

CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA

INV E – 148 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos de subrasante, subbase y base, denominado CBR (*California Bearing Ratio*). Este método de ensayo está proyectado, aunque no limitado, para la evaluación de la resistencia de materiales que contengan tamaños máximos de partículas de menos de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ").
- 1.2** Cuando se van a ensayar materiales con partículas de tamaño máximo mayor de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "), este método de ensayo provee una forma de modificar la gradación del material, de manera que el usado para las pruebas pase en su totalidad por el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ "), a la vez que mantiene constante la fracción del total de la grava entre 75 mm (3") y 4.75 mm (No. 4). Aunque tradicionalmente se ha empleado este método de preparación de especímenes para evitar el error inherente en el ensayo de materiales que contienen partículas gruesas en el equipo de prueba de CBR, el material modificado puede tener propiedades de resistencia significativamente diferentes a las del material original. Sin embargo, se ha desarrollado una gran base de experiencia usando este método para materiales en los cuales la gradación ha sido modificada y están en uso métodos satisfactorios de diseño, basados en los resultados de pruebas usando este procedimiento.

Nota 1: No obstante la declaración del numeral 1.2, se ha comprobado que la práctica de reemplazar la fracción granular de tamaño mayor por otra más fina es inapropiada para determinar el peso unitario seco máximo de un suelo. Por este motivo, la ejecución de los ensayos de compactación normal y modificado (normas INV E-141 e INV E-142) desaprueban completamente dicho procedimiento. El ingeniero diseñador deberá evaluar la conveniencia de aceptar este reemplazo, mientras estudios detallados sobre el particular conducen a una modificación de esta norma en este aspecto particular.

- 1.3** La experiencia ha demostrado que los resultados del ensayo CBR para aquellos materiales que contienen porcentajes sustanciales de partículas retenidas en el tamiz 4.75 mm (No. 4), son más variables que los de los materiales más finos. En consecuencia, se pueden requerir más pruebas para estos materiales, con el fin de establecer un valor confiable de CBR.
- 1.4** El ensayo se realiza, normalmente, sobre una muestra de suelo preparada en el laboratorio en determinadas condiciones de humedad y densidad. Los pesos unitarios secos de los especímenes corresponden, generalmente, a un

porcentaje del peso unitario seco máximo obtenido en el ensayo normal de compactación (INV E-141) o en el ensayo modificado (INV-142); pero, también, se puede operar en forma análoga sobre muestras inalteradas tomadas del terreno (Ver Anexo A).

- 1.5 La entidad que exija la ejecución de ensayos de acuerdo con esta norma, deberá indicar la humedad (o rango de humedades) y el peso unitario seco para el cual desea conocer el valor del CBR del suelo.
- 1.6 A menos que el cliente especifique algo en contrario, todos los especímenes ensayados por este método deberán ser sometidos a inmersión antes de la penetración.
- 1.7 Esta norma reemplaza la norma INV E-148-07.

2 DEFINICIONES

- 2.1 Las siguientes definiciones aplican específicamente a esta norma de ensayo:

- 2.1.1 *Contenido de agua (humedad) de la muestra (espécimen) compactada(o)* – Contenido de agua, expresado en porcentaje, del material usado para compactar la muestra de ensayo.
- 2.1.2 *Contenido de agua en los 25.4 mm (1") superiores luego de la inmersión (w_s)* – Contenido de agua, expresado en porcentaje, del material de los 25.4 mm (1") superiores de la muestra compactada, luego de su inmersión y penetración.
- 2.1.3 *Contenido de agua luego del ensayo (w_f)* – Contenido de agua, expresado en porcentaje, del material de la muestra compactada, luego de su inmersión y penetración, sin incluir el material descrito en el numeral 2.1.2.
- 2.1.4 *Densidad seca antes de la inmersión (ρ_d)* – Densidad seca del espécimen tal como fue compactado, calculada a partir de su masa húmeda y de su contenido de agua.

3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** El ensayo CBR se utiliza en el diseño de pavimentos. En el ensayo, un pistón circular penetra una muestra de suelo a una velocidad constante. El CBR se expresa como la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para que el pistón penetre 2.54 o 5.08 mm (0.1 o 0.2") dentro de la muestra de ensayo, y el esfuerzo que se requirió para penetrar las mismas profundidades una muestra patrón de grava bien gradada.
- 3.2** Este método se emplea para determinar el CBR de una muestra compactada en un molde especificado. Es de responsabilidad de quien exige la ejecución de ensayos de acuerdo con esta norma, especificar la finalidad del ensayo para satisfacer sus protocolos o los requerimientos específicos del diseño. Entre las posibles finalidades se pueden mencionar las siguientes:
- 3.2.1** El ensayo se debe realizar sobre cada punto de un ensayo de compactación realizado de acuerdo con las normas de ensayo INV E-141 o INV E-142. En este caso, el molde CBR con el disco espaciador especificado en esta norma tendrá el mismo volumen del molde de compactación de 152.4 mm (6").
- 3.2.2** Se emplea otra alternativa para la determinación del CBR del material compactado a unos valores específicos de humedad y densidad o, alternativamente, se establecen unos rangos de humedad y densidad para realizar los ensayos. En este caso, se requiere elaborar varias muestras de ensayo, usando dos o tres energías de compactación que permitan abarcar el rango requerido.

