nuevo método de análisis de compactación de suelos

FRANCISCO GIULIANI y RAUL SUAREZ ROBLEDO, Ingenieros Civiles.

JUAN RAMON PUEBLA, Auxiliar de Laboratorio.

Resumen

Los valores de relación humedad-densidad-energía de compactación, obtenidos en diversos métodos convencionales de ensayo, incluyendo los métodos Próctor normal y modificado, así como el método de compresión Porter o California, pueden tener una correlación definida en términos de compacidad relativa y de energía de compactación relativa. La compacidad relativa se define como la densidad relativa del suelo entre el límite plástico y un nuevo límite de compactación, el cual se puede a su vez definir como la razón de vacíos, o su correspondiente humedad de saturación, en la máxima densidad que se puede obtener en sucesivas compresiones confinadas rápidas, con aumento progresivo de humedad. El ensayo de límite de compactación, descrito en este trabajo, es muy preciso y de más fácil ejecución que cualquiera de los ensayos convencionales de compactación, y el valor del límite de compactación podría ser considerado como otra constante característica del suelo, tan útil como los límites plástico y líquido para interpretar el comportamiento de los suelos. Con el fin de determinar la energía de compactación, el peso de suelo seco se conserva constante en las operaciones sucesivas de ensayos de compactación, por medio de golpes o de compresión confinada, aplicándose en estos últimos, como en el ensayo de límite de compactación, una precompresión moderada para definir la altura inicial del testigo, midiéndose a continuación las deformaciones. La energía de compactación relativa se determina en todo tipo de ensayo por la relación entre el trabajo total de compactación, que resulta de la caída de una masa de compactación o de la curva de presiones y deformaciones de un proceso de compresión confinada, y la sección y peso seco del testigo. Como el peso seco se conserva constante durante las operaciones sucesivas de cada ensayo, existe también la posibilidad de cambiar arbitrariamente la energía relativa y la densidad resultante, con sólo modificar el peso de suelo en el ensayo. Los autores han tratado este tema recientemente en otro trabajo, mostrando que existe proporcionalidad entre compacidad relativa y energía relativa de compactación, en ensayos de compactación standard y modificados convencionales para un suelo determinado. En este trabajo se extiende el estudio a tres suelos de muy diferente plasticidad, incluyendo, además de los métodos de compactación a golpes, el de compactación por compresión confinada, cambiando el peso de suelo para obtener diversas energías relativas de compactación, así como detalles de los procedimientos de ensayo para determinar con precisión el trabajo de compactación. Trazando una línea de referencia entre los límites plástico y de compactación se ve claramente que los puntos representativos de resultados de diversos métodos de compactación se encuentran más o menos próximos a dicha línea, con una distribución muy parecida en los tres suelos estudiados, aunque también se observa que, para cada forma o tipo de ensayo, los puntos se agrupan a distancia diferente de la línea de referencia, demostrando posible influencia de la fricción lateral y las dimensiones del testigo. Como la humedad óptima se puede obtener directamente del valor calculado del contenido de agua de saturación y de un valor aproximadamente constante del grado de saturación, se puede especificar la compactación de suelos y efectuar el estudio de las características de estabilidad de suelos compactados, en función solamente de la compacidad relativa y del límite de compactación.

1. Introducción

Los autores han presentado anteriormente un artículo titulado «Límites de compactación y compacidad relativa», mostrando la posibilidad de definir y realizar un ensayo indicativo de la máxima densidad que se puede obtener en un suelo como resultado de las curvas de relación humedad-densidad, con progresivo aumento del trabajo de compactación. En este artículo se perfecciona el trabajo anterior, con resultados extendidos a tres suelos de diferente plasticidad, clasificados en los grupos A_4 , A_6 y A_{7-6} , respectivamente, e incluyendo, además de ensayos de compactación de tipo Próctor normal y modificado, ensayos de compresión confinada del tipo Porter o California. El propósito fundamental del trabajo es obtener la relación que existe entre los resultados de las compactaciones realizadas, expresados por las densidades máximas y humedades óptimas respectivas, y el trabajo de compactación aplicado, con el objeto de demostrar la posibilidad de expresar estados de compactación, sin nece-

