

# Conceptos Básicos sobre la Compactación de Suelos

508

*Traducido del "Journal of the Soil Mechanics  
and Foundations División - Pro-  
ceedings of the A. S. C. E. -  
Vol. 82 N° SM 1 January 1956.*

Por: C. Y. Li, (1) A. M. ASCE

Trad.: Darío Fernández

## PRESENTACION

El artículo que presentamos, debido al distinguido ingeniero Dr. Chung Y. Li, pone en manos de nuestros lectores la oportunidad de obtener los conceptos modernos básicos sobre el inquietante problema de la compactación de suelos. Este tema tiene una gran actualidad y un interés extraordinario, ahora que entidades públicas están empeñadas en la construcción de represas de tierra y obras semejantes. La explicación que dá de los variados hechos que se presentan en el complejo problema de la compactación es sencilla y profunda a la vez; introduce conceptos nuevos que nos dan la base para utilizar métodos apropiados para aumentar la eficiencia del trabajo de la maquinaria, en fin, enfoca de tal manera el problema en su totalidad que no queda duda de la conveniencia de su lectura cuidadosa y del fruto que ésta dejará en los que así lo hagan.

El Dr. Li actualmente presta sus servicios en la construcción de la Represa de Quebradona en la Central Hidroeléctrica de Riogrande por parte de Interventoría que conjuntamente llevan a cabo las firmas Integral Ltda. y Gannett Fleming Corddry & Carpenter Inc.

No dudamos que en esta obra tendrá oportunidad de aplicar ventajosamente los conceptos que menciona en su artículo y que su labor será provechosa para el desarrollo de esta especialización de ingeniería relacionada con los suelos y que, tal vez por nueva, no ha alcanzado entre nosotros la importancia a que ha llegado en otras partes.

Después de su publicación, este artículo produjo opiniones muy favorables que presentaremos en nuestro próximo número acompañados del comentario final del Dr. Li.

J. G. V.

## RESUMEN

Se hace un intento para discutir el proceso de compactación del suelo sobre bases racionales y para crear conceptos básicos sobre los problemas en cuestión. Se emplea la Ley de la Conservación de la Energía para interpretar como se disipa la energía durante el proceso. Se explica el comportamiento, por la influencia de varios factores, de una masa de suelo durante la compactación. Se introduce el con-

(1) Ingeniero Civil, Gannett Fleming Corddry and Carpenter, Harrisburg, Pennsylvania. U. S. A.

cepto "Compactación por Etapas". Se presenta el efecto del contenido de cascajo sobre la compactación de fracciones de suelo fino. Se incluye también la significación práctica de esta aproximación racional.

## INTRODUCCION

La información disponible sobre la compactación de un suelo pertenece principalmente a la ejecución de métodos más bien que a los principios fundamentales de la compactación. Poca investigación comprensiva sobre la compactación del suelo se ha hecho con vista a establecer un principio básico o una teoría que gobierne las relaciones entre las numerosas variables que influyen el resultado de la compactación. Los ingenieros que encaran el problema en una construcción deben confiar principalmente en la experiencia pasada como base para tomar sus decisiones y por tanto están sujetos a las limitaciones de todos los métodos empíricos. La controversia y puntos de vista divergentes han aumentado y agravado frecuentemente temas importantes tales como: la escogencia de los tipos de cilindradoras, el uso apropiado de ellas, la densidad máxima del suelo que puede obtenerse económicamente, los métodos de control de campo, el Ensayo Proctor de Laboratorio, la compactación de suelos cascajosos, etc. El significado del problema no necesita recalcarse, especialmente en el aspecto económico, cuando se realiza la ejecución y avanza de la construcción del terraplén. Es necesaria una comprensión fundamental del problema de la compactación y la formación de conceptos básicos con el fin de predecir correctamente y controlar con eficiencia la influencia de los diversos factores sobre el resultado final.

### *Suposición*

El siguiente estudio sobre la compactación se basará en la suposición de que la masa de suelo, en su estado más flojo de compactación, es estructuralmente homogénea. Está libre de bloques grandes, terrones o poros grandes en puente. Se supone que antes del cilindrado, el suelo ha sido sometido a los procedimientos usuales de excavación, transporte, descargue y regado en capas. El paso del equipo de arrastre y regalo sobre el suelo poco denso puede conducir a un suelo estructuralmente homogéneo. Sin embargo, se debe reconocer que una masa de un suelo natural nunca es verdaderamente homogénea ni en su composición ni en su estructura. Se cree que la suposición simplificante de la homogeneidad no introducirá incompatibilidad especial cuando se trate con la tendencia general de la propiedad o resultados estadísticos promedios del lleno actual.

### *Definición de Compactación*

Cuando una masa de suelo se somete a una carga, sea estática o dinámica, se produce una transferencia de esfuerzos y sus subsecuentes deformaciones. Las deformaciones producen alteración y cambio del volumen. En una masa de suelo se necesita un período definido de tiempo para que se desarrollen completamente las deformaciones no-elásticas después de la inducción de los esfuerzos, debido a que se requiere que se efectúe el drenaje y reajuste plástico. Si la carga se aplica por tiempo suficientemente largo para sobrepasar este retardo de tiempo, se dice que el suelo está "consolidado", con respecto a la carga. Sin embargo, si la carga es instantánea, tal como el golpe de un martillo o el paso de una cilindradora, solamente hay tiempo suficiente para que ocurran los esfuerzos iniciales o una compresión parcial. El último proceso se denomina "compactación". Generalmente la compactación se puede definir como el proceso de densificación del suelo mediante la aplicación de una carga dinámica, lo que causa una disminución en el aire de los poros debido al cambio en las posiciones relativas de los granos del suelo.

### *Ley de la Conservación de la Energía*

La relación esfuerzo-deformación de la masa de un suelo durante la compactación es un problema excesivamente complejo. Es improbable que alguna vez sea expresado por fórmulas que tengan en consideración todos los factores principales. No obstante, la primera ley de termodinámica, bien conocida como la Ley de la Conservación de la Energía, puede emplearse para explicar cualitativamente los factores básicos involucrados durante el proceso de compactación.

La Ley de la Conservación de la Energía dice que "la Energía no puede ser ni creada ni destruida sino solamente convertida de una forma a otra; o, para cualquier sistema, el resultado neto de calor o trabajo será un cambio en la energía del sistema (1). De esta manera

$$Q - W = E_2 - E_1 \quad (1)$$

$$= \Delta E$$

donde

$Q$  = calor añadido al sistema;

$W$  = trabajo hecho por el sistema;

$E_1$  y  $E_2$  = energía inicial y final del sistema, respectivamente;

$\Delta E$  = Cambio en la energía total del sistema.

La ecuación (1) puede escribirse en la forma de

$$(-W) = \Delta E + (-Q) \quad (2)$$

(1) El sistema puede definirse como la región donde se estudian la transferencia de la masa y la energía.

la cual significa que el trabajo hecho sobre el sistema es igual al cambio en la energía total del sistema más el calor transferido del sistema.

En el proceso de compactación de un suelo, los términos de la ecuación indicada arriba pueden explicarse como sigue:

a) *Trabajo hecho sobre el Sistema.* - El trabajo se define como el producto de una fuerza por la distancia a través de la cual actúa la fuerza. Con carga estática, el trabajo hecho sobre el suelo es

$$W = \int P dS \quad (3)$$

donde  $P$  = carga sobre el sistema;

$S$  = asentamiento.