4 IMPORTANCIA Y USO

- 4.1** Este método de ensayo se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, subbase y base, incluyendo materiales reciclados, para su empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. El valor de CBR obtenido en esta prueba forma parte integral de varios métodos de diseño de pavimentos flexibles.
- 4.2** Para aplicaciones en las cuales el efecto del contenido de agua de compactación sobre el CBR es bajo, tal el caso de los materiales de grano grueso sin cohesión, o cuando se permita una tolerancia en relación con el efecto de diferentes contenidos de agua de compactación en el procedimiento

de diseño, el CBR se puede determinar con el contenido óptimo de agua para un esfuerzo de compactación especificado. El peso unitario seco especificado corresponde, generalmente, al porcentaje mínimo de compactación permitido por las especificaciones para la compactación del suelo en el terreno.

- 4.3** Para aplicaciones en las cuales el efecto del contenido de agua de compactación sobre el CBR se desconoce, o en las cuales se desea tener en cuenta su efecto, el CBR se determina para un rango de contenidos de agua, usualmente el permitido para compactación en el campo, empleando las especificaciones existentes para tal fin.
- 4.4** El criterio para la preparación de especímenes de prueba de materiales autocementantes (y otros), los cuales ganan resistencia con el tiempo, se debe basar en una evaluación de ingeniería geotécnica. Los materiales autocementantes se deben curar apropiadamente hasta que se considere que las relaciones de soporte que se miden, representan las condiciones de servicio a largo plazo.

5 EQUIPO Y MATERIALES

- 5.1** *Prensa* – Utilizada para forzar la penetración de un pistón dentro del espécimen de ensayo. Debe estar equipada con una cabeza o base móvil que se mueva a una velocidad uniforme de 1.27 mm/min (0.05"/min), con una tolerancia de $\pm 20\%$. La capacidad de la prensa debe satisfacer las exigencias de la Tabla 148 - 1.
 - 5.1.1** La máquina debe estar equipada con un dispositivo indicador de carga que tenga una aproximación de lectura adecuada para la máxima carga prevista durante la penetración. La aproximación de lectura deberá ser de 44 N (10 lbf) o menos, si la prensa tiene una capacidad de carga de 44.5 kN (10 kip) o más; deberá ser de 22 N (5 lbf) si la capacidad de carga es de 22.3 kN (5 kip), y deberá ser de 8.9 N (2 lbf) para una capacidad de carga mínima de 11.2 kN (2.5 kip).
 - 5.1.2** El dispositivo medidor de la penetración (dial mecánico o transductor de desplazamiento electrónico) debe dar lecturas con una aproximación a los 0.025 mm (0.001") más cercanos y estar asociado a un accesorio de montaje, el cual debe establecer una conexión entre el medidor de penetración, el pistón de penetración y el borde del molde, para brindar medidas de penetración correctas. El ensamble del

medidor a algún componente del marco de carga sometido a esfuerzo produce inexactitudes en las lecturas.

Tabla 148 - 1. Capacidad mínima de carga

MÁXIMO CBR QUE SE PUEDE MEDIR	CAPACIDAD DE CARGA MÍNIMA	
	(kN)	(lbf)
20	11.2	2500
50	22.3	5000
> 50	44.5	10000

5.2 Moldes – Cada molde deberá ser un cilindro de un metal rígido, de 152,4 mm \pm 0.66 mm (6 \pm 0.026") de diámetro interior y de 177,8 \pm 0.46 mm (7 \pm 0.018") de altura, provisto de un collar suplementario de no menos de 50.8 mm (2.0") de altura y una placa de base de 9.53 mm (3/8") de espesor, con perforaciones. La base se deberá poder ajustar a cualquier extremo del molde. Las perforaciones de la base deberán ser por lo menos 28, uniformemente distribuidas dentro del círculo que va a ser ocupado por el molde, de 1.59 mm (1/16") de diámetro. Al ensamblar el molde con el disco espaciador en su interior, el molde deberá tener un volumen interno (sin considerar el collar de extensión), de 2124 \pm 25 cm³ (0.075 \pm 0.0009 pies³). La Figura 148 - 1 muestra un esquemade un molde apropiado para el ensayo.

5.3 Disco espaciador – De forma circular, metálico, de 150.8 \pm 0.8 mm (5 15/16" \pm 1/32") de diámetro y de 61.4 \pm 0.25 mm (2.416 \pm 0.01") de espesor (Ver Figura 148 - 1), para insertarlo dentro del molde cilíndrico como falso fondo durante la compactación.

Nota 2: Al usar moldes con una altura de 177.8 mm (7.0") se necesita un disco espaciador de 61.37 mm (2.416") de espesor para obtener un espesor de espécimen compactado que esté de acuerdo con el espesor de 116.43 mm (4.584") indicado en las normas INV E-141 e INV E-142.

5.4 Martillos de compactación – Como los descritos en las normas INV E-141 e INV E-142, excepto que si se usa un martillo mecánico, solo se permite el empleo del de cara circular.

5.5 Aparato medidor de expansión – Compuesto por los elementos indicados en los numerales 5.5.1 y 5.5.2, y cuya masa total no puede exceder de 1.27 kg (2.8 lb).

