

2. RELACIONES BÁSICAS ASOCIADAS CON LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

2.1 Propiedades básicas del suelo

Las propiedades básicas de un suelo son las que se requieren para definir su estado físico. Para los propósitos del análisis y diseño de ingeniería, es necesario cuantificar las tres fases constituyentes (sólida, líquida y gaseosa) y poder expresar las relaciones entre ellas en términos numéricos. Por ejemplo, el contenido de humedad de un suelo es simplemente la relación de la masa de agua a la masa del sólido. Las densidades, esto es, las relaciones entre la masa y el volumen, también son medidas importantes del estado físico de un suelo. En un suelo típico, el sólido, el líquido (agua) y el gas (aire) están intermezclados en forma natural, por lo que resulta difícil visualizar sus proporciones relativas. Por consiguiente, es muy conveniente considerar un modelo de suelo en el cual las tres fases se separan en cantidades individuales correspondientes a sus proporciones correctas.

A continuación se muestra en la Fig. 2.1 un modelo de suelo de volumen sólido unitario, el cual nos será de gran importancia para definir los conceptos de las propiedades básicas que en él intervienen, los cuales serán de gran ayuda más adelante para definir la curva de compactación en el laboratorio.

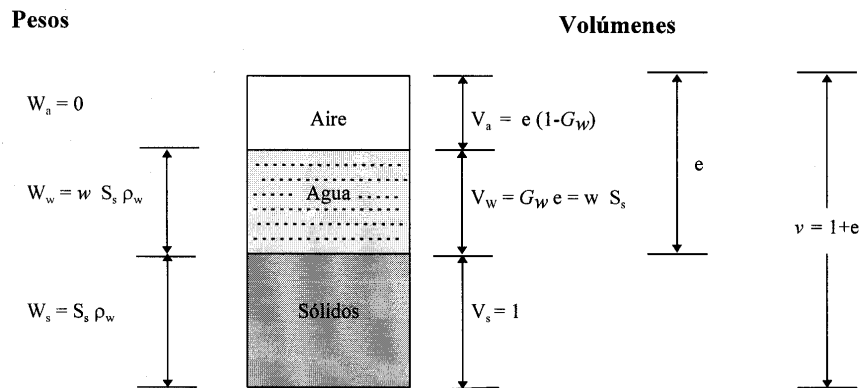


Fig. 2.1 Modelo de Suelo de volumen sólido unitario

Las principales definiciones son las siguientes:

Relación de Vacíos (e)

El volumen no ocupado por los sólidos se conoce como *volumen de vacíos*; puede estar ocupado por agua, aire, o por una mezcla de ambos.

$$\text{Relación de vacíos, } e = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen de sólidos}} \quad (2.1)$$

Porosidad (n)

Otra forma de expresar la cantidad de vacíos consiste en relacionar el volumen de éstos con el volumen *total*:

$$\text{Porosidad, } n = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen total}} = \frac{V_v}{V}$$

$$\text{De la Fig.2.1, } n = \frac{e}{1 + e} \quad (2.2)$$

Volumen específico (v)

En la Fig.2.1 puede verse que el volumen total del modelo de suelo es igual a $1 + e$, siendo esta cantidad el *volumen específico* del suelo.

$$\text{Volumen específico, } v = 1 + e \quad (2.3)$$

Grado de saturación (G_w)

La cantidad de agua en el suelo puede expresarse como una fracción del volumen de vacíos; esta fracción se conoce con el nombre de *grado de saturación*.

$$\text{Grado de saturación, } G_w = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen de vacíos}} = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.4)$$

$$o \quad V_w = G_w e$$

$$\text{Porcentaje de saturación} = 100 G_w$$

$$\text{Para un suelo perfectamente seco} \quad G_w = 0$$

$$\text{y para un suelo saturado} \quad G_w = 1$$

Relación de aire-vacíos (A_v)

El *volumen de aire-vacíos* de un suelo es la parte del volumen de vacíos no ocupado por el agua.

Volumen aire-vacíos = volumen de vacíos - volumen de agua

$$\begin{aligned} V_a &= V_v - V_w \\ &= e - G_w e \\ &= e (1 - G_w) \end{aligned} \quad (2.5)$$

La relación de aire-vacíos es la relación del volumen aire-vacíos al volumen específico del suelo.

$$A_v = \frac{\text{Volumen de aire - vacíos}}{\text{Volumen específico}}$$

$$A_v = \frac{e (1 - G_w)}{(1 + e)} = n (1 - G_w) \quad (2.6)$$

o puesto que $G_w = (w \cdot S_s) / e$ (véase la Ec.(2.10) más adelante)

$$A_v = \frac{e - (w \cdot S_s)}{(1 + e)} \quad (2.7)$$

Porcentaje de vacíos de aire = $100 A_v$

Densidad o peso específico de los sólidos (S_s) y densidad de partículas (ρ_s)

La relación del peso de un volumen dado de un material al peso del mismo volumen de agua recibe el nombre de *peso específico* relativo del material. El peso de una unidad de volumen sólido en el modelo de suelo (Fig. 2.1), es:

$$W_s = S_s \cdot \rho_w \quad \text{donde} \quad S_s = W_s / \rho_w \quad (2.8a)$$

Donde ρ_w = densidad del agua, que puede considerarse como 1.00 Mg/m^3 .

La *densidad de partícula* (ρ_s) o *densidad de grano*, es el peso por unidad de volumen de las partículas sólidas, o granos, y es igual a :

$$\rho_s = S_s \cdot \rho_w \quad (2.8b)$$

La masa del agua en el modelo del suelo es:

$$W_w = G_w e \rho_w \quad (2.9)$$

Contenido de humedad (w)

La proporción del peso de agua a la masa de sólidos recibe el nombre de *contenido de humedad* del suelo

$$\text{Contenido de humedad } w = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de sólidos}} = \frac{W_w}{W_s}$$

De acuerdo con las ecuaciones (2.8) y (2.9):

$$w = (G_w - e \rho_w) / (S_s \rho_w)$$

$$w = (G_w - e) / (S_s) \quad (2.10)$$

$$\text{O } w S_s = G_w - e$$

$$\text{Porcentaje de contenido de humedad} = 100 w \quad (2.11)$$

Peso volumetrico de los suelos

Las cantidades conocidas con el nombre de pesos volumétricos proporcionan una medición de la *cantidad* de material con relación a la cantidad de *espacio* que ocupa.

