

UN METODO RAPIDO PARA LA DETERMINACION DEL GRADO DE COMPACTACION DE OBRAS DE TIERRA

Por VENTURA ESCARIO,
Ingeniero de Caminos.

Después de una breve descripción del método normal para determinar el grado de compactación de una obra de tierra y de reseñar sus inconvenientes, propone el autor un nuevo método, cuyas ventajas analiza y cuya eficacia comprueba.

El método normal.

Como es sabido, el método más extendido hoy día para determinar el grado de compactación alcanzado en un terraplén, consiste en obtener la densidad seca del terreno *in situ* y compararla con la densidad máxima seca obtenida en un ensayo normal de laboratorio. La densidad *in situ* se determina practicando un agujero en la zona deseada, obteniendo el peso del suelo seco extraído y determinando el volumen del agujero practicado por uno de los varios métodos existentes, tales como el de la arena, el del aceite, el del balón de goma, etc., en cuya descripción no vamos a entrar por estar expuestos con detalle en numerosas publicaciones (1). La densidad máxima se obtiene compactando en un molde de dimensiones determinadas, y con una maza de características fijas, la muestra del suelo con diferentes grados de humedad. De esta forma se obtiene una curva que relaciona densidades secas con grados de humedad. Naturalmente, según la energía de compactación utilizada por unidad de volumen se obtiene una curva distinta. Generalmente se utiliza o el método Proctor Normal o el Proctor Modificado (2), siendo la energía de compactación por unidad de volumen para este segundo tipo más fuerte que para el primero y siendo fijas también las dimensiones del molde y maza en cada caso, pues son estos factores que también tienen alguna influencia en los resultados obtenidos. El máximo de la curva obtenida es el que se utiliza como patrón de comparación, determinándose la relación entre la densidad *in situ* y dicho máximo y expresándola en tanto por ciento.

Inconvenientes del método normal y sistemas hoy día utilizados para evitarlos.

De la breve descripción anterior se deduce que hay que determinar la relación entre la densidad *in situ* y la densidad máxima, secas. Y es de aquí de

(1) Ver, por ejemplo, *Normas de ensayos*, del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo.

(2) *Caminos*, Escario. 3.^a edición.

donde se deriva el mayor inconveniente de este método. En efecto, normalmente las densidades se determinan cuando la obra está en ejecución, controlándose la compactación obtenida tongada por tongada. Antes de extender la tongada siguiente, hay, pues, que haber comprobado que la anterior está debidamente compactada, y para ello no se dispone de mucho tiempo. En primer lugar hay que determinar la humedad de la densidad *in situ*. Si se utiliza el método de secado en estufa esto se lleva una porción de horas. Por eso, normalmente se utilizan métodos más rápidos de secado, tal como el método del alcohol, que consiste en mezclar y quemar con este producto varias veces el suelo. Este procedimiento requiere de veinte minutos a media hora con suelos arcillosos. También se emplean, a veces, hornillos portátiles para secar, pero hay que tener mucho cuidado, pues se puede sobrecalentar el suelo y obtener resultados erróneos.

Una vez obtenida la densidad *in situ* seca hay que determinar la densidad máxima Proctor. Para ello hay que hacer este ensayo con el mismo suelo de los alrededores del agujero practicado para obtener la densidad *in situ* y requiere el secado de unas cinco muestras. Naturalmente este secado se podría hacer también por cualquiera de los procedimientos rápidos descritos. Sin embargo, para tantas muestras resulta engorroso y lleva mucho tiempo. Por ello, normalmente se utiliza la estufa, lo que significa que no se puede conocer la densidad máxima hasta el día siguiente o, por lo menos, hasta varias horas después. Cuando se trata de suelos cuyas características no varían mucho, lo que se suele hacer es suponer cuál es la densidad máxima, a base de los ensayos Proctor que con antelación se van efectuando en las cantéras a utilizar. Este sistema, aunque en muchas ocasiones es útil, con frecuencia deja en la duda de si la densidad máxima supuesta era o no correcta; esto sucede especialmente cuando el terreno contiene estratos de características diferentes, que en la explotación se mezclan en proporciones arbitrarias, en

cuyo caso el asignar al punto de que se trate una densidad máxima resulta difícil.

