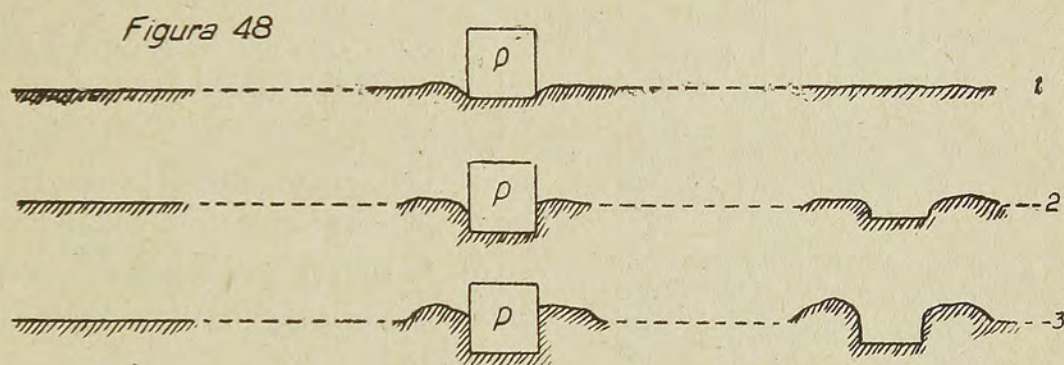
3.º Deformaciones de los suelos.

Bajo la acción de las cargas los suelos se deforman. Las deformaciones que sufren los suelos, sólo pueden ser de dos clases: Elásticas y permanentes. Estas últimas pueden ser de compresión y de deslizamiento:



Elástica es aquella deformación que desaparece al eliminar su causa.

Permanente, es la que subsiste después de retirada la carga que la produce. La



deformación permanente es de simple compresión, cuando no hay movilización de partículas, sino sólo una disminución de la relación de vacíos debajo de la zona de aplicación de la carga. Las deformaciones son de deslizamiento, cuando, bajo la acción de la carga, se producen sollevamientos laterales que acusan movimientos de partículas.

Las deformaciones que produce una determinada carga sobre un suelo, dependen de su intensidad y permanencia, y de las características resistentes del suelo.

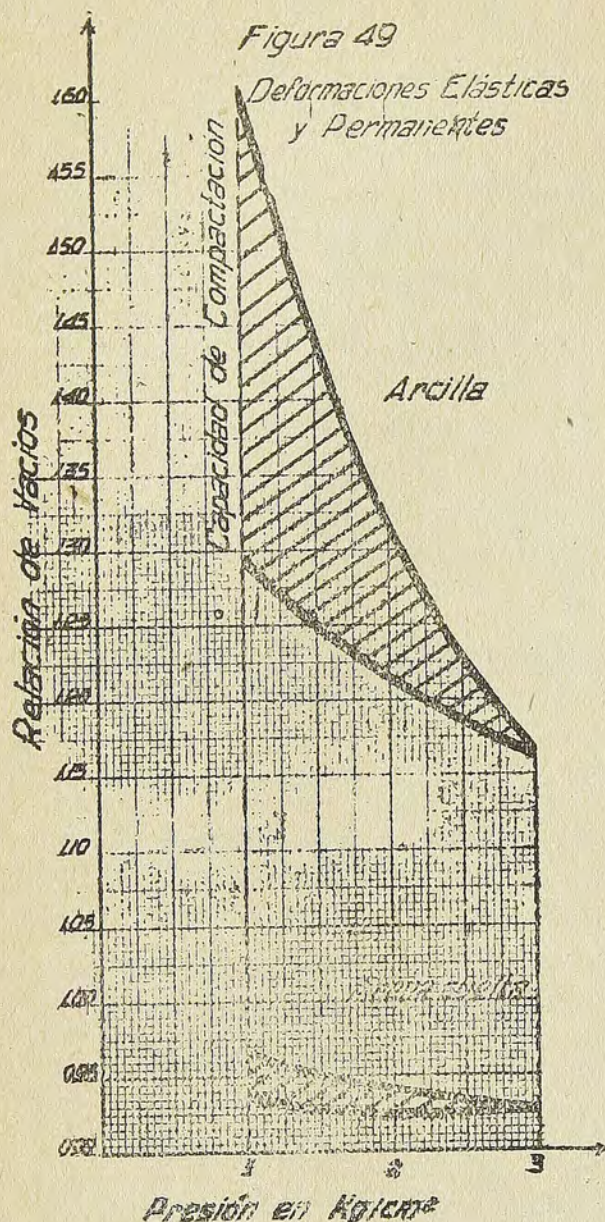
En general, siempre se producen deformaciones elásticas e inelásticas en un suelo; pero predomina una u otra. Según cual sea ésta, los suelos se dividen en elásticos (1) e inelásticos (2 y 3); y estos últimos, en compresibles (2) y deslizables (3).

Terzaghi ha ideado un dispositivo—el compresor Terzaghi que se estudió en *Medidas Edafológicas*—con el cual ha estudiado las curvas carga—deformación de distintos materiales; y también la relación carga—deformación tiempo, que tiene fundamental importancia en Edafotecnia (Cálculo de sentamiento de terraplenes).