Se pueden definir diversos tipos de *densidades*:

$$\text{Peso volumetrico seco, } \rho_s = \frac{\text{masa de sólidos}}{\text{volumen total}}$$

$$\text{De la Fig.2.1, } \rho_v = \frac{G_w}{1+e} = \frac{\rho_w}{1+e} \quad (2.12)$$

$$\text{Peso volumetrico total, } \rho = \frac{\text{masa total}}{\text{volumen total}} = \frac{\text{masa de sólidos} + \text{masa de agua}}{\text{volumen total}}$$

$$\text{De la Fig.2.1, } \rho = \frac{S_s \rho_v + G_w e \rho_v}{1+e} = \frac{\rho_s + G_w e \rho_v}{1+e} \quad (2.13)$$

La relación de estos dos pesos volumetricos permite obtener una expresión muy útil

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \frac{\frac{S_s + G_w e}{1+e} \rho_v}{\frac{S_s}{1+e} \rho_v} = 1 + \frac{G_w e}{S_s}$$

o, puesto que $w S_s = G_w e$

$$\rho = (1 + w) \rho_d \quad (2.14)$$

El peso volumetrico saturado es el peso volumetrico total del suelo cuando esta saturado, esto es, $G_w = 1$

$$\text{Entonces, el peso volumetrico saturado, } \rho_{sat} = \frac{S_s + e}{1 + e} \rho_w \quad (2.15)$$

La densidad sumergida o densidad efectiva de un suelo es la masa efectiva por volumen unitario (total), cuando esta sumergido. Al sumergirse en agua un volumen unitario (total) de suelo se desplaza un volumen igual de agua; entonces, la masa neta de un volumen unitario de suelo sumergido es $\rho_{sat} - \rho_w$. A esto se le conoce como densidad sumergida.

$$\text{Densidad sumergida, } \rho' = \rho_{sat} - \rho_w \quad (2.16)$$

2.2 Curva de compactación en el laboratorio.

En el laboratorio el estado de compactación de un suelo puede medirse de manera conveniente usando el peso volumetrico seco, cuyos valores estan relacionados con el contenido de humedad. Al añadir agua a un suelo seco se forman peliculas de agua adsorbida alrededor de la particula. A medida que las particulas de agua adsorbida incrementan su espesor, las particulas quedan lubricadas y tienden a empacarse más cercanas unas de otras, con lo cual aumenta el peso volumetrico. Sin embargo, al llegar a un cierto punto, las peliculas de agua adsorbida empiezan a empujar a las partículas separandolas, por lo que al seguirse aumentando la humedad, el peso volumetrico disminuye. Por consiguiente el peso volumetrico seco máximo se presenta con un contenido óptimo de humedad, tal como se muestra en la Fig.2.2.

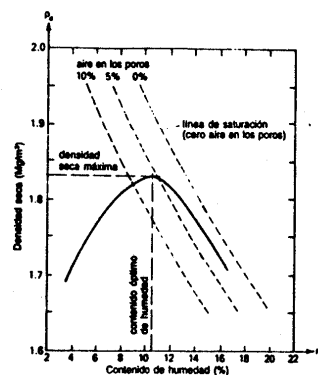


Fig. 2.2 Gráfica de Densidad Seca Vs. Contenido de humedad.

Para evaluar el potencial de compactación de un suelo se usa uno de cualquiera de los tres ensayos estandar de laboratorio (Proctor, Proctor Modificada y Porter) dependiendo del tipo de suelo a tratar, mismas que se explicaran mas adelante detalladamente. Independientemente del metodo de compactación que se vaya a utilizar, la prueba consiste esencialmente en colocar el suelo en un molde apropiado ya sea en tres o cinco capas iguales, cada una de las cuales se somete a un grado especifico de energía de compactación. Después de compactar la capa final, se determina el peso volumetrico total del suelo en el molde, se vuelve a mezclar con una cantidad adicional de agua y se repite el procedimiento. Debe llevarse a cabo un total de cuando menos cinco pruebas para cada tipo de suelo. Inicialmente, el suelo se seca al aire y se eliminan las partículas mayores de 20mm.

El peso volumetrico seco se calcula a partir de los valores del peso volumetrico total (ρ) y del contenido de humedad (w) definidos anteriormente (véase Ec. 2.14) de este capítulo.

$$\rho_{d \text{ máx}} = \frac{\rho}{(1 + w)}, \quad \text{donde } \rho = \frac{W}{V}, \quad \text{sustituyendo: } \rho_{d \text{ máx}} = \frac{W}{V(1 + w)}$$

y con una gráfica como se mostró en la Fig. 2.2 de peso volumetrico seco/contenido de humedad. Con esta curva, se determina el *peso volumetrico seco máximo* para el grado de compactación utilizado. tambien se obtiene el contenido de humedad que corresponde al peso volumetrico seco máximo, que recibe el nombre de *contenido óptimo de humedad*.

El peso volumetrico seco máximo con un contenido de humedad determinado, recibe el nombre de *peso volumetrico seco de saturación*, que es el estado en el cual el suelo tiene cero aire en los poros, esto es, $A_v = 0$. Para valores de $A_v > 0$, el peso volumetrico seco máximo alcanzable esta dada por la siguiente ecuación

$$\rho_d = \frac{S_s \rho_w}{1 + w S_s} (1 - A_v) \quad (2.17)$$

que se obtiene considerando la muestra de un suelo modelo que se ilustra en la Fig.2.3, en el cual:

Volumen total $V = V_a + V_w + V_s$

Sustituyendo y transponiendo:

$$V (1 - A_v) = V_s (1 + w S_s) \quad \text{lo que da: } \frac{V_s}{V} = \frac{(1 - A_v)}{(1 + w S_s)}$$

$$\text{Ahora: } \rho_d = \frac{V_s S_s \rho_w}{V}$$

$$\text{Entonces: } \rho_d = \frac{S_s \rho_w}{1 + w S_s} (1 - A_v)$$

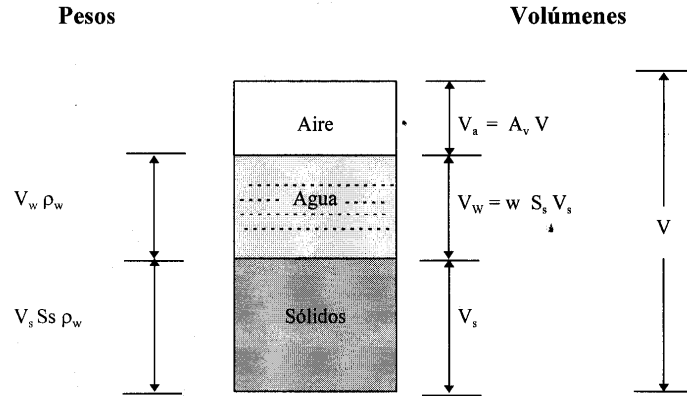


Fig. 2.3 Suelo modelo

Para obtener una estimación del contenido de aire en los poros del suelo, a la gráfica de peso volumetrico/contenido de humedad (Fig.2.2), se le adiciona un conjunto de curvas que representan 0, 5% y 10% de aire en los poros. Un aumento del esfuerzo de compactación produce un peso volumetrico seco máximo más elevado con un contenido óptimo de humedad más bajo, quedando la relación de aire en los poros casi invariable como se muestra en la Fig.2.4.

