

aclaraciones sobre compactación, compactibilidad y los ensayos de proctor

SANDRO ROCCI, ingeniero de caminos

1. Introducción

Nuestra época técnica sufre una hipertrofia de publicaciones. Ello origina, a la par, daños y beneficios: concretamente, entre los primeros es frecuente el desarrollo paralelo de investigaciones sobre el mismo tema, pero con enfoques diferentes, obteniendo, luego, resultados cuya comparación o extrapolación resulta peligrosa o inadecuada: es un caso claro de falta de generalidad. El fenómeno de la compactación, cuya aplicación es tan frecuente, resulta no sólo sorprendentemente reciente, sino, además, poco conocido en realidad..., y ese poco conocimiento es inconexo y, a veces, erróneo. La compactación aguarda a su teorizador, que elabore una sistematización general de los diversos fenómenos simultáneos que en ella intervienen; síntesis difícil, pues descansa sobre una base empírica muy aleatoria, como todas las de Mecánica del Suelo.

No pretendo, por tanto, establecer dicha sistematización, sino únicamente llamar la atención sobre algunos puntos que en ella deberán ser tenidos en cuenta; nada nuevo, pero nada viejo tampoco; y un útil punto de partida para futuras investigaciones sobre el tema, hoy de urgente actualidad.

2. Compactación y consolidación

Las propiedades más interesantes de un suelo como material de construcción son su resistencia y su inalterabilidad. La primera depende, como es natural, de la estructura interna del suelo; una característica importante del mismo es la proporción entre el volumen ocupado por las partículas y el de los huecos que quedan entre ellas. Una medida de esta proporción es el *índice de huecos* y, conocida la densidad absoluta de las partículas, también lo es el *peso específico aparente del suelo*.

Por otra parte, los huecos entre las partículas pueden ser rellenados por el agua o por el aire. Como la alterabilidad del suelo es influenciada primordialmente por el agua, el contenido relativo de ésta y de aire en los huecos, o *grado de saturación*, es otra propiedad fundamental para el conocimiento del comportamiento del suelo como material de construcción. Suele manejarse en forma de porcentaje de *humedad respecto a peso de suelo seco*, combinado con el peso específico conjunto del mismo suelo.

Suele admitirse—aunque ello no es siempre cierto, como veremos más adelante al hablar de sobrecompactación—que las propiedades resistentes de un suelo aumentan al disminuir el índice de huecos, porque las partículas se disponen según estructuraciones más estables. Por ello, es por lo que interesa reducir esos huecos al máximo compatible con la economía, antes de utilizar al suelo como cimiento capaz de soportar cargas: es la *compactación*, que se hace a expensas de los huecos ocupados por el aire (aumentando, por tanto, el grado de saturación), que es expulsado o se disuelve en el agua intersticial.

Más adelante, y ya bajo los efectos de las cargas, se produce la lenta expulsión del agua, con subsiguiente reducción de huecos por efecto de esta *consolidación*. No voy a ocuparme ahora del proceso lento de la consolidación, y sí del rápido de la compactación.

Definida así la compactación como el proceso rápido, en que por medios mecánicos se reduce el índice de huecos de un suelo, fundamentalmente por la eliminación de aire (aunque en algunos

suelos granulares muy permeables se elimina también agua durante la compactación), veamos qué factores tienen importancia en relación con la obtención económica de la resistencia aneja al estado compacto (que es, en definitiva, lo que se desea). Dejando a un lado, por ahora, la relación entre dicha resistencia y el índice de huecos, en este último influyen decisivamente tres variables independientes:

- A) Tipo de suelo.
- B) Contenido de humedad en el momento de aplicar la compactación.
- C) Naturaleza y cantidad de energía de compactación aplicada.

No entra en mis propósitos el establecer reglas "a priori" sobre la influencia de estos tres factores en el resultado de la compactación; estas reglas deben ser, en cada caso, fruto de una experimentación; es, por ello, que llamo la atención sobre la importancia que en esta cuestión tienen los ensayos, y su correcta interpretación.

3. Límites de la compactación: compactibilidad

Admitiremos, en principio, que operamos experimentalmente sobre un solo tipo de suelo, o sea: fijamos la variable (A). Consiguientemente, se conoce la densidad absoluta de las partículas del suelo: aunque el esfuerzo compactivo fuera infinito, reduciéndose a cero el índice de huecos, no se podría alcanzar un volumen específico (y, por tanto, un peso específico aparente) inferior (superior) al correspondiente a la densidad absoluta de las partículas. He aquí una primera limitación de la compactación, totalmente teórica.