Con carga dinámica, el *trabajo* es

$$W = 1/2 M (V_2^2 - V_1^2) \quad (4)$$

donde  $M$  = masa de la carga aplicada;

$V_1$  = velocidad inicial de la carga aplicada;

$V_2$  = velocidad final de la carga aplicada.

Generalmente, la cantidad total del trabajo hecho sobre el sistema puede determinarse o estimarse. En la compactación del suelo en el laboratorio por el Método de Proctor, el producto del peso del martillo por su altura de caída es la cantidad de trabajo efectuado, y es la energía transferida a la muestra del suelo. En la compactación en el campo, el trabajo efectuado sobre el suelo varía directamente con la presión de la barra de tracción sobre el rodillo y la distancia a través de la cual viaja el rodillo.

b) *Cambio en la Energía Total del Sistema.* (<sup>2,3</sup>) La energía de un sistema alude a la energía interna que los átomos y las moléculas del sistema poseen como un resultado de su configuración y movimiento.

En suelos que contienen partículas de tamaños de arcilla, el aumento en la densidad por la compactación cambia la energía total interna del suelo. Es un proceso que implica la reorientación de las partículas del suelo, las cuales poseen fuerzas de repulsión o atracción debido a sus iones absorbidos y a las moléculas de agua absorbida. Los cambios físicos durante la compactación, tales como la compresión de los gases en los poros, el aumento de la cantidad de gases disueltos en el agua intersticial, la deformación elástica de las partículas sólidas, y otros fenómenos coloidales complejos, son el resultado del cambio en la cantidad de energía interna. El aumento de energía se está almacenando en el sistema pero el proceso es reversible. La cantidad de energía almacenada en un suelo cohesivo se demuestra por el rebote o el hinchamiento al remover la carga.

La compactación de un suelo no cohesivo es un proceso físico mucho más simple, en que los granos individuales del suelo son forzados a juntarse. El cambio en la energía total del sistema es principalmente la inducción de energía elástica de deformación.

c). *Calor Transferido del Sistema.* - En el proceso de compactación de un suelo, debe haber un movimiento relativo de las partículas del suelo de todos los tamaños. Se necesita una fuerza para vencer la resistencia friccional desarrollada entre las partículas durante el movimiento. Como es bien sabido, el gasto de energía para vencer la resistencia friccional se convierte en calor, el cual se disipa en el medio que las rodea.

Hay tres tipos de resistencia friccional que caracterizan el movimiento relativo entre las partículas del suelo durante la compactación, a saber; (1) Fricción sobre superficies secas; (2) Fricción superficial hidrodinámica o de película lubricante gruesa; y (3) Fricción superficial intermedia o de película lubricante delgada (4).

1). Fricción sobre superficies secas. La resistencia a la fricción entre dos superficies secas se determina por el coeficiente de fricción y la presión normal. Se considera independiente del área de contacto y de la velocidad relativa de movimiento. La compactación de un suelo granular seco consiste en vencer la resistencia a la fricción sobre superficies secas entre las partículas del suelo, la cual proviene de deslizamiento, rodamiento o trabazón.

2). Fricción superficial hidrodinámica o de película lubricante gruesa (4). Cuando un lubricante como el aceite se añade gradualmente a las superficies secas de deslizamiento, se formará una película lubricante sobre las superficies secas. Es muy delgada al principio y aumenta en espesor a medida que se añada más y más lubricante. La fricción superficial hidrodinámica lubricada ocurrirá cuando hay una fuente abundante de lubricante para formar una película, el espesor de la cual es grande en comparación con la altura de las irregularidades de las superficies. La resistencia a la fricción, que es independiente de los materiales que componen las superficies de deslizamiento y de la presión entre ellas, es enteramente diferente de la de fricción seca. Los pocos factores que determinan la fuerza necesaria para producir el movimiento relativo se pueden expresar por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{\mu A \cdot v}{h} \quad (5)$$

Donde  $F$  = fuerza necesaria para producir el movimiento;  
 $\mu$  = coeficiente de viscosidad del lubricante;

- $A$  = área de la superficie de movimiento;  
 $v$  = velocidad relativa de la superficie de movimiento;  
 $h$  = distancia entre las superficies de movimiento.

Este tipo de condiciones superficiales existe solamente en suelos muy fino-granulares tales como arcilla o limo fino porque el agua, lubricante común para el suelo, no formará una película lo bastante gruesa sobre los granos gruesos. Para la compactación de un suelo arcilloso, la ecuación (5) puede considerarse como representativa del valor estadístico promedio de la resistencia friccional hidrodinámica. Se puede ver así que la fuerza necesaria para vencer la resistencia a la fricción varía directamente con: (1) la viscosidad del agua, la cual es constante a una temperatura dada; (2) las áreas superficiales de las partículas; (El hecho de que un uno por ciento de arcilla en una arena contribuya con más de un noventa por ciento de las superficies internas totales puede indicar la influencia del contenido de arcilla sobre la energía de compactación); y (3) la velocidad de movimiento, la cual demuestra que se necesita más energía para la compactación dinámica que para la compactación estática. La fuerza para producir el movimiento es inversamente proporcional al espesor de la capa de agua entre las partículas.

3). Fricción superficial intermedia o de película lubricante delgada. Entre las condiciones extremas para la fricción seca y la fricción superficial hidrodinámica lubricada hay una fricción superficial intermedia o de película lubricante delgada. Ocurre cuando la fuente de lubricante no es suficiente para alcanzar la condición superficial hidrodinámica. Sin embargo, el lubricante tiende a reducir el coeficiente de fricción entre las superficies secas. La presión de contacto y la naturaleza de los materiales que componen los cuerpos son aún de importancia pero la fuerza necesaria es relativamente independiente del área de las superficies de contacto y la velocidad de deslizamiento. Esta puede considerarse como la transición entre las dos condiciones extremas descritas antes y puede aplicarse a un suelo con un tamaño intermedio de granos tal como arena fina y limo.

#### *Significado de la Ley de la Conservación de la Energía*

El significado de la Ley de la Conservación de la Energía en la compactación de un suelo consiste en entender cuánta energía se está gastando durante el proceso de compactación y cuánta se puede consumir de muchas otras maneras en la densificación del suelo. Dos factores de importancia primaria son la resistencia a la fricción del suelo, y la energía no tenida en cuenta o "malgastada".

Puesto que la compactación es el resultado de reducir los poros en una masa de suelo, debe incluir la redistribución de los granos del

suelo cambiando sus posiciones relativas. La energía se necesita para vencer la resistencia friccional del movimiento. Sin embargo, la redistribución de las partículas del suelo no sigue necesariamente de la reducción de los vacíos de aire, debido a la completa falla a la cizalladura de la masa de suelo al resistir la carga. La última es una forma de energía "malgastada".

El rodamiento repetido de una cilindradora liviana sobre un suelo denso puede causar una disminución muy pequeña o insignificante sobre los vacíos llenos de aire. Sin embargo, de acuerdo con la Ley de la Conservación de la Energía, nada de la energía se pierde; esta aparece en la masa de suelo, similar a una estructura elástica, como energía potencial, denominada generalmente como energía de deformación. Desde el punto de vista de la compactación, la energía de deformación es totalmente energía "malgastada".

Otras formas de energía "malgastada", las cuales son inherentes al proceso de compactación, son la deformación elástica de los granos del suelo, la compresión del aire en los poros, el vencimiento de la ligazón entre las partículas y otras posibles reacciones físico-químicas.