sidad de ensayos convencionales, en términos más fácilmente comparativos de compacidad relativa y límites de compactación. A los efectos de una mayor claridad de la exposición se describen también en este artículo el método de ensayo para límite de compactación y las modificaciones introducidas en métodos convencionales de compactación para asegurar una mayor uniformidad de resultados y una medida suficientemente precisa del trabajo de compactación. Se introduce el concepto de trabajo o energía de compactación relativa, referido al peso de suelo y al área de la sección del molde, el cual se determina, con la precaución de mantener constante el peso de suelo en todas las operaciones de cada ensayo, en función del número e intensidad de los golpes aplicados por capa de suelo en los ensayos de tipo Próctor, normal o modificado, y en función de la curva de presiones y deformaciones en los de tipo California. Se desprende que una variación del peso del suelo en cada tipo de ensayo permite modificar la energía de compactación relativa y los resultados de compactación.

2. Ensayos de compactación a peso constante

Todos los ensayos de compactación convencionales y sus modificaciones, así como el ensayo especial para determinar límite de compactación, se han realizado a peso constante, determinando solamente la humedad inicial del suelo antes de iniciar las compactaciones y la humedad final al terminar el ensayo, midiendo cuidadosamente incrementos iguales de agua incorporada por medio de un pulverizador con recipiente graduado de vidrio (*) y midiendo la diferencia de altura entre el borde del molde y la superficie del suelo compactado. Se procura no perder suelo al desmenuzarlo para compactaciones sucesivas, ni humedad al pulverizar el agua, realizando todas las operaciones en bandejas de metal para ensayos convencionales y en un mortero de losa para el ensayo de límite de compactación, de acuerdo al peso de suelo que se utiliza en cada tipo de ensayo. La pérdida de peso de suelo en un ensayo completo cualquiera es insignificante, apenas del orden de 1 por 100 en cualquier tipo de ensayo, siendo la pérdida de humedad a su vez del orden de 15 por 100 en cada ensayo. El error de humedad, debido a inevitable dispersión en la atmósfera y evaporación en el manipuleo del suelo húmedo, no afecta el resultado final, en cuanto se puede interpolar fácilmente el valor más aproximado de humedad óptima, por ser muy uniforme el error al incorporar incrementos constantes de agua en compactaciones sucesivas. En el caso de compactación por capas se distribuye, además, el suelo en tres o cinco capas de pesos iguales. Los resultados de ensayos realizados de esta manera no difieren apreciablemente de los realizados en la forma usual, pero, en cambio, se tiene la ventaja de una distribución muy uniforme de los puntos de compactación sucesivos y un valor preciso de la energía de compactación relativa con respecto al peso de suelo en cada compactación. El peso de suelo se puede fijar en 1,8 kg para el ensayo Próctor normal y en 4 kg para el modificado AASHO, pero se han realizado ensayos variando el peso de suelo para tener distintos trabajos de compactación y variación concordante de densidad. La compactación se realiza con martillos normales de 2,5 y 4,5 kg, con alturas de caída de 30 y 45 cm, y con 25 y 56 golpes, respectivamente, en un aparato que regula exactamente la altura de caída después de un primer golpe en cada capa compactada y que regula la distribución de golpes por rotación del molde sobre un pivote excéntrico. La energía relativa de compactación referida a la sección del molde y al peso del suelo resulta de la siguiente fórmula:

$$REC = \frac{N H P_m \cdot n}{A_m \cdot P_s}$$

En el cuadro I se puede ver claramente el procedimiento seguido en una compactación Próctor normal, con 1,4 kg de suelo. Nótese que basta representar un gráfico de alturas de suelo compactado a iguales intervalos de abscisas, para definir el punto de máxima densidad e interpolar un valor corregido de humedad óptima, con bastante precisión. En general, los resultados se dan como promedio de dos o tres ensayos iguales.