Las curvas de deformación tienen en abscisas la carga—en kilogramos por centímetro cuadrado—y en ordenadas la relación de vacíos (Ver medidas edafológicas).

Ningún material acepta ciclos elásticos perfectos; siempre subsiste una de-

formación permanente, medida en el sector de las ordenadas comprendido entre las curvas de carga y descarga. Esta deformación mide la capacidad de compactarse de los suelos. (Figura N.º 49).



Las deformaciones permanentes son mayores en los suelos de granulometría fina.

Cada material tiene un gráfico de deformaciones que es característico. Un suelo puede, pues, ser reconocido por su gráfico de deformaciones.

La relación entre espesores y relación de vacíos es fácil de obtener. Sean, en efecto:

S y S' ... los espesores de un suelo antes y después de aplicada cierta carga.

E y E' ... las correspondientes relaciones de vacíos.

V' y V'' ... los volúmenes de poros antes y después de aplicada la carga.

V el volumen de las partículas, que es igual antes y después del fenómeno.

Habiendo permanecido en el compresor invariable la sección de la muestra de tierra, los espesores son proporcionales a los correspondientes volúmenes totales:

$$S : S' = (V + V') : (V + V'')$$

Simplificando el segundo miembro por V ; y recordando la definición de relación de vacíos, podemos escribir de inmediato.

$$S : S' = (1 + E) : (1 + E')$$

Esta fórmula es general y puede aplicarse al cálculo del asentamiento de un terraplén (Naturalmente que haciendo abstracción del asentamiento que pudiera experimentar el terreno sobre el cual se ha fundado el terraplén.).

Resolvamos ahora un problema. Se quiere construir un terraplén cuya altura definitiva será h . Se exige, o especifica, que la relación de vacíos del material consolidado sea E . ¿Cuánta tierra debe transportarse por metro corrido, si su relación de vacíos, suelta, es E' ?

Los volúmenes son en este caso también proporcionales a los espesores; y estos, a uno más la correspondiente relación de vacíos:

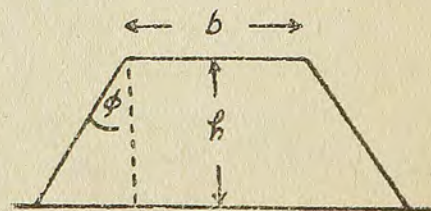


Figura 50

$$V : (b + h \operatorname{tg} \phi) h = (1 + E') : (1 + E)$$

$$V = h (b + h \operatorname{tg} \phi) \frac{1 + E'}{1 + E}$$

Este mismo problema se resuelve con los pesos aparentes: Se exige un peso aparente definitivo g ; siendo g' el del material suelto.

Escribiendo que los pesos antes y después del asentamiento son iguales, resulta:

