estudio especial de la compactación de suelos

Presentamos a continuación dos artículos sobre estudios de compactación de suelos cuyo objetivo es obtener una correlación teórico-experimental de los diversos ensayos de compactación, tan diversos y engorrosos, que incluyen Próctor normal y reforzado en cilindro de cuatro pulgadas con masa de cinco y media libras, método dinámico AASHO en cilindro de seis pulgadas con masa de diez libras, método estático Porter o California, y tantas otras variantes no solamente empleadas en la técnica por una u otra consideración, sino también posibles por variación de sección del molde, peso de suelo, número de golpes y altura de caída, sin contar métodos de ensayos especiales o equivalentes, tales como el de la minicompactación de Casagrande, el especial de Hvem, etc. En estos artículos se resuelve, ciertamente, gran parte del problema relativo a la interpretación comparativa de resultados de tan diversos ensayos, y se abre el camino para investigaciones fecundas de correlación entre propiedades mecánicas de estabilidad y valores relativos de compactación y humedad.

Los dos artículos referidos, que exponen resultados de investigaciones realizadas en el Instituto de Materiales y Suelos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuyo, Argentina, se deben a su Director, Ingeniero Civil Francisco Giuliani, a su colaborador, Ingeniero Civil Raúl Suárez Robledo y al Auxiliar de Laboratorio Juan Ramón Puebla.

El primero de estos trabajos se titula «Límites de Compactación y Compactación relativa de suelos» y mereció un premio en concurso de la Dirección Nacional de Vialidad de la República Argentina, siendo también seleccionado por la misma para presentarlo en el Congreso Panamericano de Carreteras, que tuvo lugar en Washington, en mayo de 1963.

El segundo de estos trabajos se titula «Nuevo método de análisis de compactación de suelos», y fue presentado por los autores al II Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, que tuvo lugar en Brasil, en julio de 1963.

La presentación conjunta de estos dos trabajos, que se continúan y completan entre sí, puede ser de sumo interés para lectores de habla española y europeos en general.

límites de compactación y compacidad relativa de suelos

FRANCISCO GIULIANI y RAUL SUAREZ ROBLEDO, Ingenieros Civiles.
JUAN RAMON PUEBLA, Auxiliar de Laboratorio.

Resumen

Es sabido que al aumentar el trabajo de compactación de suelos, aumenta la densidad máxima y disminuye la humedad óptima. En especificaciones de compactación propuestas sucesivamente se ha aumentado cada vez más el trabajo de compactación y las densidades máximas correspondientes, pero no se conocen hasta ahora procedimientos para fijar límites superior e inferior de compactación posible, que permitan expresar el resultado de ensayos de compactación en términos de compacidad relativa. En este trabajo se define un límite superior de compactación, correspondiente a máxima densidad y mínima humedad para alcanzarla en estado próximo a saturación, se describe el ensayo para determinarlo, y se propone al mismo tiempo como límite inferior de compactación de suelo en estado de saturación al límite plástico. De cada ensayo convencional de compactación resultan valores de densidad máxima, humedad óptima y humedad de saturación, de los cuales se deducen, teniendo en cuenta los límites expresados, dos valores característicos relativos: el coeficiente de saturación y la compacidad relativa, definida esta última por la densidad relativa referida a la razón de vacíos entre los límites definidos, o lo que es igual y más directamente, por la humedad de saturación referida a las humedades características de dichos límites. Efectuada la compactación de un suelo por diversos procedimientos de compactación, se ha comprobado que la compacidad relativa varía en función directa del trabajo de compactación referido a peso de suelo y área del molde, y también de la humedad de compactación, siendo la compacidad relativa nula en el límite plástico. Se expresa que la verificación de conclusiones en otros suelos y la correlación de características de suelos, incluyendo el límite de compactación aquí definido, permitirán perfeccionar especificaciones en términos de compacidad relativa, simplificando el control de la compactación en obra.

1. Introducción

La compactación de suelos finos de muy diversa plasticidad puede variar entre límites muy amplios para cada suelo, como se observa al comparar las curvas de densidad-humedad en ensayos Próctor realizados con creciente trabajo de compactación. Aún mayor es el campo de variación si se consideran los ensayos a presión constante denominados Porter o California. Es sabido que al aumentar el trabajo de compactación se produce a la vez aumento de la densidad máxima y disminución de la humedad óptima, explicándose esto último por la disminución del límite de saturación al aumentar la densidad. Admitiendo como límite superior de la humedad de compactación el límite plástico, el primer objetivo de este estudio ha sido encontrar un método de ensayo para obtener un límite inferior de la humedad de compactación, correspondiente a un límite superior de compacidad, independientemente del trabajo o de la presión necesaria para alcanzarlo. Así como la diferencia entre límite líquido y límite plástico define el índice o rango de plasticidad, la diferencia entre límite plástico y límite de compactación definiría un índice o zona de compacidad de un suelo.