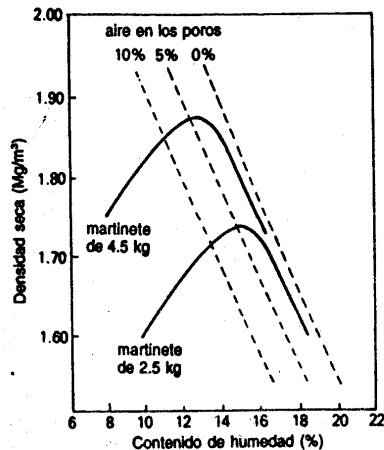


Fig. 2.4 Efecto de diferentes esfuerzos de compactación en la curva ρ_d / w

Este procedimiento de obtención de la *curva de compactación en el laboratorio* es similar para las distintas pruebas de laboratorio mencionadas anteriormente y que se describen cada una de ellas a continuación:

A) Proctor: R.R. Proctor estableció que hay una correspondencia entre el peso volumetrico seco de un suelo compactado y su resistencia. El equipo para hacer pruebas de compactación en la obra es un equipo

económico y sencillo. Proctor desarrollo una prueba que consiste en:

- a) Se toma una muestra representativa del suelo a compactar, de humedad conocida
- b) Se toma un cilindro de 4" de diámetro x 4 1/2" de altura, se llena en tres capas aproximadamente iguales con material de prueba.
- c) Cada capa se compacta con 25 golpes de un martillo (martinete) de 2.5 kg. con un área de contacto de 20 cm², el que se deja caer de 35 cm. de altura (Fig 2.5). Todo esto con el objeto de siempre dar al material la misma energía de compactación.

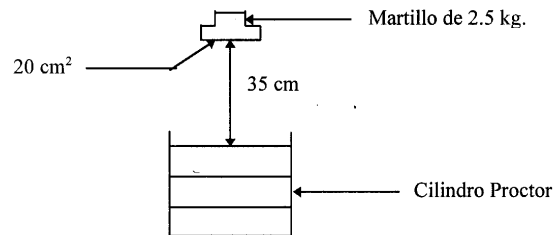


Fig. 2.5

- d) Se pesa el material y como el volumen es conocido se calcula el peso volumetrico humedo, simplemente dividiendo el peso del material entre su volumen. Como la humedad es conocida, se resta el peso del agua y se obtiene el peso volumetrico seco para esa humedad.
- e) Se repite la prueba varias veces, variando cada vez el grado de humedad, con lo que se obtienen pares de valores Humedad-Peso Volumetrico Seco.

Con estos pares de valores se dibuja la siguiente grafica (Fig. 2.6).

Puede observarse que hay un cierto contenido de humedad para el cual el peso volumetrico es máximo, este peso se conoce como: "Peso Volumetrico Seco Máximo" (P.V.S.M.), o peso proctor, y el contenido de humedad como humedad óptima.

El diseñador entonces especifica el porcentaje del peso proctor que debe obtenerse en la construcción del terraplen y la humedad óptima.

Por ejemplo: Si el proyectista especifica 95% Proctor en el caso de la gráfica, tenemos:
 $P.V.S.M. = 1820 \text{ kg/m}^3$

$$95\% \text{ de P.V.S.M.} = 0.95 \times 1820 = 1729 \text{ kg/m}^3$$

es decir el constructor debe obtener un peso volumetrico seco minimo de 1729 kg/m^3 en ese material.

La razón de la existencia de un peso volumetrico máximo es que en todos los suelos, al incrementarse su humedad, se les proporciona un medio lubricante entre sus partículas, que permite un cierto acomodo de estas cuando se sujetan a un cierto trabajo de compactación. Si se sigue aumentando la humedad con el mismo trabajo de compactación, se llega a obtener un mejor acomodo de sus partículas y en consecuencia un mayor peso volumetrico, si se aumenta la humedad más todavía, el agua empieza a ocupar el espacio que deberían ocupar las partículas del suelo y por lo tanto comienza a bajar el peso volumetrico del material, para el mismo trabajo de compactación.

Por lo tanto, si se aumenta o disminuye la humedad sera necesario aumentár el trabajo del equipo de compactación, lo que en general, no es economico.

B) Proctor Modificada: Conforme fueron aumentando las cargas sobre las terracerias por el uso de camiones y aeroplanos cada vez más pesados, se vio la necesidad de desarrollar mayores densidades y resistencias en muchos materiales usando mayor trabajo de compactación. Por esta razón se desarrollo la prueba Proctor Modificada.

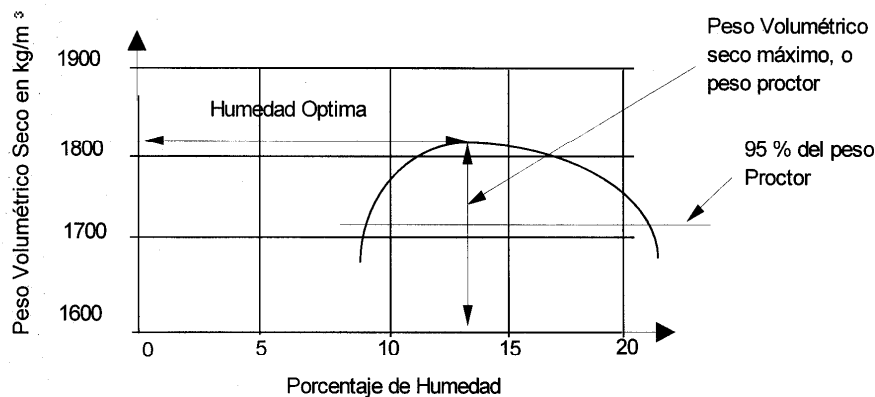


Fig. 2.6

Para esta prueba se usa el mismo cilindro proctor, pero el material se compacta en cinco capas con un martillo de 4.5 kg. y cayendo de una altura de 46 cm., dando 25 golpes por capa (Fig. 2.7).

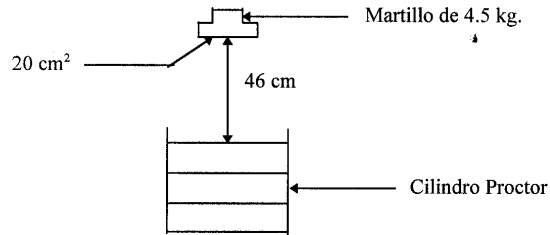


Fig. 2.7

En todos los aspectos las dos pruebas son semejantes únicamente el trabajo de compactación se ha incrementado aproximadamente 4.5 veces.

La grafica siguiente es un ejemplo de la prueba proctor y la prueba proctor modificada efectuadas en el mismo material (Fig. 2.8).

Observe en esta grafica que aunque el trabajo de compactación se ha incrementado 4.5 veces, la densidad solamente se incremento un 9%, y que la humedad optima disminuyo un 3%. Esto ultimo es invariablemente cierto.

C) Porter: Tanto la prueba Proctor como la prueba Proctor modificada han dado muy buen resultado en suelos cuyos tamaños maximos son de 10 mm. (3/8"), en suelos con particulas mayores, el golpe del martillo no resulta uniforme por lo tanto la prueba puede variar de resultados en un mismo material.