$$g h (b + h \operatorname{tg} \phi) = g' V$$

$$V' = h (b + h \operatorname{tg} \phi) \frac{g}{g'}$$

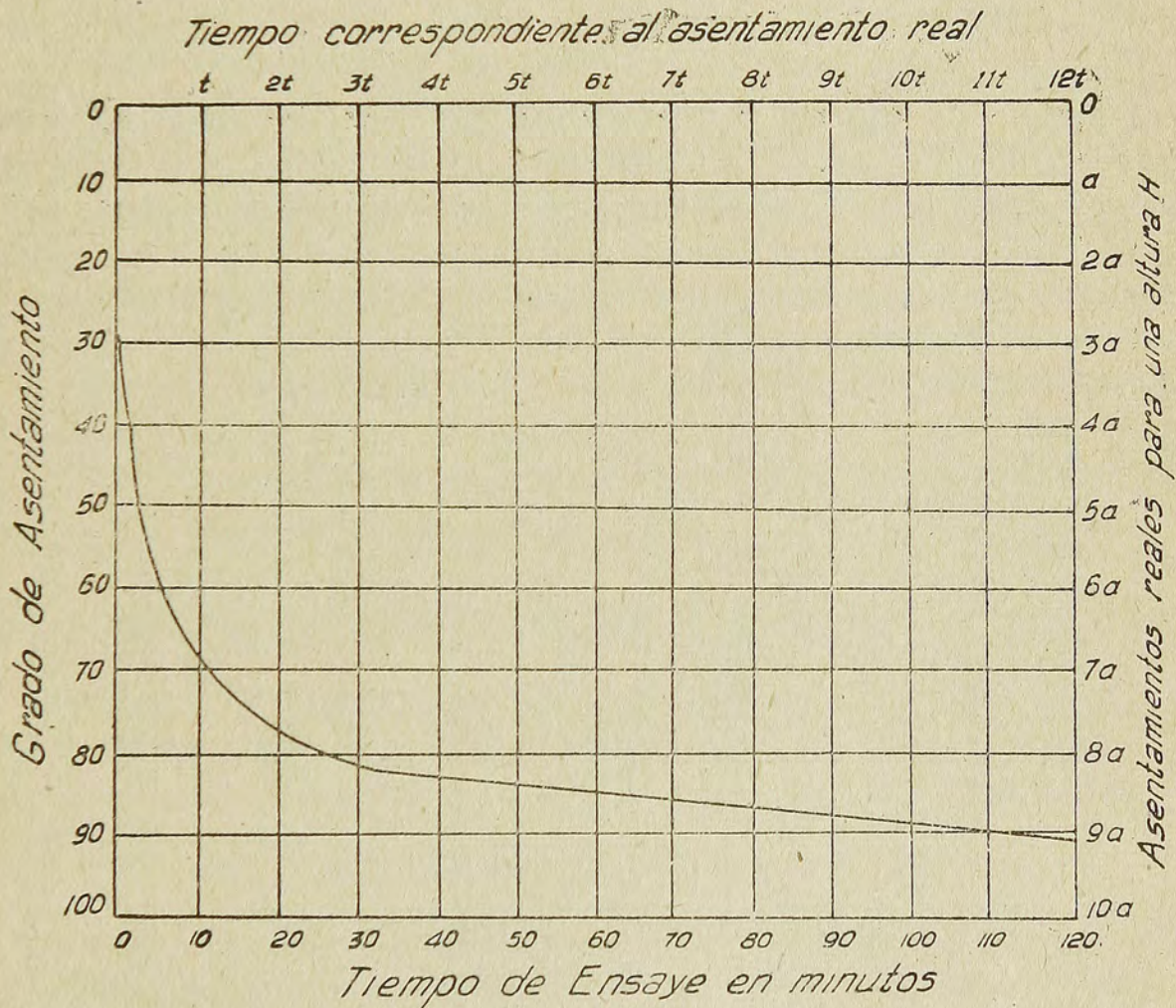


Figura 51 Curva Tiempo-Asentamiento.

Las curvas tiempo—asentamiento se construyen para una carga determinada. El estudio se realiza con el compresor Terzaghi, cargándolo con un determinado peso, y observando periódicamente las deformaciones.

Los resultados se colocan en un gráfico, en cuyo eje de abscisas se anotan los tiempos y cuyo eje de ordenadas mide lo que se llama el *Grado de asentamiento*. (Figura N.º 51).

Grado de asentamiento es el porcentaje de deformación experimentado por el suelo hasta el instante de la medida, con respecto al asentamiento máximo bajo la carga con la cual se experimenta.

El asentamiento máximo se puede obtener consultando la curva de deformaciones, en el punto cuya abscisa es la carga para la cual se está estudiando la función tiempo—deformación.

Conocida la curva tiempo—asentamiento de un suelo—curva que se realiza experimentando con un determinado espesor de material—es posible calcular analíticamente los asentamientos sucesivos del mismo suelo, colocado bajo la misma carga y condiciones, pero con un espesor distinto.

Para llegar a este resultado, es preciso aceptar una relación analítica entre tiempos y espesores. Se acepta que los tiempos necesarios t y t' para que dos capas de un mismo suelo, cuyos espesores son S y S' , lleguen a un mismo grado de asentamiento, son proporcionales a los cuadrados de dichos espesores.

$$t : t' = S^2 : S'^2$$

Aceptando este principio, si se ha construido una curva tiempo—asentamiento para un determinado espesor S , la misma curva sirve para otro espesor cualquiera S' , a condición de que la escala de los tiempos se modifique de acuerdo con la fórmula:

$$t' = Kt$$

donde:

$$K = \frac{S'^2}{S^2}$$

La curva, como se ha dicho, entrega el grado de asentamiento. Cabe ahora transformar este valor en la deformación misma. Para esto necesitamos los datos de la curva de deformaciones: La relación de vacíos con carga cero, E ; y la mínima relación de vacíos E' . Estos datos nos permitirán calcular el espesor s a que llegará el suelo S ; y el espesor s' a que llegará el suelo S' .

$$\frac{s}{S} = \frac{s'}{S'} = \frac{1 + E'}{1 + E}$$

De esta fórmula es posible deducir la disminución d de espesor del suelo S' , lo cual permite colocar una escala de asentamiento reales, al lado de la de los asentamientos porcentuales:

$$d = S' \left(1 - \frac{1 + E'}{1 + E} \right)$$

El asentamiento real A que corresponde a un punto de la curva con grado asentamiento C , es:

$$A = \frac{C S'}{100} \left(1 - \frac{1 + E'}{1 + E} \right)$$

B.—INFLUENCIA DE LA HUMEDAD SOBRE LA ESTABILIDAD DE LOS SUELOS.

1.º Cohesión hídrica.

El efecto que produce el agua sobre la estabilidad de los suelos, es una función de su plasticidad y granulometría.

Sabemos ya que en los suelos arcillosos, pequeñas dosis de humedad, contribuyen a su resistencia con lo que se ha llamado cohesión hídrica. Esta forma de cohesión se produce por la acción de liga del agua superficial, que mantiene unidas a las partículas.

Al aumentar la humedad, el espesor de las películas acuosas aumenta también, y la cohesión hídrica disminuye, afectando las características resistentes del material.

Si se toma una muestra de arcilla seca compacta, y se le agrega agua lentamente, se verá que al principio ella se comporta como un sólido que no podría moldearse con los dedos y que no transmite esfuerzos en direcciones normales a la de la carga.