(*) Ver figura 4 en «Límites de compactación y compactación relativa de suelos».

CUADRO I.—Ensayo de compactación a peso constante. (Suelo: A₆).

Método de ensayo: Próctor normal.

Cilindro: diámetro, 103 mm; sección, 33,5 cm²; altura, 170 mm.

Masa: peso, 2,5 kg; caída, 30 cm; número de golpes, 25.

Peso de suelo: $P_s=1,4$ kg; número de capas, 3.

Energía relativa de compactación: $REC = \frac{2,5 \times 30 \times 25 \times 3}{1,4 \times 83,5} = 48 \frac{\text{kg/cm}}{\text{kg/cm}^2}$

Humedad inicial: $\omega_1=7,6$ %. Peso inicial: $1,4 \times 1,076=1,506$ kg.

Incrementos de humedad a incorporar: $\Delta V_w = \frac{\omega_{\max} - \omega_1}{n} P_s = 35 \text{ cm}^3$.

Número	0	1	2	3	4	5	6	7	8	U
ΔV_w		75	35	35	35	35	35			cm ³
$\sim P_w$	—	1.581	1.605	1.632	1.663	1.685	1.710			g
P_w	1.506	1.570	1.597	1.628	1.650	1.675	1.702			g
$\sim P_w/3$	—	527	535	544	554	562	570			g
Δh	—	70,8	72,6	74,0	75,8	73,9	69,9			mm
h	—	99,2	97,4	96,0	94,2	96,1	100			mm

Humedad final: $\omega_u=21,5$ %

Altura mínima: $h_m=94$ mm.

Humedad óptima: $\omega_o=7,6 + 190 \frac{21,5 - 7,6}{250} = 18,2$ %

Densidad máxima: $\delta_{\max} = \frac{1,4}{9,4 \times 83,5} = 1,780$

Humedad de saturación: $\omega_s = \frac{1}{1,780} - \frac{1}{2,72} = 19,4$ %

3. Energía de compactación en ensayos tipo CBR

Los ensayos de compactación por compresión confinada del tipo CBR y sus modificaciones se han efectuado también a peso constante, como se ha explicado anteriormente, modificando el peso en diversos ensayos para tener diferente energía relativa de compactación y densidad correspondiente. La energía relativa de compactación se ha determinado también en relación al área de la sección del cilindro de compactación y del peso de suelo, pero en este caso es necesario medir las deformaciones después de una moderada precompresión inicial, fijada en 5 kg/cm², que tiene por objeto definir una altura inicial del testigo. El proceso de carga es continuo hasta la presión de 140 kg/cm² (aproximadamente 2.000 p. s. i.) de acuerdo a lo prescrito para ensayos CBR, modificándose solamente el peso de suelo para variar la energía de compactación relativa, que se obtiene midiendo las deformaciones, δ , a intervalos constantes de presión, $\Delta\sigma$, por medio de la fórmula siguiente:

$$REC = \frac{\Delta\sigma \sum \delta_i}{P_s}$$

En esta fórmula debe entenderse que la suma incluye todas las deformaciones a intervalos de carga constantes, menos la mitad de la última, como expresión representativa del área del gráfico de cargas-deformaciones. En el cuadro II se puede ver bien el procedimiento seguido en una compactación California modificada, con 3 kg de suelo, estando ordenadas las operaciones para obtener rápidamente las energías relativas de compactación en operaciones sucesivas que permiten interpolar el valor correspondiente a la máxima densidad. En todo lo demás, para determinar densidad máxima y humedad óptima, se sigue el mismo procedimiento y el cuadro está ordenado de igual manera que en el caso anterior.

CUADRO II.—Ensayo de compactación tipo CBR a peso constante y con medida del trabajo de compactación. (Suelo: A₄)

Método de ensayo: California modificado.