- 5.5.1** *Una placa de metal perforada* – Una para cada molde, de 149.23 ± 1.6 mm ($5\frac{7}{8} \pm 1/16$ ") de diámetro, con no menos de 42 perforaciones de 1,6 mm ($1/16$ ") de diámetro, distribuidas uniformemente sobre el área de la placa. Estará provista de un vástago en el centro, con un sistema de tornillo que permita regular su altura (Ver Figura 148 - 1).
- 5.5.2** *Un trípode* – Para medir la expansión durante la inmersión de las probetas en agua. Sus patas deben estar conformadas de manera que se puedan apoyar en el borde del molde; el aparato lleva montado y bien sujeto en el centro un dial (deformímetro), cuyo vástago debe coincidir con el de la placa, de forma que permita controlar la posición de ésta y medir la expansión, con aproximación de 0.025 mm (0.001"), en un rango mínimo de 5 mm (0.200") (Ver Figura 148 - 1).
- 5.6** *Sobrecargas metálicas* – Unas diez por cada molde, una o dos anulares y las restantes ranuradas (similares a herraduras), con una masa de 2.27 ± 0.02 kg (5 ± 0.10 lb) cada una y 149.23 ± 1.6 mm ($5\frac{7}{8} \pm 1/16$ ") de diámetro exterior. La anular debe tener un orificio central de, aproximadamente, 53.98 mm ($2\frac{1}{8}$ ") de diámetro (Ver Figura 148 - 1).
- 5.7** *Pistón de penetración* – Cilíndrico, metálico, de 49.63 ± 0.13 mm de diámetro (1.954 ± 0.005 "), área de 1935 mm² (3 pulg²) y con la longitud necesaria para realizar el ensayo de penetración con el número requerido de sobrecargas según el numeral 7.2.5, pero nunca menor de 101.6 mm (4").
- 5.8** *Tanque* – Con capacidad suficiente para la inmersión total de los moldes en agua. Deberá tener una reja en su fondo, que permita el acceso del agua a través de las perforaciones de la placa de base del molde.
- 5.9** *Horno* – Termostáticamente controlado, preferiblemente de tiro forzado, regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$).
- 5.10** *Balanzas* – Una de 20 kg de capacidad, y otra de 1000 g, con posibilidades de lectura de 1 g y 0.1 g, respectivamente.