Aumentando la humedad, llega un momento en que la arcilla, lubricada con el exceso de agua, se torna capaz de transmitir esfuerzos normales a la dirección de la carga y en que es posible moldearla con los dedos. El material no se encuentra ya en estado sólido, sino en el plástico. La dosis de humedad que limita ambos estados, se conoce con el nombre de *límite plástico inferior*; más corto, *Límite Plástico*.

Al aumentar la humedad, la plasticidad de la pasta se acentúa; hasta que llega un momento en que ya no es moldeable; porque ha perdido su consistencia: Se ha fluidificado. La dosis porcentual de agua que limita estos dos estados, se llama *Límite Líquido Inferior*; o, simplemente, *Límite Líquido*.

En los suelos arcillosos, los límites, plástico y líquido se encuentran bastante separados; dejando un amplio margen dentro del cual la pasta es moldeable (*Índice de Plasticidad*).

En los suelos limosos, los límites se encuentran muy próximos; y en las arenas, coinciden; es decir, no existe en ellas el estado plástico.

2.º Variaciones volumétricas causadas por el agua.

Las variaciones de humedad en los suelos van acompañadas de cambios volumétricos, cuya magnitud depende de las propiedades de los suelos. La medida de estos cambios tiene importancia en Edafotecnia, porque en ciertos suelos, las contracciones suelen producir agrietamientos peligrosos. El fenómeno del agrietamiento se produce de acuerdo con el siguiente mecanismo: La absorción de agua distancia a las partículas, haciendo aumentar el volumen del suelo. Al evaporar el agua, las partículas tienden a cohesionarse, por la acción del agua superficial. Las contracciones así producidas, determinan tensiones que cortan el material según líneas de menor resistencia que se producen a causa de la desigual evaporación del agua.

Los cambios volumétricos que más afectan a los suelos son los que producen las heladas. También estos cambios son funciones de las propiedades del suelo.

Sabemos ya que en los poros capilares el agua congela a temperaturas más bajas que la que se encuentra en estado libre. Hay, pues, desde este punto de vista una diferencia específica entre un suelo que no tiene poros capilares—llamémoslo de estructura abierta—y un suelo capilar—que llamaremos de estructura cerrada.

En los suelos de estructura abierta, en donde el agua se encuentra en condiciones de líquido libre, el congelamiento se produce simultáneamente en toda la masa del suelo, a la temperatura de cero grados centígrados.

Como se sabe desde física elemental, el agua, al bajar su temperatura, sólo se contrae hasta que llega a los cuatro grados, punto termométrico que marca el mínimo volumen y la máxima densidad. Al seguir enfriando el líquido, ya no se contrae, sino que se dilata; de modo que, al congelar, ya tiene un volumen mayor en un nueve por ciento al que tenía a cuatro grados. Se comprende que en estas condiciones, la formación de hielo esté acompañada de formidables presiones que actúan sobre la estructura del suelo.

En los sistemas cerrados—capilares—la formación de hielo comienza en los poros grandes, debido a que en los pequeños, como se ha expresado, la temperatura de congelación es más baja. Las masas de hielo formadas crecen luego a expensas del agua contenida en los poros de menor tamaño.

En las estructuras cerradas, el congelamiento del agua se produce como si ella estuviese sometida a presión.

Se han estudiado en los suelos, experimentalmente, las condiciones favorables para la formación de hielo. En este sentido, Taber ha llegado a la conclusión de que las condiciones más favorables para la formación de hielo en láminas con tendencia a crecer, se presenta cuando la dimensión de las partículas del suelo es menor que un micrón. Otros investigadores colocan las condiciones más favorables entre cinco y diez micrones.

El efecto que produce la formación de hielo en un suelo, es función de las temperaturas y del tiempo durante el cual actúan.

Para que se inicien en los suelos fenómenos de congelamiento, es preciso que la temperatura del aire se mantenga entre 4 y 5 grados centígrados durante un lapso que fluctúa entre $2\frac{1}{2}$ y $4\frac{1}{2}$ horas. Petit ha puntualizado que este período es de 160 minutos en las arenas; de 190 en las arcillas; y de 266 en la tierra vegetal.

Existe también un espesor crítico de suelo superficial, dentro del cual los efectos de las bajas temperaturas son perjudiciales. Este espesor varía entre 10 y 15 centímetros.

Bouyoucus ha confeccionado un gráfico que da las variaciones de temperatura del suelo a 7,5 cm. de profundidad, en función de las variaciones de la temperatura atmosférica (Figura N.º 52).

Se observa que la función $t_s = f(t_a)$; donde t_s es la temperatura del suelo y t_a , la del aire, es lineal. Por lo tanto, es fácil darle una expresión analítica de la forma:

$$t_s = n + mt_a$$

Los coeficientes m y n , en el caso estudiado por Bouyoucus valen:

$$n = -4,5$$

$$m = 0,4$$

de aquí resulta

$$t_s = 0,4 t_a - 4,5$$

Los efectos perjudiciales que produce la formación de hielo, se hacen máximos cuando el suelo no es uniforme. En estos casos, la diferente velocidad con que se producen los aumentos de volumen, determina en los sectores de transición, esfuerzos que pueden producir rupturas y levantamientos superficiales irregulares. Esto tiene importancia en Edafotecnia Caminera porque los sollevamientos irregulares de la subrazante, pueden producir la ruina de cualquier pavimento.