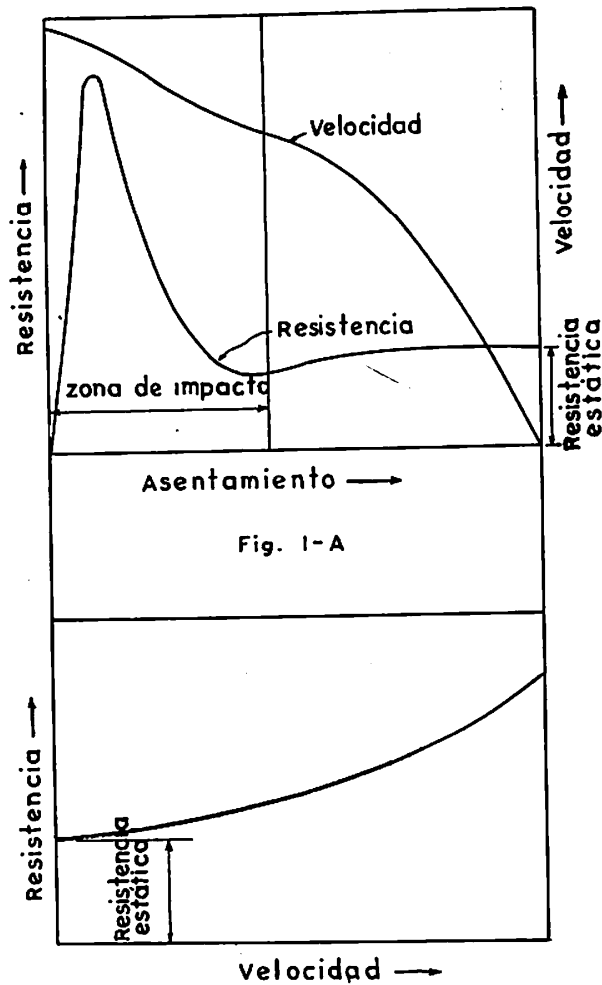
Parece claro que solamente llevando a cabo la reducción de la resistencia a la fricción de la compactación y la energía "malgastada" puede mejorarse la eficiencia del proceso de compactación. La aproximación práctica será, por supuesto, el entendimiento de los importantes factores que influyen el resultado de la compactación. La discusión siguiente sobre "Carga y Resistencia" puede formar un concepto básico para explicar la influencia de diversos factores en la compactación, los cuales aparecerán en las secciones subsiguientes.

### *Carga y Resistencias*

La moderna compactación en el campo a grande escala de un suelo se hace generalmente por la penetración rápida y la sacada de la pata apisonadora de rodillos pátocabra o de llantas de caucho, infladas a alta presión, de rodillos neumáticos. Esta aplicación y remoción rápida de la carga es esencialmente dinámica (1). La Carga dinámica es muy diferente de la carga estática debido al hecho de que ella produce la llamada resistencia dinámica en el suelo además de la resistencia estática.

La variación de la resistencia de un suelo durante la carga dinámica se muestra en la Fig. 1-A. La resistencia dinámica llega a un máximo bajo el impacto de la carga aplicada. Disminuye rápidamente

(1). La compactación por vibración no se discutirá en este artículo.



Curvas sobre resistencia dinámica  
(Según Grasshoff)

carga es empujado hacia abajo y hacia afuera. Este movimiento desarrollará más y más resistencia, formada no solamente por aumento de resistencia debido al confinamiento lateral por la profundidad sino también por el aumento de la densidad del suelo que resulta del movimiento de asentamiento mismo, con tal de que la masa de suelo no esté completamente saturada. El asentamiento termina cuando se llega al equilibrio entre los esfuerzos y la resistencia.

Si la resistencia del suelo es relativamente alta comparada con los esfuerzos, la carga producirá muy poco asentamiento, lo cual también significa muy pequeña cantidad de cambio en los poros y, por lo tanto, poca compactación. La mayor parte de la energía se gasta en producir deformaciones volumétricas y de deslizamiento. Solamente una pequeña cantidad se usa para obtener compactación a través del movimiento de las partículas. Sin embargo, si la resistencia es extremadamente baja en comparación con los esfuerzos,

te y se aproxima a la resistencia estática y al equilibrio final con la carga al fin del asentamiento. La distribución del esfuerzo y la deformación bajo la carga puede considerarse como similar a la de la carga estática. El concepto del bulbo de presión, los efectos del tamaño y la forma del área cargada sobre la resistencia del suelo y la teoría del equilibrio plástico pueden emplearse para explicar el comportamiento de la masa de suelo durante la compactación. Debería recalcarse también que las deformaciones o asentamientos son una función directa de la intensidad de la carga más bien que de la carga bruta.

Si los esfuerzos aplicados exceden la resistencia a la cizalladura o resistencia del suelo, empieza una falla local y la carga comienza a hundirse en el suelo. Cuando la carga se hunde, el suelo bajo la



la carga producirá una falla completa de cizalladura bajo el suelo subyacente hundiéndose profunda y rápidamente reemplazando el volumen del suelo por el empuje de este hacia los lados. Este estado de perturbación completa puede resultar en una compactación del suelo debajo de la carga y un aflojamiento del suelo en los lados. La reducción total neta en los poros es dudosa y a lo mejor ineficiente. La energía se gasta en compactar una porción del suelo y, al mismo tiempo, en aflojar otra porción. Ambas, compactación y aflojamiento, envuelven movimiento de las partículas y necesitan energía para vencer la resistencia friccional.

De la discusión anterior puede verse que la compactación depende de los valores relativos de la carga y la resistencia, y de la magnitud del asentamiento.

Puede decirse entonces que la presión óptima de rodamiento parece ser la que es lo suficientemente grande para la falla local sin producir una falla completa de la masa del suelo. Esto ha sido confirmado por la experiencia real. Por ejemplo, el paso de un rodillo patecabra pesado en un caso produjo falla completa por cizalladura del suelo bajo el rodillo y muy poca compactación de la masa de suelo; sin embargo, reduciendo la presión del rodillo, se obtuvieron densidades satisfactorias.

#### *Introducción del concepto "Compactación por Etapas"*

Cuando el suelo flojo, cohesivo o moderadamente cohesivo, se extiende primero en capas listas para el cilindrado, su resistencia a la cizalladura es siempre muy baja. Probablemente es incapaz de soportar un rodillo pesado sin fallar completamente. Usando el rodillo "patecabra", la pata compactadora penetra completamente el suelo no compactado, y el tambor del rodillo hace contacto con el suelo, extendiendo efectivamente la carga sobre una área grande. Usando rodillo neumático, la llanta se hunde en el suelo y reduce la presión de carga por el aumento del área de contacto. Se ve que el suelo será compactado en algún grado desde la primera pasada del rodillo. Los viajes subsiguientes del rodillo serán sobre un suelo de más resistencia y cada paso adicional del rodillo es sobre un suelo más resistente que el previamente pisado con el resultado de que es posible lograr una cierta densidad máxima para cada carga particular.

