

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

3.1 INTRODUCCIÓN

Los pavimentos están constituidos por diferentes materiales, incluyendo las terracerías y el terreno de fundación los cuales se ven sometidos a un gran número de cargas dinámicas repetitivas de ruedas de diversas magnitudes según su intensidad y duración, es decir, son afectados por esfuerzo de fatiga, que al moverse imparten un pulso dinámico a todas las capas del pavimento y a la subrasante. Como respuesta a este pulso cada capa sufre una deflexión.

Los esfuerzos aplicados al pavimento debido al paso de vehículos por la superficie de rodamiento, son distribuidos a las capas inferiores, las cuales se ven sujetas a esfuerzos cíclicos de compresión y de tensión los cuales van provocando deformaciones en toda la estructura del pavimento.

Con el fin de tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, investigadores y diseñadores han realizado en el mundo varios trabajos experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en el laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo - deformación de los materiales en respuesta del suelo a las diferentes sollicitaciones.

Estas deformaciones que surgen por el paso de vehículos son de recuperación instantánea, denominadas así deformaciones elásticas, sin embargo, existe una pequeña deformación permanente denominada plástica, la cual al someter la muestra bajo ciclos de carga y descarga se va acumulando; debe hacerse notar el hecho de que en ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado

tal en que toda la deformación es recuperable proporcional a la carga y puede ser considerada como elástica. Para fines de análisis se considera que el comportamiento de los materiales es fundamentalmente elástico durante cada ciclo de carga, por lo que se caracteriza como un comportamiento resiliente. De aquí se desprende el concepto de módulo de resiliencia, el cual se basa en la deformación recuperable bajo la acción repetida de cargas y está definido como la relación entre el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial y la correspondiente deformación axial recuperable.

La metodología actual para diseño de pavimentos utilizada por el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) considera al parámetro Módulo Resiliente (M_R) como la base para caracterizar el comportamiento de los materiales constitutivos de la sección de una carretera tanto para materiales finos como granulares.

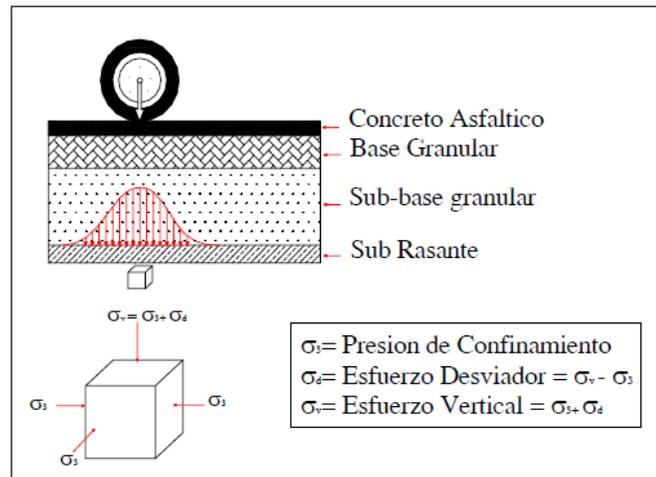
Por lo expuesto anteriormente el especialista a cargo del diseño, construcción y conservación de tales estructuras, debe de tener el conocimiento básico de lo que el parámetro Módulo Resiliente (M_R) representa, de la prueba de laboratorio y metodologías a partir de las cuales se obtiene y de los factores que hay que considerar para la selección del valor adecuado para su uso en una determinada metodología de diseño.

3.2 CONCEPTO DE MÓDULO RESILIENTE

Cuando un vehículo circula sobre el pavimento, los neumáticos transmiten cargas que son absorbidas por la estructura, entonces un elemento diferencial de suelo ubicado en la subrasante, estará sometido a esfuerzos que a su vez inducen un estado de deformaciones, tal como se muestra en la figura 3.1 Si se considera al material de la subrasante, con un comportamiento elástico, isótropo y homogéneo, hipótesis básicas de la mecánica de suelos, los esfuerzos y las deformaciones se relacionarán con el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, propios del material.

Pero la respuesta real, está en función de las características propias de los materiales que conforman el pavimento y donde las cargas impuestas por el tránsito tienen un carácter dinámico con muy cortos tipos de aplicación. Luego la deformación total inducida, se recupera al cesar la carga aplicada.

FIGURA 3. 1: ESTADO DE LOS ESFUERZOS PROVOCADOS EN LA SUBRASANTE POR EL PASO DE UN VEHÍCULO EN MOVIMIENTO.

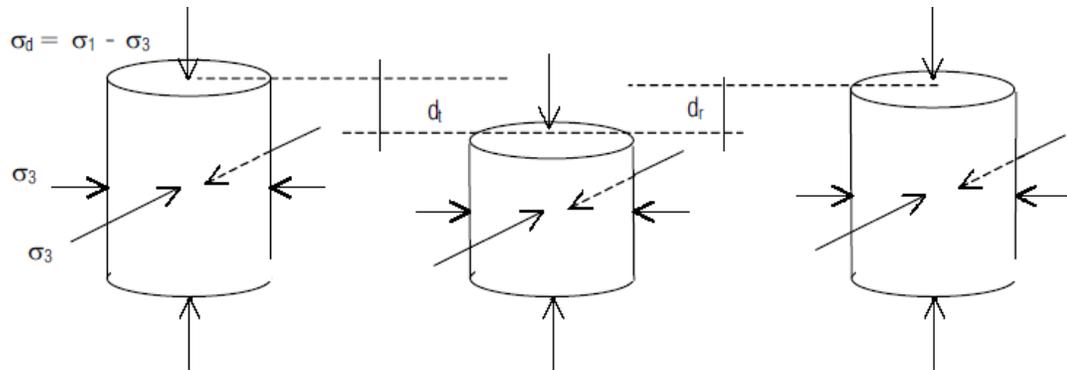


Fuente: XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil – “Ensayo del Módulo Resiliente por Bach Felicita Marlene Limaymanta Mendoza, Ing. Wilfredo Gutiérrez Lazares. Iquitos 2003.