Para obviar esta dificultad se ideó la prueba Porter, que consiste en lo siguiente:

- a) Se toma una muestra del material a probar y se seca.
- b) Se pasa por la malla de 25 mm (1") y se determina el porcentaje, en peso, retenido en la malla, si el porcentaje es menor del 15%, se usará para la prueba el material que paso por la malla. Si el porcentaje retenido es mayor del 15% se prepara, del material original, una muestra que pase por la malla de 1" y que sea retenida en la

mallá No. 4, de esta muestra se pesa un tanto igual al peso del retenido, el que se agrega al material que paso por la mallá de 1", con este nuevo material se procede a la prueba.

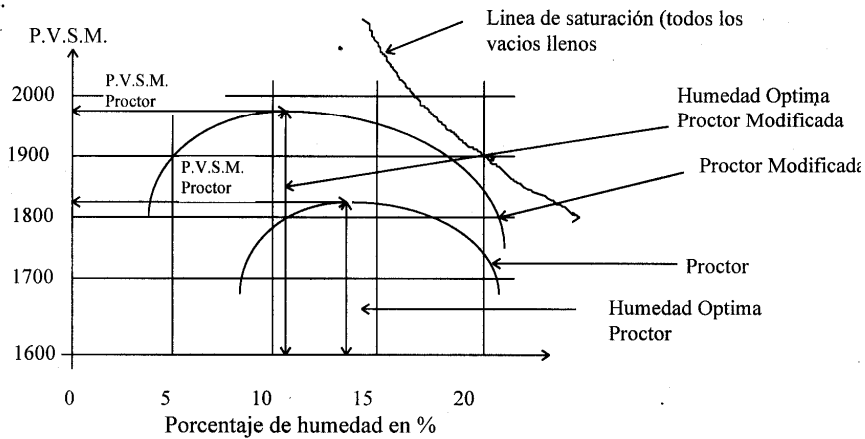


Fig.2.8

- c) A 4 kg. de la muestra así preparada se le incorpora una cantidad de agua conocida; se homogeniza con el material.
- d) Con este material se llena, en tres capas, un molde metálico de 6" de diámetro x 8" de altura con fondo perforado. Cada capa se pica 25 veces con una varilla de 5/8" de diámetro x 30 cm. de longitud con punta de bala.
- e) Sobre la última capa se coloca una capa circular ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro, y se mete el molde en una prensa de 30 Ton.
- f) Se aplica la carga gradualmente de tal manera que en cinco minutos se alcance una presión de 140.6 kg/cm^2 , la cual debe mantenerse durante un minuto, e inmediatamente se descarga en forma gradual durante un minuto.

Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad ensayada es inferior a la óptima.

- g) Se prosigue por tanteos hasta que la base del molde se humedezca al alcanzar la carga máxima. La humedad de esta prueba es la humedad óptima. Se determina entonces el peso volumétrico seco de la muestra dentro del cilindro, a este peso

se le conoce como el Peso Volumetrico Seco Máximo Porter, y que será el peso comparativo para el trabajo de campo.

Por ejemplo: Si en la prueba Porter obtuvimos un Peso Volumetrico Seco Maximo de 2000 kg/m^3 , y el diseñador ha pedido el 95% Porter, en la obra tendremos que alcanzar un peso volumetrico seco de: $0.95 \times 2000 \text{ kg/m}^3 = 1900 \text{ kg/m}^3$.

2.3.- Suelos Cohesivos.

Pruebas de compactación en laboratorio para suelos cohesivos.

En las pruebas de laboratorio empleadas para determinar el contenido óptimo de humedad de suelos cohesivos, comúnmente la muestra es aireada y disgregada al estarla pasando a través de un tamiz. Si se presentan partículas grandes, generalmente estas son desechadas. En algunos procedimientos una cantidad igual de partículas pequeñas son agregadas como reposición. Después los suelos son procesados, agregando agua a la muestra y permitiendo el empapado o remojo en el interior del suelo. Entonces la muestra se coloca en un molde de prueba y se sujeta a un esfuerzo de compactación cualquiera por impacto ocasionado por la caída de un peso dado a una distancia determinada o por un lento movimiento de amasado. El proceso seguido es similar al mencionado en el apartado anterior, obteniéndose curvas como las de la Fig. 2.9 y Fig. 2.10.

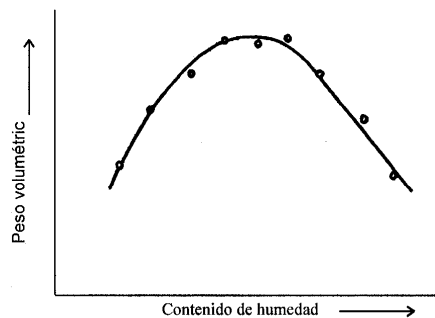


Fig 2.9 Curva típica de compactación para suelos cohesivos.

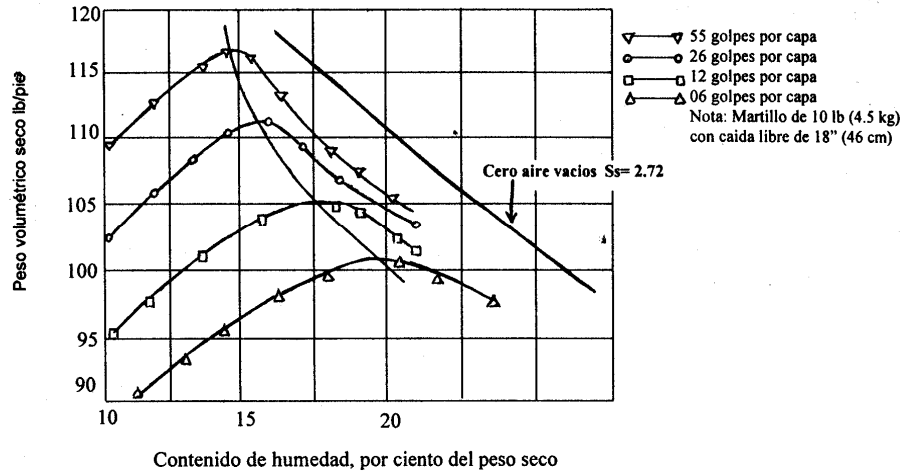


Fig. 2.10 Compactación dinámica de laboratorio
Contenido de humedad Vs Peso volumétrico
Típica de suelos cohesivos para distintos
esfuerzos de compactación.