Se ve así que cualquiera de los compactadores pesados comunes son probablemente demasiado pesados al comienzo del cilindrado de las capas flojas del suelo. Sin embargo, la eficiencia de la cilindradora aumenta gradualmente hasta que se llega a un máximo. Luego, la eficiencia disminuye porque la presión del rodillo es demasia-

do liviana con relación a la resistencia del suelo. A lo último, la eficiencia del cilindrado se aproxima a cero porqué no resultará más compactación por cilindrado adicional. Es decir, la resistencia a la cizalladura del suelo es igual a la presión del rodillo. El trabajo efectuado por el cilindrado se almacena completamente en forma de deformaciones elásticas. La Fig. 2-A muestra la rata del aumento de

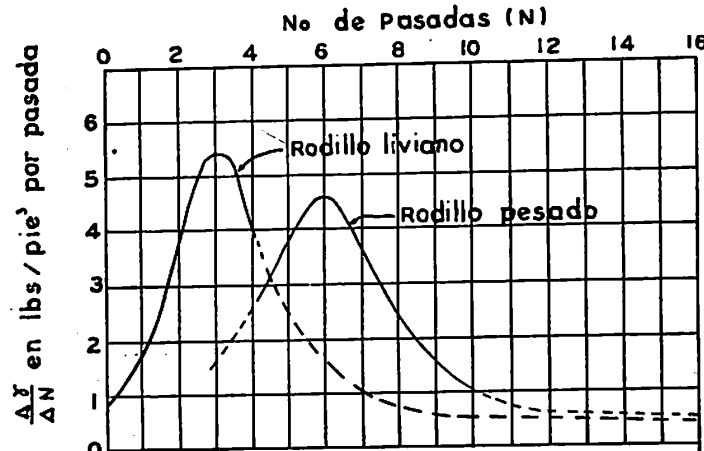


Fig. 2-A

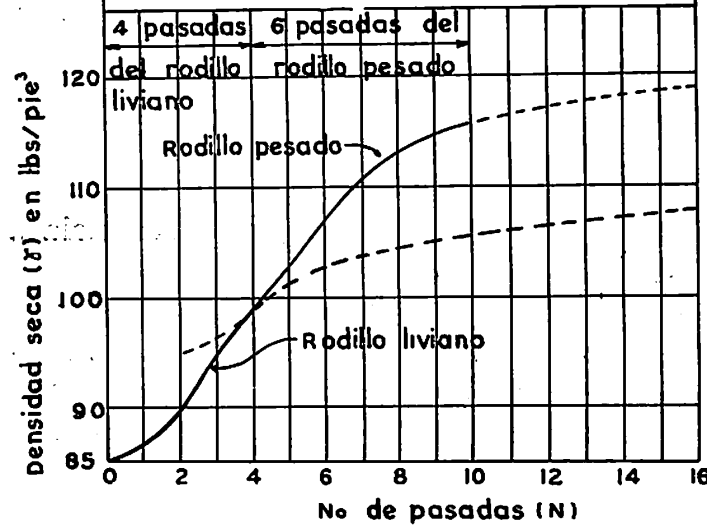


Fig 2-B

Comparacion entre rodillos pesados y livianos

compactar primero por los movimientos de rodillos de peso liviano, seguidos por el uso de rodillos pesados. La variación de la eficiencia y la densidad de "la compactación por etapas" con el número de pasadas se muestra en líneas continuas en la Fig. 2-A y Fig. 2-B respectivamente. Si un rodillo excesivamente pesado se usa con el fin de obtener una densidad alta, el suelo flojo probablemente será incapaz de soportar el rodillo al principio. Esta dificultad puede vencerse por "la compactación por etapas" usando rodillos ligeros al principio hasta que la densidad del suelo es lo suficiente-

la densidad con respecto al número de pasadas de la cilindradora. Es una medida de la eficiencia del cilindrado.

Los rodillos de presiones bajas tienen una eficiencia inicial mucho más alta que rodillos de presiones altas. Sin embargo, un rodillo pesado puede compactar un suelo a una mayor densidad que un rodillo liviano. Con rodillos extremadamente livianos o pesados se puede obtener muy poca compactación.

A pesar de que es verdad que la mayor densidad de compactación se puede obtener solamente por el empleo de rodillos pesados, se puede lograr mejor eficiencia de compactación por medio de la "compactación por etapas". "Compactación por Etapas" es el proceso de

mente alta para soportar el rodillo pesado. Se pueden usar con ventaja dos etapas o aún más.

En la práctica, si el trabajo es de tal magnitud que se pueden usar dos rodillos o más, será económico y ventajoso usar rodillos que ejerzan diferentes presiones en vez de rodillos que produzcan la misma presión.

Aún más, se cree que puede diseñarse un rodillo pesado de modo que su presión de compactación puede aumentarse gradualmente con el número de pasadas. Con uno de tales rodillos, el método de la "compactación por etapas" no sería necesario y el límite de la compactación se ampliaría grandemente.

### *Contenido de Humedad*

Como se sabe generalmente, la influencia del contenido de humedad sobre la densidad es uno de los factores más importantes en la compactación del suelo. El contenido de humedad afecta principalmente la resistencia al movimiento relativo de los finos del suelo.

Cada partícula de arcilla puede cubrirse con una película de moléculas de agua, de una o más moléculas de espesor. La primera capa de las moléculas de absorción, que posee una orientación definida, es hielo sólido y es excesivamente viscosa. Cuando se dispone de más agua, la capa de absorción llega a ser más gruesa y, al mismo tiempo, el grado de orientación disminuye hacia la capa exterior hasta que se llega a un espesor en el cual la orientación es nula. La viscosidad de la película de agua disminuye con el grado de orientación de las moléculas de agua. El hecho de agregar más agua al suelo simplemente suministra un lubricante fluido de baja viscosidad y separa más la distancia entre las partículas de arcilla. La resistencia friccional al desplazamiento relativo de las partículas de arcilla es hidrodinámica, como se dijo previamente.

El efecto de la adición de agua es disminuir la viscosidad y aumentar la distancia entre las partículas. De acuerdo con la ecuación 5, se reduce así la resistencia friccional al movimiento relativo entre las partículas. Para la misma energía de compactación, por lo tanto, la densidad compactada seca varía con el contenido de humedad.

En la Fig. 3 se muestran las curvas típicas densidad seca contra contenido de humedad. La validez de la ecuación 5 para explicar el efecto del contenido de humedad sobre la densidad es muy obvia. Para un suelo cohesivo o moderadamente cohesivo, la densidad seca compactada es más o menos directamente proporcional al contenido de humedad hasta que se llega a la "óptima". Para materiales que contienen muy pocos finos o que no los contienen, el contenido de



humedad casi no tiene efecto sobre la densidad. El suelo cascajoso con los finos justamente suficientes para llenar los espacios entre las partículas de cascajo es el más sensible al contenido de humedad, mientras que una arcilla es el menos sensible. Esto es porque la resistencia friccional contra el movimiento varía directamente con las áreas superficiales, suponiendo que los otros factores son los mismos. Un peso unitario de arcilla posee más área superficial total que un peso igual de un suelo cascajoso. El contenido de humedad "óptimo" para una arena sin cohesión es la saturación. Esto no se debe a ninguna acción de "lubricación" del agua, sino más bien a la reducción de la presión efectiva entre los granos de arena por la presión hidrostática.

### *Contenido Optimo de Humedad y Presión Optima de Compactación*

Una masa de suelo se considera formada generalmente de substancias sólidas y poros, los cuales están llenos, o parcialmente llenos, con líquidos y gases. Para nuestro estudio, se puede mirar como compuesto de partículas sólidas, agua y aire. En la compactación de un suelo cohesivo o ligeramente cohesivo, se supone que las partículas del suelo y el agua son incompresibles y que el agua no tiene tiempo para ser drenada, siendo solamente los vacíos de aire la porción restante del suelo que está sometida a modificación. La compactación de una masa de suelo es, por tanto, el proceso de forzar a juntarse las partículas del suelo y reducir así sus vacíos de aire.

