

GUIA DE LABORATORIO N° 4

I. ENSAYO DE COMPACTACION

Generalidades

El propósito de un ensayo de compactación en laboratorio es determinar la curva de compactación para una determinada energía de compactación. Esta curva considera en abscisas el contenido de humedad y en ordenadas la densidad seca. A partir de ella, se podrá obtener la humedad llamada óptima que es la que corresponde a la densidad máxima. Con estos resultados se podrá determinar la cantidad de agua de amasado a usar cuando se compacta el suelo en terreno para obtener la máxima densidad seca para una determinada energía de compactación. Para cumplir este propósito, un ensayo de laboratorio debe considerar un tipo de compactación similar a la desarrollada en terreno con los equipos de compactación a especificar.

El agua juega un papel importante, especialmente en los suelos finos. Hay que hacer notar que cuando hablamos en este párrafo de suelos finos, no estamos refiriéndonos a suelos que contengan más de un 50% de finos, sino a la fracción fina que controla este comportamiento. Esta fracción fina, que puede ser para gravas sobre un 8% y para arenas sobre un 12% (Holtz 1973), lleva a limitar el uso de la densidad relativa y, por lo tanto, obliga a su reemplazo por el ensayo de compactación.

El agua en poca cantidad, se encuentra en forma capilar produciendo tensiones de compresión entre las partículas constituyentes del suelo que llevan a la formación de grumos difíciles de desintegrar y que terminan por dificultar la compactación. Mirado desde un punto de vista físico-químico, se produce una tendencia a la floculación entre las partículas arcillosas, lo que produce uniones entre partículas difíciles de romper. El aumento del contenido de humedad hace disminuir la tensión capilar – y a nivel físico-químico facilita la separación de las partículas - haciendo que una misma energía de compactación produzca mejores resultados en el grado de consistencia del suelo, representado por un menor índice de vacíos y un mayor peso unitario seco. Si por otra parte, el agua pasa a existir en una cantidad excesiva antes de iniciar la compactación, ella dificultará el desplazamiento de las partículas de suelo – debido a la baja permeabilidad del suelo y por ende a la dificultad de su eliminación - produciendo una disminución en la eficiencia de la compactación. En consecuencia, existirá para un determinado suelo fino y para una determinada energía de compactación, una humedad óptima para la cual esta energía de compactación producirá un material con densidad seca máxima.

Al compactar un suelo se persigue lo siguiente:

- (a) disminuir futuros asentamientos
- (b) aumentar la resistencia al corte
- (c) disminuir la permeabilidad

Para asegurar una compactación adecuada deben realizarse canchas de prueba en terreno que permitirán definir los equipos de compactación más adecuados para esos materiales, los

espesores de capa y número de pasadas del equipo seleccionado para cumplir con las especificaciones técnicas de densidad seca. El control de la obra final se realizará a través de determinaciones de los parámetros densidad seca y humedad de compactación de los rellenos colocados. Las especificaciones para la compactación en terreno exigen la obtención de una densidad mínima que es un porcentaje de la densidad máxima seca obtenida en el laboratorio. Una práctica común para numerosas obras es exigir a lo menos el 95% del Proctor Modificado.

Definiciones

En 1933, R.R. Proctor definió el ensayo conocido como Proctor Estándar, el cual consiste en tomar una muestra de 3 kg de suelo, pasarla por el tamiz # 4, agregarle agua cuando sea necesario, y compactar este suelo bien mezclado en un molde de 944 cm^3 en tres capas con 25 golpes por capa de un martillo de compactación de 24.5 N con altura de caída de 0.305 m. Esto proporciona una energía nominal de compactación de 593.7 kJ/m^3 .

Cuando el ensayo incluye el reuso del material, la muestra es removida del molde y se toman muestras para determinar el contenido de humedad para luego desmenuzarla hasta obtener grumos de tamaño máximo aproximado al tamiz # 4. Se procede entonces a agregar más agua, se mezcla y se procede a compactar nuevamente el suelo en el molde. Esta secuencia se repite un número de veces suficiente para obtener los datos que permitan dibujar una curva de densidad seca versus contenido de humedad con un valor máximo en términos de densidad seca, y suficientes puntos a ambos lados de éste. La ordenada de este diagrama se conoce como la densidad máxima, y el contenido de humedad al cual se presenta esta densidad se denomina humedad óptima.