En una serie de ensayos con diverso trabajo de compactación, realizados para un mismo suelo, se observa que las densidades máximas y humedades óptimas corresponden a

un grado de saturación elevado y prácticamente uniforme. Como la compacidad relativa puede ser expresada por el índice de vacíos en relación a sus valores límites, también podría expresarse por el valor de humedad de saturación entre los valores límites respectivos.

Estos nuevos conceptos de límites de compactación y compactación relativa, además de completar el grupo de límites de plasticidad e índices característicos de suelos plásticos, y de generalizar el concepto equivalente de densidad relativa en suelos incoherentes, permitirían correlacionar racionalmente las propiedades mecánicas de suelos compactados, independientemente de las especificaciones arbitrarias de los ensayos convencionales de compactación.

2. Definición de límite de compactación

Comprimiendo una cantidad de suelo húmedo en un consolidómetro, 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 pasará 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 puede todavía disminuir por 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.

3. Condiciones de compactación total para determinar el límite de compactación

El procedimiento de compresión de la muestra de suelo en el ensayo de límite de compactación ha sido resuelto de acuerdo a las siguientes condiciones:

- a) Necesidad de eliminar la influencia del rozamiento en las paredes del molde de compactación, para lo cual la altura final de la muestra debe ser del orden de un cuarto o un quinto del diámetro del molde, como en ensayos de consolidación.
- b) Necesidad de establecer un volumen inicial del testigo como referencia de la medida de deformaciones, para lo cual la muestra debe precomprimirse a presión prefijada antes de iniciar el ensayo de carga-deformación.
- c) Necesidad de fijar un criterio para la terminación de cada compactación, para lo cual la compresión debe terminar cuando a un incremento establecido de presión corresponde un incremento de deformación unitaria igual o menor que un valor límite prefijado.

Estas condiciones se verifican al comprimir muestras de suelo de aproximadamente 150 g en un consolidómetro de 2 ½" (63 mm) de diámetro, suplementado para alcanzar una altura útil de 2" (50 mm), aproximadamente, con lo cual se tiene capacidad inicial suficiente para el volumen de la muestra totalmente suelta. Las piedras porosas del consolidómetro se reemplazan por piezas de metal, con el fin de tener condiciones comparables a las de los procedimientos usuales de compactación. El suelo se comprime con un pistón bien ajustado pro-

visto de una escala milimétrica enrasada en el borde inferior. En la figura 1 se muestra un corte del consolidómetro y piezas especiales empleadas, designándose H a la altura útil, E a la longitud de la escala del pistón de compresión, x a la lectura de la escala y h al espesor de la muestra comprimida. El objeto de la escala es de poder pre-comprimir la muestra a una presión convencional, fijada aproximadamente en 5 kg/cm^2 , y leer directamente la altura inicial del testigo al suprimir la carga:

$$h_o = (H - E) + x_o \quad [1]$$

Efectuada la operación anterior se ajusta un medidor de deformaciones o un comparador centesimal y se inicia el proceso de compresión aplicando incrementos constantes de carga, por ejemplo, correspondientes a incrementos de presión de 10 kg/cm^2 , como se ve en cualquier etapa del cuadro I.

Fig. 1. Adaptación del consolidómetro para ensayos de compactación.

CUADRO I.—Determinación del límite de compactación. (Suelo: A_s).