La resiliencia en los suelos se entiende como la capacidad que tienen éstos para recuperarse después de una sollicitación de carga, cuando se trabajan bajo deformaciones en una zona elástica supuesta.

El esquema de esfuerzos al que son sometidas las muestras de ensayo, se puede representar según lo que se muestra en la figura 3.2.

FIGURA 3. 2: ESQUEMA DE ESFUERZOS AL QUE SON SOMETIDAS MUESTRAS DE ENSAYO



Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares, por Julián Vidal y Rodrigo Osorio.

Donde:

σ_3 : Esfuerzo de confinamiento

σ_1 : Esfuerzo de confinamiento

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$: Esfuerzo desviador

d_t : Deformación total

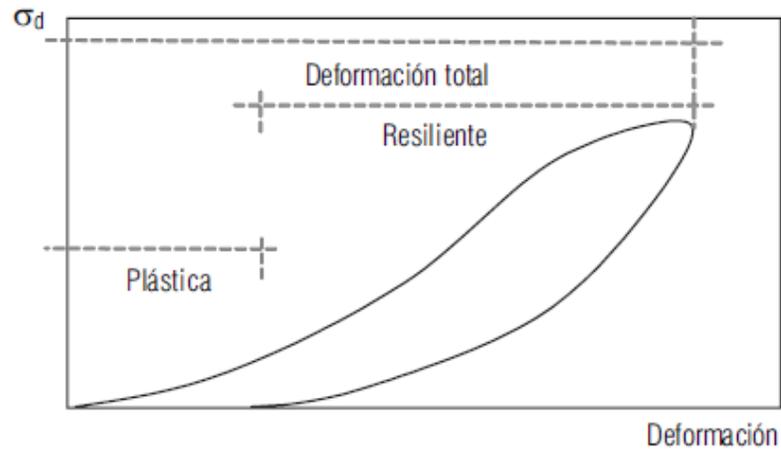
d_r : Deformación recuperada

$d_t - d_r$: Deformación remanente

El esquema de la figura 3.2 se puede explicar de la siguiente manera: al aplicar una carga creciente se incrementa la deformación; cuando la carga se reduce la deformación también se reduce, pero no toda ella se recupera. Por lo tanto, la deformación total se compone de dos partes: una plástica o permanente y una elástica o resiliente. Únicamente, la resiliente o recuperada se utiliza para calcular el módulo

resiliente. En la figura 3.3 se presenta una secuencia de carga y descarga y los parámetros asociados.

FIGURA 3. 3: SECUENCIA DE CARGA Y DESCARGA Y LOS PARÁMETROS ASOCIADOS

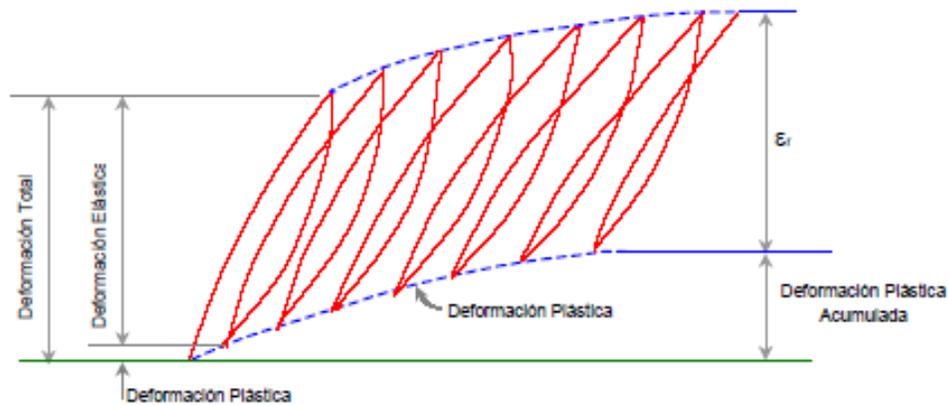


Fuente: Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares, por Julián Vidal y Rodrigo Osorio.

La reacción de un material cuando la carga es retirada, es recuperar parte de la deformación inducida; la capacidad de recuperación de dicho material es lo que comúnmente se denomina la resiliencia de los materiales. La relación entre el esfuerzo desviador y la correspondiente deformación unitaria recuperada se denomina módulo resiliente.

La energía provocada por los ciclos de carga se disipa, generando menor histéresis en la relación esfuerzo - deformación del material para cierto número de ciclos; aproximadamente después de 200 ciclos (Drumm, et al, 1990) el módulo elástico se vuelve constante suponiendo así respuestas lineales

FIGURA 3. 4: DEFORMACIÓN BAJO CARGAS REPETIDAS



Fuente: XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil – “Ensayo del Módulo Resiliente por Bach Felicita Marlene Limaymanta Mendoza, Ing. Wilfredo Gutiérrez Lazares, Iquitos 2003.

A partir de este ensayo se puede definir matemáticamente el Módulo Resiliente del material como la relación entre el esfuerzo desviador y la deformación axial, según la expresión indicada en la ecuación 3.1

$$M_R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}} \quad \text{ECUACION 3.1}$$

Donde:

- σ_1 : Esfuerzo principal mayor
- σ_3 : Esfuerzo principal menor
- σ_d : Esfuerzo desviador
- ε_{axial} : Deformación recuperable

Durante pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega aproximadamente constante y la respuesta del suelo

puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama módulo de resiliencia. Este concepto aplica tanto para suelos finos como para materiales granulares.

Así entonces, el concepto de módulo de resiliencia está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida.

El parámetro Módulo de Resiliencia, a través de las investigaciones, se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos y ha despertado gran interés en el desarrollo de procedimientos de diseño con bases mecanicistas; los cuales lo introducen como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura.

3.3 NIVELES DE CONFIABILIDAD EN LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

Las guías de diseño de pavimento flexible determinan un nivel de confiabilidad en el diseño, en función del grado de precisión empleado para la determinación del módulo resiliente como parámetro de entrada; el cual está clasificado en 3 niveles.