Los efectos del deshielo son talvez más perjudiciales en los suelos que el congelamiento.

Si la temperatura del ambiente se mantiene durante algún tiempo por encima de cero grados, el deshielo comienza por la parte superior y el agua líquida, que no puede escurrir hacia abajo porque aún queda hielo, satura el terreno y lo hace perder su estabilidad.

Las oscilaciones de la temperatura ambiente alrededor de cero son perjudiciales para las cubiertas elásticas o rígidas que se coloquen sobre el suelo; debido a los levantamientos sucesivos e irregulares producidos por las dilataciones y contracciones del agua al cambiar de estado.

Figura 52

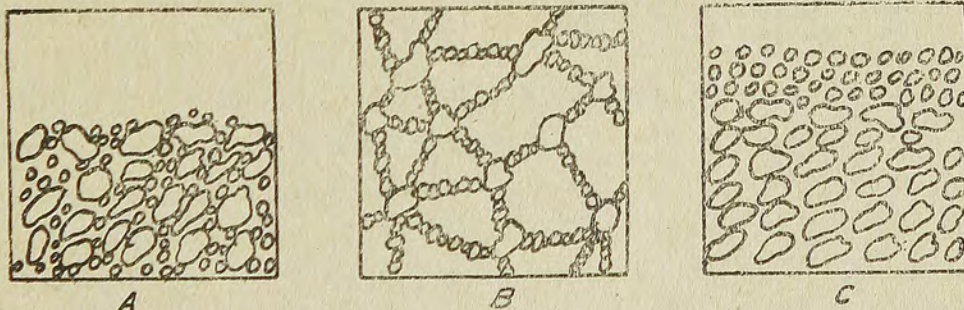
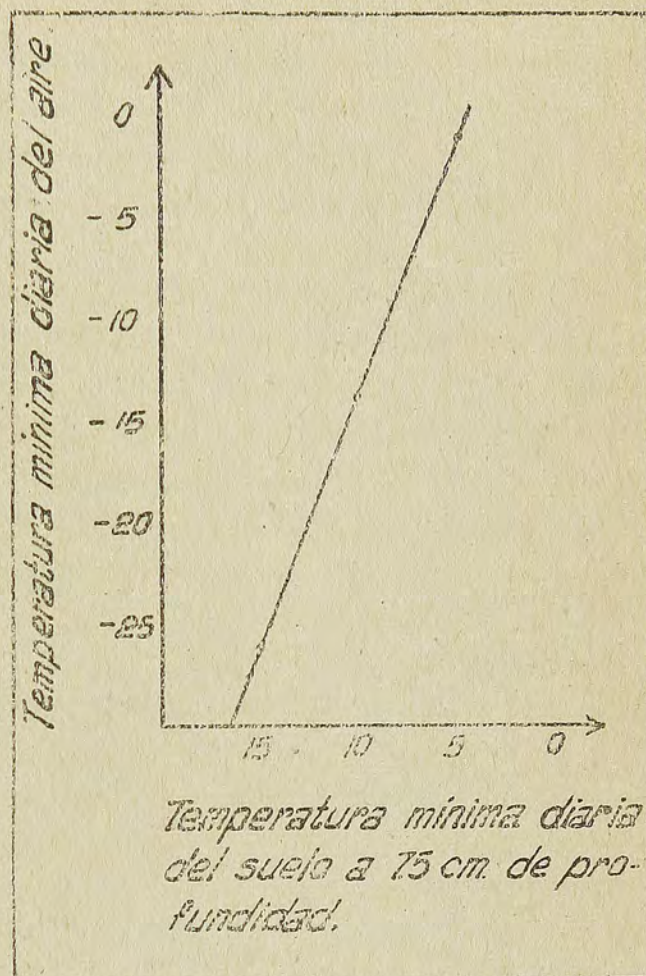


Figura 53

3.º Floculación de los suelos.

Al sedimentar, las partículas de tierra pueden agruparse en las tres formas que se observan en figura N.º 53; formas que son típicas, y que es conveniente analizar para explicarse ciertas expansiones y contracciones que el agua produce en algunos suelos.

En A, la sedimentación es normal; y la relación de vacíos, la mínima entre los tres casos.

En B, se ha producido el fenómeno que hemos estudiado con el nombre de floculación; que consiste en que las partículas coloidales se reúnen en forma de copos que rodean las partículas de arcilla no coloidal, y precipitan. La relación de vacíos se hace máxima en este caso, y el suelo se torna capaz de absorber grandes cantidades de agua cuya pérdida da origen a fuertes contracciones.

El caso de C es el de un suelo defloculado. La relación de vacíos es bastante menor que en los floculados; pero algo mayor que en el estado natural.

La floculación de los suelos se produce en la naturaleza por las siguientes causas:

- 1.º Acción de las heladas.
- 2.º Acción alternada de humedad y sequía.
- 3.º Presencia de materia orgánica.
- 4.º Presencia de calcáreos y magnesia.