Idealmente, el procedimiento de compactación en laboratorio produce una curva "humedad-densidad" que concuerda aproximadamente con la producida por equipo de compactación de campo. Desafortunadamente, las curvas humedad-densidad para los equipos de compactación en campo son limitados. El Road Research Laboratory (Laboratorio de Investigación de Caminos) publicó curvas "humedad-densidad" para una amplia variedad de compactadores, comparable con la curva de laboratorio. Las curvas humedad-densidad obtenidas con el rodillo pata de cabra en tres presas de tierra construidas bajo supervisión del Buró de Mejoras (Bureau of Reclamation) fueron reportadas por Hilf. La WES (Waterways Experiment Station, Estación experimental en Vías Navegables), de Vicksburg, Miss., publicó curvas humedad-densidad obtenidas con rodillo pata de cabra y rodillo neumático sobre arcilla magra en los suelos naturales de los terrenos de la WES. En estas pruebas, ambas características, las del rodillo pata de cabra y las del rodillo neumático, y el número de operaciones variaron al producir diferencias en los esfuerzos de compactación. Las curvas humedad-densidad para los diferentes esfuerzos de compactación siguen el mismo patrón mostrado en la Fig. 2.10, en el cual una línea de unión de puntos "pico" o puntos máximo de las curvas, sigue la forma general de la curva "cero-aire-vacios". La Fig.2.11 muestra la "línea de los óptimos" desarrollada en las pruebas de compactación de campo con el

rodillo pata de cabra y el rodillo neumático. También se muestra en la Fig. 2.11 las "líneas de los óptimos" obtenidas en pruebas de compactación en laboratorio con un mismo suelo pero usando compactación dinámica y estática.

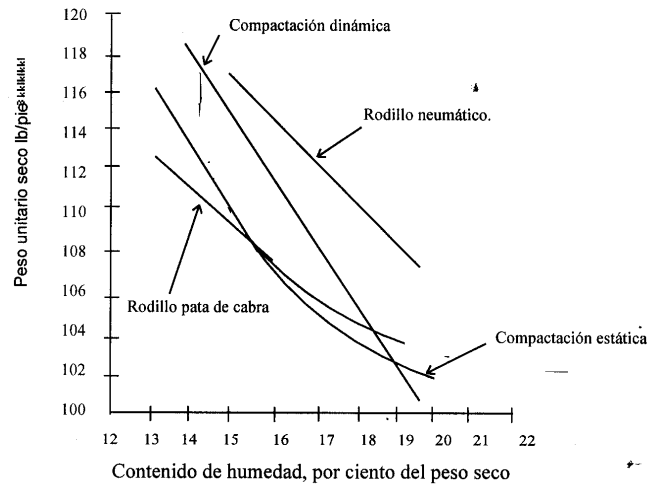


Fig. 2.11 Comparación de métodos de compactación.

Puede observarse que el procedimiento de laboratorio tampoco es completamente coincidente con la compactación en campo. Además, estos nuevos procedimientos de laboratorio en apariencia distintos pueden ser ideales, pero necesitan de las diversas clases de compactadores.

Esta falta de coincidencia entre el contenido de humedad de laboratorio y el de campo fue reconocida por algunos investigadores antes de las pruebas de compactación de laboratorio. R.R. Philipe aplicó amasamiento con movimientos lentos de carga, simulando la acción de un sólo componente de un rodillo pata de cabra. Wilson hizo uso de un dispositivo operado manualmente con cargas de rebote. Con lentos movimientos de amasado intentó producir empleando el compactador Harvard miniatura curvas que se ajustan aproximadamente con las curvas de campo. McRae y Rutledge describen un compactador de amasado desarrollado en la Universidad del Noroeste (Northwestern University) en el que la carga de la pata y el tiempo que

ésta entra en contacto con el suelo pueden ser controlados. Con la variación de estas dos características, la "línea de los óptimos" puede ser cambiada con respecto a cualquier incremento o decremento en el contenido de humedad, hasta lograr una mejor correlación con la curva de compactación en campo. Sin embargo, las correlaciones y ajustes necesarios entre las pruebas de campo y de laboratorio por medio de compactadores de amasado, no han sido completamente satisfactorias. Actualmente, la mayoría de las construcciones se controlan tomando como base las pruebas de impacto. Muchos trabajos han sido satisfactoriamente concluidos usando los ensayos actuales; no obstante el buen juicio siempre es recomendable.

Los procedimientos de prueba que se han extendido en la mayor parte de los Estados Unidos y que han sido adoptadas a la realidad mexicana son: (a) El procedimiento original descrito por Proctor, (b) una ligera modificación al procedimiento original proctor normalizado por la Asociación Americana de Estándares para Carreteras y Transportación Estatal (AASHTO, American Association of State Highway and Transport Officials) y la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (ASTM, American Society of Testing Materials); (c) procedimientos especificados por el Buró de Mejoras; (d) el método California y (e) la modificación de la norma AASHTO hecha por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Norteamericano con el fin de incrementar los esfuerzos de compactación. En Inglaterra, la Norma Británica (British Standard) empleada, da aproximadamente los mismos resultados que la prueba Estándar AASHTO. La Tabla 2.1 muestra las características adecuadas para cada una de las pruebas citadas anteriormente. El esfuerzo de compactación mostrado en la última columna representa el valor calculado a partir de las dimensiones de la prueba, redondeándolo a las 10 lbs. (45.4 kg.) más cercanas. El esfuerzo de compactación real que se imprime al espécimen depende de muchos factores y los valores mostrados deben ser considerados sólo como indicaciones generales. La AASHTO y la ASTM han revisado sus procedimientos de laboratorio para pruebas de compactación, con el fin de incluir tanto los tamaños del molde de 4" como el de 6", así como, los martillos de 5.5 y de 10 lbs. Esos procedimientos ya revisados se designan con la Norma AASHTO T-99-57 y ASTM D 698-58 T para cuando se usa el martillo de 5.5 lbs. y una AASHTO T 180-57 y ASTM D 1557-58 cuando se usa el martillo de 10 lbs. Cada procedimiento tiene cuatro alternativas.

tabla 2.1 Características adecuadas para pruebas de compactación de laboratorio en suelos cohesivos

Prueba	Precesamiento	Tamaño del molde		Peso del martillo (LB)	Altura de Caída (PLG)	Número de capas	Golpes por capa	El suelo reusado	Esfuerzo de Compactación (lb.-pie/pie ³)
		Diámetro (PLG)	Altura (PLG)						
Proctor.....	Cribado a través de la malla de 1/4" Secado al aire para remover las adherencias, cribado a través de la malla No. 4. Secado al aire, cribado a través de la malla No. 4. Secado al aire, cribado a través de la malla de 3/4". Reemplazar los tamaños superiores con material de peso similar que pase a través de las mallas de 3/4" hasta la No. 4 Cribado a través de la malla de 3/4"	4 ^a	5	5.5	12	3	25 ^b	Si	12,400
Buró de Mejoras Designación..... E-10.		4.25 ^c	6	5.5	18	3	25	Si ^d	
AASHTO T99-57, Método A.....		4	4.5 + ^e	5.5	12	3	25	Si ^f	12,400
ASTM D 698-58T, Método A		6	7 ^g	10	18	5	55	No	56,000
AASHTO Modificada.....	Cribado a través de la malla de 3/4" Secado al horno, cribar a través de la malla de 3/4". Las mallas son de la British Standard.	2.875	36 ^h	10	18	5 ⁱ	20	No	36,300
California.....		4	4.6 ^j	5.5	12	10 ⁱ	20	No	72,600
British Std. 1377:1948.....						3	25	Si	12,400

^a El tamaño del molde usado por Proctor ha sido reportado como de aproximadamente 4 por 5" y con un volumen de 1/20 de pie cúbico.

^b Los golpes usados para la Proctor informan como de 25 golpes firmes en una altura de caída de 12".