Nivel 1

Otorga la mayor confiabilidad en el diseño, disminuyendo el grado de incertidumbre en la determinación del módulo resiliente. Este parámetro puede ser obtenido mediante 2 formas:

1. Que el módulo resiliente sea determinado en un laboratorio competente, con capacidad de realizar las pruebas triaxiales dinámicas de forma rigurosa según lo indicado en los manuales o procedimientos de prueba normalizados y establecidos para este fin.
2. Que el módulo resiliente sea obtenido por medio de la realización de una prueba de campo no destructiva con un equipo de deflectometría de impacto ó FWD.

Nivel 2

Proporciona un nivel intermedio de confiabilidad en el diseño y su uso está asociado a la falta de disponibilidad de equipos relacionados dentro del nivel 1. Aquí, el módulo resiliente se obtiene de correlaciones típicas asociadas con otras propiedades del material entre las que se encuentran el peso unitario seco, los límites de Atterberg, la gravedad específica, resultados del ensayo de CBR, la prueba de cono dinámico o de compresión inconfiada, entre otros.

Nivel 3

Los valores adoptados para el módulo resiliente en el nivel 3 ofrecen la más baja precisión y por consiguiente el nivel de confiabilidad más bajo en el diseño, asumiendo valores típicos representativos encontrados en la literatura según el contenido de humedad óptimo del material analizado.

3.4 FACTORES QUE AFECTAN EL MÓDULO RESILIENTE

Como se ha observado en los estudios llevados a cabo sobre módulo de resiliencia, este parámetro no es una propiedad constante del suelo, sino que depende de muchos factores como ser:

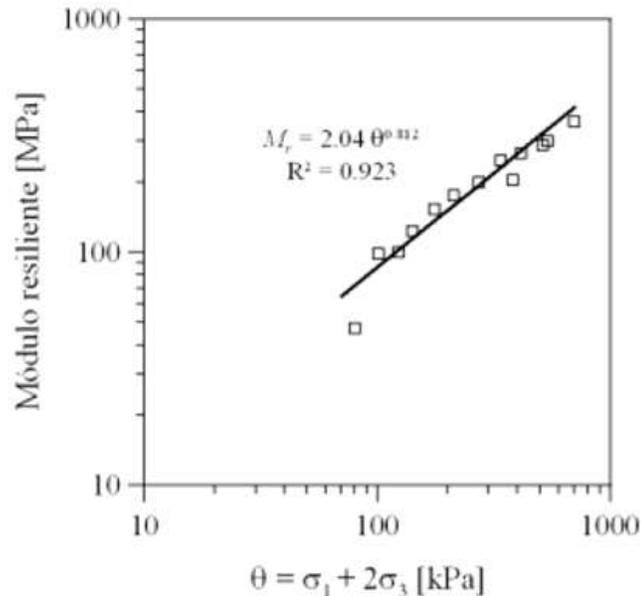
- Estado de tensiones (esfuerzo confinamiento y esfuerzo desviador)
- Tipo de suelo y estructura interparticular (métodos de compactación)
- Estado físico del suelo (humedad y densidad)

3.4.1 INFLUENCIA DEL ESFUERZO

Con respecto a la magnitud del esfuerzo, ha sido ampliamente demostrado que el valor del Módulo Resiliente (M_R) depende principalmente de la presión de confinamiento y mantiene una relación de proporcionalidad directa con la suma de esfuerzos principales, lo cual genera un incremento notable en el Módulo.

Un ejemplo de variación del Módulo Resiliente según la magnitud de esfuerzo se puede ver (Fig. 3.5.)

FIGURA 3. 5: VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL ESFUERZO DESVIADOR



Fuente: Comportamiento Resiliente de materiales granulares en Pavimentos Flexibles: Estado del Conocimiento, Hugo Alexander Rondon Quintana y Fredy Reyes Lizcano.

3.4.2 TIPO DE SUELO Y ESTRUCTURA

Algunos estudios realizados han demostrado que la estructura de los suelos se ve afectada por factores como el método de compactación, el esfuerzo de compactación y el contenido de agua, los cuales influyen directamente en la magnitud del módulo resiliente para muestras compactadas en laboratorio.

Compactar significa, romper la estructura original del suelo y modificarlo para generar suelos más densos. El método de compactación depende de la naturaleza propia del suelo.

El arreglo que tomen las partículas al ser compactadas depende en cierto modo del grado de saturación. Por ejemplo, para bajos grados de saturación, las partículas de los suelos finos, se acomodan al azar formando lo que se llama una estructura floculada, en cambio, para altos de grados de saturación, las partículas tienden a acomodarse en forma paralela generando lo que se conoce como una estructura dispersa.

La estructura de los suelos compactados, depende de factores intrínsecos del material, como lo son la mineralogía, forma y tamaño del grano, así como de la energía usada para la compactación y del método.

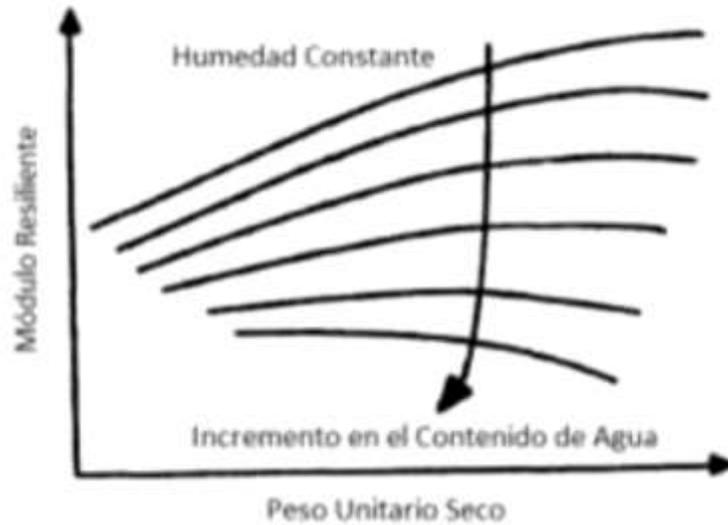
Si se compacta el material, independientemente del método, pero con contenido de agua inferior al óptimo, el resultado obtenido de resistencia a la compresión no es variablemente significativo, sin embargo, no sucede lo mismo cuando se compacta por el lado húmedo de la curva de compactación.