La defloculación puede ser causada por:

- 1.º Acción mecánica.
- 2.º Lluvias.
- 3.º Por la acción de la soda o de la potasa.

C.—INFLUENCIA DE LA CONSOLIDACIÓN SOBRE LA ESTABILIDAD DE LOS SUELOS.

1.º *Explicaciones.*

Como se dijo al principio de este capítulo, la estabilidad de un suelo depende de su cohesión, fricción y traba mecánica. Todos estos factores son, a su vez, funciones del estado de consolidación del suelo; de modo que también la estabilidad resulta función del estado de consolidación.

El estado de un suelo desde el punto de vista de su consolidación, puede apreciarse a través de su relación de vacíos: Cuanto más grande sea ésta, menos consolidado estará el suelo.

La mayor estabilidad que produce en los suelos su consolidación—mayor estabilidad que se aprecia en todas sus características resistentes—se debe al hecho de que, al aproximarse y acomodarse las partículas, aumenta su superficie de contacto y disminuye la magnitud de los poros. Con esto crece la cohesión en sus dos formas, propia e hídrica; y también la fricción y la traba mecánica.

La consolidación de un suelo se produce en dos formas: Natural y Mecánica.

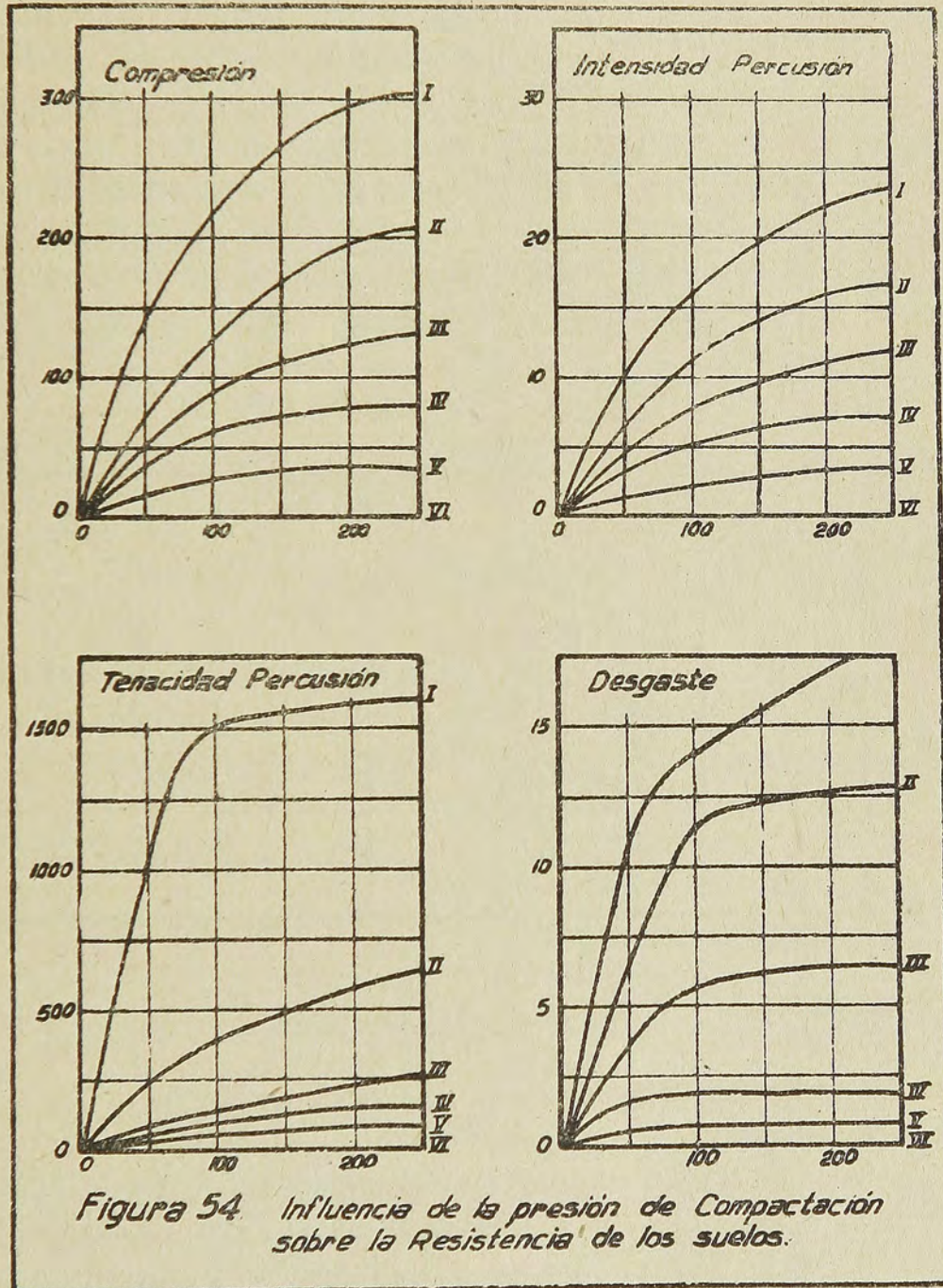
La consolidación natural—que recibe el nombre de asentamiento—es producida por el peso propio del suelo y por el de las estructuras permanentes que soporta, bajo la influencia de los agentes climatéricos, principalmente hidrológicos.