^c Teniendo en la base 4.131". El volumen es de 1/20 de pie cúbico.

^d El suelo no es reutilizado cuando contiene partículas frágiles o es una arcilla de textura densa.

^e La altura es determinada para que dé un volumen de 1/30 pie cúbico.

^f En la revisión hecha por la ASTM el suelo no es reutilizado cuando contiene partículas frágiles o es una arcilla de textura densa.

^g Un disco espaciador de 2 1/2" es requerido. La altura de la muestra es de 4.5". El volumen nominal es de 0.0736 pie cúbico.

^h La altura de la muestra va de 10 a 12 pulgadas. El volumen nominal de la muestra es de 0.0413 pie cúbico.

ⁱ Se usan 10 capas cuando el suelo queda dentro de un espesor de 2 pies o cuando se coloca un valor equivalente de arena de 25 o más independientemente del espesor. En cualquier otro caso se usan 5 capas.

La prueba de compactación Harvard Miniatura sigue los mismos procedimientos generales descritos en los párrafos anteriores, excepto que, el suelo es compactado en el molde presionando con un pison de amasado aplicado lentamente sobre el suelo. El pisón de amasado es ajustado de forma tal que cuando una carga predeterminada es alcanzada, un resorte es accionado y la carga predeterminada no puede ser excedida por cualquier cantidad apreciable. La carga sobre el resorte y el número de apisonamientos usado en la compactación para un tamaño de molde dado pueden ser variados con el fin de tener diferentes esfuerzos de compactación. Otra característica de la prueba es el tamaño del equipo, el molde es de 1 5/16" de diámetro y tiene 2.816" de altura. El pisón de amasado tiene 0.5" de diámetro.

El esfuerzo de compactación usado en las pruebas que usan martillos de caída, pueden ser rápidamente expresados en términos de lb-pie por pie cúbico de suelo compactado pero como se anotó previamente el esfuerzo real que se imprime al espécimen varía con muchos factores, y los valores calculados son sólo indicadores generales. Los valores para los procedimientos originales de Proctor de los procedimientos ASTM y AASHTO son del orden de 11,000 a 12,000 lb-pie por pie cúbico. El esfuerzo de compactación para la energía AASHTO es casi cinco veces el de los procedimientos ASTM y AASHTO normales. La Fig. 2.10 muestra las curvas típicas de humedad-densidad para diferentes esfuerzos de compactación, las cuales, indican un crecimiento regular en la densidad máxima con respecto al incremento en el esfuerzo de compactación. Las indicaciones sobre esta relación de crecimiento regular entre el esfuerzo de compactación y la densidad máxima se dan, aun cuando varíen el peso del molde, el peso del martillo, la altura de caída y otras características.

Mecánica de la Compactación para suelos Cohesivos

La compactación o reducción de la relación de vacíos se produce de varias maneras: reorientación de las partículas, fractura de los granos o de las ligaduras entre ellos seguida por una reorientación y la flexión o distorsión de las partículas y sus capas adsorbidas. La energía que se gasta en este proceso es suministrada por el *esfuerzo de compactación* de la máquina de compactar. La eficacia de la energía gastada depende del tipo de partículas que componen el suelo y de la manera como se aplica el esfuerzo de compactación. En un suelo cohesivo la

compactación esta acompañada, principalmente, por distorsión y reorientación, las cuales son resistidas por las fuerzas atractivas de la "cohesión". A medida que la humedad del suelo aumenta la cohesión disminuye, la resistencia se hace menor y el esfuerzo más efectivo.

Sin embargo, si la humedad es muy alta, la compactación y la reducción de los vacíos de los suelos, tanto cohesivos como no cohesivos, los lleva a la saturación. El esfuerzo neutro que se crea impide que continúe disminuyendo la relación de vacíos y, por lo tanto, el esfuerzo adicional de compactación que se aplique se perderá. La saturación es, por lo tanto, el límite teórico de la compactación para una humedad dada.

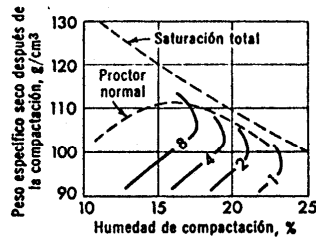
Energía de compactación para suelos Cohesivos.

La manera como se aplica la energía tiene un efecto significativo en el peso específico; en los suelos cohesivos, la presión, que flexa y fuerza los granos a tomar nuevas posiciones, es mejor que en suelos no cohesivos. Un gran número de aplicaciones de pequeñas presiones no es tan efectivo como el mismo esfuerzo total aplicado en una sola vez, porque las fuerzas pequeñas no pueden vencer la resistencia de cohesión para mover los granos, no importa la frecuencia con que se apliquen. La duración del esfuerzo influye a veces en el peso específico obtenido. En algunas arcillas, a diferencia de los suelos no cohesivos, una aplicación rápida de la energía de compactación parece que moviliza la resistencia viscosa del agua y es menos efectiva que si dicha energía se aplica lentamente.

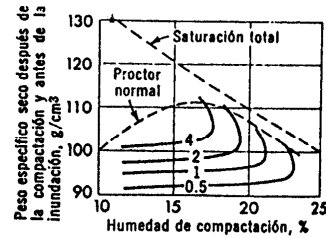
Resistencia y compresibilidad de suelos coherentes compactados.

Las propiedades físicas de un suelo compactado dependen grandemente del material del suelo, la humedad y el peso específico. En los suelos cohesivos son importantes además, la estructura y las condiciones de la compactación que la producen. Cuando un suelo cohesivo se compacta con humedades inferiores a la óptima se forma una estructura conglomerada; cuando se compacta con humedades altas, se forma una estructura dispersa con las partículas escamosas alineadas paralelamente. La resistencia sin drenaje, típica, de un suelo cohesivo a medida que se compacta y con una presión de confinamiento constante, se muestra en la Fig.2.12a. Para un peso específico constante la resistencia disminuye con el aumento de humedad; para una humedad constante la resistencia aumenta con el incremento de peso específico. Una excepción de lo anterior ocurre cuando se acerca a la curva de total saturación. El aumento de peso específico produce algún aumento en la presión intersticial, con lo cual la resistencia sin

drenaje disminuye. Esto sucede algunas veces cuando el suelo se compacta con una humedad muy por arriba de la óptima y puede dar como resultado una falla por esfuerzo cortante durante la construcción. A esto se le llama "sobrecompactación" y se evita por medio de un control adecuado de la humedad.



a. La resistencia compactada en kg/cm^2 se indica por la línea continua.



b. La resistencia después de inundado, en kg/cm^2 , se indica por la línea continua.

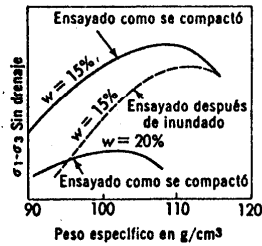
Fig. 2.12 Relación de la resistencia a compresión sin confinar (resistencia a esfuerzo cortante sin drenaje) de un suelo cohesivo compactado, con la humedad y el peso específico seco.