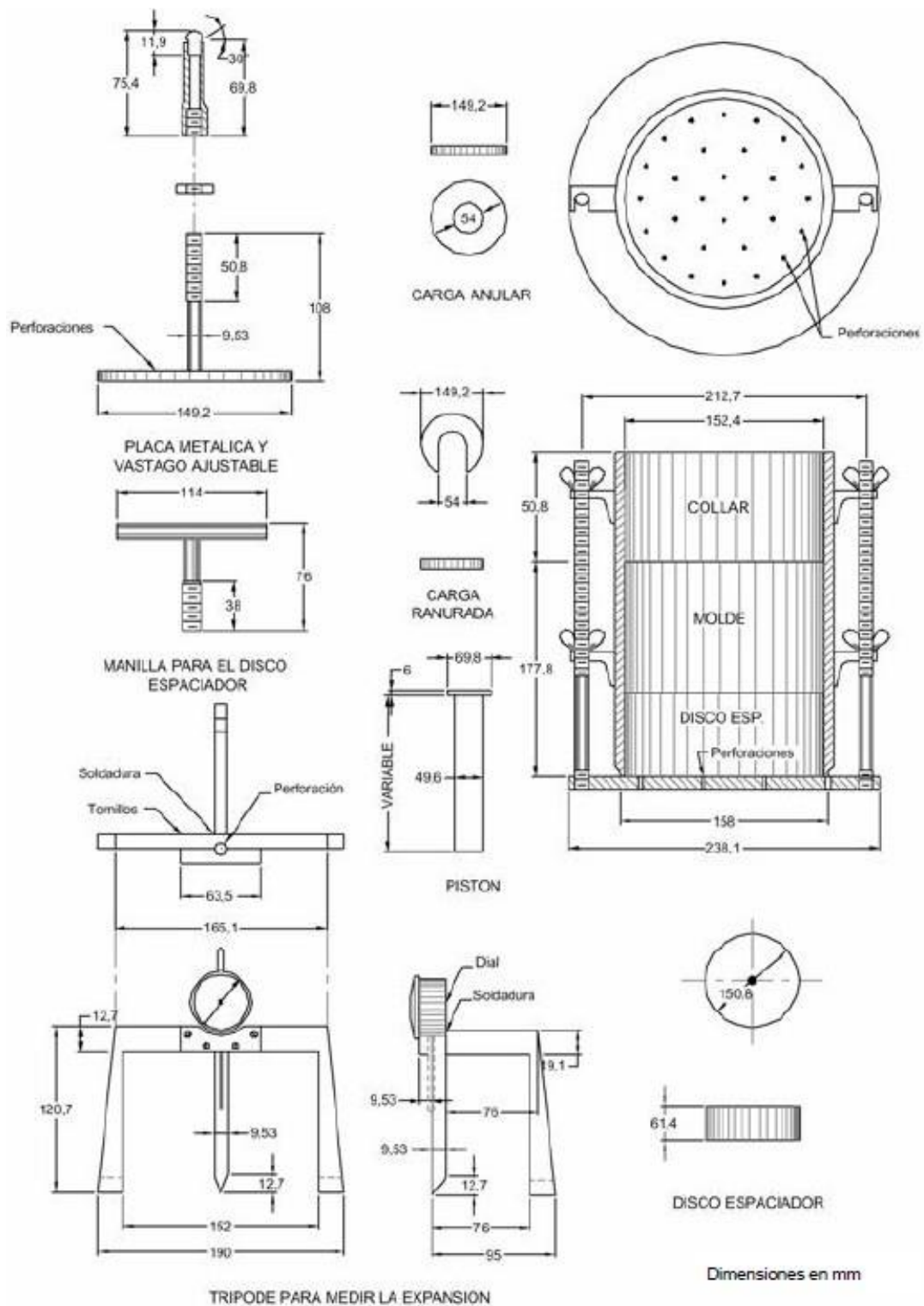


Figura 148 - 1. Elementos para determinar el CBR

5.11 Tamices – De 4.75 mm (No. 4) y de 19.0 mm (3/4").

- 5.12 Regla metálica** – De acero endurecido, de borde recto, al menos de 250 mm (10") de largo. El borde de corte y enrasado deberá ser biselado, si tiene más de 3 mm (1/8") de espesor. La regla no deberá ser tan flexible que, cuando enrase el suelo con el borde cortante, proporcione una superficie cóncava en la superficie de la muestra.
- 5.13 Material misceláneo** – Cuarteador, mezclador, cápsulas, probetas, espátulas, palas, cucharones, discos de papel de filtro aproximadamente del mismo diámetro interno del molde, etc.

6 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

- 6.1** Las muestras para compactación se deben preparar de acuerdo con el Método C, descrito en las normas INV E-141 o INV E-142, con la siguiente excepción:
- 6.1.1** Si todo el material pasa el tamiz de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "), se deberá usar la gradación entera, sin modificación, para preparar las muestras para fabricar los especímenes para ensayo. Si hay partículas retenidas en dicho tamiz, ellas se deberán remover y reemplazar por una cantidad igual, en masa, de material que pase el tamiz de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") y quede retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Ver nota 1), obtenido de porciones de la muestra total que no se van a usar para el ensayo.

7 ESPECÍMENES PARA ENSAYO

- 7.1** *Para determinar la relación de soporte únicamente con el contenido óptimo de agua* – Usando el material preparado como se indica en la Sección 6, se adelanta una prueba de control de compactación, con el número suficiente de especímenes para determinar la humedad óptima del suelo, empleando las normas INV E-141 o INV E-142, según se haya especificado. Se puede aprovechar la información de un ensayo de compactación realizado previamente, siempre y cuando se haya efectuado el reemplazo citado en el numeral 6.1.1, si la muestra de material contuviese partículas retenidas en el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") (nota 3).

Nota 3: El peso unitario seco máximo obtenido al compactar los especímenes en el molde de 101.6 mm (4") es levemente superior al obtenido al compactarlos en el molde de 152.5 mm (6") o en el molde del ensayo CBR.

- 7.1.1** Cuando se desee obtener el CBR al 100 % de compactación y a la humedad óptima, se compacta un espécimen usando el procedimiento de compactación especificado (INV E-141 o INV E-142), con una porción de suelo que contenga el contenido óptimo de agua ± 0.5 %, determinado de acuerdo con la norma INV E-122.

Nota 4: Si el peso unitario seco máximo se determinó a partir de una prueba de compactación efectuada en el molde de 101.6 mm (4"), puede ser necesario compactar especímenes como se describe en el numeral 7.1.2, usando 75 golpes por capa u otro valor suficiente para producir un espécimen cuyo peso unitario seco sea igual o superior al requerido.

- 7.1.2** Si se desea obtener el CBR con el contenido óptimo de humedad y a un determinado porcentaje del peso unitario seco máximo, se preparan tres especímenes con el contenido óptimo de agua ± 0.5 % y empleando el método de compactación especificado, pero aplicandoun número diferente de golpes por capa a cada espécimen. Dichonúmero de golpes por capa deberá variar lo necesario para que los pesos unitarios secos resultantes presenten valores por encima y por debajo del valor deseado. Típicamente, si se desea obtener el CBR de un suelo al 95 % de compactación, resulta satisfactorio compactar especímenes con 56, 25 y 10 golpes por capa. La penetración se deberárealizar sobre todos ellos.

- 7.2** *Relación de soporte para un rango de contenidos de agua* – Se preparan especímenes de manera similar a la descrita en el numeral 7.1, salvo que todos los especímenes usados para desarrollar la curva de compactación deberán ser penetrados. Además, se deberán desarrollar relaciones completas entre el contenido de agua y el peso unitario seco para 25 golpes y 10 golpes por capa y cada espécimen de prueba compactado deberá ser penetrado. Todas las compactaciones se deben realizar en moldes de CBR. En casos en los cuales el peso unitario especificado está en o cerca del 100 % del peso unitario seco máximo, puede ser necesario incluir un esfuerzo de compactación mayor de 56 golpes por capa (nota 5).

Nota 5: Un trazado semilogarítmico de peso unitario seco versus energía de compactación da, generalmente, una relación lineal recta cuando la energía, en $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ($\text{lbf}\cdot\text{pie}/\text{pie}^3$), se representa en la escala logarítmica. Este tipo de dibujo es útil para establecer la energía de compactación y el número necesario de golpes por capa para precisar el peso unitario seco especificado y el rango de contenidos de agua.

- 7.2.1** Si el espécimen va a ser sometido a inmersión, se toma una muestra representativa del material para la determinación de humedad, de acuerdo con la norma INV E-122. Si el proceso de compactación se conduce bajo unas condiciones de temperatura razonablemente controladas (18 a 24° C) (65 a 75° F) y el suelo procesado se mantiene

en recipientes cerrados antes de su colocación dentro del molde, solamente se requiere una determinación de humedad. Si, por el contrario, el proceso de compactación se adelanta bajo unas condiciones ambientales fuera de control, se tomará una muestra representativa del material para la determinación de humedad al comienzo de la compactación de cada espécimen y otra muestra del material que sobre después de la compactación. Las determinaciones se deberán realizar de acuerdo con la norma INV E-122 y se tomará como contenido de agua representativo el promedio de los dos valores. La humedad de las dos muestras no deberá diferir en más de 1.5 % para poder asumir que el contenido de agua del espécimen es razonablemente uniforme.