3.4.3 ESTADO FÍSICO DEL SUELO

El estado físico del suelo generalmente está representado por su contenido de humedad y su peso unitario seco, fundamentado en que estos dos factores permiten obtener las condiciones óptimas de la curva de compactación para un suelo dado.

Li y Selg (1994), basados en una recopilación de resultados de módulo resiliente encontrados en la literatura, mostraron que éste decrece en magnitud para un mismo peso unitario seco, cuando se presenta un aumento en el contenido de humedad del suelo ver (Fig 3,6).

FIGURA 3. 6: RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE Y EL ESTADO FÍSICO DEL SUELO.



Fuente: Sandefur, 2003.

3.5 UTILIZACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

Varias son las metodologías para diseño de pavimentos, tanto rígidos como flexibles que consideran al parámetro Módulo Resiliente como la base para la caracterización del comportamiento de suelos y materiales granulares. Es por ello que la selección apropiada del módulo resiliente de un material se debe de realizar con sumo cuidado, teniendo en cuenta los factores que en él influyen.

3.6 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

La subrasante es aquella capa sobre la cual se apoya toda la estructura del pavimento, conformado por diferentes materiales a los cuales se los puede caracterizar mediante el parámetro Módulo Resiliente.

Cuando se comenzaron a efectuar los primeros diseños de pavimentos, basaban el concepto principal en caracterizar a la subrasante, analizando su granulometría; plasticidad; tipo de suelo; drenaje, obteniendo información muy superficial.

Con el paso del tiempo y gracias a nuevas investigaciones, se comenzó a analizar el comportamiento de estos suelos a través de otro tipo de ensayos utilizando carga estática o de baja velocidad como el CBR, ensayos de compresión simple.

Estos ensayos a su vez fueron reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas como es el Ensayo del Módulo Resiliente, cuyas pruebas demuestran de mejor forma y más precisa el comportamiento de los materiales que conforman la estructura del pavimento.

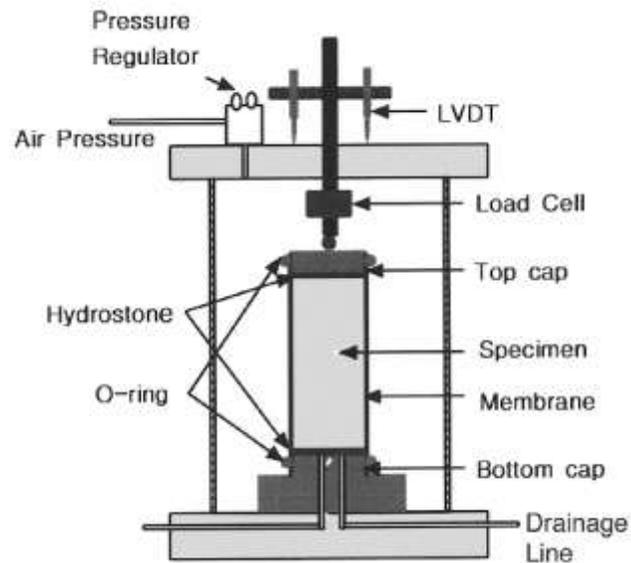
Este parámetro es determinado por varios métodos que se detallan a continuación:

3.6.1 ENSAYO TRIAXIAL

El Módulo resiliente es determinado generalmente a través de ensayos de laboratorio por medio de ensayos triaxiales cíclicos (Fig. 3.7), en los cuales se simulan diferentes estados de esfuerzos variando la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador, lo que simula las cargas variantes que genera el paso de los vehículos.

El ensayo realizado a través del equipo triaxial, aplica un esfuerzo desviador repetido, de magnitud, duración y frecuencia fija en la muestra, la cual es sometida a tres presiones de confinamiento diferentes de 41.4, 27.6, y 13.8 kPa sugeridas por la norma.

FIGURA 3. 7: MONTAJE CÁMARA TRIAXIAL



Fuente: Evaluación del Módulo (D.-S. Kim, Kweon, & Lee, 2001)

Los ciclos de carga aplicados a la muestra, se realizan a través de una onda sinusoidal, que tiene un tiempo de aplicación de 0.1 segundos y un tiempo de descanso de 0.9 segundos entre ciclos, completando así los 2000 ciclos propuestos por INV E-156 (incluyendo los 500 ciclos realizados por acomodamiento de la muestra). (Brown, 1996), observo, como la deformación máxima se presenta donde el esfuerzo aplicado tiene mayor magnitud. La magnitud y la duración de esfuerzo que genera el paso del vehículo en el pavimento, depende tanto de la velocidad como del tránsito promedio diario que circula en la vía. Dichos parámetros permitieron establecer el ciclo de 0.1 segundos para la aplicación de esfuerzos en el equipo triaxial.

Al encontrar que la deformación vertical de la estructura aumenta con la profundidad y en cambio la magnitud de carga disminuye, varios autores, Barksdale (1971), Grainger y Lister (1962), McLean (1974), estudiaron el comportamiento de varios tipos de onda, como lo son las ondas triangulares y las ondas cuadradas.

Las investigaciones con diferentes tipos de ondas, a diferentes velocidades y profundidades, estandarizaron a la onda sinusoidal (Huang, 1993), pues los parámetros anteriores no son constantes y los tiempos de pulsación representados por las ondas triangulas y cuadradas son mayor y menor respectivamente comparada con la onda sinusoidal para diferentes velocidades de estudio.