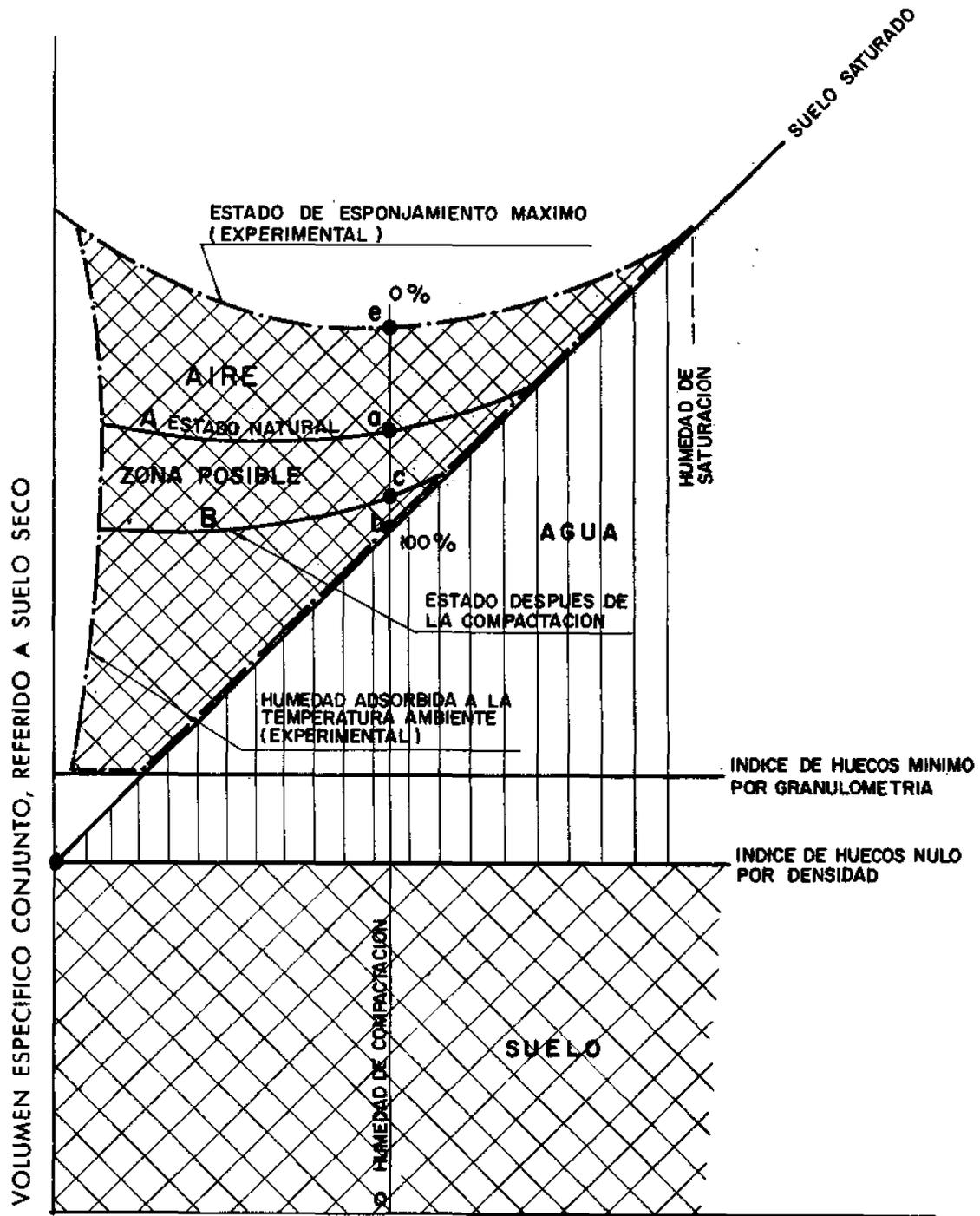
En segundo lugar, la granulometría del suelo tiene un índice de huecos inevitable, procedente del hecho de que la forma de las partículas del suelo no suele llenar totalmente el espacio entre ellas. Hay, por lo tanto, un índice de huecos mínimo, al que corresponde un volumen aparente específico mínimo, y un peso específico conjunto *máximo*. Conviene llamar la atención sobre la conveniencia de manejar el peso específico aparente seco, en lugar del total, con objeto de eliminar el aumento de peso producido por el agua que llena los huecos; cuyo aumento no refleja, claro está, una reducción del índice de huecos total.

En tercer lugar, extrapolando la consideración anterior, el añadir agua por encima de la saturación total da lugar a un aumento del índice de huecos, precisamente en proporción del exceso de agua añadida por encima de la saturación.

Y, por último, es muy importante hacer observar que existe un límite inferior a la compactación: un índice de huecos máximo, por encima del cual el suelo es incapaz de resistir su propio peso. Puede dar idea bastante exacta de ello el estado en el cual se halla el suelo recién depositado por una lenta sedimentación: los granos se apoyan unos en otros, formando frágiles estructuras a manera de castillos de naipes, que luego los agentes exteriores (incluyendo entre éstos la propia compactación) se encargan de transformar en estructuras más estables, eliminando huecos. Podemos admitir, en principio, que el peso específico conjunto *mínimo* no es nulo (como podría hacer pensar la frecuente práctica de especificar compactaciones como *porcentajes* de un peso específico máximo), sino que tiene un valor discreto; y que dicho valor no es constante, sino que depende del porcentaje de agua, que actúa de aglutinante (por capilaridad) o de lubricante (por viscosidad), según su proporción, como más adelante veremos al hablar de la compactación.

Tenemos, pues, que los estados posibles de un suelo en función de su *volumen específico* (o su peso específico) conjunto, o su índice de huecos y de su *contenido de humedad* (con respecto al peso seco) no son infinitos, sino que se mueven dentro de un reducido campo de posibilidades, limitado por las tres últimas condiciones citadas (ya que la primera es teórica, salvo machaqueo del suelo; y aún se podría añadir una quinta, puesto que tampoco el contenido de agua llega nunca a ser nulo a la temperatura ambiente, debido al agua adsorbida a las partículas de suelo) (fig. 1).

Dentro de la zona de posibilidades, el suelo, a través de su formación geológica y edafológica, habrá alcanzado una posición que denominaremos de *estado natural*, naturalmente por encima



ESTADOS POSIBLES DEL SUELO

Fig. 1.

Compactibilidad teórica = $\frac{e b}{o b}$	Grado de compactación inicial = $\frac{e c}{a b}$
Compactibilidad práctica = $\frac{a b}{o b}$	Grado de compactación alcanzado = $\frac{e a}{a b}$
	Compacidad añadida = $\frac{a c}{a b}$

del estado de esponjamiento máximo, pero sin alcanzar el índice de huecos mínimo. La variación, dentro de ese estado, del índice de huecos con el contenido de humedad, será pequeña en los suelos corrientes y mayor en los expansivos; no nos importa por ahora su forma, que será definida experimentalmente, sino la existencia de esa *curva de estado*. En efecto, si en su estado natural el suelo no tiene las características resistentes precisas, habrá que *compactarlo*, alejándolo del estado de esponjamiento máximo, y acercándolo (todo lo que la economía permita) al índice de huecos mínimo compatible con la no alteración del suelo (concretamente, de su granulometría). Obsérvese que al mismo tiempo se facilita su saturación, puesto que la zona de posibilidades es más estrecha: entra en juego ahora, no sólo la inalterabilidad frente a la acción del agua, de la que ahora precisa una cantidad menor para producir la saturación del suelo, sino también la reducción de las propiedades resistentes que sobreviene con la saturación, y que hace que no convenga acercarse a ella, a pesar de que sea más fácil que antes.