Cilindro: diámetro, 153 mm; sección, 185 cm²; altura, 202 mm.

Presión máxima: 140 kg/cm² (2.000 p.s.i.); Humedad inicial: $\omega_1=7,6\%$.

Peso de suelo: $P_s=3$ kg; Peso inicial: $3 \times 1,076=3,228$ kg.

Incrementos de humedad a incorporar: $\Delta V_w \approx \frac{\omega_{max} - \omega_1}{n} P_s = 60 \text{ cm}^3$.

Precompresión inicial: $\delta_1=5 \text{ kg/cm}^2$; $P_1=925 \text{ kg} \approx 1 \text{ t}$.

Número	—	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ΔV_w	cm ³	70	60	60	60	60				
$\sim \frac{P_w}{P_s}$	g	—	3.298	3.347	3.395	3.442	3.488			
	g	3.228	3.287	3.335	3.382	3.428	3.470			
	t	kg/cm ²								
				Deformaciones en mm $\times 10^{-2}$						
Cargas de compresión	2	10,8	512	666	902	1.145	1.380			
	4	21,6	1.018	1.300	1.635	1.998	2.232			
	6	32,4	1.340	1.660	2.020	2.380	2.490			
	8	43,2	1.550	1.900	2.262	2.575	2.570			
	10	54,0	1.725	2.075	2.430	2.682	2.600			
	12	64,8	1.870	2.210	2.550	2.735	2.616			
	14	75,6	2.010	2.328	2.635	2.766	2.628			
	16	86,4	2.160	2.425	2.698	2.780	2.640			
	18	97,2	2.278	2.502	2.745	2.792	2.652			
	20	108,0	2.366	2.567	2.780	2.802	2.664			
	22	118,8	2.445	2.618	2.803	2.810	2.675			
	24	129,6	2.517	2.678	2.820	2.820	2.688			
	26	140,4	2.578	2.720	2.835	2.829	2.700			
$\Sigma \delta_i$ (1)	mm	10 ⁻²	23.050	26.290	29.700	31.690	31.180			
REC (2)	cm ⁻¹	—	83	95	107	114	112			
Δh_u	mm	—	119,6	120,9	120,8	119,5	117,3			
δ_u	mm	—	25,8	27,2	28,3	28,3	27,0			
h_o	mm	—	108,2	108,3	109,5	110,8	111,7			
h	mm	—	82,4	81,1	81,2	82,5	84,7			

(1) La suma de deformaciones incluye solamente la mitad del último término.

(2) La energía relativa de compactación es dada por la fórmula: $REC = \frac{\Delta \sigma \cdot \Sigma \delta_i}{P_s}$

Humedad final: $\omega_u=16,1\%$.

Altura mínima: $h_m=80,7$ mm.

Humedad óptima: $\omega_o=7,6 + \frac{16,1 - 7,6}{310} 170 = 12\%$.

Densidad máxima: $\delta_{max} = \frac{3}{80,7 \times 185} = 2,00$.

Humedad de saturación: $\omega_s = \frac{1}{2,00} - \frac{1}{2,72} = 13,2$.

Valor interpolado de energía de compactación: REC=101.

4. Definición y ensayo de límite de compactación

Compactando una cantidad de suelo húmedo en compresión confinada o consolidación rápida entre placas metálicas por medio de una máquina de ensayo de carga continua, hasta alcanzar un valor prefijado de la pendiente decreciente de la curva carga-deformación, la altura final del suelo comprimido es función de la humedad. Repitiendo la operación con la misma muestra, sin modificar el peso de suelo y aumentando la humedad, la curva alturas finales-humedad pasa por un mínimo, que define la humedad límite de compactación. Este límite de compactación es entonces la menor humedad con la cual es posible consolidar el suelo prácticamente a saturación: con humedad menor que este valor límite es imposible consolidar el suelo hasta un punto próximo a su completa saturación; con humedad mayor que este valor límite se produce saturación a un volumen final que podría todavía disminuir en consolidación lenta entre piedras porosas. Aumentando progresivamente el trabajo de compactación o la presión de compactación en ensayos convencionales de tipo Próctor y de tipo California, respectivamente, la humedad óptima decrece al aumentar el trabajo de compactación tendiendo al límite de compactación definido anteriormente.