3.6.2 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE A TRAVÉS DE DEFLECTOMETRÍA APLICANDO EL MÉTODO HOGG SIMPLIFICADO

En base a la experimentación por muchos años en el estudio y evaluación de suelos y pavimentos, mediante la medición y análisis de deflexiones con la metodología Hogg-Burmister, se han desarrollado correlaciones entre las propiedades medidas (deflexión máxima D_0 y el denominado “factor de longitud de curva”) y los parámetros elásticos del sistema suelo-pavimento, lo que ha permitido el desarrollo de un método simple y rápido para ser aplicado en obra con la finalidad de evaluar la capacidad de soporte de los suelos, ya sea a través de Módulo de Resiliencia o del valor del CBR del substrato.

El trabajo presenta los conceptos teóricos en que se basa el método propuesto (Hogg Simplificado), así como el procedimiento de cálculo que debe seguirse en campo para la obtención de la capacidad de soporte; asimismo, se presentan valores tabulados que facilitan y hacen más rápido el proceso de cálculo para la determinación del Módulo Resiliente de la estructura del pavimento.

Este método que se presenta permitirá la completa aplicación del análisis deformacional en la construcción y supervisión de pavimentos, superando de esa manera las limitaciones conocidas que tienen los métodos empíricos para la caracterización de la performance de los pavimentos.

Este un método simplificado que facilitará en la práctica la rápida verificación, para condiciones reales de campo, de los valores de soporte asumidos en el diseño del pavimento, así como el adecuado dimensionamiento de la altura de los terraplenes, el aporte y eficiencia de los materiales empleados en su construcción, el efecto de la ubicación del nivel freático en la capacidad resistente de los suelos, entre otros aspectos.

3.6.2.1 TÉCNICAS E INSTRUMENTACIÓN

La medición de deflexiones se realizará a través de la viga Benkelman siguiendo un procedimiento de campo determinado.

El equipo mínimo requerido para la realización de ensayos de medición de deflexiones es el siguiente:

- a) Deflectómetro Viga Benkelman con su respectivo flexímetro o extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm, con una relación de brazos 1:1, 1:2 o 1:4 siendo las más comerciales y usadas. Como, por ejemplo, una viga de relación de brazos 1:2 tendrá las siguientes dimensiones:
 - Longitud de brazo de ensayo, desde el pivote a la punta de prueba es 2.438 mts.
 - Longitud de brazo de ensayo desde el pivote al punto de apoyo del vástago del dial indicador es 1.219 mts.

Longitudes no estandarizadas, pudiendo variar, dependiendo de la marca del equipo.

FIGURA 3. 8: VIGA BENKELMAN



FIGURA 3. 9: VIGA CON DIAL DIGITAL



b) Un camión para el ensayo con las siguientes características:

**FIGURA 3. 10: CAMIÓN UTILIZADO PARA LA PRÁCTICA DE VIGA
BENKELMAN**



- Carga del eje trasero simple de 18,000 libras, igualmente distribuidas en sus dos ruedas duales.
- La presión de inflado de las llantas deberá estar dentro del rango de 75 a 85 psi.

c) Un termómetro de 0 a 100°C con divisiones cada grado.

FIGURA 3. 11: TERMÓMETRO



- d) Un barreno para ejecutar orificios en el pavimento de 4 cm. de profundidad y 1 de diámetro.
- e) Una cinta métrica.
- f) Vehículo auxiliar, para transportar al personal y equipo de apoyo (cintas métricas, termómetro, hojas de campo, señales de seguridad, etc).

Para la realización del ensayo, se deben tener presente las siguientes condiciones:

- La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones debe ser de 9000 libras (4080 Kg).
- La carga aplicada al pavimento será proporcionada por una de las llantas dobles del eje trasero de un camión.
- Debe tenerse en cuenta la presión de las llantas requerida.
- Localizar el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizaron con la ayuda de las progresivas marcadas)
- Para la rutina del ensayo será necesario del concurso de dos operadores: un operador que lea y anote las lecturas tanto del extensómetro como del termómetro y un ayudante que coordine con el conductor del camión.

3.6.2.2 PROCEDIMIENTO DE CAMPO

1.- PREPARACIÓN DEL ENSAYO

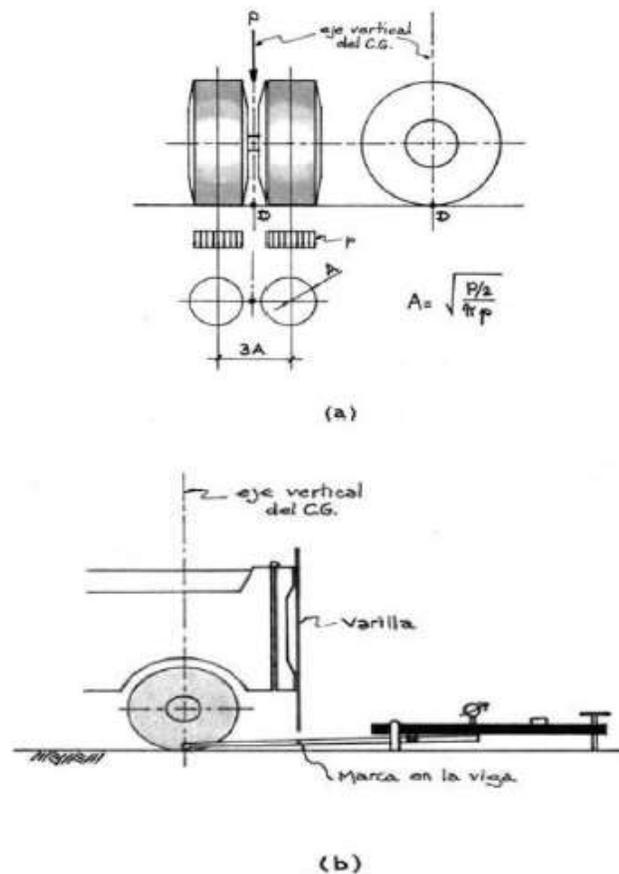
El camión se cargará con piedras manzana, y se pesará en báscula hasta alcanzar el peso requerido. Se comprobará la carga al comienzo del ensayo.