En definitiva, se ha pasado de un estado A "natural" del terreno a otro estado B "compactado", en el que las propiedades resistentes son mayores, pero en el que el margen tolerable de contenido de agua es menor. La operación se realiza por medios mecánicos (variable C), y partiendo de un punto del estado A, correspondiente a una humedad determinada (variable B, humedad de compactación). Esta humedad se aumenta fácilmente (por riego); pero disminuirla (por secado) es engorroso y caro (y en climas lluviosos, a veces imposible); tiene una importancia fundamental en la consecución del estado B "compactado". En terrenos naturales, se parte del estado A "natural"; pero en los ensayos de compactación se parte, en realidad, del estado de esponjamiento máximo o uno próximo a él, puesto que el suelo se desmenuza y amasa por separado antes de someterlo a la compactación: cosa que no es económicamente posible en la realidad. Ha de recordarse esto al interpretar en la realidad los rendimientos de la compactación definida por ensayos.

Al movernos dentro de la zona posible a lo largo de una vertical (humedad B constante en el momento de la compactación) vemos que, aún a partir del estado de esponjamiento máximo (0 % de compactación) el punto correspondiente al 100 % de compactación alcanzable, corresponde a una diferencia de índice de huecos o de volumen específico, distinta para cada humedad B; esta diferencia es lo que vamos a llamar *compactibilidad teórica*, expresada de forma relativa al 100 % o "recta del suelo saturado", que únicamente es función de la densidad absoluta de las partículas de suelo. Es esta compactibilidad teórica la que entra en juego en los ensayos de compactación.

Pero en la realidad no se parte del estado de esponjamiento máximo (punto *e* de la figura 1), sino del estado natural del terreno (punto *a*), por lo que es más significativo definir la *compactibilidad práctica* de forma análoga a la compactibilidad teórica, pero partiendo del estado natural del terreno.

4. Compactación: fases

Seguimos manteniendo fija la variable B (humedad en el momento de la compactación). En el instante inicial, el terreno tiene ya adelantado un *grado de compactación inicial*, a veces muy elevado en la realidad, y casi nulo en el ensayo. Después de la compactación, el *grado de compactación* ha variado (punto *c* de la fig. 1). A la diferencia entre ambos grados de compactación la llamaremos adecuadamente *compactidad añadida*, expresada como porcentaje de la añadible hasta compactación 100 %.

El paso del estado natural, A, al compactado, B, se puede realizar a partir de cualquier humedad (variable B) y con la aplicación de una forma de energía determinada (variable C). Manteniendo fija esta última variable, es interesante estudiar el efecto de la variación de B en los parámetros que hemos definido anteriormente.

Antes de iniciar la compactación, podemos saber que tanto la compactibilidad teórica como la práctica contravarían casi linealmente con el contenido de humedad que vayamos a utilizar. Por el contrario, el grado de compactación inicial covaría, también de forma casi lineal, con la humedad. El simple examen de la figura 2 aclara estos puntos de forma cualitativa, aunque la cuantitativa esté sujeta a la experimentación.

Si ahora se realiza una compactación, con variable C constante, y variando el contenido de humedad, se obtiene la curva (c_1) de la figura 3. En ella apreciamos los siguientes tramos:

1. *Entumecimiento.* — Para determinados tipos de suelos, un pequeño contenido de agua perjudica, por su atracción capilar, el movimiento de los granos, de forma tal que incluso puede llegar a sustentar estructuras más esponjosas, con un aumento del índice de huecos.
2. *Lubricación.* — Una vez vencida la falsa cohesión capilar, el agua actúa de lubricante, favoreciendo el reajuste de las partículas de suelo a posiciones más estables (con menor índice de huecos).

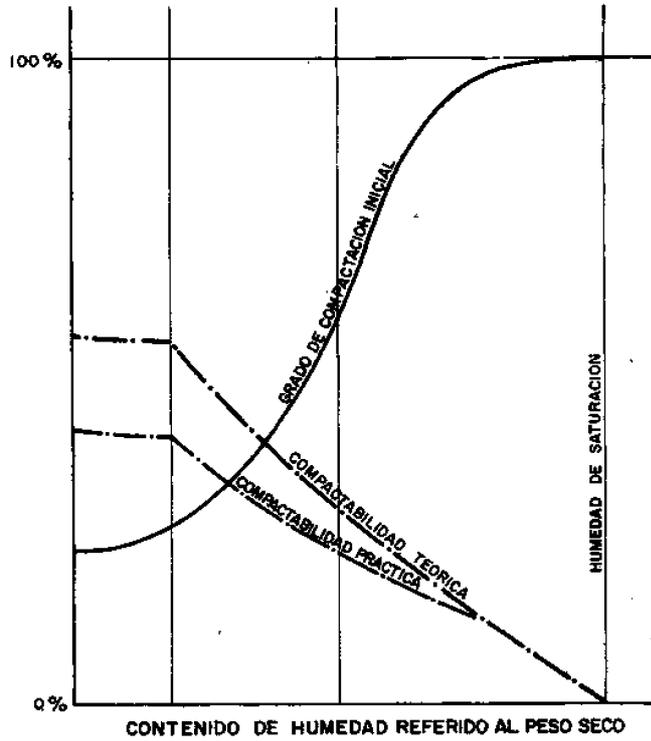


Fig. 2.