- 7.2.2** Si el espécimen no va a ser sometido a inmersión, se toma una muestra para el contenido de humedad, de acuerdo con las normas INV E-141 o INV E-142, si se desea el contenido promedio de humedad.
- 7.2.3** Se ajusta el molde a la placa de base y se une el collar de extensión. A continuación, se inserta el disco espaciador dentro del molde y se coloca un papel filtro grueso sobre el disco. Se elaboran mezclas de suelo con agua y se compactan en moldes de CBR, de acuerdo con lo indicado en los numerales 7.1, 7.1.1 y 7.1.2.
- 7.2.4** Terminada la compactación, se quita el collar de extensión y se enrasa el espécimen con la regla metálica dispuesta para ello. Cualquier hueco superficial producido al eliminar partículas gruesas durante el enrase, se rellenará con material sobrante sin gruesos, comprimiéndolo con la espátula. Se desmonta el molde de la placa de base y se determina la masa del molde con el espécimen compactado. Se vuelve a montar el molde sobre la placa de base, pero ahora en posición invertida, sin incluir el disco espaciador y colocando previamente un papel de filtro sobre la placa de base.
- 7.2.5** Sobre la superficie de la muestra invertida se coloca la placa perforada con vástago ajustable y, sobre ésta, las pesas de sobrecarga necesarias para producir una presión equivalente a la originada por todas las capas de pavimento que se hayan de construir sobre el suelo que se ensaya, con una aproximación de 2.27 kg (5.0 lb), correspondientes a una pesa. En ningún caso, la sobrecarga total será menor de 4.54 kg (10 lb). A falta de instrucciones concretas al respecto, se puede determinar el espesor de las capas que se han de construir por encima del suelo que se ensaya, bien por estimación, o por algún método

aproximado. Cada 15 cm (6") de espesor de estructura del pavimento corresponde, aproximadamente, a 4.54 kg (10 lb) de sobrecarga. A continuación, se sumerge el molde en el tanque con las pesas de sobrecarga colocadas, dejando libre acceso al agua por la parte inferior y superior de la muestra. Se toma la primera lectura para medir la expansión, colocando el trípode de medida con sus patas sobre los bordes del molde, haciendo coincidir el vástago del deformímetro con el de la placa perforada (Figura 148 - 2). Se anota su lectura [con aproximación a 0.0025 mm (0.0001")], así como el día y la hora de la lectura. Se mantiene la probeta en estas condiciones durante 96 horas (4 días) con el nivel de agua constante, aproximadamente 25 mm (1") por encima de la superficie del espécimen. Se admite un periodo de inmersión más corto, nunca menor de 24 horas, si se trata de suelos granulares que se saturan de agua rápidamente y si los ensayos muestran que esto no afecta los resultados. Para algunos suelos arcillosos puede ser necesario un período de inmersión superior a 4 días. Al final del período de inmersión, se vuelve a colocar el trípode exactamente en la misma posición que cuando se tomó la primera lectura y se lee el deformímetro para medir el hinchamiento y calcular posteriormente la expansión, como un porcentaje de la altura inicial del espécimen.



Figura 148 - 2. Medida de expansión axial

- 7.2.6** Después del período de inmersión, se saca el molde del tanque y se vierte el agua retenida en la parte superior del mismo, sosteniendo firmemente la placa y las pesas de sobrecarga en su posición. Se deja escurrir el molde durante 15 minutos. Se debe tener cuidado para no alterar la superficie de la muestra durante el lapso de remoción de agua. A continuación, se retiran las pesas de sobrecarga, la placa

perforada y el papel de filtro. Inmediatamente, se pesa y se procede al ensayo de penetración según el proceso descrito en la Sección siguiente.

8 PENETRACIÓN DE LAS PROBETAS COMPACTADAS

- 8.1** Se colocan sobre el espécimen las mismas pesas de sobrecarga que tuvo durante el período de inmersión. Para evitar el empuje hacia arriba del suelo dentro del agujero de las pesas de sobrecarga, es conveniente colocar inicialmente una pesa anular sobre la muestra. Para ello, se lleva el molde a la prensa y se coloca la pesa anular y luego el pistón de penetración a través del orificio de la pesa. En seguida, se coloca el resto de las pesas alrededor del pistón.
- 8.2** Se aplica una carga de 44 N (10 lbf) para que el pistón asiente. Se monta el dial medidor de manera que se pueda medir la penetración del pistón (Ver numeral 5.1.2) y, seguidamente, se sitúan en cero los diales medidores: el del anillo dinamométrico (u otro dispositivo para medir la carga) y el de control de la penetración.

Nota 6: Cuando las cargas son elevadas, los soportes de la prensa pueden sufrir un movimiento de rotación, afectando la lectura del dial de penetración. Verificar la profundidad de penetración del pistón es un medio de controlar indicaciones erróneas de la deformación.

- 8.3** Se aplica la carga sobre el pistón de penetración mediante el gato o mecanismo correspondiente de la prensa, de manera de producir una velocidad de penetración uniforme, de 1.27 mm (0.05") por minuto (Figura 148 - 3). Las prensas manuales no preparadas para trabajar a esta velocidad de forma automática se controlarán mediante el deformímetro de penetración y un cronómetro. Se anotan las lecturas de la carga para las siguientes penetraciones del pistón dentro del suelo: 0.64 mm (0.025"), 1.27 mm (0.050"), 1.91 mm (0.075"), 2.54 mm (0.100"), 3.18 mm (0.125"), 3.81 mm (0.150"), 4.45 mm (0.175"), 5.08 mm (0.200"), 7.62 mm (0.300"), 10.16 mm (0.400") y 12.70 mm (0.500"). Si la carga máxima ocurre a una penetración menor de 12.70 mm (0.500"), se hará la anotación correspondiente.