La resistencia sin drenaje de un suelo cohesivo compactado después de inundado (bajo una presión de confinamiento constante) se indica en la Fig. 2.12 b. Aunque la humedad es aproximadamente la misma después de la inundación, para pesos específicos iguales, la resistencia disminuye ligeramente con el aumento inicial (compactación) de humedad, probablemente porque la estructura del suelo cambia de la forma agregada más fuerte a la dispersa más débil. Como el caso anterior, la resistencia cae rápidamente cerca de la curva de saturación total con el aumento de peso específico, debido al mayor crecimiento del esfuerzo neutro en la estructura dispersa.

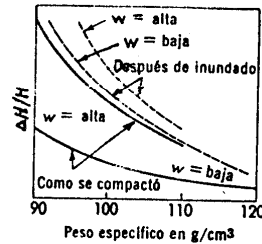
La resistencia como una función del peso específico, para distintas humedades, se indica en la Fig. 2.13 a. Generalmente la resistencia sin drenaje aumenta con el aumento del peso específico, aunque este aumento disminuye a medida que se acerca a la saturación.

La compresibilidad de un suelo cohesivo típico como función de la compactación, se indica en la Fig. 2.13 b. En general la compresibilidad disminuye con el aumento del peso

específico (o la disminución de la relación de vacíos) y la disminución de la humedad de compactación. Si el suelo compactado se inunda antes de ser sometido a consolidación, la compresibilidad aumenta grandemente. El suelo que ha sido compactado seco es todavía menos compresible que el que ha sido compactado con la humedad óptima, porque la compactación del suelo seco produce más fuerte ligazón de cara a arista que cuando se compacta húmedo.



a. Resistencia al esfuerzo cortante sin drenaje, siendo σ_3 constante y para dos humedades de compactación.



b. Compresibilidad compactada, para un σ_0 constante y $\Delta\sigma$.

Fig. 2.13 Resistencia a compresión sin drenaje y compresibilidad como funciones del peso específico seco del suelo compactado.

La expansión potencial de las arcillas aumenta con el peso específico y disminuye con la humedad de compactación. La expansión es generalmente mucho más grande en un suelo compactado con menos humedad que la del límite plástico que en uno compactado húmedo. La expansión se puede reducir al mínimo limitando el grado de compactación y aumentando la humedad hasta el límite plástico o ligeramente por arriba (algo más que la humedad óptima del método normal AASHTO).

Características de la compactación de suelos cohesivos.

En los suelos cohesivos la compactación se produce por la reorientación y por la distorsión de los granos y sus capas adsorbidas. Esto se logra por una fuerza que sea lo suficientemente grande para vencer la resistencia de cohesión o las fuerzas entre las partículas. La vibración y el choque ayuda poco, pues aunque producen fuerza dinámica además de la estática, ésta es grandemente neutralizada por el aumento de la resistencia de cohesión que acompaña a la carga dinámica.

En los suelos cohesivos la resistencia depende de la relación de vacíos y de humedad y es mayormente independiente del confinamiento.

La compactación eficiente en los suelos cohesivos requiere presiones más altas para los suelos secos que para los húmedos, pero el tamaño del área cargada no es crítico. La eficiencia se mejora aumentando la presión durante la compactación a medida que el peso específico y la resistencia aumenta.

Estructura de suelos cohesivos.

Puede definirse un suelo cohesivo como una agregación o colección de partículas minerales que tiene un índice de plasticidad definido por los límites de Atterberg y que forma una masa coherente al secarse, de tal forma que se requiere una fuerza para separar los granos microscópicos individuales. Los ingredientes necesarios para dar cohesión a un depósito de suelo son los *minerales arcillosos*, a veces denominados materiales arcillosos. El grado de cohesión depende de los tamaños relativos y de las cantidades de diversos granos de suelos y materiales arcillosos presentes. Generalmente, cuando más del 50 por ciento del depósito está formado por partículas de 0.002 mm y menores, el depósito se llama "arcilla". Con este porcentaje relativo, las partículas mayores del suelo están suspendidas en una matriz de suelo fino. Cuando 80 a 90 por ciento del material del depósito es menor que la malla No. 200 (0.075 mm), una pequeña cantidad, 5 a 10 por ciento de arcilla, puede dar al suelo el nombre de cohesivo.

Rara vez existe en estado natural un depósito de pura arcilla; está casi siempre contaminada con limo y/o partículas de arena fina, así como también con tamaños coloidales (menores que 0.001 mm). Los coloides, a veces llamados polvo de roca, son el subproducto de la abrasión de la roca y no poseen propiedades de los minerales arcillosos aunque el intervalo de los tamaños sea similar.

La descripción completa de la estructura de un suelo cohesivo de grano fino requiere de un conocimiento de las fuerzas interparticulares y del arreglo geométrico o textura de las partículas. Es casi imposible medir los campos de fuerzas que rodean directamente partículas de arcilla; en consecuencia, la textura es el principal foco en los estudios de suelos cohesivos. De los estudios de la textura, se hacen estimaciones teóricas o tentativas de las fuerzas interparticulares. Las fuerzas entre partículas parecen originarse de tres tipos diferentes de cargas eléctricas :

- 1.- *Enlaces iónicos*. Enlaces debidos a una diferencia de electrones en las capas exteriores de átomos que componen las unidades básicas del suelo.
- 2.- *Enlaces que van der Waals*. Enlace debido a alteraciones en el número de electrones en cualquier instante a un lado del núcleo atómico.
- 3.- *Otros*. Incluye enlaces de hidrógeno y la atracción gravitacional entre dos cuerpos.

2.4 Suelos no cohesivos o friccionantes.

Pruebas de compactación en laboratorio para suelos no cohesivos.

La Fig. 2.14 muestra el esquema típico de un suelo sin cohesión la relación humedad-densidad desarrollada en la prueba de compactación en un suelo no cohesivo. Este esquema se da en cualquier material que esta suficientemente libre de drenaje, de forma que no se desarrollen presiones de poro durante el proceso de compactación. Cualquiera de las pruebas que empleen compactación dinámica pueden ser usadas para desarrollar curvas similares mostradas en la Fig. 2.14. El incremento en el esfuerzo de compactación en la prueba de laboratorio, tiene mucho menos efecto en suelos sin cohesión que en suelos cohesivos.