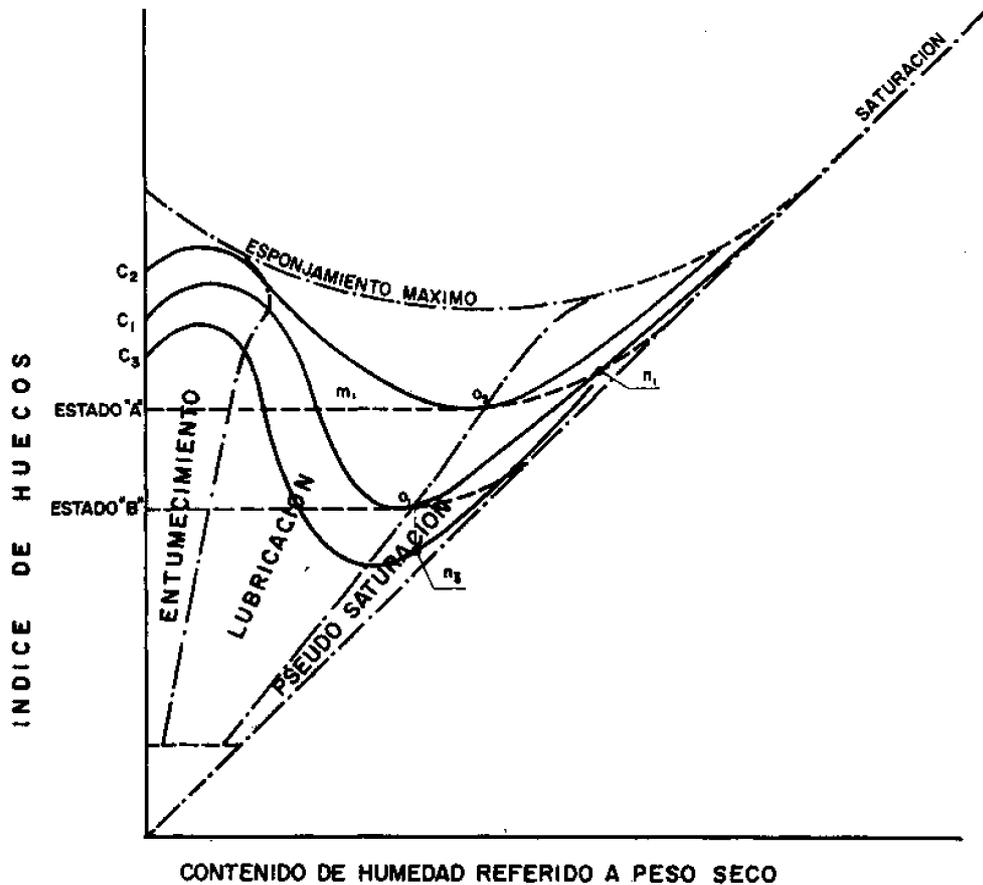


Fig. 3.

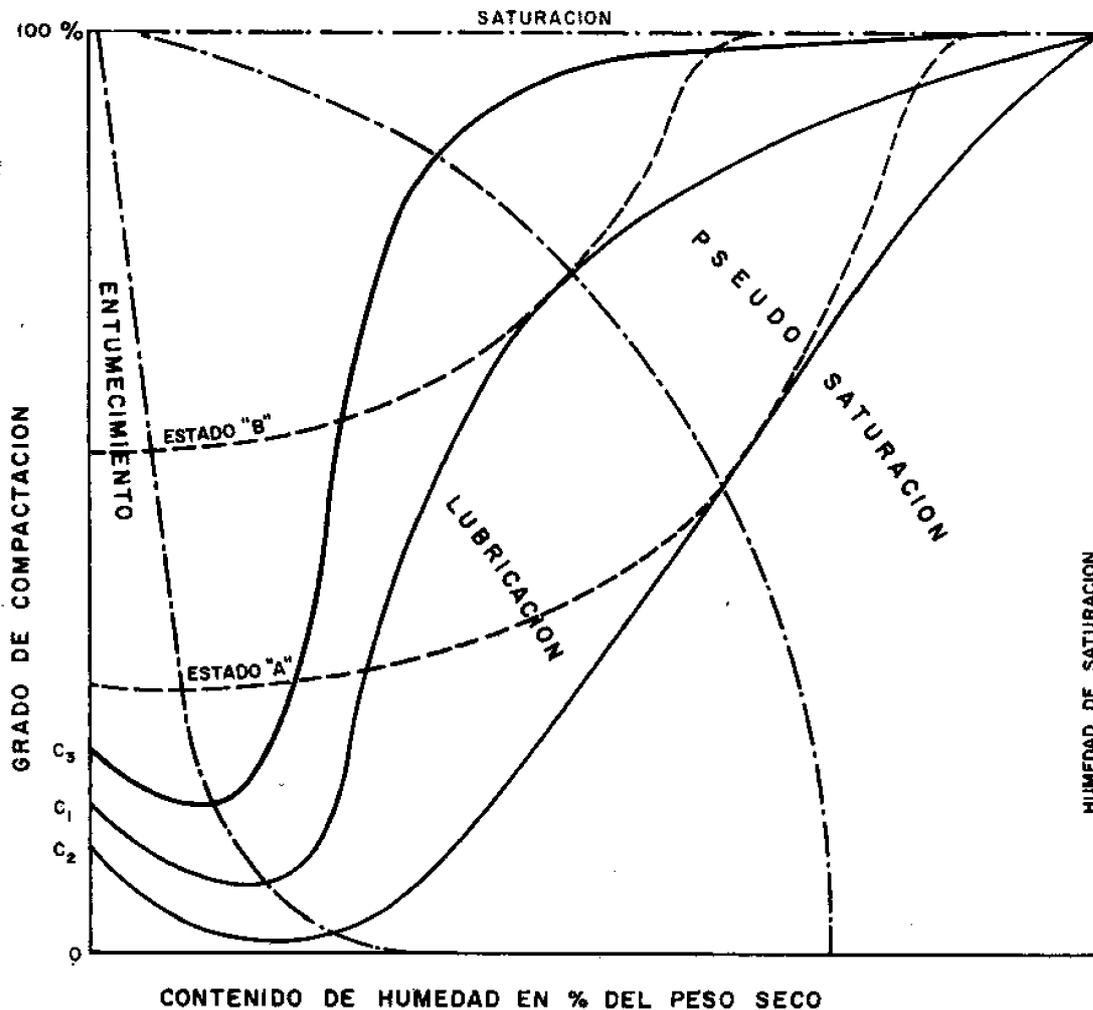


Fig. 4.

Los huecos, llenos de aire al principio, van siendo rodeados progresivamente por agua, aumentando el grado de saturación, hasta la pseudosaturación.

3. *Pseudosaturación.*—Hay un porcentaje de huecos ocupados por el aire, que con la energía compactiva, C , considerada, no puede ya ser eliminado. Se alcanza así una condición de pseudosaturación, ya que el añadir más agua no tiene más efecto que el aumentar el índice de huecos, por aumento de las distancias intersticiales. A partir de este momento, las características resistentes del suelo, totalmente lubricado por el agua, disminuyen muy rápidamente. Esto ha sido comprobado ya experimentalmente por Peltier y otros investigadores.