Nota 7: Se pueden omitir las lecturas de carga para penetraciones superiores a 7.62 mm (0.300"), si se advierte que se está alcanzando la capacidad de carga de la prensa.



Figura 148 - 3. Ensayo de penetración

- 8.4** Se desmonta el molde de la prensa y si el espécimen fue sometido previamente a inmersión, se toma una muestra para determinar su humedad, de los 25 mm (1") superiores, en la zona próxima a donde se hizo la penetración. Su masa deberá ser al menos de 100 g si el suelo ensayado es de grano fino y de 500 g si es granular.

9 CÁLCULOS

- 9.1** *Curva penetración–esfuerzo* – Se calcula la presión aplicada por el pistón para cada penetración indicada en el numeral 8.3 (dividiendo la carga aplicada por el área del pistón mencionada en el numeral 5.7) y se dibuja una curva para obtener los esfuerzos de penetración a partir de los datos de prueba. Ocasionalmente, la curva resulta cóncava hacia arriba en su parte inicial, debido a irregularidades en la superficie del espécimen o a otras causas y, en tal eventualidad, el punto cero de la curva se debe ajustar como se muestra en la Figura 148 - 4. La corrección consiste en trazar una tangente a la curva en el punto de inflexión, cuya prolongación hasta el eje de abscisas definirá el nuevo origen de esa curva (penetración cero) para la determinación de las presiones correspondientes a 2.54 y 5.08 mm, como se indica más adelante. Se debe dibujar una curva por cada espécimen penetrado.

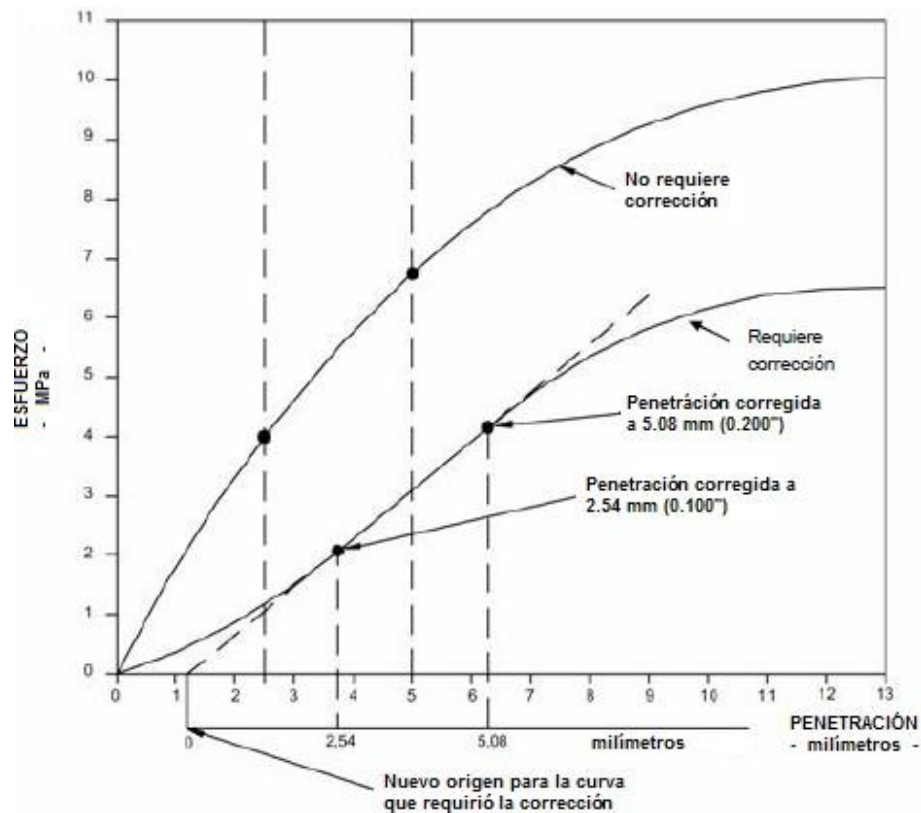


Figura 148 - 4. Curvas Penetración – Esfuerzo

- 9.2 Relación de soporte (CBR) –** Usando los esfuerzos corregidos, tomados de las curvas penetración - esfuerzo, para penetraciones de 2.54 y 5.08 mm (0.100 y 0.200"), se calculan las relaciones de soporte correspondientes, dividiendo dichos esfuerzos por los esfuerzos de referencia 6.9 MPa (1000 lb/pg²) y 10.3 MPa (1500 lb/pg²), respectivamente, y multiplicando por 100. También, se debe calcular la relación de soporte para el esfuerzo máximo, si éste se produjo a una penetración inferior a 5.08 mm (0.200"); en este último caso, el esfuerzo de referencia se deberá obtener por interpolación. La relación de soporte (CBR) reportada para el suelo es, normalmente, la de 2.54 mm (0.1") de penetración. Cuando la relación a 5.08 mm (0.2") de penetración es mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, se toma como resultado del ensayo la relación de soporte (CBR) para 5.08 mm (0.2") de penetración.
- 9.3 CBR de diseño para un solo contenido de humedad (humedad óptima) –** Usando los datos obtenidos a partir de los tres especímenes preparados como se indicó en el numeral 7.1.2, se dibuja la curva peso unitario seco (o densidad seca) – CBR (Figura 148 - 5). El CBR de diseño puede, entonces, ser determinado al porcentaje deseado del peso unitario seco máximo que,

normalmente, corresponde al porcentaje mínimo especificado para el control de la compactación en obra.