Se anotará la presión de inflado con la que se ha obtenido la huella correcta. Esta presión es la que debe mantenerse constante con oscilaciones máximas de +/- 0.01 durante todas las series de ensayos a realizar.

Se montará la viga Benkelman, comenzando por la unión de los tres tramos de la palanca de medida. Luego se coloca el nivel y finalmente el comparador. Se comprobará el correcto funcionamiento de todo el conjunto. La viga Benkelman se sitúa en el punto de medida, de modo que la punta del palpador quede situada sobre dicho punto y la palanca alineada con una paralela al eje de la calzada y en dirección al movimiento del camión. Se deberá proteger la viga de la insolación directa.

Se procederá a buscar un orificio de 20 a 50 mm de profundidad con diámetro suficiente para la introducción del bulbo del termómetro y de esta manera realizar la lectura de la temperatura.

FIGURA 3. 12 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL SISTEMA DE CARGA



2.- PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS

Una vez elegida la situación del punto a ensayar y realizar los procesos preparatorios, se sitúa el vehículo con el centro de las ruedas a 0.30 m del punto a ensayar, hacia el operador, de manera que el eje del vehículo quede en la dirección elegida de movimiento, generalmente paralela al borde de la calzada.

Se coloca la viga Benkelman en el punto de medida.

El ensayo comenzará cuando se compruebe que dicha lectura inicial permanece constante en cero.

El operador deberá avisar al conductor para que este desplace el camión lentamente, con velocidad de 1 cm/s, hacia adelante, de forma continuada hasta que el eje de las ruedas (o centro de carga) se encuentre a 5 m del punto de medida.

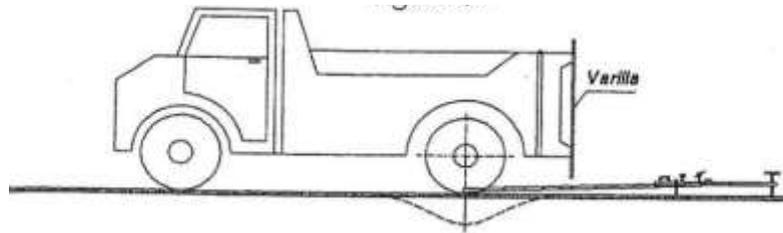
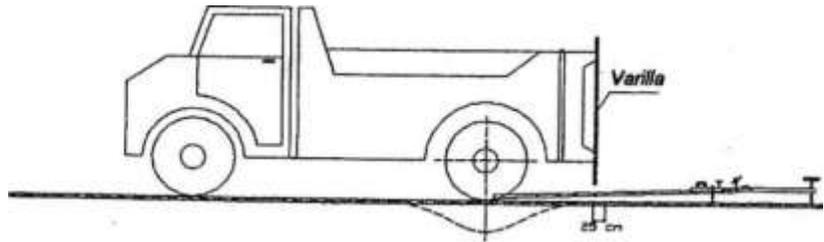
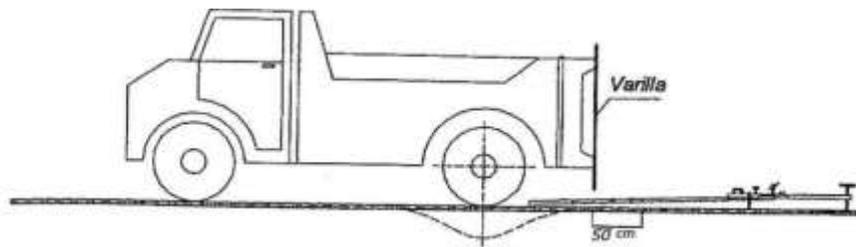
Se anotará la lectura máxima del comparador, que se produce generalmente en las proximidades del paso del eje de las ruedas (o centro de la carga) sobre la vertical del punto de medida, y las lecturas siguientes a 25; 50; 100; 150; 200 y 500 cm respectivamente.

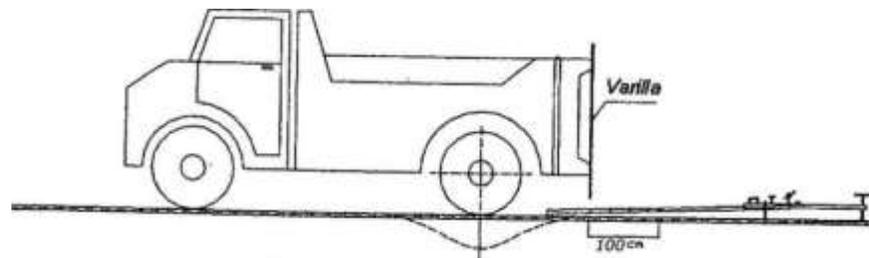
Se avisa al conductor para que desplace el vehículo hasta que el centro de carga se aleje más de 500 cm del punto de medida.

Se anota la lectura final (L_f) después de parado el camión, cuando la variación de la lectura del comparador sea inferior a 0.01mm en 5 seg.

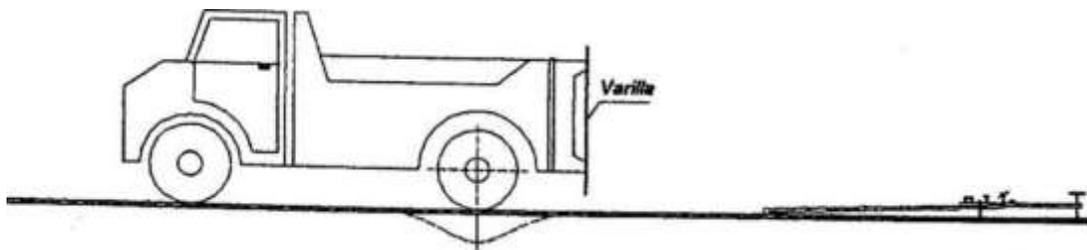
Se anota la temperatura del pavimento, retirando el medidor de temperatura del orificio, y la temperatura del aire.