Obsérvese que un estado A dado puede ser alcanzado por medio de la compactación (C_1) aplicada, a partir del esponjamiento máximo, con dos contenidos de humedad, m_1 y n_1 (fig. 3). En general, al contenido menor de humedad, m_1 , corresponden unas propiedades resistentes mayores que al n_1 , e incluso que al máximo o_1 . Pero no debe olvidarse que el suelo, compactado al punto m_1 , puede luego pasar por absorción de agua al n_1 , perdiendo casi todas sus propiedades resistentes. En realidad, las cosas no son tan desfavorables, pues lo que sucede es que el suelo, al absorber agua desde m_1 y llegar a o_2 , alcanza la pseudosaturación, y su permeabilidad y capacidad de absorción se ven fuertemente disminuidas; por lo que no llega a n_1 , tan rápidamente.

Pero, al mismo tiempo, las condiciones resistentes correspondientes a o_2 son las máximas que hubieran podido alcanzarse con una compactación (C) más reducida; por lo que hemos desperdiciado gran parte de nuestra compactación (C_1). Si, por el contrario, hubiéramos compactado con la humedad óptima o_1 , se hubiera alcanzado el máximo rendimiento económico, y el suelo estaría desde un principio en condiciones de máxima resistencia, además de que su inalterabilidad estaría, por así decirlo, garantizada, al haber alcanzado ya la pseudosaturación.

De aquí que económicamente interesa realizar la compactación con un contenido de humedad nunca muy superior al óptimo (para no caer en el reblandecimiento y la sobrecompactación) y tan cerca de él cuanto sea posible.

Complica las cosas la dependencia de la humedad óptima de la energía de compactación. En efecto, si conservando la humedad o_1 , que sería óptima con la compactación (C_1), nos sentimos generosos y aplicamos una energía de compactación mayor (C_2), el suelo, efectivamente, se compacta más (su peso específico aparente aumenta), pero se sitúa (n_2) en plena pseudosaturación, con una pérdida enorme de propiedades resistentes. A este fenómeno se llama *sobrecompactación*.

Es, por lo tanto, imprescindible el complementar la práctica de exigir en obra un peso específico aparente mínimo, con la de exigir que dicho peso sea logrado con un contenido de humedad, en el momento de la compactación, no superior al óptimo correspondiente a la compactación empleada. Con ello, además, se favorece al contratista, pues el óptimo corresponde precisamente al punto de mayor rendimiento de la energía aplicada. El sobrepasar dicho óptimo de humedad, aunque se logre el mismo peso específico aparente, trae consigo una fuerte disminución de la resistencia e inalterabilidad que se van buscando.

Es interesante observar la figura 4, en que se expresan las consideraciones anteriores en función del grado de compactación, en vez del índice de huecos. Se aprecia claramente que en la zona de pseudosaturación, cuanto mayor sea la energía de compactación, menor es la mejora del grado de compactación alcanzada, y, por lo tanto, resulta menos interesante rebasar el límite de la zona de lubricación. ¿Querrá esto decir que interesan bajos esfuerzos de compactación?

Una mirada a la figura 5, en la que el mismo fenómeno se representa en términos de grado de saturación, aclara esta paradoja. Se han representado cualitativamente unas curvas de isorresistencia, en las que se evidencia la gran pérdida de esta propiedad en la zona de pseudosaturación. Resulta, por lo tanto, conveniente buscar el máximo de resistencia, junto con la facilidad de puesta en obra y subsiguiente inalterabilidad; condiciones todas que proporcionan el óptimo de humedad; y cuanto más elevada la energía de compactación, más resistencia, pero con menor humedad óptima. Obsérvese también qué fácil es caer en la sobrecompactación si se fuerza la energía aplicada sin disminuir la humedad, debido a la proximidad de las curvas en la zona de pseudosaturación; es conveniente incluso mantenerse algo por debajo del óptimo de humedad, para contar con un margen frente a ese riesgo.

En resumen: existe para cada tipo de compactación (variable C) un contenido máximo de humedad, independiente del estado inicial, a partir del cual puede efectuarse la compactación. Cuanto más cerca se esté de él, mayor será la resistencia obtenida, la facilidad de compactación, y la inalterabilidad posterior; pero no debe olvidarse que el sobrepasar la humedad óptima trae consigo consecuencias poco deseables, y que dicho "óptimo" disminuye al aumentar la energía de compactación.

La energía de compactación que se deba utilizar (supuesto ya que se empleará conjuntamente con la humedad óptima a ella correspondiente) se determina en función de la resistencia que se va a exigir; la correlación entre las dos se determina experimentalmente. Asimismo, se puede valorar el rendimiento de la operación, considerando la *compacidad añadida* que se ha definido más arriba, como un índice de su eficacia.

5. Influencia del tipo de suelo: ensayos

En el capítulo anterior se han considerado las influencias que las variables B (humedad en el momento de compactar) y C (energía compactiva) tienen en la eficacia de la compactación. Se ha visto que, aunque los parámetros que intervienen pueden definirse de forma cualitativa sin