Los procedimientos vibratorios han sido usados en las pruebas de compactación de laboratorio con suelos sin cohesión. En las prueba vibratoria Providencia, desarrollada en el Distrito de Providencia por el Cuerpo de Ingenieros la vibración se aplica mientras la muestra esta confinada en un molde de acero. El molde usado en esta prueba tiene 6" de diámetro por aproximadamente 7" de altura con paredes de un espesor de 1/2". Una carga se aplica a la superficie de una muestra por medio de un resorte comprimido que actua sobre una placa de apoyo y, la muestra es vibrada por un golpeo agitado en los lados del molde empleando un martillo. La carga sobre la muestra puede ser variada; en los procedimientos normales se uso una carga de 800lbs (28 lbs sobre pulgada cuadrada). Los procedimientos por vibrado de la muestra, emplean 15 golpes de un martillo de 2.5 lbs., haciendo rotar el cilindro 120 grados, aplicando 15 golpes más y continuando este proceso hasta la densificación total indicada por el movimiento de un micrómetro adherido a la placa de apoyo, si esta densificación es menos de 0.001 pies cubicos para una serie de golpes. Cuando la densificación se dá, el resorte debe ser ajustado para garantizar una carga completa de 800 lbs. El proceso de muestreo consiste en cribar el suelo a través de una malla de 2" y corregir matemáticamente las paertículas que sobrepasen ese tamaño. La forma de la curva humedad-densidad obtenida en esta prueba es similar a la mostrada en la Fig. 2.14. Las densidades máximas son del orden de las obtenidas por la prueba AASHTO modificada.

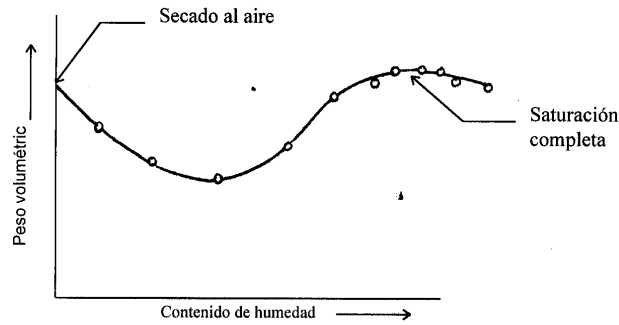


Fig. 2.14 Curva de compactación típica para suelos sin cohesión y gravas arenosas.

En suelos sin cohesión con drenaje libre, el grado de compactación es algunas veces expresado en términos de la densidad relativa o en términos de la relación de vacíos, particularmente, en trabajos de presas y diques. Las pruebas de laboratorio se emplean para determinar la densidad máxima y mínima a la cual el suelo pueda ser colocado. El grado de compactación para una densidad específica de campo se determina, restando la densidad de campo de la máxima y, expresando este valor como un porcentaje de la diferencia entre el máximo y del mínimo. Los procedimientos de laboratorio para la determinación de las densidades máxima y mínima, han sido estandarizados por el Buró de mejoras, designándolo con la Norma E-11. Hay actualmente una actividad en este sentido para estandarizar los procedimientos de la ASTM. Generalmente la densidad mínima se determina colocando el suelo en un contenedor cilíndrico de baja altura con una cuchara o otro dispositivo especial, teniendo cuidado el evitar el apisonado o vibrado de la muestra. La densidad máxima generalmente se determina vibrando el suelo contenido en el molde cilíndrico en su condición seca o saturada. En algunos procedimientos el suelo se confina durante el período vibratorio. La densidad máxima generalmente se le considera como la intensidad relativa al tipo de vibración. Datos recientes indican que la densidad máxima puede variar con la carga de confinamiento y con el tiempo de vibración mientras la carga de confinamiento es usada.

Teoría de la compactación para suelos no cohesivos.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la compactación o reducción de la relación de vacíos se produce de distintas maneras. En un suelo no cohesivo o en una roca partida, la compactación se logra principalmente por la reorientación de los granos, aunque la fractura de los granos en los puntos de contacto es algunas veces un factor secundario importante. La reorientación es resistida por el rozamiento entre las partículas. La tensión capilar de la película de humedad entre los granos aumenta la presión de contacto y por lo tanto la fricción. A medida que la humedad aumenta, la tensión capilar disminuye y el esfuerzo de compactación se hace más efectivo.

En algunas arenas y en la roca partida el aplastamiento local de los puntos de contacto entre las partículas es el mecanismo más importante de la compactación. La humedad acelera el aplastamiento y por lo tanto ayuda a la compactación y esta aceleración del aplastamiento reduce los futuros asentamientos después de ejecutada la obra.

Sin embargo, como se mencionaba para suelos cohesivos, si la humedad es muy alta, la compactación y la reducción de la relación de vacíos de los suelos no cohesivos, los lleva a la saturación. El esfuerzo neutro que se crea, impide que continúe disminuyendo la relación de vacíos y, por lo tanto, el esfuerzo adicional de compactación que se aplique se perderá. La saturación es, por lo tanto, el límite teórico de la compactación para una humedad dada.

En los suelos no cohesivos y en la roca partida, la permeabilidad es tan grande que no se puede producir la saturación durante la construcción, a menos que la masa esté inundada. El peso específico límite a que pueda llegarse, está regulado por la geometría de las partículas y por el agrupamiento estructural más favorable, que se llama *rellenamiento* y que corresponde a la relación de vacíos mínima.

Energía de compactación.

La relación entre la energía de compactación y el peso específico seco máximo; no es una relación lineal y se necesita un gran aumento en la energía para producir un pequeño aumento en el peso específico. La manera como se aplica la energía tiene un efecto significativo en el peso específico; en los suelos no cohesivos, así como en la roca triturada o partida, la vibración, que reduce la fricción entre los granos, es particularmente efectiva. En los suelos de grano grueso, el esfuerzo neutro que se opone a la compactación cuando la

humedad es alta, no se puede desarrollar si la energía de compactación se aplica tan lentamente que el agua pueda drenar.

Características de la compactación de suelos no cohesivos.

En un suelo no cohesivo la compactación ocurre mayormente por la reorientación de los granos para formar una estructura más densa. La presión estática no es muy efectiva en este proceso porque los granos se acunian unos contra otros y resisten el movimiento. Si los granos se pueden liberar momentáneamente, las presiones, aun las ligeras, son efectivas para forzarlos a formar una distribución más compacta. Tanto la vibración como el choque son útiles para reducir el acunamiento de los granos y facilitar la compactación. El agua que fluye también reduce el rozamiento entre las partículas y hace más fácil la compactación; sin embargo, el agua en los poros también impide que las partículas tomen una distribución más compacta. Por esta razón la corriente de agua sólo se usa para ayudar a la compactación, cuando el suelo es de granos tan gruesos que el agua abandona los poros o huecos rápidamente.

Al igual que en suelos cohesivos, para obtener la máxima eficiencia, la fuerza de compactación debe ser lo suficientemente grande para distorcionar las partículas y mover los granos individuales, pero no tan grande como para cortar la masa. En los suelos no cohesivos la resistencia depende del confinamiento y éste se puede proporcionar aplicando la carga en una amplia área. Para lograr una compactación eficiente en los suelos no cohesivos se requiere una fuerza moderada aplicada en una amplia área, o choque y vibración.

Características de un suelo no cohesivo.

Si los granos de un suelo se separan después del secado (previo humedecimiento) y solamente se pegan cuando están húmedos debido a las fuerzas de tensión superficial en el agua, el suelo es *sin cohesión* o *no cohesivo*. Un suelo sin cohesión no presenta una línea de demarcación entre los estados plástico y no plástico, ya que este tipo de suelo es no plástico para todos los intervalos de contenido de agua. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, un suelo *sin cohesión* con un alto contenido de agua puede actuar como un fluido viscoso.