#### LEYENDA

No	Descripcion	LL	IP
1	Arena margosa bien gradada	16	NP
2	Marga arenosa bien gradada	16	0
3	Marga arenosa med gradada	22	4
4	Arcilla limo arenosa magra	28	9
5	Limo con carácter de 'Poess'	26	2
6	Arcilla pesada	67	40
7	Arena muy pobremente gradada	NP	
8	Arena gradada	NP	

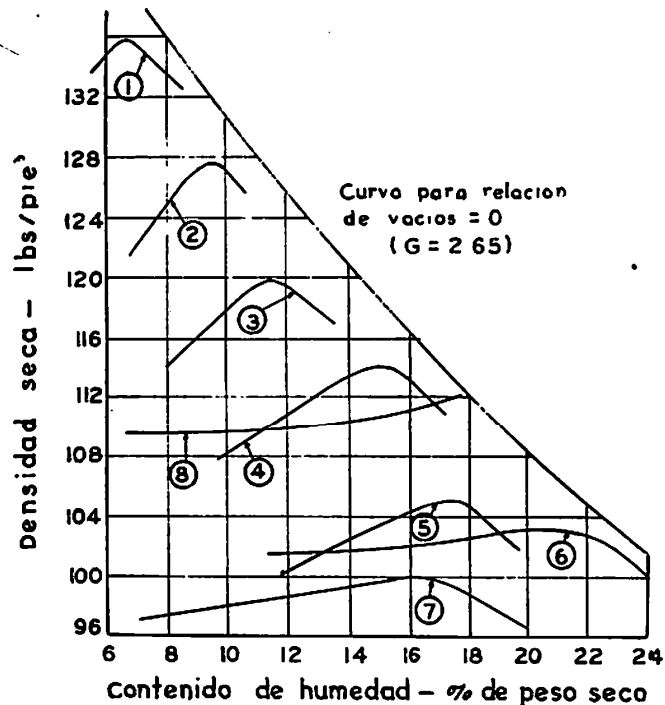


Fig. 3 - Curvas de humedad-densidad para suelos diferentes sometidos al mismo esfuerzo de compactación

(Parcialmente según Public Roads)

La variación de las relaciones entre las partículas sólidas del suelo, agua, y aire bajo el mismo esfuerzo de compactación se muestran en la Fig. 4. El contenido de humedad óptima se indica clara-

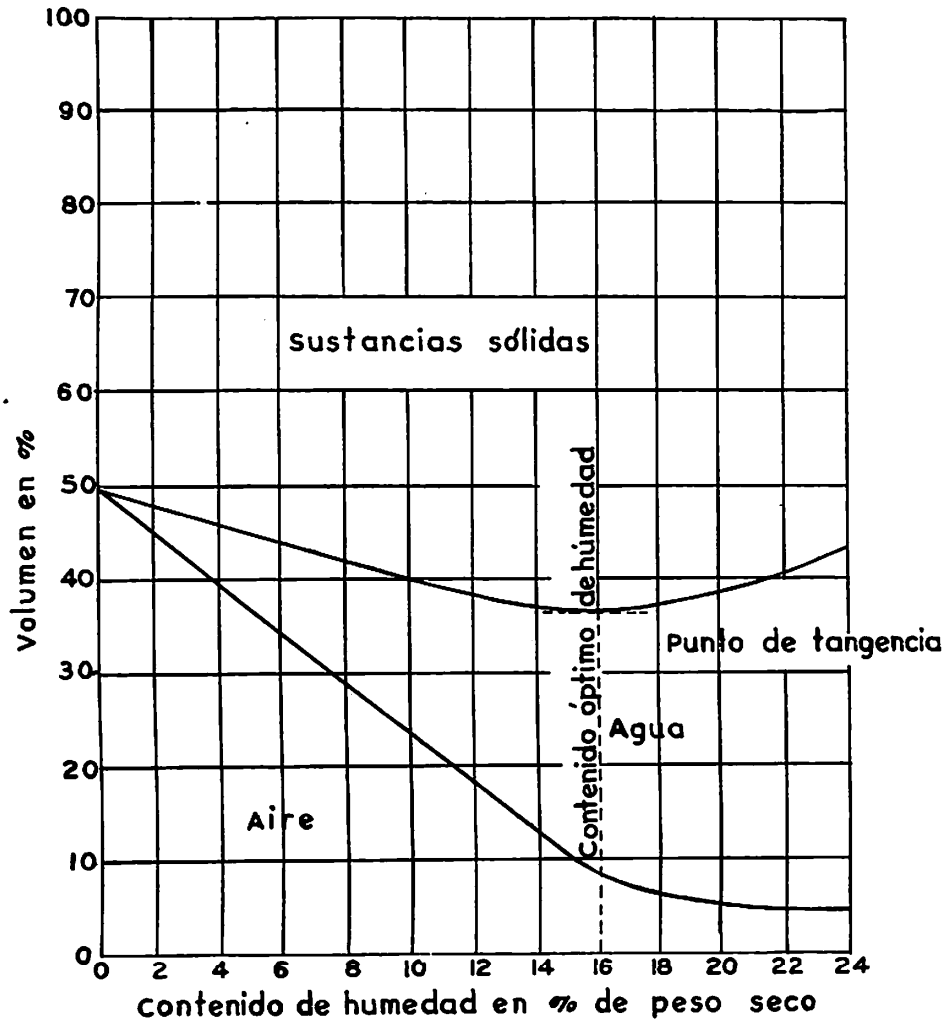


Fig. 4 - Volumen relativo de los constituyentes del suelo

mente en el diagrama como el contenido de humedad correspondiente al punto de máxima sustancia sólida. La masa del suelo que tiene un contenido de agua más allá del óptimo tendrá una densidad más baja porque el exceso de agua ocupa los poros o el espacio que de otra manera habría sido llenado con las partículas sólidas. El vacío de aire se acerca aproximadamente a un valor constante después de que se llega al contenido óptimo de humedad. Representa el volumen del aire atrapado en el suelo durante la compactación.

El término "contenido óptimo de humedad" se usa más bien vagamente entre los ingenieros. Se olvida a menudo que el contenido de humedad óptimo de un tipo de suelo es solamente para una pre-

sión de compactación o un esfuerzo de compactación. Cada presión de compactación tiene su propio contenido óptimo de humedad.

Hay en el uso común numerosos tipos de cilindradoras con diferentes presiones. Es imposible predeterminar el contenido óptimo de humedad de un suelo sin conocer el tipo de cilindradora que se va a usar en el campo. Los métodos de compactación de laboratorio llamados Proctor y Modificado de la A. A. S. H. O. son standards valiosos para el uso en el estudio del comportamiento a la compactación de un suelo, pero no deberían usarse indiscriminadamente como medio para determinar el contenido óptimo de humedad de un suelo para la compactación en el campo. Para un buen control de laboratorio de la compactación en el campo, es necesario a menudo variar uno o más de los detalles del método Proctor standard de compactación tales como el peso del martillo, la altura de caída y número de golpes del martillo, el espesor de las capas y aún el tamaño del molde de compactación, con el fin de obtener una relación más cercanamente exacta entre el contenido de humedad óptimo del material y la cilindradora que se va a usar.

Frecuentemente hay situaciones en las cuales el contenido natural de humedad existente en el suelo que va a ser compactado es tal que su modificación para una compactación eficiente por la cilindradora adoptada es económicamente impracticable. Por ejemplo, al intentar construir represas de tierra cilindradas con un material de préstamo excesivamente húmedo, puede ser impracticable secar el suelo a causa del gran volumen de los materiales envueltos y el retardo en la construcción que puede ocurrir. Puesto que la humedad óptima bajo tales condiciones está cerca a un valor fijo, se sigue que se debe determinar la "presión óptima de compactación". Este es un proceso de tanteo en el cual la presión de la cilindradora se varía hasta que el óptimo contenido de agua en el campo coincide estrechamente con el contenido de agua existente.