Se realizan estos ensayos cada 50 m a lo largo de la vía, en cada carril.

FIGURA 3. 13 ESQUEMA DEL PROCESO DE MEDICIÓNa) Posición inicial (D_0 = Deflexión máxima)b) Posición a 25 cm (D_{25})c) Posición a 50 cm (D_{50})



Posición a 100 cm (D100)



d) Posición final a 500 cm (D500)

3.6.2.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

El procedimiento para estimar el Módulo Resiliente mediante el método de HOGG SIMPLIFICADO se realiza de la siguiente manera:

1.- CÁLCULO DE DEFLEXIONES

De la curva de deflexión medida se selecciona el valor de la deflexión máxima D_0

$$D_0 = (L_i - L_f) \quad \text{ECUACIÓN 3.2}$$

Para encontrar la deflexión a una determinada distancia, se deberá realizar la diferencia entre la lectura a una distancia X y la lectura final.

$$D_X = (L_X - L_f) \quad \text{ECUACION 3.3}$$

2.- CORRECCIÓN POR TEMPERATURA Y ESTACIONALIDAD

Tomando en cuenta que la temperatura de la capa asfáltica de rodadura influencia en el valor de la deflexión, las deflexiones medidas sobre la superficie de un pavimento asfáltico deben ser corregidas en función a la temperatura media que la capa experimenta durante la ejecución del ensayo la cual varía durante el transcurso del día.

Así mismo la capacidad de deformación de los suelos está influenciada por el grado de saturación que experimentan, por lo que el valor del coeficiente C depende de la naturaleza del suelo subrasante y el periodo característico de la zona. (Ver Tabla 3.1)

TABLA 3. 1 CORRECCIÓN DE LA DEFLEXIÓN POR CONDICIONES AMBIENTALES

TIPO DE SUELO DE SUBRASANTE	ESTACION LLUVIOSA	ESTACION SECA
Arenosa - permeable	1.0	1.1 a 1.3
Arcillosa – sensible al agua	1.0	1.2 a 1.4

A fin de referir todas las deflexiones a una temperatura estándar de 20 °C y a las mismas condiciones ambientales, se emplea la siguiente expresión.

$$FC = \frac{C}{(K*(t-20)*e+1)} \quad \text{ECUACION 3.4}$$

Dónde:

C : Coeficiente de corrección por condiciones ambientales.

K : Coeficiente igual a 1×10^{-3} (1/cm°C)

t : Temperatura del asfalto medida para cada ensayo.

e : Espesor de la carpeta asfáltica en cm.

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL

2.- DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA

El método asume que la curvatura que experimenta la superficie del pavimento, durante la aplicación de la carga es de forma parabólica, en un segmento de aproximadamente 25 cm, a partir del punto máxima deflexión.

Para la determinación del radio de dicha curvatura se ha establecido la siguiente expresión empírica:

$$R = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})} \quad \text{ECUACION 3.5}$$

Dónde:

D_0 : Deflexión máxima

D_{25} : Deflexión a 25 cm del punto de inicio

Teniendo en consideración el espesor de la carpeta asfáltica, se presentan dos casos, muy bien definidos:

- Si tenemos grandes Radios de Curvatura con relación a la deflexión, lo interpretaremos como que la mayor parte de la deformación se produce en la subrasante.
- Si la carpeta asfáltica, base o subbase están conformados por materiales de deficiente calidad, la mayor parte de la deformación se producirá en la estructura del pavimento y por consiguiente obtendremos pequeños Radios de Curvatura.

Por lo antes mencionado deducimos que el Radio de Curvatura es una característica fundamental para determinar la magnitud de la deformación lineal por tracción, que sufren las capas del pavimento al aplicar una carga puntual o móvil.

3.- DETERMINACIÓN DE LA DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA

La deflexión característica es un parámetro estadístico empleado para la caracterización representativa de la magnitud de deformación de los pavimentos. Para su determinación es necesario contar con una base de datos de deflexiones máximas, del tramo que se requiere evaluar, y establecer los parámetros estadísticos de dichos datos. Se define con la siguiente expresión empírica:

$$D_c = D_p + t * \sigma \quad \text{ECUACION 3.6}$$

Dónde:

D_c : Deflexión característica.

D_p : Deflexión promedio de los valores individuales de D_o corregidos por temperatura y estacionalidad.

σ : Desviación estándar

t : Coeficiente que representa al porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica D_c .

Convencionalmente se utiliza un valor de $t=1.645$, lo que equivale a considerar que, solo un 5% del área total del pavimento, tendrá deflexiones mayores a D_c .

4.- DETERMINACIÓN DE LA DEFLEXIÓN ADMISIBLE

La deflexión admisible es un parámetro definido en función al tráfico de diseño, que establece un límite para la deflexión característica por encima del cual no se garantiza un comportamiento satisfactorio de la estructura durante el periodo considerado. La expresión analítica que define este parámetro es:

$$D_a = \left(\frac{1,15}{N_{18}} \right)^{1/4} \quad \text{ECUACION 3.7}$$

Dónde:

D_a : Deflexión admisible inicial (mm).