Durante la Segunda Guerra Mundial, los nuevos y pesados equipos de aviación pasaron a exigir densidades de subrasante en las aeropistas, mayores que el 100 % del Proctor Estándar. Se introdujo entonces el ensayo de compactación modificado (Proctor Modificado, ensayo modificado AASHTO, o ensayo de compactación modificado) en el que se utiliza una mayor energía de compactación.

Las características básicas del ensayo son las misma del ensayo estándar de compactación. El ensayo de compactación modificado aplica una energía nominal de compactación al suelo de 2710 kJ/m^3 lo que representa cerca de 5 veces la energía de compactación del ensayo estándar produciendo un incremento entre un 5 y un 10 % de la densidad y una disminución en la humedad óptima.

Toda curva de compactación estará siempre por debajo de la curva de saturación, $S = 100\%$ la que puede ser graficada en la curva de compactación una vez conocido el peso específico de los granos, G_s . En el mismo gráfico se pueden incluir las curvas para $S = 90$ y 80% .

La curva $S = 100\%$ se obtiene calculando, para cualquier contenido de humedad w , su peso unitario seco:

$$g_d = \frac{G_s \cdot g_w}{1 + w \cdot G_s}$$

donde:

G_s : densidad de los sólidos

g_w : peso unitario del agua

w: contenido de humedad

La densidad seca la podemos expresar en función de la densidad húmeda y el contenido de humedad:

$$g_d = \frac{g_t}{1 + w}$$

donde:

g_t : densidad húmeda

w: contenido de humedad

Las curvas para otros grados de saturación, pueden ser fácilmente calculadas.

Equipo

- molde de compactación con base y collar
- martillo de compactación
- latas para contenido de humedad
- espátula metálica

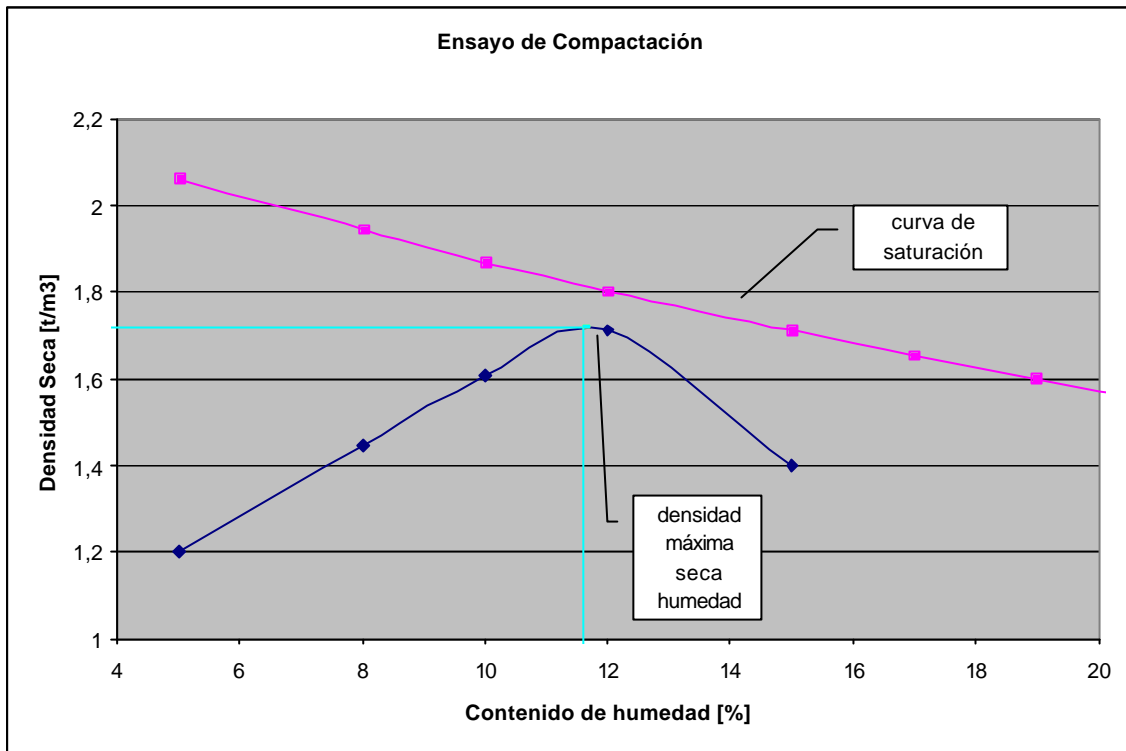
Procedimiento (Proctor Modificado)