### *Velocidad de las Cilindradoras*

La resistencia dinámica de un suelo es un fenómeno bien reconocido en el hincamiento de pilotes. Puede también existir en cierto grado en la compactación de un suelo durante la penetración rápida de la pata apisonadora de un rodillo patecabra o de la llanta de caucho de un rodillo neumático inflada a alta presión. Si es suficientemente rápida, la carga será resistida no solamente por la fricción estática y la cohesión, sino también por la viscosidad del suelo.

La resistencia dinámica del suelo es un problema complejo y se conoce relativamente poco sobre el tema. Sin embargo, los resultados de un número de experimentos sobre la acción de fuerzas diná-

micas, especialmente en conexión con la aplicación de la fórmula dinámica de hincamiento de pilotes, son elementos valiosos para llegar a un entendimiento cualitativo de los problemas (5). La figura 1-A indica la relación entre la penetración y la resistencia y entre la penetración y la velocidad. Puede parecer que al comienzo de la penetración la resistencia subirá a un valor máximo, que es la resistencia dinámica principalmente, y que luego cae rápidamente a un valor casi constante, que es la resistencia estática. La figura 1-B ilustra la variación de la resistencia dinámica con la velocidad. El área bajo la curva resistencia-velocidad representa la pérdida de energía. La forma de la curva muestra que el área aumenta a una rata mucho más rápida que el aumento de la velocidad. Por lo tanto es más eficiente reducir la velocidad de penetración si la energía que se va a consumir es constante.

Sin embargo, puesto que la resistencia dinámica es una función directa de la velocidad, y la energía recibida es también una función directa de la velocidad, se pueden escribir estas ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{v^2}{2} &= \int_0^S R \cdot dS \\ M \cdot v \cdot dv &= R \cdot dS \\ S &= M \int_v^0 \frac{v \cdot dv}{R} = M \int_v^0 \frac{v \cdot dv}{f(v)} \quad (6) \end{aligned}$$

en la cual  $R$  = resistencia del suelo;

$S$  = asentamiento;

$M$  y  $V$  son masa y velocidad, respectivamente, como se señaló previamente.

En la práctica, la ecuación  $R = f(v)$  para el suelo en consideración es demasiado compleja para ser determinada. Por tanto, la ecuación (6) es de un valor académico solamente. No obstante, se puede formar un concepto de que existe una velocidad más benéfica para obtener el máximo asentamiento, o una velocidad óptima de compactación.

#### *Tamaño de las Cilindradoras*

La influencia del tamaño de las cilindradoras sobre la compactación es similar a la influencia que el tamaño de una zapata tiene sobre el asentamiento. La influencia varía con los tipos de suelos. Para suelos no cohesivos, la diferencia en los tamaños del área de carga tiene poco efecto sobre la compactación con tal que la presión permanezca igual. Sin embargo, para cilindradoras muy pesadas, la fa-

lla de cizalladura comenzará más pronto bajo áreas pequeñas de carga que bajo áreas grandes de carga. Para arcilla, son más eficientes para la compactación las cilindradoras de áreas pequeñas que aquellas con grandes áreas de contacto, pues habrá más deformación volumétrica por la pequeña área de carga bajo la misma intensidad de presión, haciendo la salvedad, por supuesto, de que el suelo no se cargue hasta la falla.

Para tipos de suelos entre arena no cohesiva y arcilla cohesiva, la curva presión-deformación se muestra en la Fig. 5, suponiendo

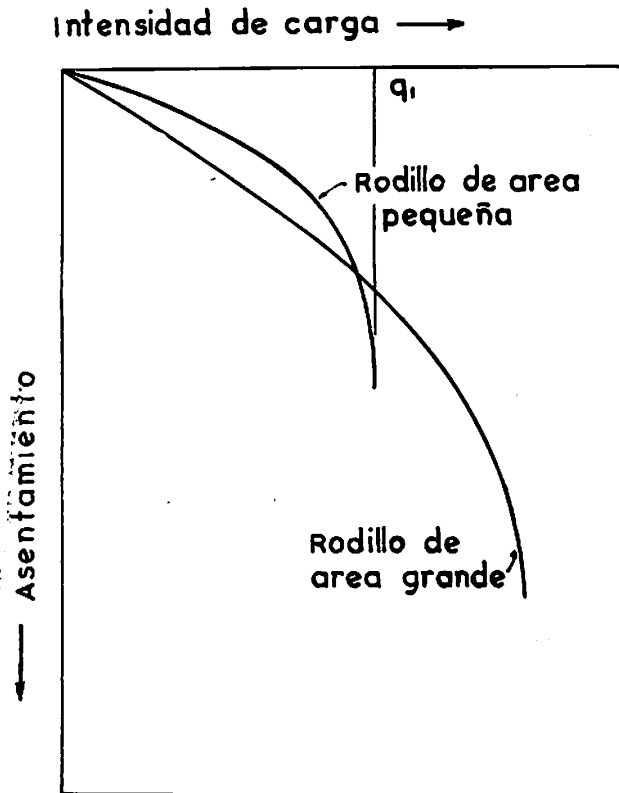


Fig. 5 - Efecto del tamaño del rodillo sobre el asentamiento.

que es similar a la de una zapata. Se ve que si la presión es constante y no excede  $q_1$ , el área grande producirá más deformación que el área pequeña. Por tanto, la cilindradora con mayor área de contacto será más eficiente que la de área de contacto más pequeña. Ensayos reales en los cuales se usaron rodillos "patecabra" con varios tamaños de patas, han comprobado la afirmación anterior. Con todo, se llama la atención al hecho de que conservando todas las otras cosas constantes, la energía recibida por la compactación es directamente proporcional al área de la pata apisonadora.

#### *Espesor de la capa compactada*

El espesor de la costra dura que se desarrolla sobre el suelo flojo bajo las concentraciones del tráfico pesado sobre el lleno no compactado es una buena indicación de la profundidad límite de compactación del tráfico particular de los vehículos. A medida que la profundidad del suelo aumenta, la presión bajo la carga disminuye y la capacidad de soporte del suelo aumenta. El beneficio, y por lo tanto la densidad compactada, disminuirá con la profundidad. Basados en la concepción de carga y resistencia, la profundidad efectiva de compactación dependerá del tamaño del ancho de la carga. Los rodillos



neumáticos pesados de 50 ton. que se usan y se manufacturan ahora, pueden tener un ancho de llanta hasta de 30 pulgadas. Su profundidad efectiva de compactación puede exceder considerablemente las 6 pulgadas, que es el espesor arbitrario de la capa de compactación adoptado por muchas especificaciones para cilindrado sin tener en cuenta el tipo de cilindadora. Por otra parte, el hecho de que las patas apisonadoras del rodillo patecabra pueden ser del orden de 3 pulgadas de diámetro, es la razón para considerar el uso de un espesor de capa compactada mucho más delgado para cilindrado por medio de rodillos patecabra que por medio de rodillos neumáticos. Se cree que, debido a la falta de relaciones y conceptos establecidos entre los tipos de rodillos y el espesor de la capa compactada, la práctica de adoptar cualquier espesor arbitrario de la capa de suelo conduce a una de las mayores fuentes de energía malgastada durante la compactación.