La consolidación mecánica—que se llama compactación—se produce por la acción combinada de la humedad, y de la presión ejercida sobre el suelo en diversas formas, por equipos especiales o por el tráfico.

El presente párrafo tiene por objeto mostrar la influencia que ejerce la compactación en sus diversas formas, sobre las características resistentes de los suelos.

2.º Influencia de la presión de compactación.

Experiencias hechas por el suscrito y el Profesor Thomas en el Laboratorio Edafológico de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, resumidas en los gráficos que se adjuntan, (Figura N.º 54) ponen de manifiesto las siguientes propiedades de los suelos, en lo que al asunto tratado se refiere:



A.—Todas las propiedades resistentes de los suelos aumentan con la presión de compactación, hasta llegar a cierto límite que corresponde a la presión que da el acomodamiento corpuscular óptimo. (Presión de compactación es la fuerza por centímetro cuadrado que se aplica sobre el material suelto húmedo para consolidarlo).

- B.—La influencia de la presión de compactación disminuye cuando decrece la proporción de material cohesivo.
- C.—Los efectos de la compactación se anulan en los materiales sin cohesión (Arenas, Gravas).
- D.—Al realizar mezclas de materiales de distinta granulometría, el máximo peso aparente del material suelto, y el del consolidado, no coinciden, para una misma dosificación de la mezcla, en las mismas condiciones de humedad. El máximo peso aparente consolidado se obtiene con una dosis mayor de material de relleno; con lo cual se demuestra el relleno de huecos que realiza la compactación. (Figura N.º 54).

Las curvas de la figura N.º 54 tienen en abscisas la presión de compactación, en kilogramos por centímetro cuadrado; y en ordenadas, la resistencia: Para la compresión, en kilogramos por centímetro cuadrado; para la intensidad de la percusión, altura de caída, en centímetros, del martillo para medir la tenacidad en las piedras; para la tenacidad de la percusión, número de golpes dados por el martillo que mide la cementación del polvo de roca; y para el desgaste, un índice que es el valor recíproco del desgaste experimentado en una revolución de la máquina de Dorry por una probeta cilíndrica standard.

Las curvas dibujadas corresponden a las siguientes mezclas:

Número de la curva	PORCENTAJES	
	Conglomerante	Inerte
I	100	0
II	80	20
III	60	40
IV	40	60
V	20	80
VI	0	100

3.º *Influencia del agua.*

El efecto del agua sobre la compactación es considerable; y ha sido estudiado por el Ingeniero R. R. Proctor.

Hemos repetido que el agua, bajo ciertas dosis, es un adherente de las partículas; y sobre ella, un lubricante. De aquí se desprende que el efecto de cualquiera acción mecánica sobre un suelo, debe ser función de su humedad. Efectivamente, la experiencia demuestra que un mismo suelo, bajo análogas condiciones de compactación, da pesos aparentes variables con la humedad..

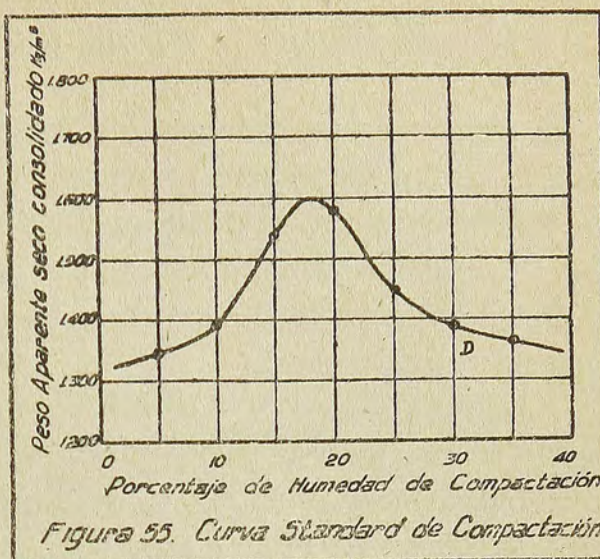
En el gráfico de la figura N.º 55 se ha colocado en abscisas, la humedad de las muestras de un mismo suelo; y en ordenadas, los pesos aparentes obtenidos en dichas muestras con compactaciones iguales. (Figura N.º 55).

Se observa que la curva está netamente dividida en tres sectores:

En el primero, AB, el peso aparente crece con lentitud; porque el suelo aún no contiene agua libre que lubrique sus partículas y les permita acomodarse bajo la acción compactante.

En BC, el peso aparente crece con rapidez, debido a que el agua actúa ahora como lubricante.

En el sector CD, el peso aparente desciende con rapidez, porque el agua y el aire contenido en el suelo, ocupan un volumen mayor que el de poros; es decir, el agua está desplazando a las partículas; y, como su peso específico es menor que el del suelo, se produce como consecuencia una disminución del peso aparente del sistema.