Suelo: $\omega_L=32,6$						IP=10,7		Grupos A_s ó CL.					
Peso inicial W=160 g.						Humedad inicial=5,2 %							
Núm.	Agua	h_o	$\Delta \delta_{\mu}$	Núm.		1	2	3	4	5	6	$\Sigma \delta_i$	h_n
—	cm^3	mm	$\frac{\text{mm}}{100}$	σ_i	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	21,3
				δ_{i-1}	—	0	235	432	551	643	718	—	
				$\Delta \delta_i$	—	235	197	119	92	75	54	—	
2	9	28,4	56,8	δ_i	0	226	434	552	642	718	775	2.959	20,6
				δ_{i-1}	—	0	235	432	551	643	718	—	
				$\Delta \delta_i$	—	226	208	118	90	76	57	—	
3	12	28,1	56,2	δ_i	0	273	488	610	700	776	821	3.257	19,9
				δ_{i-1}	—	0	273	488	610	700	776	—	
				$\Delta \delta_i$	—	273	215	122	90	76	45	—	
4	15	28,0	56,0	δ_i	0	320	550	663	736	781	—	2.659	20,2
				δ_{i-1}	—	0	320	550	663	736	—	—	
				$\Delta \delta_i$	—	320	230	113	73	45	—	—	
5	18	28,2	56,4	δ_i	0	384	592	667	705	—	—	1.995	21,2
				δ_{i-1}	—	0	384	592	667	—	—	—	
				$\Delta \delta_i$	—	384	208	75	38	—	—	—	

$$\begin{aligned} \text{Incremento final} & \dots \dots \dots \Delta \delta_{\mu} = \frac{h_o}{100} \frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_o} = 2h_o \text{ mm} 10^{-2} \\ \text{Altura final} & \dots \dots \dots h_n = h_o - \sigma_n \dots \dots h_c = 19,8 \text{ mm} \\ \text{Peso inicial del testigo} & \dots \dots \dots W_{so} = \frac{W}{1 + \omega} = 152,2 \text{ g} \\ \text{Peso final del testigo} & \dots \dots \dots W_s = 150 \cdot 35 \text{ g} \\ \text{Pérdida de peso en operaciones} & \dots \dots \dots \xi = \frac{W_{so} - W_s}{W_s} = 1,2 \% \\ \text{Area del consolidómetro} & \dots \dots \dots A = 35 \text{ cm}^2 \\ \text{Densidad aparente en límite de compactación} & \dots \delta_{so} = \frac{W_s}{A \cdot h_c} = 2,16 \\ \text{Límite de compactación} & \dots \dots \dots \omega_c = \frac{1}{\delta_{so}} - \frac{1}{\delta_s} = 9,2 \% \end{aligned}$$

Fig. 2. Curvas de deformaciones e incrementos de deformación.

Fig. 3. Compactación en consolidómetro con máquina de compresión.

En la figura 2 se ha representado una curva de carga-deformación de una etapa del ensayo en el cuadro I, acompañada de la curva de incrementos de deformación, que ilustra el procedimiento seguido para decidir en qué punto se da por terminada la compactación. En efecto, la compresión podría seguir indefinidamente, pero puede darse prácticamente por terminada cuando el incremento de deformación unitaria es igual o menor que un valor preestablecido, el cual ha sido fijado tentativamente en 1 por 100 para un incremento $\Delta\sigma_o = 5 \text{ kg/cm}^2$.

Por lo tanto, determinada la altura inicial del testigo, h_o , y fijado el incremento de presión constante, $\Delta\sigma$, a emplear en la operación, se calcula el último incremento de deformación, cuyo valor determina el fin de la operación:

$$\Delta\delta_\mu = \frac{h_o}{100} \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_o} \quad [2]$$

En la práctica, el gráfico es completamente innecesario, bastando la determinación previa de h_o , el cálculo inmediato del último incremento de deformación, $\Delta\delta_\mu$, y el desarrollo del proceso de carga-deformación, calculando en el cuadro I los sucesivos incrementos de deformación, dando por terminada cada etapa u operación parcial cuando $\Delta\delta_i \leq \Delta\delta_\mu$.

Por último, la altura final del testigo se obtiene deduciendo la deformación total del testigo:

$$h_n = h_o - \delta_\mu \quad [3]$$

Se ha supuesto que el medidor de deformaciones registra directamente las deformaciones del testigo, debiendo restarse las deformaciones del anillo de carga o dinamómetro cuando se registran los desplazamientos del cabezal o plato móvil de la máquina de carga, como en el caso de la figura 3. El ensayo del cuadro I ha sido efectuado con mediciones directas de las deformaciones.

4. Condiciones para la repetición de compactaciones totales con humedad creciente

El procedimiento para repetir las operaciones de compactación total de la muestra de suelo con humedad progresiva para el ensayo de límite de compactación ha sido resuelto de acuerdo a las siguientes condiciones:

a) Necesidad de trabajar con una pequeña muestra de suelo, cuyo volumen final debe estar de acuerdo a las dimensiones del consolidómetro.

b) Necesidad de conservar intacta la pequeña muestra de suelo, evitando la sustracción progresiva para determinación de humedad, con el fin de reducir la influencia de errores de medida.

c) Necesidad de simplificar y disminuir las operaciones de cálculo.