1. Cada grupo debe tomar 7 kg (peso nominal) de suelo secado al aire, desmenuzado para que pase a través del tamiz # 4; luego debe ser mezclado con la cantidad de agua necesaria para alcanzar el contenido de humedad basado en porcentaje de peso seco; la humedad deberá ser, para este primer ensayo, aproximadamente un 4 a 5 % menor que la humedad óptima estimada; debe quedar claro que el suelo y el agua en un ensayo deberían mezclarse con anterioridad y dejarse curar - para asegurar su distribución homogénea - durante 24 horas cuando se trabaja con suelos cuyos finos sean plásticos; sin embargo, en esta sesión de laboratorio para estudiantes, esta etapa podrá omitirse.
2. Pesar el molde de compactación, sin incluir la base ni el collar.
3. Medir las dimensiones internas del molde de compactación para determinar su volumen.

4. Compactar el suelo en 5 capas aplicando 56 golpes sobre cada una (para molde grande); se debe procurar que la última capa quede por sobre la altura del molde de compactación; en caso que la superficie de la última capa quedara bajo la altura del molde, se debe repetir el ensayo; se debe evitar además que esta última capa exceda en altura el nivel del molde en más de 6 mm ya que al enrasar se estaría eliminando una parte significativa del material compactado, disminuyendo la energía de compactación por unidad de volumen.
5. Retirar cuidadosamente el collar de compactación, evitar girar el collar; en caso que se encuentre muy apretado, retirar con espátula el suelo que se encuentra adherido a los bordes por sobre el nivel del molde; finalmente enrasar perfectamente la superficie de suelo a nivel del plano superior del molde.
6. Pesarse el molde con el suelo compactado y enrasado.
7. Extraer el suelo del molde y tomar una muestra representativa para determinar el contenido de humedad.
8. Desmenuzar el suelo compactado y mezclarlo con suelo aún no utilizado; agregar un 2% de agua (en relación a los 7 kg) y repetir los pasos 4 a 8; realizar la cantidad de ensayos que el instructor indique, suficientes para obtener una cantidad de puntos que permita determinar la humedad óptima y la densidad máxima.
9. Volver posteriormente al laboratorio para obtener los pesos secos de las muestras de humedad.

Cálculos

Calcular el peso unitario seco y hacer un gráfico de γ_d versus contenido de humedad. Dibujar en este gráfico la curva de saturación; si no se conoce G_s , suponer que la densidad saturada correspondiente a la humedad óptima es 5 % mayor que la densidad máxima seca; con este valor calcular el valor de G_s ; la curva de saturación en ningún caso debe intersectar la curva de compactación; en caso que esto suceda, incrementar en un 1 % adicional el valor de la densidad saturada hasta asegurar que la curva de saturación pase por sobre la de compactación.



II. ENSAYO DE LA RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

Generalidades

No basta con especificar el grado de compactación de un suelo. Dos suelos diferentes alcanzarán no solo densidades secas y humedades óptimas diferentes en el ensayo de compactación, sino que el material al estar constituido por partículas diferentes, tendrá un comportamiento en términos de ingeniería diferente. Por ello, se hace necesario un parámetro adicional que considere la capacidad de soporte del suelo en sí mismo para esas condiciones de compactación.

El ensayo de soporte de California se desarrolló por parte de la División de Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificar la capacidad de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en construcción de carreteras.

El ensayo CBR (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número asociado a la capacidad de soporte.

Definiciones

El CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria (por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración dentro de la muestra de suelo compactada a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación, esto se puede expresar como:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} \times 100 (\%)$$

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo determinado utilizando el ensayo de compactación estándar (o modificado).

A menudo se compactan dos moldes de suelo: uno para penetración inmediata y otro para penetración después de dejarlo saturar por un periodo de 96 horas; este último se sobrecarga con un peso similar al del pavimento pero en ningún caso menor que 4.5 kg. Es necesario durante este periodo tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente.