- 9.4** *CBR de diseño para un rango de contenidos de humedad (Ver numeral 7.2)* – Se trazan las curvas de compactación y las de humedad de compactación versus el CBR corregido con los datos de las pruebas realizadas con las tres energías de compactación, como se muestra en la parte izquierda de la Figura 148 - 6. Igualmente, se elaboran las curvas de peso unitario seco (o densidad seca) versus CBR para diversas humedades de compactación (gráfico de la parte derecha de la Figura 148 – 6). Para el propósito del informe, se acostumbra seleccionar el CBR más bajo dentro del rango en que el ingeniero haya determinado que se encontrará la humedad de equilibrio (por ejemplo, entre 13 y 16 % en el caso de la figura) y para un peso unitario seco (o densidad seca) ubicado entre el mínimo especificado y el máximo producido por compactación dentro del rango elegido de contenidos de agua, que se prevea que no dará origen a problemas por la expansión del suelo de subrasante en servicio (a manera de ejemplo, entre 1770 y 1842 kg/m³ para el caso ilustrado en la figura). Los límites generados por estos dos rangos de humedad y peso unitario seco (o densidad seca) son los acotados por la zona achurada en el gráfico. Se deberá reportar, además, la expansión sufrida por el suelo durante el ensayo para la combinación de peso unitario seco (o densidad seca) y humedad correspondientes al valor de CBR que finalmente se escoja.

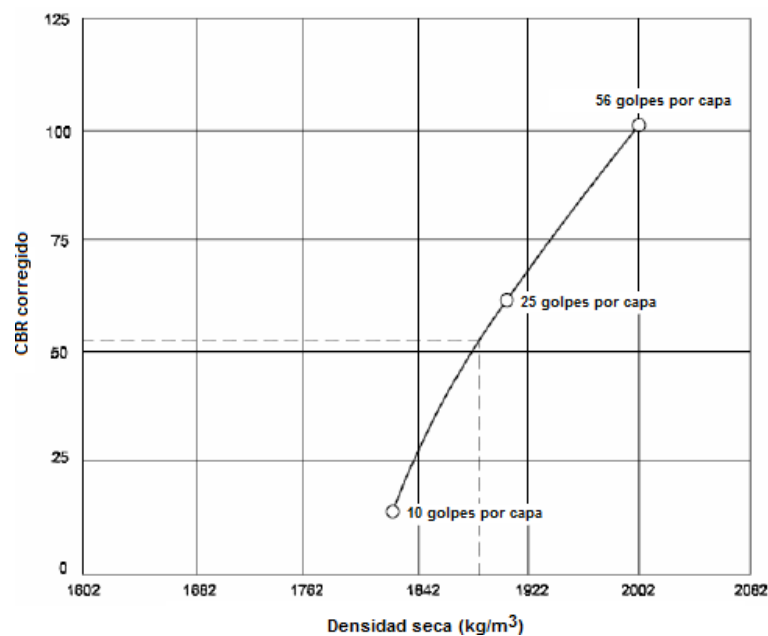


Figura 148 - 5. Curva Densidad seca – CBR

9.5 *Cálculo de los pesos unitarios secos de los especímenes compactados* – Los pesos unitarios secos requeridos para dibujar las curvas mencionadas en los numerales 9.3 y 9.4, se determinan de la siguiente manera:

9.5.1 *Densidad seca del espécimen antes de la inmersión (ρ_d):*

$$\rho_d = \frac{M_{\text{sac}}}{V_m} \quad [148.1]$$

Donde:

$$M_{\text{sac}} = \frac{M_{\text{mws}} - M_m}{1 + w_{\text{ac}}} \quad [148.2]$$

M_{sac} : Masa seca del suelo al ser compactado en el molde, Mg o g;

M_{mws} : Masa húmeda del suelo compactado más la masa del molde, Mg o g;

M_m : Masa del molde, Mg o g;

w_{ac} : Contenido de agua de porciones representativas tomadas durante el proceso de compactación de cada espécimen;

V_m : Volumen del espécimen compactado en el molde, m^3 o cm^3 .

9.5.2 *Conversión a peso unitario seco:*

9.5.2.1 En kN/m^3 :

$$\gamma_d = 9.8066 \times \rho_d \quad [148.3]$$

9.5.2.2 En lbf/ft^3 :

$$\gamma_d = 62.428 \times \rho_d \quad [148.4]$$

- 9.6 Expansión** – La expansión de cada espécimen se calcula por la diferencia entre las lecturas del deformímetro del aparato medidor de expansión al inicio y al final de la inmersión (Ver numeral 7.2.5). Este valor se reporta en tanto por ciento, con respecto a la altura inicial de la muestra en el molde, que es de 116.43 mm (4.58").