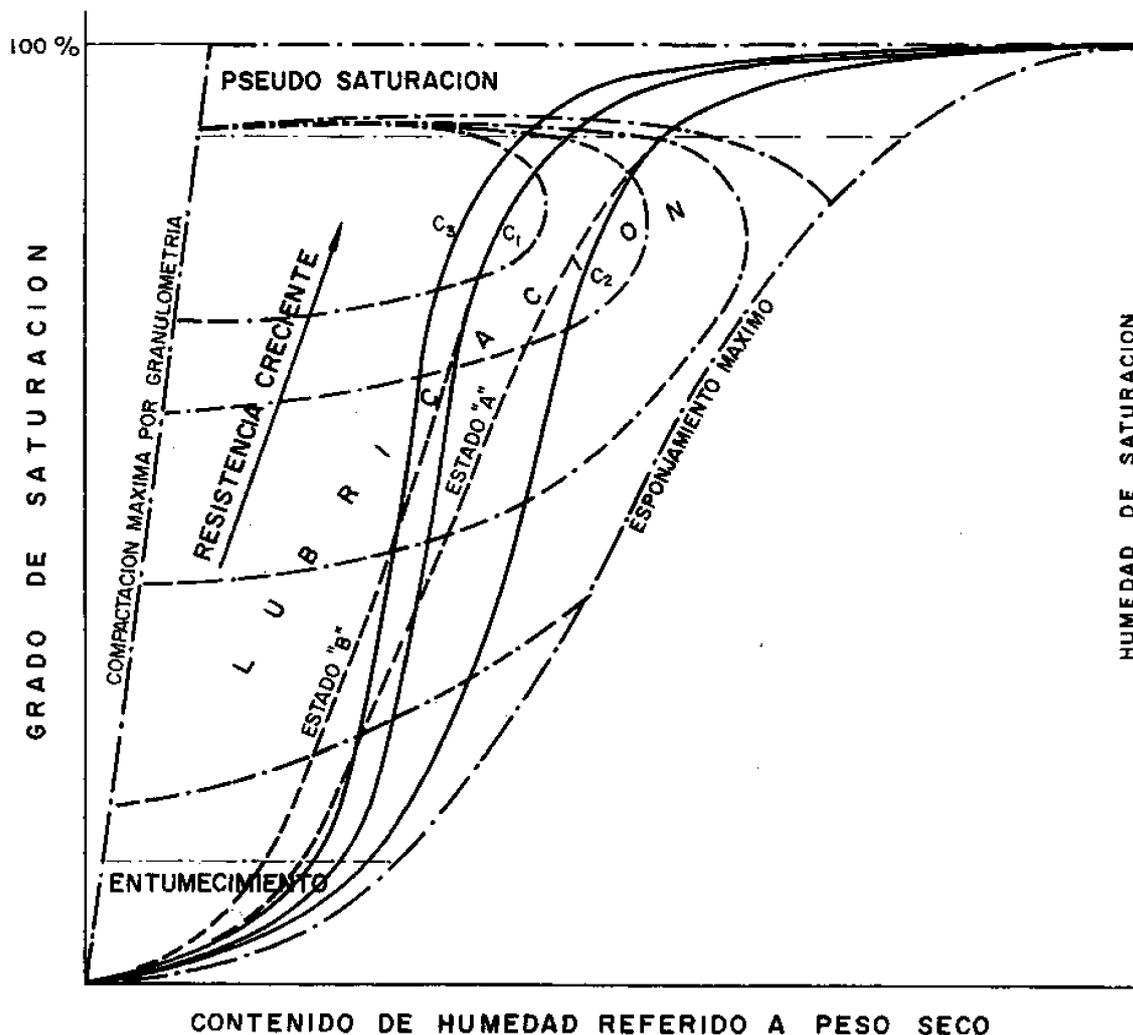


Fig. 5.

recurrir a la experimentación, los ensayos son obligados cuando se trata de discernir la influencia de las características propias del suelo a compactar.

Los ensayos de compactación suelen consistir en realizar la operación mencionada sobre una cantidad reducida del suelo, con contenido de humedad variable, y forma de aplicación de la energía compactiva, normalizada y constante. Con estas premisas, lo que se estudia es la variación del peso específico conjunto obtenida con la variación de la humedad de compactación. El suelo parte del estado de esponjamiento máximo o casi, puesto que se desmenuza y amasa con agua antes de empezar el ensayo: circunstancia que debe tenerse en cuenta, puesto que en la realidad se parte de un estado natural del terreno, en el que el grado de compactación es con frecuencia mucho mayor.

Atendiendo a la naturaleza de la energía de compactación aplicada, los ensayos se clasifican en *estáticos* y *dinámicos*. En los primeros, el suelo (dentro de su molde) es sometido a una presión lenta por medio de una prensa: la medida de la energía aplicada la da precisamente el valor de dicha presión (kg/cm^2). En los ensayos dinámicos, el apisonado se realiza por un medio mecánico, que la mayoría de las veces consiste en un pisón de tamaño y peso fijos, que cae desde una determinada altura un cierto número de veces sobre la superficie del suelo (también confinado completamente dentro de su molde). En este caso el apisonado se efectúa por tongadas

iguales. Obsérvese que la energía aplicada por unidad de volumen tiene las mismas dimensiones que en el caso de compactación dinámica: $\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3 = \text{kg}/\text{cm}^2$; difiriendo tan sólo en el número de aplicaciones discretas que se requieren para la totalidad de la energía.

Naturalmente, estas condiciones de aplicación de la energía de compactación no se parecen todo lo que sería de desear a las que se dan en la realidad en obra: no sólo está el suelo confinado lateralmente por el molde, sino que los diversos tipos de pisonos empleados en los ensayos no tienen un efecto igual que los rodillos (lisos, vibratorios, pata de cabra, neumáticos, etc.) que se utilizan en la realidad. Aún así, vale más esta indicación que ninguna; y, salvo realizar ensayos a escala natural, con la maquinaria que se va a utilizar, para determinar su humedad óptima de aplicación, se acude a estos ensayos reducidos, con una energía de compactación que guarde proporción, al menos cuantitativa, con la que después se va a utilizar. Naturalmente, los ensayos dinámicos son los más utilizados, por simplicidad de equipo y parecerse más a la maquinaria real.

Otra diferencia entre el ensayo y la realidad es la tolerancia de fracción gruesa de suelo. Es sabido que no se compactan igualmente los suelos gruesos que los finos. Si el suelo sólo contiene partículas gruesas (una grava, por ejemplo) quedarán muchos huecos sin rellenar, por enérgica que sea la compactación: el índice de huecos mínimos por exigencias granulométricas es muy elevado. Si estos huecos se pretenden colmatar con partículas más finas, la presencia de las gruesas dificulta el reajuste de las finas, y, sin embargo, este efecto no se refleja en el ensayo, puesto que el mayor peso de las partículas gruesas (frente a una masa mal compactada de partículas finas de igual volumen aparente) hace que los resultados del mismo sean optimistas en cuanto a reducción del índice de huecos, sobre todo en la fracción fina. Como de esta última dependen la mayoría de las propiedades interesantes del suelo (concretamente, resistencia e inalterabilidad), la compactación no resulta eficaz (por ello, se limita en obra el tamaño máximo de árido grueso en el suelo a compactar) ni el ensayo resulta representativo (por ello, se limita aún más en el mismo la proporción de partículas superiores a un tamaño dado).

Como quiera que el tamaño máximo en obra es mayor que el admitido en el ensayo, los resultados de éste deben extrapolarse al suelo total (en obra), por medio de una corrección empírica que tenga en cuenta la proporción y naturaleza de la fracción gruesa eliminada. Esto se suele hacer de dos maneras: 1.ª Sustituyendo la fracción gruesa rechazada por una cantidad igual de la fracción más gruesa tolerada. 2.ª Aplicando fórmulas empíricas de corrección.