#### *Número de Pasadas de la Cilindadora*

Hay dos consideraciones primordiales para determinar el número de pasadas de la cilindadora para la compactación: el aumento de la resistencia del suelo con el número de viajes de cilindrado, y el área de las patas de contacto de la cilindadora. Como ya se explicó, cada pasada subsiguiente de la cilindadora se hace sobre un suelo que tiene una resistencia más alta a la deformación que aquel bajo el rodamiento previo. Para una cilindadora escogida para un tipo de suelo, hay un número de pasadas definidas que darán el máximo rendimiento en aumento de densidad con relación a la energía gastada. (Ver Fig. 2-A). Familiar entre los ingenieros de compactación es el "rendimiento disminutivo" en aumentar la densidad cuando el número de pasadas es grande. Sin embargo, debería reconocerse un simple pero fundamental concepto: usando una cierta cilindadora, hay una densidad máxima del suelo que puede obtenerse bajo cualquier condición práctica. La mayor densidad se puede lograr usando una cilindadora más pesada. (Ver Fig. 2-B). Demasiadas pasadas en exceso de las que se necesitan para el rendimiento máximo es otra fuente principal de energía "malgastada" durante la compactación.

Debe tenerse en cuenta también que el área de las patas de contacto de una pasada de un rodillo "patecabra" es solamente alrededor de 5 a 17 por ciento del área de la tierra cubierta por el rodillo la que depende, por supuesto, del tipo de rodillo, mientras que el área de contacto de una llanta en una pasada de un rodillo neumático es el 100 por ciento del piso cubierto. Este hecho puede explicar por qué razón se necesitan menos pasadas de un rodillo de llantas neumático que de un rodillo patecabra para producir una densidad dada.

### *Influencia del Contenido de Cascajo en la Compactación*

El ensayo de Proctor en el laboratorio, usado para el control de la compactación en el campo, se hace generalmente sobre la fracción de la muestra total que pasa por la malla N° 4. Por lo tanto no se basa sobre una muestra representativa del material real. Es necesario entender el efecto de la inclusión de la fracción de cascajo (material retenido en la malla N° 4) en la compactación, con el fin de avaluar los resultados de la compactación en el campo basados en los ensayos de control de laboratorio. Esta evaluación es de gran importancia en la práctica. Por ejemplo, la experiencia real en construcción de represas de tierra por la firma en que trabaja el autor, ha demostrado que es imperativo poder correlacionar claramente el grado de compactación logrado en el campo con los resultados de compactación obtenidos en el laboratorio.

La densidad teórica total de un suelo que contiene cascajo puede obtenerse por la fórmula:

$$\gamma_t = \frac{1}{\frac{p}{\gamma_g} + \frac{1-p}{\gamma_s}} \quad (7)$$

en la cual  $\gamma_t$  = densidad total del suelo y el cascajo;

$\gamma_s$  = densidad seca del suelo (fracción menor que la malla N° 4);

$\gamma_g$  = densidad seca del cascajo (fracción mayor que la malla N° 4);

$p$  = porcentaje del contenido de cascajo expresado como fracción decimal

Las líneas discontinuas en la Figura 6 muestran la variación de la densidad teórica total, y los pesos teóricos de cascajo y suelo con relación al porcentaje del contenido de cascajo. La ecuación 7 se basa en las suposiciones de que la densidad del suelo permanece igual para contenidos de cascajo diferentes y de que el peso unitario es el peso sin ningún espacio vacío entre los granos individuales de cascajo. En otras palabras, se supone que los cascajos simplemente flotan y desplazan un volumen igual de suelo.

La validez de la ecuación anterior debería advertirse. Los cascajos en el suelo si se agrupan juntos tienden a formar poros que no se pueden llenar total o parcialmente con los finos del suelo. Si el contenido de cascajo aumenta, la probabilidad de deformar tales poros por agrupación también aumenta. La distribución debería seguir una ley estadística. Por tanto, la desviación de la suposición de las condi-

ciones actuales aumenta con el contenido de cascajo. Esto ha sido comprobado por la experiencia en la compactación.

La ecuación 7 es correcta teóricamente cuando el contenido de cascajo es cero. Su aplicabilidad disminuye cuando el contenido de cascajo aumenta. Cuando el material es casajoso 100 por ciento, el peso unitario, de acuerdo con la ecuación 7, es el de la roca sólida, cerca de 155 libras por pie cúbico, lo cual es obviamente incorrecto. El peso unitario de 100 por ciento de cascajo es de cerca de 110 libras por pie cúbico.

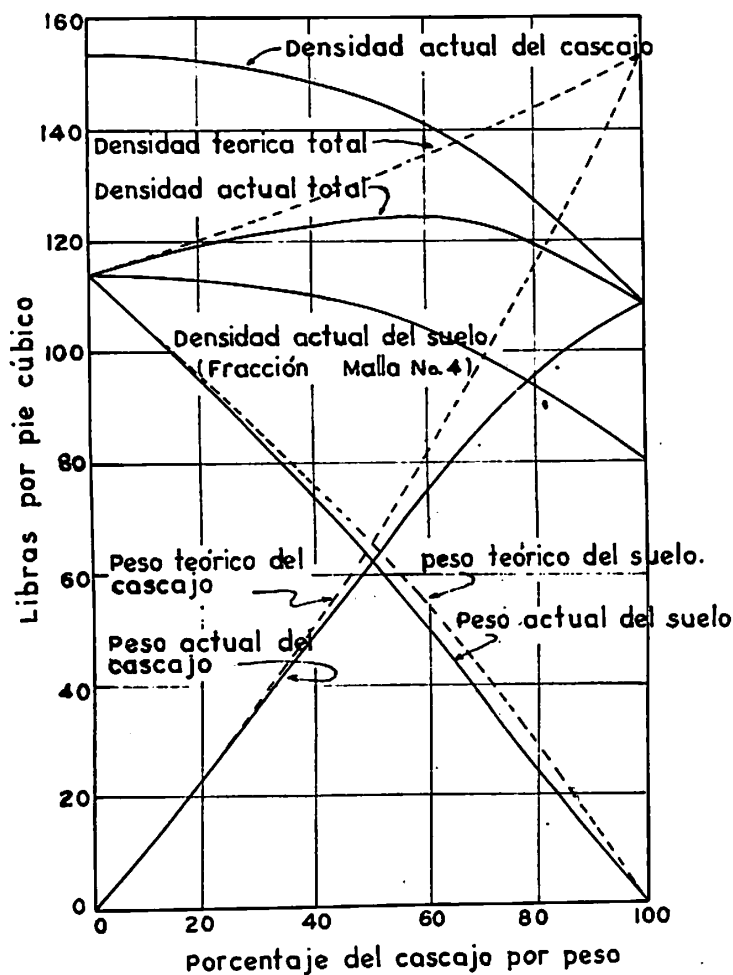


Fig. 6 - Influencia del contenido de cascajo sobre la densidad.

Las curvas reales correctas de la densidad y el peso se muestran en líneas continuas en la Fig. 6. La curva de la densidad total es la curva que puede obtenerse por ensayos de densidad en el campo y en el sitio. Se desvía más y más de la densidad teórica total cuando el contenido de cascajo aumenta, y se acerca al peso unitario real del cascajo. De la densidad total real se pueden computar las curvas de los pesos reales del cascajo y del suelo. A cualquier contenido de cascajo, el grado de compactación del suelo comparado con el que es-

tá libre de cascajo se puede obtener dividiendo el peso real por el peso teórico.