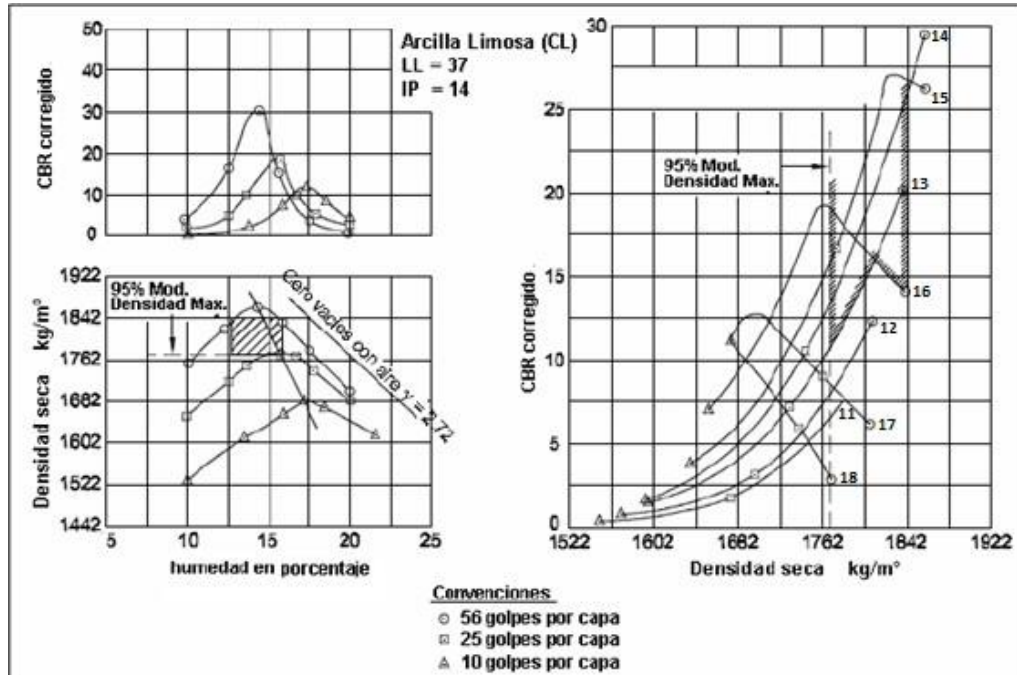


Figura 148 - 6. Determinación del CBR para un rango de humedades y densidades secas

10 INFORME

10.1 Deberá incluir, como mínimo, lo siguiente:

- 10.1.1** Identificación completa de la muestra de ensayo (proyecto, número y localización de la calicata, profundidad de muestreo, etc.).
- 10.1.2** Descripción de las pruebas realizadas para la identificación de la muestra: descripción visual (norma INV E-102); granulometría (norma INV E-123); límites de Atterberg (normas INV E-125 e INV E-126); clasificación formal (normas INV E-180 e INV E-181).
- 10.1.3** Método usado para la preparación y la compactación de las muestras (INV E-141, INV E-142 u otro), con la respectiva descripción.

- 10.1.4 Porcentaje de material retenido en el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y sustituido para realizar el ensayo.
- 10.1.5 Condición de ensayo de las probetas (con o sin inmersión previa).
- 10.1.6 Humedad y peso unitario seco con los cuales quedaron compactados los especímenes.
- 10.1.7 Humedad en la parte superior del espécimen luego de la penetración.
- 10.1.8 Pesas de sobrecargas utilizadas y tiempo de inmersión.
- 10.1.9 CBR de cada espécimen.
- 10.1.10 Curvas penetración versus esfuerzo.
- 10.1.11 Curvas CBR contra peso unitario seco y humedad, según los modelos mostrados en los ejemplos de las Figuras 148 - 5 y 148 - 6.
- 10.1.12 Valores de expansión de los especímenes.

11 PRECISIÓN Y SESGO

- 11.1 *Precisión* – A la fecha no se han recogido suficientes datos para establecer la precisión de este ensayo. En un caso particular, un usuario, basado en siete repeticiones, obtuvo una desviación estándar de 8.2 % con especímenes compactados con la energía del ensayo normal de compactación y de 5.9 % con especímenes compactados con la energía del ensayo modificado.
- 11.2 *Sesgo* – Ningún método disponible actualmente suministra valores aceptados como referencia para la capacidad de soporte obtenida por medio de este método de ensayo. Por lo tanto, no hay manera significativa de establecer el sesgo.

12 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

ASTM D 1883 – 07

THE ASPHALT INSTITUTE, "Soils Manual for Design of Asphalt Pavement Structures, Manual Series No. 10 (MS-10)", College Park, Maryland, April 1963

ANEXO A

(Información obligatoria)

PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO SOBRE MUESTRAS INALTERADAS

A.1 En el caso de muestras inalteradas, se procede como sigue:

A.1.1 Empleando un molde de filo cortante, de 152.4 mm (6") de diámetro, se sigue el procedimiento indicado en el numeral 3.3 de la norma INV E-104 para tomar la muestra inalterada para el ensayo, la cual se traslada luego al laboratorio.

A.1.2 Cuando se vaya a efectuar el ensayo, se quita la parafina de ambas caras y, con ayuda de la prensa y del disco espaciador, o de un extractor de muestras, se deja un espacio vacío en el molde equivalente al del disco espaciador, enrasando el molde por el otro extremo. A continuación, se procede como con las muestras preparadas en el laboratorio.

Nota A.1: La operación para dejar ese espacio vacío no es necesaria si se utiliza un molde de

116.43 mm de altura, en vez de los 177.8 mm, y se monta el collar antes de proceder al ensayo de penetración.

A.1.3 A voluntad del responsable, la muestra puede ser ensayada por un extremo con la humedad natural, recién retirada la parafina en el laboratorio, y por el otro extremo luego de someterla a un período de inmersión.