Este ensayo se realiza, por lo tanto, en compresión confinada con una relación diámetro-altura final no menor de 3, con el fin de reducir la influencia de la fricción lateral, a peso constante, con precompresión inicial y con carga continua y medida de deformaciones a intervalo constante como se ha explicado anteriormente. La diferencia fundamental entre este método de ensayo y los otros métodos de compactación, consiste entonces en que, en vez de fijar un trabajo de compactación constante o una presión máxima constante para compactaciones sucesivas con humedad progresiva, se fija solamente un criterio para limitar la consolidación rápida del suelo en compresión confinada, en función de un valor mínimo de la pendiente decreciente de la curva de cargas-deformaciones, después del cual la disminución de volumen es insignificante. Tal límite, que podría variarse convencionalmente sin alterar mucho el resultado final, es fijado en un incremento de deformación unitaria de 1 por 100 para un incremento de presión de 5 kg/cm², y permite calcular el incremento de deformación límite, en función de la altura en milímetros establecido en una precompresión inicial del testigo, y del intervalo constante de presión, $\Delta\sigma$, en kg/cm², para lectura de deformaciones, por medio de la fórmula siguiente:

$$\Delta\delta_u = 0,002 h_p \Delta\sigma \quad (\text{mm } 10^{-2})$$

En el cuadro III se muestra el ordenamiento de operaciones para determinar progresivamente los incrementos de deformación a intervalo constante de presión, hasta alcanzar el límite calculado. Las demás operaciones y cálculos concuerdan con los explicados anteriormente para compactación a peso constante y para determinación de energía de compactación en compresión confinada. Las operaciones para límite de compactación se han efectuado en una máquina de ensayo con dinamómetro a péndulo y lectura directa de cargas, pero pueden efectuarse también, modificando ligeramente el cuadro, en una máquina de compresión con anillo de carga (*).

5. Resultados

El estudio de compactación se ha realizado en los tres suelos más típicos y de más diversa plasticidad de la región de Cuyo, y será proseguido eventualmente en otros suelos característicos del país. En el cuadro IV se han resumido todos los datos relativos a los suelos y compactaciones realizadas, y en el gráfico de la figura 1 se han representado las densidades obtenidas por diversos métodos de compactación en función de energía de compactación relativa, incluyendo las densidades en límite de compactación y en límite plástico. Para poder comparar los resultados obtenidos se ha trazado una línea de referencia entre el límite plástico, al cual se asigna energía de compactación nula, y el límite de compactación, y se

(*) Ver figura 4 en «Límites de compactación y compactación relativa de suelos».

CUADRO III.—Determinación del límite de compactación. Suelo: A₆.

Peso inicial: $W=160$ g; Humedad inicial: 5,2 %.

Núm.	Agua	h_o	Δh_o	Num.		1	2	3	4	5	6	$\Sigma \delta_i$	h_o
—	cm ³	mm	$\frac{mm}{100}$	σ_1	kg/cm ²	10	20	30	40	50	60	—	mm
				P_i	kg	350	700	1.050	1.400	1.750	2.100	—	
1	6	29,0	58,0	δ_i	0	235	432	551	643	718	772	3.965	
				δ_{i-1}	—	0	235	432	551	643	718	—	21,3
				$\Delta \delta_i$	—	235	197	119	92	75	54	—	
2	9	28,4	56,8	δ_i	0	226	434	552	642	718	775	2.959	
				δ_{i-1}	—	0	235	432	551	643	718	—	20,6
				$\Delta \delta_i$	—	226	208	118	90	76	57	—	
3	12	28,1	56,2	δ_i	0	273	488	610	700	776	821	3.257	
				δ_{i-1}	—	0	273	488	610	700	776	—	19,9
				$\Delta \delta_i$	—	273	215	122	90	76	45	—	
4	15	28,0	56,0	δ_i	0	320	550	663	736	781	—	2.659	
				δ_{i-1}	—	0	320	550	663	736	—	—	20,2
				$\Delta \delta_i$	—	320	230	113	73	45	—	—	
5	18	28,2	56,4	δ_i	0	384	592	667	705	—	—	1.995	
				δ_{i-1}	—	0	384	592	667	—	—	—	21,2
				$\Delta \delta_i$	—	384	208	75	38	—	—	—	