De todas maneras, la capacidad resistente de los suelos gruesos no es bien conocida, y tampoco lo es la evolución de sus propiedades con una compactación más o menos eficaz; en general, se recurre a métodos de estabilización por mezcla o sustitución.

6. Características de los ensayos dinámicos

Las diferencias principales entre los diversos ensayos normalizados en países diferentes (e incluso en el mismo país, por distintas entidades) se refieren, principalmente, al tamaño de la probeta, y a la energía de compactación (véase tabla I).

El tamaño mínimo de la probeta suele estar determinado por el tamaño máximo del suelo que se vaya a utilizar, con objeto de evitar el "efecto pared". Las diferencias en energía de compactación se refieren al número de tongadas en que se apisona la probeta, número de golpes de maza que recibe cada una, peso y tamaño de la maza, y altura de caída de la misma. Naturalmente, están en proporción con el tamaño de probeta utilizado; y aún para el mismo tamaño se pueden adoptar valores bajos de la energía por unidad de volumen (*apisonado standard*) o valores más elevados (*apisonado modificado*). Estos últimos corresponden a la adopción de maquinaria de obra cada vez más potente, capaz de lograr los elevados grados de compactación y resistencia exigidos por el tráfico pesado, especialmente en el caso de aeropuertos.

Se ha hablado en exceso del ensayo "Proctor", "Proctor normal", "Proctor modificado". Dicha terminología es totalmente inexacta, e induce a errores al comparar resultados de varios experimentadores. En efecto, en el ensayo concebido en 1933, por R. R. Proctor, en relación con obras

Cuadro sinóptico comparativo de las diver

	Califor- nia Impact test	Standard Proctor	AASHO T99-57 y ASTM D 698-58T				Dieterl	Harvard
			A	B	C	D		
SUELO UTILIZADO:								
Tamaño máximo	3/4"	# 4	# 4	# 4	3/4"	3/4"	1/8"	# 4
Correcciones por gruesos	Sí	No	No	No	Sí	Sí	No	No
MOLDE:								
Diámetro interior	2.875"	4"	4"	6"	4"	6"	2"	1 5/16"
Altura total	36"	4 5/8"		4.584"			4 3/4"	2.816"
Collar de enrase	No	2"		2"			No	1 1/2"
Base especial	—	—		—			Penetra 1"	—
PROBETA:								
Altura	10-12"	4 5/8"		4.584"			Variable	2.816"
Volumen cm ³	1055,28 a 1266,33	944	944	2125	944	2125	180 a 220	62,4
MAZA:								
Peso	10 libras	5,5 libras		5,5 libras			8143 g + 1707 g (fijos)	40 libras
Diámetro que entra en contacto con la probeta	2.875"	2"		2"			1 15/16"	1/2"
Altura de caída de la parte móvil	18"	A mano desde 12"		12"			5 cm	Con resorte estático
Trabajo por cada golpe (kg)	2,070	0,762		0,762			0,407	—
APISONADO:								
Número de tongadas	5	3		3			1	5
Número de apisonados por tongada	20	25	25	56	25	56	10 + 10	5
Trabajo por tongada (kg)	41,40	19,06	19,06	42,65	19,06	42,65	8,14	—
Presión equivalente (kg/cm ²)	16,37 a 19,64	6,05	6,05	6,01	6,05	6,01	3,7 a 4,6	5,62

hidráulicas (precedido unos cuantos años por la California Division of Highways con un ensayo, el California Impact Test, muy parecido) se realizaba el apisonado golpeando firmemente *a mano* (esto es, asiendo la maza con la mano y acompañándola en su caída) con una maza de 5,5 libras desde una altura *aproximada* de 12 pulgadas: el error operatorio era evidentemente muy grande.

En 1938, la American Association of State Highway Officials, y en 1942 la American Society for Testing Materials, recogieron y normalizaron dicho ensayo para maza en caída libre, con las designaciones, respectivamente, AASHO T-99 y ASTM D-698. Posteriormente, las mismas entidades introdujeron a raíz de la segunda guerra mundial (en la que las construcciones militares, especialmente aeropuertos, habían aumentado el tamaño de la maquinaria existente) los ensayos llamados "modificados", con una energía de compactación mayor: son éstos los AASHO T-180 y ASTM D-1557. No existe, por lo tanto, un "Proctor normal" (designación impropia del AASHO T-99 o del ASTM D-698) ni un "Proctor modificado" (designación aún más impropia del AASHO T-180 o del ASTM D-1557).

Además, todos los ensayos de la AASHO se efectúan sobre probeta de 4 pulgadas de diámetro, mientras que los de la ASTM prevén el empleo, tanto de la probeta mencionada (métodos A y C) como de la probeta de igual altura y 6 pulgadas de diámetro (métodos B y D), variándose en este último caso el número de golpes por capa. Resulta, pues, que el ensayo ASTM es cuádruple (la diferencia entre los métodos A y C, o B y D, estriba en el tamaño máximo admitido), debiéndose concretar, siempre que se utilice, cuál ha sido el método empleado.

Entre los demás grupos de ensayos que se reseñan en la tabla I se tienen:

— Los del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, del Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Obras Públicas español (N. L. T.) y los del Laboratoire Cen-

J

alizaciones de ensayos de compactación

Engineers (C. B. R.)	AASHO T180-57 y ASTM D 1557-58T				NLT 107/58	NLT 108/58	ISS	Microproctor STAIM	LCPC S1		LCPC S2		Bureau of Reclamation
	A	B	C	D	3/4"	3/4"			A	B	A	B	
	# 4	# 4	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"		5 mm	5 mm	20 mm	5 mm	20 mm	# 4
	No		Sí		No	No		No	Sí		Sí		Sí
	4"	6"	4"	6"	10,20 cm	6"	6 cm	60 mm	4"	6"	4"	6"	4"
		4.584"	2"		12,24 cm	7"	5,5 cm	69 mm	4,6"	6"	4,6"	6"	6"
1/2"					Sí	Sí		20 mm	Sí		Sí		Sí
						Disco 2"				Disco 1"		Disco 1"	
		4.584"			12,24 cm	5"	5,5 cm	69 mm	4,6"	5"	4,6"	5"	6"
	944	2125	944	2125	1000	2318	155,5	195	944	2308	944	2308	1229
x. fijo) lb			10 libras		2,5 kg	10 libras	775 g + pistón fijo	1080 g + pesas de 250 g hasta 2330 g	5,5 libras		10 libras		5,5 libras
			3"		5 cm	5 cm	6 cm	3 cm	2"		2"		2"
			18"		30,50	18"	30 cm	16 cm	12"		18"		18"
			2,070		0,762	2,070	0,232	0,173	0,762		2,070		1,141
	25	56	25	56	3	5	1	3	3		5		3
0	51,70	115,95	51,70	115,95	25	55	25	48	25	55	25	55	25
0		27,53			19,05	113,80	5,85	8,30	19,05	41,95	51,70	113,80	28,55
					5,72	29,80	5,72	27,53	6,05	5,45	27,40	27,35	20,18

tral des Ponts et Chaussées francés (L. C. P. C.), son esencialmente traducciones de los ASTM al sistema métrico decimal, con escasas diferencias.