Por ejemplo, con referencia a la Figura 6, la densidad seca de la fracción de suelo que pasa la malla N° 4 es de 114 libras por pie cúbico; la gravedad específica aparente del cascajo (fracción mayor que la llama N° 4) es de 2.45, de la cual se encuentra que la densidad seca del cascajo sin poros es  $2.45 \times 62.4$  o sea 153 libras por pie cúbico. Digamos, a 40 por ciento del contenido de cascajo,

Densidad total real = 122.5 lbs. por pie<sup>3</sup> determinada por el ensayo de densidad en el campo.

$$\text{Dens. teórica total (de la Ec. 7)} = \frac{1}{\frac{0.40}{153} + \frac{0.60}{114}} = 127 \text{ lbs./pie}^3$$

$$\text{Peso teórico del cascajo} = 127 \times 0.4 = 50.8 \text{ lbs};$$

$$\text{Peso teórico del suelo} = 127 (1 - 0.4) = 76.2 \text{ lbs};$$

$$\text{Peso real del cascajo} = 122.5 \times 0.4 = 49.0 \text{ lbs};$$

$$\text{Peso real del suelo} = 122.5 (1 - 0.4) = 73.5 \text{ lbs};$$

$$\text{Grado de compactación del suelo} = \frac{73.5 \times 100}{76.2} = 96.4\% \text{ del peso teórico}$$

Relación del volumen de vacíos al volumen de cascajo o porosidad

$$\left( 1 - \frac{49.0}{50.8} \right) \times 100 = 3.5\%$$

De aquí, se ve que, a un contenido de 40 por ciento de cascajo el suelo ha sido compactado solamente a 96.4 por ciento de la densidad del suelo libre de cascajo y el cascajo tiene 3.5 por ciento de vacíos.

Repitiendo procedimientos similares para materiales con diferentes contenidos de cascajo, se pueden obtener curvas como las que se muestran en la Fig. 7. La curva de la densidad del suelo muestra el obstáculo a la compactación del material fino por la presencia de cascajos. La curva de la porosidad del suelo indica el cambio del volumen de los poros formados por los grupos de cascajos. Es interesante observar que son directamente proporcionales.

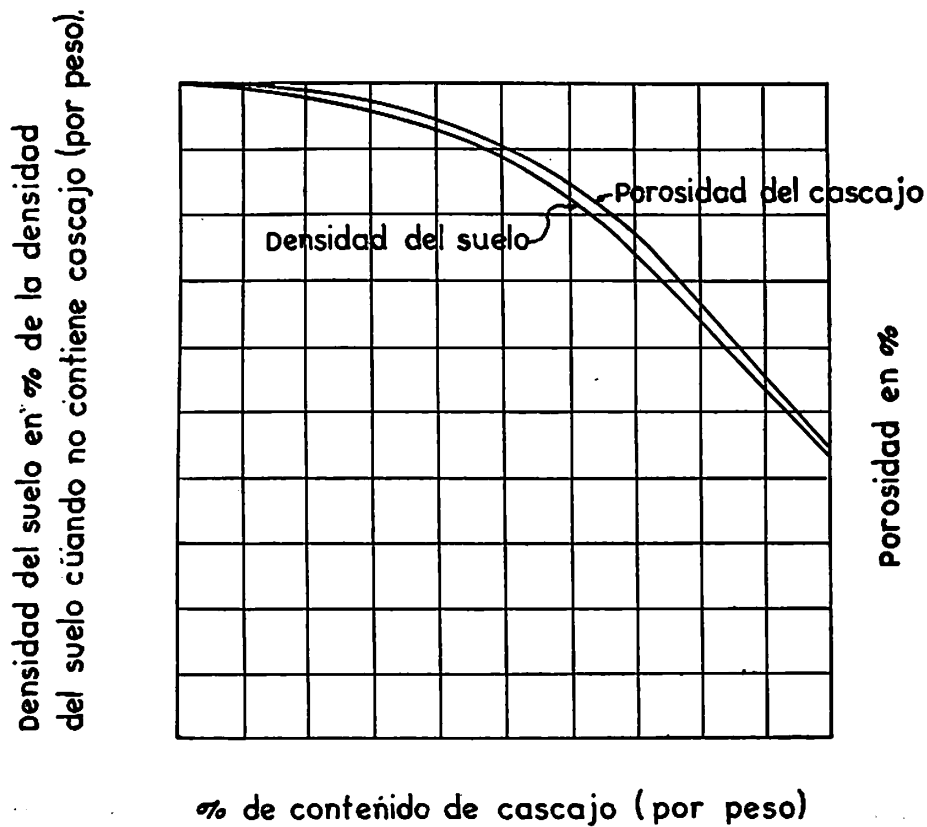


Fig. 7 - Porcentaje de la densidad del suelo y porosidad del cascajo.

## RESUMEN Y CONCLUSION

El trabajo hecho durante la compactación de una masa de suelo es almacenado como energía interna o convertido en calor venciendo la resistencia friccional que surge del movimiento relativo entre las partículas del suelo. Lo último puede resultar en la disminución de los vacíos de aire y el aumento en la densidad del suelo. El método más eficiente de compactación es por lo tanto aquel que realice el trabajo que cumpla el objetivo deseado; esto es, el reajuste de las partículas del suelo acompañado por la disminución de los vacíos.

La compactación de un suelo es esencialmente el proceso de encontrar equilibrio entre la carga dinámica y la resistencia del suelo. Depende de la intensidad de la presión de la carga más bien que de la carga total. Se puede obtener un suelo de alta densidad utilizando la "compactación por etapas" con el uso de rodillos de presión ligera al principio, seguidos por rodillos pesados. El efecto del contenido de humedad es reducir la resistencia friccional al movimiento relativo de las partículas del suelo. Es efectiva solamente en partículas finas del suelo. La presión óptima deberá determinarse teniendo en cuenta que se debe fijar el contenido de humedad del suelo. Gran-

des áreas de contacto del rodillo darán mejor compactación a suelos moderadamente cohesivos que rodillos con áreas pequeñas de contacto, suponiendo que las presiones de contacto sean las mismas. Los espesores de la capa compactada para la compactación deberán basarse en el ancho del contacto de los rodillos. Para un cierto tipo de rodillo en un suelo dado, hay un número definido de pasadas que darán el máximo rendimiento en aumento de densidad según la energía gastada. Finalmente, la influencia del contenido de cascajo sobre la compactación es importante porque estorba la compactación de las fracciones fino-granulares del suelo.

#### REFERENCIAS

1. "Physical Chemistry for Colleges" by E. B. Millard, 1946 McGraw-Hill.
2. Geuze and Bruyn "The First Law of Thermodynamics and the Consolidation Process" Proc. of Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1948, Vol. III.
3. Winterkorn "Physio-Chemical Properties of Soils". Proc. of Second Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1948, Vol. I.
4. O. W. Eshbach: "Handbook of Engineering Fundamentals" John Wiley & Sons, 1952 Pg. 4-52.
5. Grasshoff "Investigation of Values of the Dynamic Penetration Resistance to Model Piles in Sand and Clay, Obtained from Test". Proc. of 3rd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1953.
6. Turnbull, Johnson and Maxwell "Factors Influencing Compaction of Soils". Bulletin N° 23, Higway Research Board (1949).
7. "Fundamentals of Soil Mechanics" Taylor, 1948, p. 538.
8. Soil Compaction Investigation Report, N° 6 "Effect of Size of Feet on Sheep-foot Roller" 1954.
9. Walker & Holtz "Control of Embankment Material by Laboratory Testing" - Transactions ASCE Vol. 118, 1953.

**MORENO & VILLA LTDA.**

**INGENIEROS, CALCULISTAS Y CONTRATISTAS**

Oficinas: Edificio Fabricato Nros. 709 - 710

**T E L E F O N O 2 2 1-2 5**