Proctor realizó experiencias de compactación en diferentes suelos. Las probetas compactadas las sometió a una prueba consistente en determinar la resistencia que oponían a la penetración de una aguja. Obtuvo las siguientes conclusiones:

- A.—A cada tipo de suelo corresponde un contenido óptimo de humedad, que permite alcanzar el máximo peso aparente, al compactarlo mediante determinada acción mecánica.
- B.—La resistencia a la penetración de la aguja disminuye cuando aumenta el contenido de humedad.
- C.—Se alcanzan iguales pesos aparentes en los suelos compactados con dos contenidos de humedad diferentes; uno en la rama ascendente y otro en la descendente de la curva; pero cuando se ha compactado el suelo con el contenido más bajo de humedad, éste puede absorber agua hasta llegar al contenido más alto, sin modificación del peso aparente.
- D.—Hogentogler ha completado el trabajo de Proctor, agregando esta última observación, de gran importancia edafotécnica: Cuando un suelo se ha compactado hasta su máximo peso aparente, bajo su contenido de humedad óptimo, disminuye en gran escala la posibilidad de mayores absorciones de agua.

4.º Influencia de la temperatura.

Los cambios de temperatura modifican el espesor de la película de agua adhesiva. Un descenso hace crecer este espesor, a expensas del agua libre, determinando una disminución de su acción lubricante. Se desprende de aquí que para compactar un suelo a baja temperatura, se necesita más agua que a una temperatura mayor, para conseguir iguales pesos aparentes con iguales condiciones de compactación.

Los efectos producidos por los cambios de temperatura crecen cuando se hace más fina la granulometría.

Esto se debe al hecho de que la superficie interna específica crece cuando la

granulometría disminuye; y a que los efectos de la cohesión crecen con la superficie interna específica.

5.º *Influencia del tamaño y forma de las partículas.*

Mientras menor es la granulometría de un suelo, mayor es la dificultad con que se alcanza el máximo peso aparente. Esto se debe a que la cohesión y fricción interna que hay que vencer, en los suelos más finos es mayor que en los otros.

Por esta misma causa, al compactar suelos en la naturaleza, la profundidad hasta donde influyen iguales compactaciones mecánicas, es mayor en los suelos de granulometría más gruesa.

Cuanto más fina es la granulometría de un suelo, mayor es su contenido óptimo de humedad, y menor su máximo peso aparente. Esto es así porque el contenido óptimo de humedad debe ser proporcional directamente a una determinada función positiva de la superficie interna específica.

6.º *Influencia del tiempo.*

La influencia del tiempo en la consolidación es muy lenta. Las acciones compactantes son el peso propio y los agentes climatéricos. En Chile debemos agregar los terremotos; que producen un menor acomodamiento de las partículas, por vibración.

Ya hemos dicho que este modo de consolidar se denomina asentamiento; y lo hemos estudiado con algunos detalles, y cuantitativamente, en el párrafo A del presente capítulo.

Cabe hacer mención aquí de un interesante fenómeno que se produce en la naturaleza: La *Tipsotropía* (cambio por tocación). Este fenómeno se observa en ciertas arcillas coloidales que endurecen al quedar en reposo; pero que ablandan por amasado, sin alteración de su contenido de humedad. La masilla y algunas cremas y pinturas presentan análoga característica.

7.º *Influencia de las sales.*

Más atrás se ha leído que las sales alteran el estado del complejo coloidal de los suelos, e influyen sobre el espesor de la película de agua adhesiva. Todo esto debe repercutir en los procesos de compactación; y, efectivamente, experiencias hechas en Wáshington lo demuestran claramente, como se aprecia en el cuadro que sigue, que resume esas experiencias.

Suelo y Sal	% Humedad Optimo	Peso aparente Max. Kg/m ³
Muestra Pura	16,1	1.792
Muestra Pura más 5% Cloruro sodio .	13,8	1.876
Muestra más 5% Cloruro de Calcio ...	14,0	1.869
Muestra más 5% Hiposulfito de sodio .	13,3	1.934
Muestra más 5% Cloruro férrico	14,5	1.870
Muestra más 5% Cèmento Portland...	15,2	1.822
Muestra más 5% Cal Hidratada	18,0	1.714
Muestra más 5% Emulsión asfáltica...	14,0	1.765
Muestra más 5% Piedra Caliza	16,8	1.782

8.º *Influencia de la manera de compactar y de la persistencia de la acción compactante.*

Existen varias maneras de compactar. Se comprende que ellas sólo son otras tantas maneras de comprimir.

Se puede comprimir por presión directa y por impacto. La presión directa puede aún ser repartida uniformemente, como en los rodillos corrientes, o seccionada, como en los rodillos del tipo «pata de cabra».

Se han intentado estudios de comparación de estas tres maneras de compactar. El ensayo standard de compactación de Laboratorio (Ver Medidas Edafológicas) equivale, por ejemplo, a 20 pasadas de un rodillo pata de cabra de cuatro toneladas, con 16 filas de 7 dientes cada una, con una superficie de apoyo de 5 por 8,7 centímetros, sobre capa de suelo de 20 centímetros, que produce un espesor compactado de 15 cm. aproximadamente.

(Continuará).