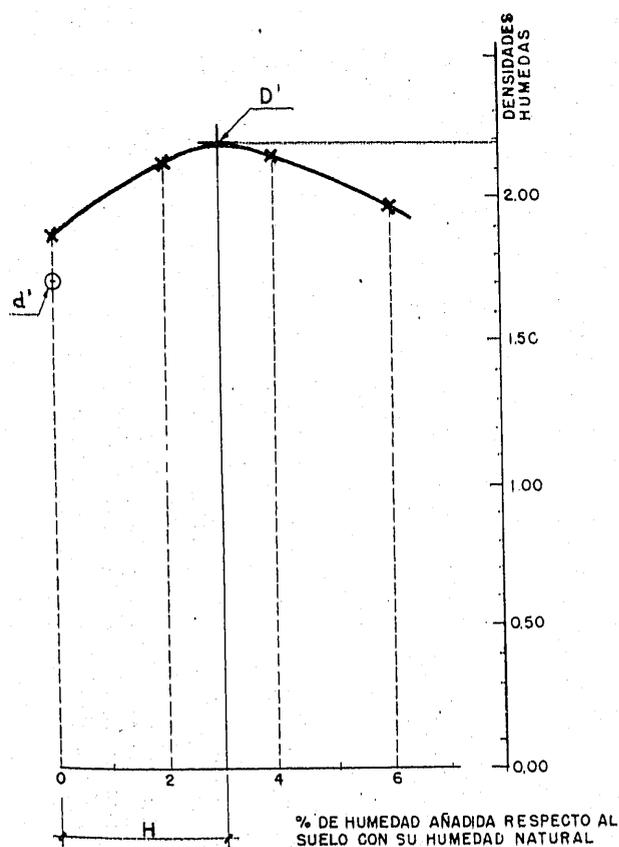
A veces lo que se suele hacer para determinar la densidad máxima es relacionarla con alguna característica del suelo. Así, por ejemplo, para el caso de subbases o bases granulares H. W. Flumpres (1) determina la densidad máxima correspondiente a un punto a partir de la cantidad de material que pasa por el tamiz núm. 4 (4.76 mm.), valor éste fácil de determinar en obra.

Esto, sin embargo, no es siempre posible, especialmente en obras como las de carreteras, por ejemplo, en las que el aprovechamiento de los productos de desmonte obliga a utilizar suelos de características con frecuencia muy distintas, para los que sería preciso establecer una correlación en cada caso.

El método propuesto.

A continuación proponemos un método con el cual no es preciso secar ninguna muestra para determinar el tanto por ciento de compactación obtenido.

Supongamos que determinamos la densidad *in situ* húmeda. A continuación, del mismo suelo, situado junto al agujero, tomamos una muestra y la com-



(1) "A Method for controlling compaction of Granular Materials". Boletín núm. 153 del Highway Research Board. Boletín de Información núm. 13 del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo.

pactamos en el molde de Proctor, determinando la densidad húmeda correspondiente. Tomamos una nueva muestra y le añadimos un tanto por ciento de agua conocido, respecto al suelo, incluida su humedad natural; lo anasamos y compactamos en el molde Proctor y determinamos su densidad húmeda. Repetimos el proceso añadiendo tantos por cientos de agua conocidos crecientes hasta que las densidades húmedas correspondientes empiecen a descender (suponemos de momento que la humedad natural es inferior a la óptima).

Si en unos ejes que tengan por ordenadas las densidades húmedas y por abscisas los tantos por ciento de agua añadidos respecto al suelo con su humedad natural y tomando, por tanto, como origen (cero) la humedad natural del terreno, situamos los puntos correspondientes a la densidad *in situ* y a los obtenidos en el molde Proctor, obtendremos un gráfico como el adjunto. En él aparece un punto aislado, correspondiente a la densidad *in situ* húmeda d' , y la curva Proctor de densidades húmedas. De la curva Proctor de densidades húmedas podremos determinar el tanto por ciento de humedad H que habría que añadir, respecto al suelo con su humedad natural, para obtener la densidad húmeda máxima, D' .

Si llamamos d y D a las densidades secas correspondientes a las húmedas d' y D' , y h al tanto por ciento de humedad natural del suelo referida al suelo seco, tendremos:

$$\frac{d'}{D'} = \frac{d(100+h) \times 100}{D(100+h)(100+H)} = \frac{d}{D} \cdot \frac{100}{100+H};$$

es decir, que la relación entre las densidades *in situ* y la máxima Proctor, húmedas, multiplicada por el factor $(100+H)$ es igual a la relación entre las densidades secas correspondientes, expresada en tanto por ciento. Pero, por otra parte, como se demuestra más adelante, el valor de D prácticamente coincide con el de la densidad seca máxima Proctor. Por tanto, resulta que la relación $\frac{d'}{D'}$, multiplicada por $(100+H)$, nos da el tanto por ciento de la densidad máxima Proctor que se ha alcanzado en obra.