En ambos ensayos, se coloca una sobrecarga sobre la muestra de la misma magnitud de la que se utiliza durante el ensayo de expansión. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

1. Dar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.
2. Dar indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.

El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una velocidad de deformación unitaria de 1.27 mm/min. Se toman lecturas de carga versus penetración cada 0.64 mm de penetración hasta llegar a un valor de 5.0 mm a partir del cual se toman lecturas con velocidades de penetración de 2.5 mm/min hasta obtener una penetración total de 12.7 mm.

El valor del CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos, principalmente con fines de utilización como base y subrasante bajo pavimentos de carreteras y aeropistas.

Equipo

- Equipo de CBR:
 - Molde de compactación (con collar y base)
 - Disco espaciador
- Martillo de compactación

- Aparato para medir la expansión con deformímetro de carátula con precisión de 0.01 mm
- Pesos para sobrecarga
- Máquina de compresión equipada con pistón de penetración CBR capaz de penetrar a una velocidad de 1.27 mm/min

Procedimiento

1. Preparar una muestra de suelo de grano fino (en cantidad suficiente para hacer 6 probetas) menor que el tamiz # 4, al contenido de humedad óptima del suelo determinado con el ensayo de Proctor Modificado.
2. Antes de compactar el suelo en los moldes, tomar una muestra representativa para determinar su contenido de humedad (por lo menos 100 g si el suelo es de grano fino).
3. Pesar los moldes sin su base ni el collar.
4. Para cada molde ajustar el molde a la base, insertar el disco espaciador en el molde y cubrirlo con un disco de papel filtro.
5. Fabricar 6 probetas de 5 capas cada una: 2 de 12 golpes por capa, 2 de 26 golpes por capa y 2 de 56 golpes por capa; dejar saturando una muestra de 12, de 26 y de 56 golpes por capa.
6. Para cada molde retirar la base, el collar y el disco espaciador, pesar el molde con el suelo compactado y determinar el peso unitario total del suelo.
7. Colocar un disco de papel filtro sobre la base, invertir la muestra y asegurar el molde a la base de forma que el suelo quede en contacto con el papel filtro.

Para muestras no saturadas, llevar a cabo los pasos 8 a 10:

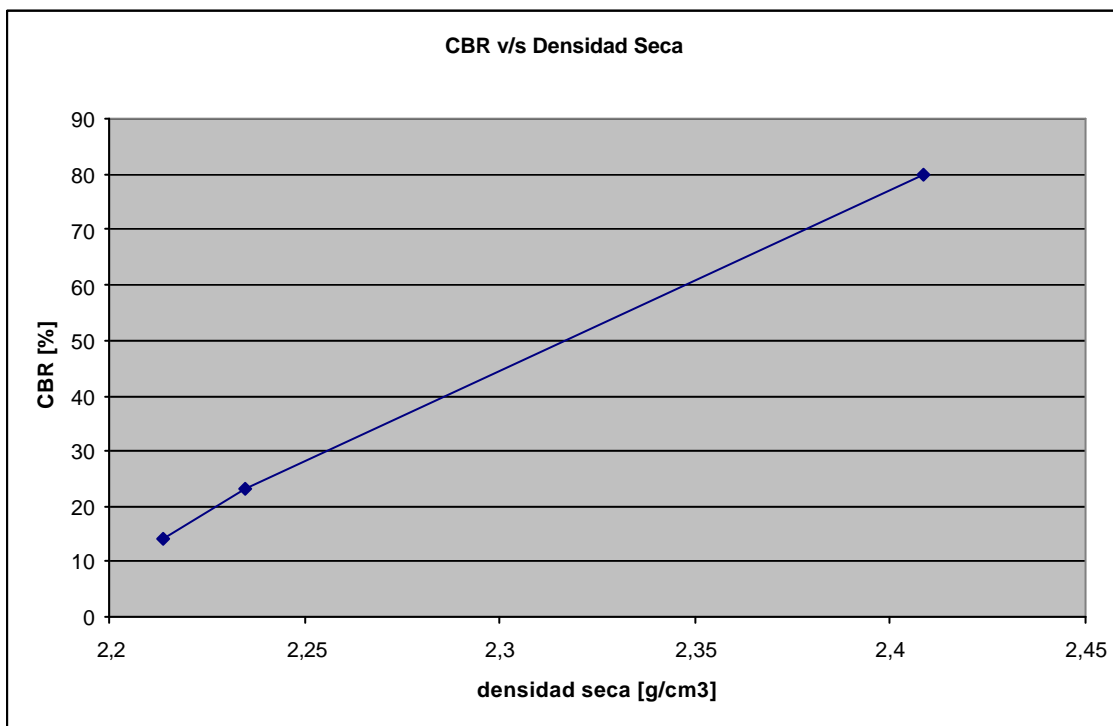
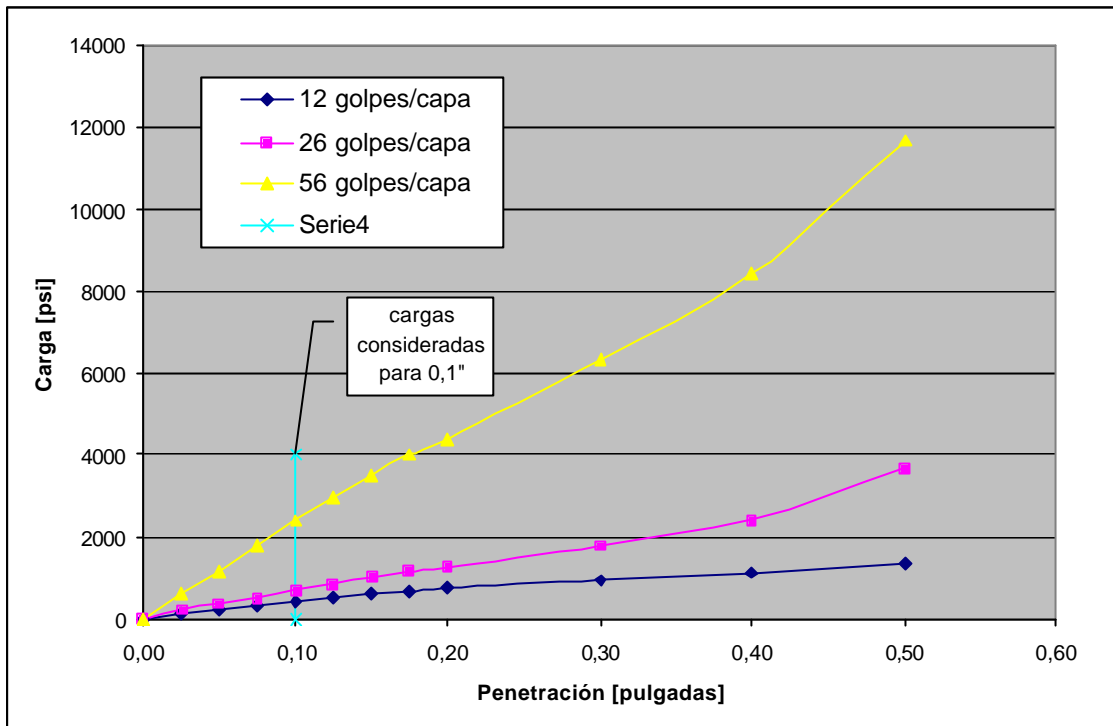
8. Colocar suficientes pesas ranuradas (no menos de 4.5 kg) sobre la muestra de suelo para simular la presión de sobrecarga requerida.
9. Colocar la muestra en la máquina de compresión y sentar el pistón sobre la superficie de suelo utilizando una carga inicial no mayor de 4.5 kg. Fijar el cero en los deformímetros de medida de carga y de penetración (o deformación).
10. Hacer lecturas de deformación o penetración y tomar las respectivas lecturas del deformímetro de carga. Extraer la muestra del molde y tomar dos muestras representativas adicionales para contenido de humedad.