Precompresión inicial: 5 kg/cm².

Incremento final:

$$\Delta \delta_o = \frac{h_o}{500} \Delta \sigma = 2h_o \text{ mm } 10^{-2}$$

Altura mínima: $h_m=19,8$ mm.

Peso inicial del testigo:

$$P_o = \frac{P}{1+w} = 152,2 \text{ g.}$$

Peso final del testigo: $P_o=150,35$ g.

Pérdida de peso en operaciones:

$$\xi = \frac{152,2 - 150,35}{150,35} = 1,2 \%$$

Area del consolidómetro: $A=35$ cm².

Densidad aparente en límite de compactación:

$$\delta_s = \frac{150,35}{1,98 \times 35} = 2,16$$

Límite de compactación:

$$CL = \frac{1}{2,16} - \frac{1}{2,72} = 9,2 \%$$

Energía relativa de compactación:

$$REC = \frac{3.040 \times 10}{0,150} = 200$$

Fig. 1

CUADRO IV.—Comparación de resultados de ensayos de compactación.

A) METODOS DE ENSAYO Y ENERGIA RELATIVA DE COMPACTACION.

Núm.	M E T O D O	U N I D A D E S								
		D _m cm	A _m cm ²	P _s kg	n	P _u kg	H cm	N	σ _u kg/cm ²	REC cm ⁻¹
1	Próctor Standard	10,3	83,5	1,8	3	2,5	30	25	—	37,5
2	Próctor Standard Especial	10,3	83,5	1,4	3	2,5	30	25	—	48
3	Próctor Standard Especial	10,3	83,5	1,0	3	2,5	30	25	—	67,5
4	Próctor modificado AASHO... ..	15,3	185	4,0	5	4,5	45	56	—	77
5	Próctor modificado Especial... ..	15,3	185	2,8	3	4,5	45	56	—	66
6	California	15,3	185	4,0	—	—	—	—	140	*
7	California Especial	15,3	185	3,0	—	—	—	—	76	*
8	Límite de compactación	6,7	35	0,150	—	—	—	—	*	*

* Valores a determinar en el proceso de ensayo.

B) COMPACTACIONES EN TRES SUELOS (A₁, A₂ y A₇₋₈).