La humedad natural del suelo puede estar por encima de la óptima Proctor, aunque esto, en la práctica, será poco frecuente en España. Entonces, al añadir agua al suelo, la densidad húmeda disminuirá. Para localizar el máximo necesitamos situar puntos con humedades inferiores. Para ello, lo que se ha de hacer es tomar una o más porciones del suelo, pesarlas y, bien extendidas, dejarlas secar un rato al sol mientras se compactan las otras muestras; o bien, para mayor rapidez, calentarlas ligeramente (2) con

(2) Cuidando de no sobrecalentar el suelo.

un mechero portátil u otro medio disponible. Una nueva pesada nos dará el tanto por ciento de agua, que será negativo. La relación de densidades secas se obtendrá en este caso multiplicando la de densidades húmedas por $(100 - H)$.

Fuentes de error.

Como puede deducirse de lo anteriormente expuesto, existen dos fuentes principales de error. La primera consiste en que se añade un tanto por ciento de agua que durante el amasado puede evaporarse parcialmente. La práctica ha demostrado, sin embargo, que, operando con un poco de cuidado, la pérdida es pequeña y se puede, en general, obtener un error menor del 0,5 por 100 en la cantidad añadida. Por otra parte, el máximo de la curva de densidades húmedas apenas varía con estos errores; el error cometido en los resultados por este concepto es, por tanto, del mismo orden de magnitud que el cometido en la situación de la humedad óptima correspondiente y, por ello, despreciable (del orden del 0,5 por 100). Para efectuar la operación de añadir el agua y amasar, deberá disponerse de una probeta graduada y de una bandeja para no perder el agua al añadirla.

La otra fuente de error es el hecho de que los máximos de la curva de densidades secas y la de densidades húmedas no están en la misma vertical. De los datos que hemos consultado de resultados de ensayos obtenidos en el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo y de otras fuentes, parece deducirse que el máximo de la curva húmeda queda algo a la derecha del máximo de la curva seca. Cuanto menor es la densidad máxima seca, la diferencia en valor absoluto entre las humedades correspondientes parece ser mayor; pero al mismo tiempo las curvas se hacen más tendidas. Ello es causa de que el error tienda a disminuir por otro lado; pues en definitiva, desde nuestro punto de vista, lo que nos interesa es la relación entre la densidad seca correspondiente a la máxima húmeda, y la seca máxima. En la tabla I se da la relación entre estos dos valores para varios suelos de nuestro Laboratorio y para las curvas tipo dadas por el Estado de Ohio. De dicha tabla se deduce que los errores introducidos por este concepto serán inferiores a una cifra del orden del 1 por 100 y la mayor parte de las veces inferiores al 0,5 por 100.

TABLA I.

Número de M.º	PROCEDENCIA	ENSAYO PROCTOR				Densidad seca de máxima húmeda $\times 100$ Densidad máxima seca
		DENSIDADES HUMEDAS		DENSIDADES SECAS		
		Densidad máxima	Humedad óptima	Densidad máxima	Humedad óptima	
11.287	Canal de Castrejón	2,16	8,5	2,00	8,5	99,5 %
11.291	» »	2,15	13,5	1,90	12,1	100,0 %
11.472	» »	2,10	14,6	1,83	14,5	100,0 %
11.502	» »	2,13	12,5	1,89	11,0	100,0 %
11.773	» »	2,26	10,6	2,05	9,2	99,5 %
11.780	» »	2,18	7,6	2,03	7,0	99,5 %
11.373	Madrid-Trén	2,11	13,9	1,87	12,5	99,5 %
11.375	» »	2,15	12,5	1,91	11,0	100,0 %
11.383	» »	2,16	9,5	1,97	9,5	100,0 %
11.385	» »	2,00	16,7	1,71	16,5	100,0 %
13.260	Maqueda TTI	2,03	18,5	1,71	18,0	100,0 %
13.265	» »	2,02	15,5	1,75	14,5	100,0 %
13.277	» »	2,19	11,3	1,97	10,0	100,0 %
13.284	» »	1,96	22,5	1,60	22,0	100,0 %
13.286	» »	2,01	18,0	1,71	16,5	99,5 %
13.292	» »	1,89	18,5	1,60	17,0	99,5 %
13.293	» »	1,90	21,4	1,57	20,0	100,0 %
13.296	» »	1,88	21,3	1,55	20,8	100,0 %
13.625	Sagunto-Burgos	1,97	24,5	1,59	24,3	99,5 %
13.626	» »	1,96	26,3	1,56	26,3	99,5 %
13.623	» »	1,97	25,1	1,57	25,0	100,0 %
13.619	» »	1,97	23,5	1,59	23,4	100,0 %
13.620	» »	1,96	24,7	1,57	24,5	100,0 %
13.616	» »	1,96	25,4	1,56	24,2	100,0 %
13.613	» »	1,97	27,0	1,56	26,4	99,3 %
13.607	» »	2,07	19,1	1,73	19,5	100,0 %
13.606	» »	2,08	19,7	1,76	17,6	98,8 %