Para muestras no saturadas:

11. Colocar la placa perforada con el vástago ajustable sobre el suelo compactado y aplicar suficientes pesas para obtener la sobrecarga deseada, cuidando que no sea inferior a 4.5 kg. Asegurarse de usar un disco de papel filtro entre la base perforada del vástago y el suelo para evitar que el suelo se pegue a la base del vástago.
12. Sumergir el molde y las pesas en un recipiente de agua de forma que el agua tenga acceso tanto a la parte superior como a la parte inferior de la muestra y ajustar el deformímetro de carátula (con lecturas al 0.01 mm) en su respectivo soporte; marcar sobre el molde los puntos donde se apoya el soporte de forma que pueda removerse y volver a colocarlo sobre el molde en el mismo sitio cuando se desee hacer una lectura.
13. Ajustar el cero del deformímetro de expansión y registrar el tiempo de comienzo del ensayo. Tomar las lecturas a 0, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48, 72 y 96 horas de tiempo transcurrido; el ensayo de expansión puede terminarse después de 48 horas si las lecturas en el deformímetro de expansión se mantienen constantes por lo menos durante 24 horas.
14. Al final de las 96 horas de inmersión, sacar la muestra y dejarla drenar por espacio de 15 min; secar completamente la superficie superior de la muestra con toallas de papel.
15. Pesar la muestra sumergida incluyendo el molde.
16. Realizar los pasos 8 al 10 para cada muestra.
17. Tomar muestras para contenido de humedad de las muestras saturadas de la siguiente forma:
 - 2 dentro de los 3 cm superiores del suelo
 - 2 dentro de los 3 cm inferiores del suelo
 - 2 en el centro de la muestra de suelo.

Cálculos

1. Dibujar una curva de resistencia a la penetración en libras por pulgada cuadrada (psi) o kPa versus la penetración en pulgadas o mm. En un mismo gráfico las muestras secas y en otro las muestras saturadas. Dibujar posteriormente estas curvas en un mismo gráfico comparando las resistencias secas y saturadas.
2. Calcular el CBR para una penetración de 0.01 pulgadas (carga patrón 3000 psi) para los 6 ensayos; dibujar en un mismo gráfico la curva CBR (%) versus densidad seca (kg/cm^3), una curva para las muestras secas y otro para las muestras saturadas. Realizar otro gráfico con las mismas características para una penetración de 0.02 pulgadas (carga patrón 4500 psi).



Preguntas

Ensayo de Compactación

1. ¿De qué factores depende la eficacia de la compactación? ¿Cuáles de estos factores se estudian en el laboratorio mediante el ensayo de Proctor?
2. Una muestra de arcilla se compacta con la humedad óptima y otra muestra de la misma arcilla con la humedad menor a la óptima. Una vez compactadas se sumergen en agua. ¿Cuál muestra absorberá más agua para llegar a saturarse? ¿Cuál de las dos toma más tiempo en saturarse?
3. Ud. realiza dos ensayos Proctor en una arcilla muy plástica: uno, agregando el agua de compactación, mezclándola con la muestra y procediendo de inmediato a compactarla en el molde; el otro, dejando antes la mezcla (cubierta con un paño húmedo) reposar durante 24 horas. ¿Obtendría la misma curva densidad seca v/s humedad para ambos casos?
4. ¿El grado de compactación de una arena, compactada en seco y en estado saturado, es virtualmente el mismo? Explique.

Ensayo CBR

5. ¿Es posible obtener en terreno un CBR mayor que 100? Explique.
6. Se desea construir un camino en Arica. ¿Recomendaría hacer un ensayo de CBR para condición saturada?
7. ¿Por qué es necesario medir la expansión de la muestra saturada?
8. Sabiendo que un camino está compuesto por varias capas (base, sub-base, capa asfáltica, etc.) y que las tensiones verticales se disipan con la profundidad, ¿qué capas cree Ud. (superiores o inferiores) deben tener un CBR más alto?

Bibliografía

1. Lambe, T. W. Soil Testing for Engineers, 1951, capítulo V. Biblioteca IDIEM.
2. Laboratory Soil Testing, Department of the Army, U.S.A., 1965, Apéndice VI. Biblioteca IDIEM.
3. Earth Manual, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1963. Biblioteca Central Esc. Ingeniería, Biblioteca IDIEM.
4. Soil Mechanics Laboratory, Harvard University, 1965. Biblioteca IDIEM.
5. Bowles Joseph E. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. Biblioteca IDIEM.
6. Kezdi; Arpad. Soil Testing, 1980. Biblioteca IDIEM.