— Los ensayos "miniatura": Harvard (americano), I. S. S. (Instituto Sperimentale Stradale del Touring Club Italiano), STAIM (Studio Tecnico Applicazione Ingegneria Moderna) y Dietert (inglés); se caracterizan por requerir escasa cantidad de muestra.

— Los ensayos California Impact Test y del Bureau of Reclamation: intermedios entre los AASHO T-99 y T-180.

— El ensayo del Corps of Engineers, U. S. Army: muy parecido al ASTM D-1557, método D, es el que se emplea para luego determinar la resistencia a la penetración CBR, en la misma probeta.

Aparte de las preferencias personales del experimentador, y de las disponibilidades de material, es evidente la tendencia moderna hacia el apisonado "modificado", con maza de 10 libras y 18 pulgadas de caída libre, y la progresiva desaparición de los métodos "miniatura" e intermedios, a pesar de su indudable interés en ciertos casos particulares.

Estudios realizados por Sowers y Kennedy en el Georgia Institute of Technology, muestran que, a igualdad de energía compactiva por unidad de volumen, la compactación resulta tanto más eficaz, cuanto menor sea el número de aplicaciones discretas requeridas para la totalidad de la energía. Esto parece indicar como recomendables los métodos AASHO T-99, LCPC S-1A y ASTM D-698 A y C, entre los ensayos "standard", y el AASHO T-180, el LCPC S-2 A y ASTM D-1557 A y C, entre los ensayos "modificados" (fig. 6). Todos ellos utilizan probeta de 4 pulgadas de diámetro.

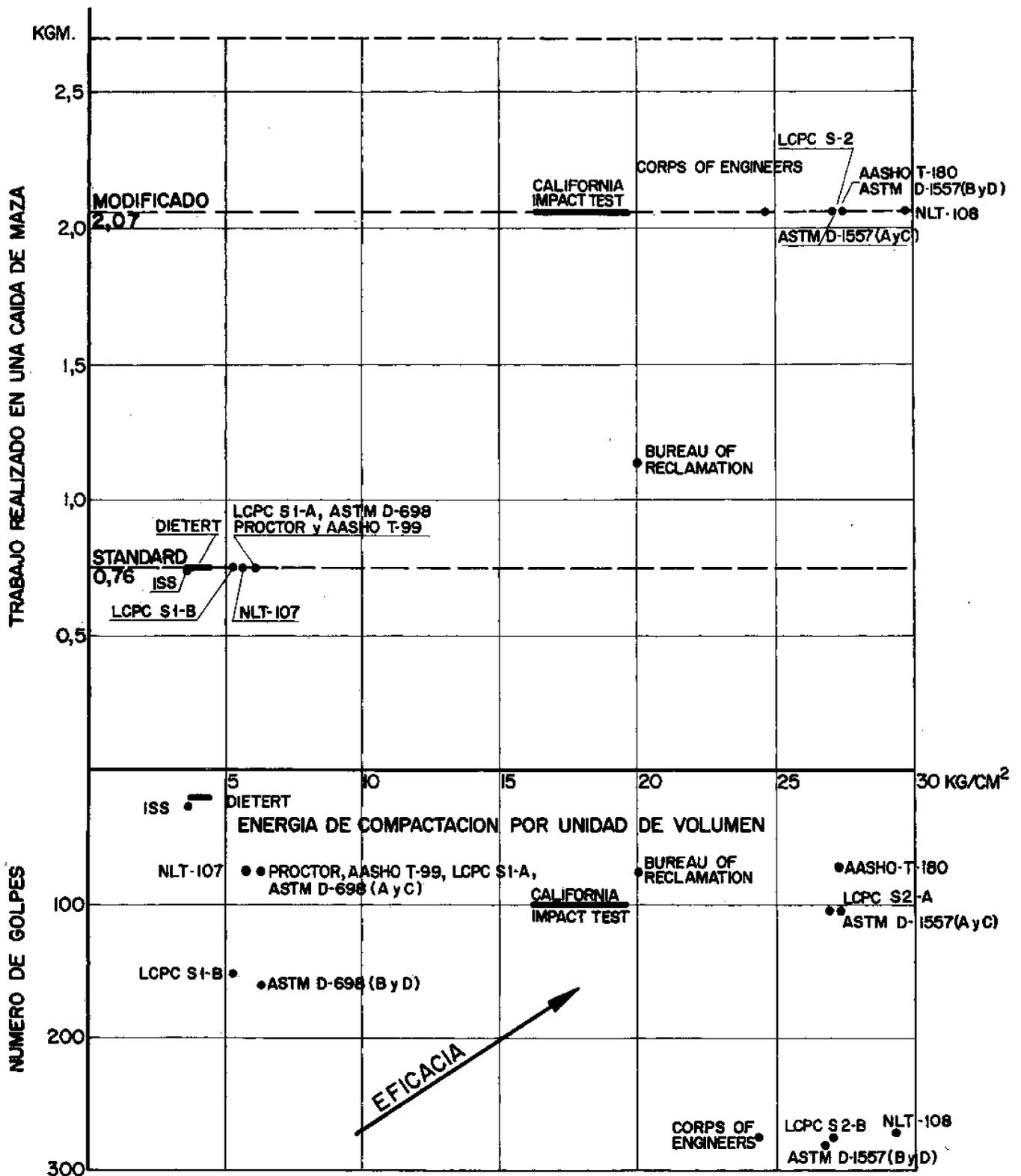


Fig. 6