Estas condiciones se verifican desmenuzando la pequeña muestra después de cada operación en un mortero de loza, evitando toda pérdida e incorporando cantidades medidas de agua en operaciones sucesivas. El desmenuzamiento es más rápido que en los ensayos ordinarios de compactación, porque la humedad límite es bastante inferior a la de otros ensayos y porque el manejo de pequeñas cantidades de suelo permite también operaciones más cuidadosas por la menor cantidad de tiempo y trabajo invertidos.

La operación de incorporar cantidades medidas de agua en operaciones sucesivas se ha resuelto diseñando el pulverizador que se ve en la figura 4, cuyo recipiente es un graduado de vidrio ajustado con tornillos entre placas de metal inoxidable, con intercalación de juntas de goma. Se pueden agregar incrementos constantes de humedad, afectados de un error prácticamente uniforme, producido por evaporación, absorción en pared del recipiente, u otras causas, el cual, sin embargo, no influye en la obtención del valor mínimo a determinar en una curva de alturas finales-agua incorporada.

El cuadro I registra todas las observaciones en operaciones sucesivas de carga-deformación con humedad progresiva para determinar el límite de compactación de un suelo. En la figura 5 se ha representado la curva de alturas finales-agua incorporada, de la cual se obtiene una altura final mínima

Fig. 4. Preparación del suelo y medición del agua incorporada.

Fig. 5. Curva de alturas finales-humedad.

aproximada. La repetición de operaciones con el mismo suelo da siempre resultados muy uniformes. Al terminar las operaciones se determina el peso W_s de la muestra secada en estufa a 100-105° C.

5. Determinación del límite de compactación

Para la correcta ejecución del ensayo es necesario evitar pérdida de suelo en las operaciones, y para el control es conveniente hallar la humedad inicial del suelo, ω , tomando una muestra de peso W , estimado para un peso seco aproximado de 150 g, cuando se emplea un consolidómetro de 2 1/2" (63 mm). El cuidado puesto en las operaciones se refleja en la pérdida relativa de peso calculada en la siguiente forma:

$$\xi = \frac{\frac{W}{1+\omega} - W_s}{W_s} \quad [4]$$

Admitiendo una pérdida de peso hasta 2 por 100 se efectúan los cálculos de densidad aparente máxima, humedad óptima y humedad de saturación correspondiente, que se toma como valor del límite de compactación buscado:

$$\delta_{ac} = \frac{W_s}{A \cdot h_o} \quad [5]$$

$$\omega_c = \frac{1}{\delta_{ac}} - \frac{1}{\delta_s} \quad [6]$$

Designaremos ω_c al límite de compactación, proponiendo para lo sucesivo la designación ω_R para el límite de contracción o retracción.

6. Compacidad relativa

La densidad relativa de un suelo de relación de vacíos, e , se define en función de los valores límites de esta variable en suelos incoherentes. Análogamente, la consistencia relativa de un suelo en estado plástico de humedad, ω , se define en función de los valores límites de esta variable en la zona de plasticidad. En la misma forma definiremos la capacidad relativa, C_r , de un suelo en el estado correspondiente al máximo de un ensayo convencional de compactación, considerando como variable la respectiva razón de vacíos entre los límites respectivos, correspondientes al límite de compactación, ω_c , y al límite plástico, ω_p :

$$C_r = \frac{e_p - e}{e_p - e_c} = \frac{\omega_p - e/\delta_s}{\omega_p - \omega_c} \quad [7]$$

Siendo ya conocidas la densidad máxima, δ_{max} , y la humedad óptima, ω_o , en un ensayo cualquiera de compactación, se puede calcular la humedad de saturación, ω_{os} , tomada como variable, y el grado de saturación, s , del suelo compactado con humedad ω_o :

$$\omega_{os} = e \cdot \delta_s = \frac{1}{\delta_a} - \frac{1}{\delta_s} \quad [8]$$

$$s = \omega_o / \omega_{os} \quad [9]$$

En consecuencia, el resultado de cualquier procedimiento de compactación en el laboratorio, expresado por la densidad máxima, δ_{max} , y la humedad óptima, ω_o , puede también ex-

presarse en valores adimensionales relativos entre cero y uno, por la compacidad relativa, C_r , y el grado de saturación, s , permitiendo la comparación directa de resultados de diversos procedimientos de compactación en diversos suelos.