SUELO Y CARACTERISTICAS		Núm.	U N I D A D E S									
			P _s kg	n	σ _u kg/cm ²	Σδ _i mm 10 ⁻²	REC cm ⁻¹	δ _{max} t/m ²	ω _o %	ω _s %	RC	S
Grupo A ₁ - CL		PL	—	—	—	—	0	1,721	—	21,1	0	—
		1	1,8	3	—	—	37	1,720	19	21,0	0,01	0,91
Densidad	δ _s = 2,70	2	1,4	3	—	—	48	1,745	17	20,2	0,10	0,84
L. líquido	LL = 29,9	3	1,0	3	—	—	67	1,775	15,7	19,3	0,19	0,82
L. plástico	PL = 21,1	4	4,0	5	—	—	77	1,840	14,9	17,9	0,34	0,83
L. contracción	SL = 19,2	5	2,8	3	—	—	66	1,900	15,2	16,1	0,53	0,95
L. compactación	CL = 11,6	6	4,0	—	140	36.300	98	1,945	12,0	14,9	0,65	0,81
I. plasticidad	PI = 8,8	7	3,0	—	140	27.920	101	1,935	12,0	15,1	0,63	0,80
I. compacidad	CI = 9,5	CL	0,155	—	60	3.125	200	2,070	—	11,6	1,00	—
Grupo A ₂ - CL		PL	—	—	—	—	0	1,705	—	21,9	0	—
		1	1,8	3	—	—	37	1,750	18,6	20,2	0,06	0,92
δ _s = 2,72		2	1,4	3	—	—	48	1,780	18,2	19,4	0,20	0,92
LL = 35,6		3	1,2	3	—	—	67	1,870	14,8	16,3	0,44	0,90
PL = 21,9		4	4,0	5	—	—	77	1,966	12,2	14,2	0,60	0,86
SL = 14,0		5	2,8	3	—	—	66	1,870	14,2	16,3	0,44	0,84
CL = 9,2		6	4,0	—	140	32.800	89	2,020	11,6	12,3	0,74	0,94
PI = 13,7		7	3,0	—	140	27.980	101	2,000	12,0	13,2	0,68	0,91
CI = 12,7		CL	0,150	—	55	3.460	200	2,160	—	9,2	1,00	—
Grupo A ₇₋₈ - ML		PL	—	—	—	—	0	1,565	—	27,2	0	—
		1	1,8	3	—	—	37	1,595	24,3	26,0	0,08	0,93
δ _s = 2,73		2	1,4	3	—	—	48	1,630	22,9	24,8	0,16	0,92
LL = 42,0		3	1,0	3	—	—	67	1,660	20,6	23,6	0,25	0,87
PL = 27,2		4	4,0	5	—	—	77	1,780	15,9	19,7	0,51	0,81
SL = 22,4		5	2,8	3	—	—	66	1,720	17,4	21,5	0,39	0,81
CL = 12,7		6	4,0	—	—	39.940	108	1,860	15,7	17,2	0,70	0,91
PI = 14,8		7	3,0	—	—	31.080	112	1,875	15,0	16,7	0,72	0,90
CI = 14,5		CL	0,152	—	65	4.150	270	2,030	—	12,6	1,00	—

Referencias: SL: límite de contracción.
CL: límite de compactación.
PL: límite plástico.
LL: límite líquido.
REC: energía de compactación relativa.

ω_o: humedad óptima.
ω_s: humedad de saturación.
δ_{max}: densidad máxima.
s: índice de saturación.
σ_u: máxima presión de ensayo.
RC: compacidad relativa.

han unido con una envolvente poligonal los puntos más alejados de dicha línea de referencia. Se observa que la distribución de los puntos representativos de diversas compactaciones es muy parecida para los tres suelos estudiados, encontrándose por debajo de la línea de referencia los puntos correspondientes a ensayos de compactación Próctor normal realizados en cilindros de 4" (101 mm) de diámetro con diferente peso de suelo, y por arriba de la línea de referencia los puntos correspondientes a ensayos de compactación tipo Próctor modificado, realizados en cilindros de 6" (152 mm) con diferente peso de suelo, así como los resultados de ensayos tipo CBR. Esta diferencia, relacionada aparentemente

con las dimensiones del molde y el esfuerzo de compactación, puede atribuirse, por lo menos en parte, a influencia negativa del rozamiento en el trabajo de compactación. En la planilla siguiente se han promediado resultados de Próctor normal con 1 y 1,4 kg de suelo, de Próctor modificado con 4 kg/5 capas y 2,8 kg/3 capas, y CBR de 4 y 3 kg, para tener una idea aproximada de la variación de compactación relativa en diversos métodos de ensayo:

Fig. 2

CUADRO V.—Valores medios de compactación relativa.