(Continuación).

Número de M.ª	PROCEDENCIA	ENSAYO PROCTOR				$\frac{\text{Densidad seca de máxima húmeda}}{\text{Densidad máxima seca}} \times 100$
		DENSIDADES HÚMEDAS		DENSIDADES SECAS		
		Densidad máxima	Humedad óptima	Densidad máxima	Humedad óptima	
13.601	Sagunto-Burgos	1,98	23,4	1,62	22,5	99,0 %
13.599	» »	2,00	22,2	1,64	21,6	99,6 %
13.598	» »	2,05	21,8	1,69	21,6	100,0 %
13.592	» »	2,04	19,0	1,72	19,0	100,0 %
13.593	» »	2,00	19,7	1,67	20,0	100,0 %
13.595	» »	2,03	23,0	1,65	22,3	100,0 %
13.596	» »	2,01	21,5	1,66	20,9	99,5 %
13.629	» »	1,96	22,8	1,59	22,8	100,0 %
13.628	» »	2,00	25,1	1,60	24,0	100,0 %
13.627	» »	2,00	23,5	1,62	22,8	100,0 %
13.624	» »	2,01	23,7	1,62	23,5	100,0 %
13.632	» »	1,95	27,3	1,53	27,0	100,0 %
13.631	» »	1,97	31,4	1,49	25,0	100,0 %
	El Carpio	1,81	29,8	1,41	29,8	98,7 %
	» »	1,89	24,3	1,54	21,8	98,7 %
	» »	1,88	31,8	1,46	28,5	97,8 %
	» »	1,88	20,5	1,57	19,8	99,4 %
A	Ohio (U.S.A.)	2,42	6,6	2,27	6,6	100,0 %
B	» »	2,38	7,2	2,23	7,2	99,5 %
C	» »	2,35	8,0	2,18	7,9	99,5 %
D	» »	2,33	8,5	2,15	8,5	100,0 %
E	» »	2,30	9,0	2,11	9,0	100,0 %
F	» »	2,27	10,0	2,07	9,7	99,5 %
G	» »	2,24	10,7	2,02	10,5	100,0 %
H	» »	2,21	11,4	1,99	11,2	99,5 %
I	» »	2,18	12,2	1,95	11,9	99,5 %
J	» »	2,16	13,1	1,91	12,7	100,0 %
K	» »	2,13	14,0	1,87	13,5	100,0 %
L	» »	2,11	15,2	1,83	14,6	100,0 %
M	» »	2,08	16,5	1,79	15,8	99,7 %
N	» »	2,06	17,6	1,75	16,9	100,0 %
O	» »	2,03	19,0	1,71	18,1	99,7 %
P	» »	2,00	20,0	1,68	19,2	99,4 %
Q	» »	1,98	21,2	1,64	20,3	99,6 %
R	» »	1,95	23,0	1,60	21,5	99,1 %
S	» »	1,93	24,5	1,56	22,7	99,3 %
T	» »	1,90	26,5	1,51	24,4	99,4 %
U	» »	1,87	28,6	1,47	25,8	98,9 %
V	» »	1,85	30,0	1,44	27,4	98,8 %
W	» »	1,82	31,5	1,40	29,5	98,8 %
X	» »	1,79	33,0	1,36	30,5	98,9 %
Y	» »	1,76	34,0	1,33	31,5	98,7 %
Z	» »	1,73	34,5	1,30	32,5	98,9 %

NOTA. — La densidad seca correspondiente a la máxima húmeda en los suelos del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, se ha obtenido gráficamente. Se trata, por otra parte, de ensayos de rutina y no efectuados, por tanto, especialmente para este estudio.