7. Trabajo unitario de compactación

La compacidad relativa de un suelo compactado en el laboratorio depende, además de las características del suelo, del trabajo de compactación aplicado. Para que los trabajos de compactación sean comparables y permitan una correlación directa con la compacidad relativa, consideramos indispensable referir el trabajo de compactación a la sección del molde y al peso de suelo compactado, resultando el trabajo unitario de compactación en función de número de golpes, N , peso de la maza, W_M , altura de caída, H_M , área del molde, A , y peso medio del suelo, W_s , compactado sucesivamente en el ensayo:

$$TUC = \frac{N \cdot W_M \cdot H_M}{A \cdot W_s} \quad [10]$$

8. Conclusiones

En el cuadro II se resumen los resultados de determinaciones efectuadas para un suelo arcilloso, que se puede clasificar A_e o CL , para el cual se han determinado las constantes físicas usuales, incluyendo límites plástico y de compactación, y las compacidades relativas, grados de saturación y trabajos unitarios de compactación obtenidos con diversos procedimientos o especificaciones de compactación.

CUADRO II.—Comparación de resultados de compactación.

1 CARACTERISTICAS FISICAS.

Densidad sólida	$\delta_s = 2,72$
Límite líquido	$\omega_L = 32,6 \%$
Límite plástico	$\omega_p = 21,9 \%$
Límite de contracción	$\omega_R = 15,4 \%$
Límite de compactación	$\omega_c = 9,2 \%$

2. CLASIFICACION DEL SUELO.

Grupos A_e y CL : arcilla de baja plasticidad.

3. COMPACTACIONES REALIZADAS.

Núm.	PROCEDIMIENTO	D_m cm	σ kg/cm ²	N —	W_M kg	H_M cm	n —	W_s kg	TUC cm ⁻¹
1	California	15	140	—	—	—	1	4,0	—
2	AASHTO	15	—	56	4,5	45	5	4,0	80,0
3	Próctor	10	—	25	2,5	30	3	1,2	56,2
4	Próctor	10	—	25	2,5	30	3	1,8	37,5

15

4. COMPARACION DE RESULTADOS.

Núm.	TUC* cm ⁻¹	γ_{max} —	w_p %	w_{or} %	C_r	s
CL	—	2,180	—	9,2	1,000	—
1	—	2,050	10,4	12,0	0,778	0,87
2	77,0	1,966	12,2	14,2	0,605	0,86
3	52,7	1,876	14,8	16,5	0,425	0,90
4	35,0	1,820	17,0	18,8	0,290	0,93
PL	—	1,705	—	21,9	0	—

* Valores corregidos de acuerdo a diámetro exacto del molde y peso medio del suelo compactado.

En la figura 5 se han representado las respectivas curvas densidad-humedad y los límites de compactación, que en la curva de saturación corresponden a los puntos, *PL* y *CL*, de límite plástico y límite de compactación, respectivamente. En la figura 7 se han representado la compacidad relativa, C_r , y el coeficiente de saturación, s , en función del trabajo unitario de compactación. Se puede expresar tentativamente, por cuanto sólo se han efectuado ensayos en un solo suelo, que el coeficiente de saturación es prácticamente constante y que la compacidad relativa es función aproximadamente lineal del trabajo específico de compactación, y también función lineal de la humedad óptima de compactación, tendiendo aparentemente a anu-

Fig. 6. Límites de compactación y curvas densidad-humedad.

larse en el entorno del límite plástico. La repetición de estos ensayos en diversos suelos permitirá verificar si se confirman y generalizan estas conclusiones tentativas, así como establecer correlaciones entre límites de compactación y otras constantes físico-mecánicas. En todo caso, se ha obtenido un procedimiento de ensayo simple, rápido y preciso, que requiere solamente pequeñas muestras, permite relacionar los resultados de todos los procedimientos de compactación en laboratorio, aclara ciertos aspectos de la teoría de compactación y permitirá perfeccionar las especificaciones de compactación, simplificando los procedimientos de control de obra en el futuro.

Fig. 7. Correlación entre compacidad relativa, trabajo unitario y humedad.

publicaciones del i.e.t.c.c.

índice de suministradores de maquinaria para la construcción y obras públicas

Una relación completa de fabricantes y representantes en España de maquinaria para la construcción y obras públicas, ordenada en cuadros de doble entrada (por firmas comerciales y por tipos de máquinas). Constituye una información utilísima e imprescindible a la hora de pulsar el mercado, solicitar ofertas y decidir sobre la más ventajosa en cada caso.