Suelo	Próctor standard	Próctor 1-1,4 kg	AASHO	CBR	Promedios	Orden de magnitud
A ₄	0,01	0,15	0,44	0,64	0,41	1
A ₆	0,06	0,32	0,52	0,71	0,40	
A ₇₋₈	0,08	0,20	0,45	0,71	0,36	0,90
Promedios	~ 0,05	~ 0,22	~ 0,47	~ 0,68	—	—
REC	37	57	71	101	—	—

Surge de esta comparación, la más directa y simple posible con los datos disponibles para tres suelos, que la compactabilidad es casi igual en los suelos A₄ y A₆, y bastante inferior en el suelo A₇ (orden de magnitud 10 por 100 menor) y que la compactación relativa, siendo insignificante en el ensayo Próctor standard, aumenta proporcionalmente a la energía de compactación relativa, según el ajuste lineal de promedios indicado en la figura 2, siendo aproximadamente 1/4 en nuestro tipo de Próctor reforzado, 1/2 en el modificado AASHO y 2/3 en el CBR. Por otra parte, puede verse en el cuadro general IV que el grado de saturación varía erráticamente en todos los ensayos realizados en tres suelos con un valor medio 0,87.

6. Conclusiones

De este estudio, realizado con el objeto de encontrar una relación racional entre los diversos tipos de ensayos convencionales de compactación, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Se puede determinar la máxima densidad que es posible para suelos compactados, por medio de un método de ensayo especial para relación humedad-densidad, que difiere de los métodos convencionales en que se efectúa compresión confinada del suelo hasta el punto en que no hay sensible aumento de deformación para un incremento determinado de carga.

Se puede determinar un límite de compactación característico de un suelo, tan significativo como los límites líquido, plástico y de contracción, expresado por la humedad de saturación correspondiente a la densidad máxima.

La energía de compactación relativa al peso de suelo y sección del cilindro o molde de compactación es una magnitud física que se puede determinar con buena aproximación, tanto en la compactación a golpes de masa en caída libre, como en ensayos de compresión confinada, tanto CBR como la realizada para límite de compactación, siendo solamente necesario realizar los ensayos de compactación en general a peso constante, y los de compresión confinada en particular con medida de las deformaciones.

Ensayos de compactación en tres suelos de muy diferente plasticidad muestran una distribución muy semejante de las densidades en función de energía de compactación relativa, con respecto a una línea de referencia definida por los límites plástico y de compactación, siendo más eficaz la compactación en moldes de 6" (152 mm) (tipo AASHO y CBR) que en moldes de 4" (101 mm) (tipo Próctor), independientemente de la energía de compactación.

Las menores densidades obtenidas en los tres suelos, muy próximas a las densidades aparentes secas en límite plástico, muestran que el rango o índice de compactación es definido con razonable aproximación por los límites plástico y de compactación, por lo cual es posible comparar densidades de diversos suelos en términos de compacidad relativa entre dichos límites.

Promediando resultados de los tres suelos para cada tipo de ensayo (Próctor standard de 1,8 kg, Próctor reforzado de 1 a 1,4 kg, AASHO de 4 kg/5 capas y 2,8 kg/3 capas, CBR de 4 y 3 kg) se encuentra que la compacidad relativa puede expresarse como función lineal de la energía de compactación relativa, resultando un valor insignificante, prácticamente en el límite plástico, para el Próctor standard, y compacidades relativas aproximadamente 1/4, 1/2 y 2/3, respectivamente, para el Próctor reforzado, AASHO y CBR.

El índice de saturación es un valor particularmente errático, con un promedio muy parecido en los tres suelos, siendo el promedio general igual a 0,87, de manera que si se conocen el límite de compactación y la densidad sólida del suelo, se pueden calcular directamente la densidad máxima y humedad óptima correspondientes a cualquier densidad relativa prefijada.

Tanto los estudios de propiedades mecánicas de suelos compactados, tales como estabilidad, compresibilidad y expansibilidad, así como las especificaciones de compactación de suelos, pueden expresarse en términos más fácilmente comparables de compacidad relativa y límite de compactación, obteniéndose este último en un ensayo muy simple, preciso y completo, que requiere solamente una pequeña muestra representativa del suelo.