Aunque no se trata de un error inherente al método, sí conviene recordar aquí que la compactación en el molde Proctor hay que hacerla sobre una base suficientemente rígida. Hemos hecho algunos ensayos comparativos utilizando un cubo de hormigón de 0,20 metros por 0,20 m. (probeta para compresión) para no apoyar el molde directamente sobre el suelo; la misma muestra se compactó después en el Laboratorio sobre una base grande de hormigón. Los resultados que se obtuvieron fueron prácticamente iguales, por lo que el empleo de dicha base, dotada de unas asas, parece recomendable para su uso en el campo.

Deberá también observarse por el color y aspecto del suelo si la humedad está repartida de manera razonablemente uniforme dentro de la zona utilizada, para que la humedad de la densidad *in situ* y la del suelo empleado para compactar los moldes sea la misma. Téngase en cuenta que una diferencia de un 1 por 100 respecto al suelo en su estado natural entre la humedad de la densidad *in situ* y la de las muestras utilizadas para el ensayo de compactación, produce aproximadamente un 1 por 100 de error en los resultados obtenidos. La porción total de suelo que vaya a utilizarse en la compactación de todos los moldes, puede ser conveniente mezclarla previamente para que en todos ellos el suelo utilizado sea de las mismas características; esta operación de amasado previo no deberá, sin embargo, prolongarse demasiado para evitar pérdidas de agua.

Cuando el suelo contenga gravilla de tamaño superior al admisible en el molde de compactación, este procedimiento puede resultar inaplicable, si no es fácil separar en húmedo dichas partículas.

Ventajas del método.

Este método tiene la ventaja fundamental de su gran rapidez, seguridad y economía. En efecto, normalmente sólo será preciso compactar tres o cuatro moldes para definir suficientemente la curva de densidades húmedas; téngase en cuenta que en una misma obra el operador pronto se familiariza con los suelos existentes, y, por tanto, en seguida se habitúa a añadir las proporciones de agua precisas para situar la curva con pocos puntos. La compactación de estos moldes puede, por tanto, suponer un tiempo de una media hora. En un suelo arcilloso el tiempo invertido es, por ello, del mismo orden de magnitud que el preciso para secar una muestra por el método del alcohol, que requiere, por lo menos, quemar la muestra tres veces. Pero además el método del alcohol sólo da una parte de la respuesta, ya que se desconoce el valor de

la densidad máxima seca correspondiente. Por otra parte, el método del alcohol supone el consumo de dicho producto, lo que lo encarece. En este método, en cambio, sólo es preciso disponer de un poco de agua.

Cualquier otro procedimiento de secado que se utilice necesita también su tiempo y tiene los peligros anteriormente apuntados, además de, como en el caso del alcohol, resolver el problema sólo parcialmente.

El procedimiento propuesto es, por otra parte, sencillo de efectuar y cualquier vigilante puede fácilmente aprenderlo. En algunos ensayos comparativos que hemos realizado para comprobar su utilidad, determinando simultáneamente los resultados por el procedimiento de secado en estufa, hemos obtenido los siguientes resultados:

Tabla II.

TIPO DE SUELO	ENSAYO PROCTOR		TANTO POR CIENTO DE LA DENSIDAD MÁXIMA PROCTOR		
	H. O.	D. M.	Método normal Por 100	Método propuesto Por 100	Diferencia
<i>Madrid-Valencia.</i>					
Muy arenoso	10,0	1,98	92,9	92,5	+ 0,4
Arcilla arenosa	18,0	1,73	83,7	83,0	+ 0,7
» »	19,5	1,70	77,3	77,2	+ 0,1
» »	11,5	1,96	87,6	88,2	- 0,6
» »	21,5	1,70	98,9	98,4	+ 0,5
<i>Ciudad Real-Toledo.</i>					
Arena arcillosa	23,2	1,60	75,6	76,8	- 1,2
Arcilla arenosa	19,3	1,70	69,4	70,3	- 0,9
» »	11,5	1,94	88,7	89,5	- 0,8
» »	24,0	1,62	79,0	79,5	- 0,5
<i>Madrid-Puente Praga.</i>					
Arcilla gris	18,3	1,75	89,2	89,4	- 0,2
Arena arcillosa	30,5	1,46	93,7	93,5	+ 0,2
Arcilla gris	25,0	1,58	93,5	92,7	+ 0,8

La concordancia, como puede observarse, es, pues, más que suficiente a efectos prácticos.

De todas formas, si en algún caso se tuviera alguna duda de si las hipótesis descritas en que el método se funda son aplicables a un suelo determinado, bastará con hacer comprobaciones en algunos puntos.