N_{18} : Número total de ejes equivalentes a 18 k (en millones)

Tabla 3. 2 CLASIFICACIÓN DEL ESTADO PAVIMENTOS CON RELACIÓN A LAS DEFLEXIONES

Rango	Medida de calificación
Muy bueno (entre 5,0 y 4,0)	$D_c/\Delta_{adm} < 0,5$
Bueno (entre 4,0 y 3,0)	$0,5 < D_c/\Delta_{adm} < 1,0$
Regular (entre 3,0 y 2,0)	$1,1 < D_c/\Delta_{adm} < 1,4$
Malo (entre 2,0 y 0,0)	$D_c/\Delta_{adm} > 1,4$

5.- DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

Para la determinación del módulo de elasticidad o módulo resiliente del suelo de subrasante se deberán seguir los siguientes pasos:

- a) De la curva de deflexión medida se selecciona el valor de la deflexión máxima D_o y una deflexión adicional D_r correspondiente a la distancia radial R .
- b) Se calcula la relación D_o/D_r .
- c) Con el valor de D_o/D_r se entra a Tablas de **ANEXO 6** y se determina el Radio de curvatura R_{50}
- d) Se calcula el producto $D_o \times R_{50}$, unidades (cm)

e) Se calcula el módulo resiliente de retrocálculo mediante la siguiente ecuación:

$$M_R = 1091314,96 (D_o * R50)^{-0,939} \quad (kg/cm^2)$$

ECUACION 3.8

Donde:

M_R : Módulo Resiliente

D_o : Deflexión en el punto inicial de carga (Deflexión máxima)

$R50$: Distancia radial

3.6.3 MÓDULO RESILIENTE A TRAVÉS DE CORRELACIONES MEDIANTE CBR (ENSAYO DE VALIDACIÓN)

3.6.3.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL CBR

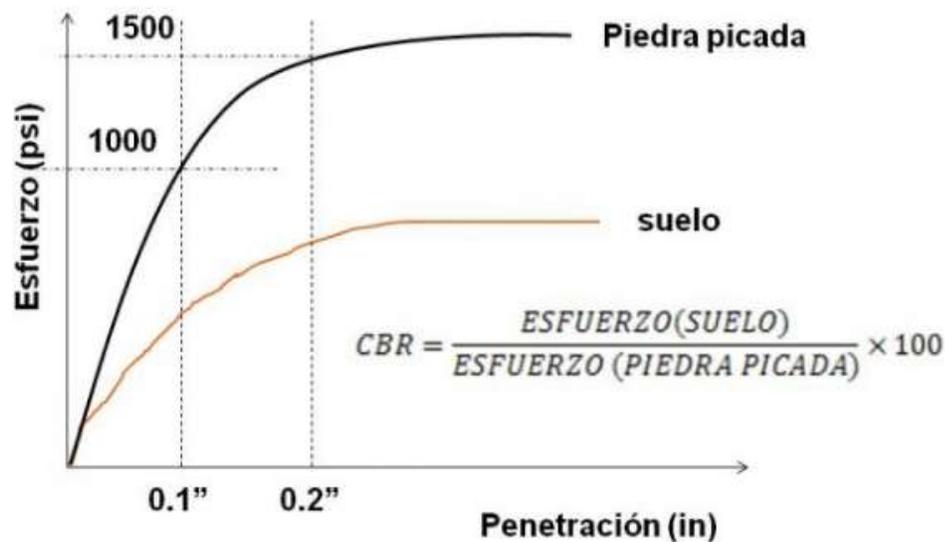
El CBR es un ensayo para evaluar la calidad de un material de suelo con base a su resistencia, mediada a través de un ensayo de placa a escala.

CBR significa en español Relación de Soporte California, por las siglas en inglés de “California Bearing Ratio”, aunque en algunos países se conoce también este ensayo como Valor Relativo del Soporte (VRS).

La finalidad de este ensayo CBR, es determinar la capacidad de soporte de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. El ensayo mide la resistencia al Esfuerzo Cortante (punzonamiento) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un % de relación de soporte.

El ensayo CBR es el ensayo más utilizado, el cual representa la relación, en porcentaje, entre el esfuerzo requerido para penetrar un pistón a cierta profundidad dentro del suelo ensayado y el esfuerzo requerido para penetrar un pistón igual, a la misma profundidad, dentro de una muestra patrón de piedra triturada.

FIGURA 3. 14: DEFINICIÓN DEL ENSAYO CBR



Fuente: Artículo “¿Qué es el CBR de un suelo?”, civilgweek.com.

$$CBR = \frac{\text{esfuerzo en el suelo ensayado}}{\text{esfuerzo en la muestra patrón}} * 100$$

ECUACIÓN 3.9

Para cada muestra preparada se debe dibujar una gráfica relacionando esfuerzo vs penetración del pistón y se determina el valor de CBR para diferentes penetraciones.

Los valores de índice de CBR oscilan entre 0 y 100. Los valores cercanos al 0% representan a suelos de pobre calidad, mientras que los más cercanos a 100% mejor es la capacidad portante del suelo. Valores por debajo de 6, deben descartarse.

TABLA 3. 3: CLASIFICACIÓN Y USOS DEL SUELO DE ACUERDO A LOS VALORES CBR

CBR	CLASIFICACIÓN CUALITATIVA DEL SUELO	USO
2 – 5	Muy mala	Subrasante
5 – 8	Mala	Subrasante
8 – 20	Regular – buena	Subrasante
20 – 30	Excelente	Subrasante
30 – 60	Buena	Subbase
60 – 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: Texto guía universidad – Materia Carreteras III

3.6.3.2 CORRELACIONES DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL ENSAYO CBR

Muchos investigadores se han preocupado por establecer correlaciones del módulo resiliente con otros ensayos utilizados normalmente en el diseño de los espesores de la estructura de pavimentos. Dentro de éstas, la más utilizada ha sido la correlación con el CBR. Es importante tener en cuenta que muchas de las correlaciones son más de tipo regional, lo que debe limitar el uso indiferente para cualquier tipo de suelo.

Solamente, con una gran experiencia y criterio, el ingeniero podrá seleccionar la correlación más adecuada para un proyecto específico.

A continuación se presentan algunas correlaciones empíricas entre el CBR y el valor del módulo resiliente.

(1) **CBR < 15% (Shell)**

$$M_R \text{ (MPa)} = 10 \text{ CBR} \quad K = \text{Tiene una dispersión de valores de 4 a 25}$$

$$M_R \text{ (psi)} = 1500 \text{ CBR} \quad K = \text{Tiene una dispersión de valores de 750 a 3000}$$

$$(2) \quad M_R \text{ (MPa)} = 17,6 \text{ CBR}^{0,64} \quad \text{(Powell et al)}$$

El Instituto del Asfalto mediante ensayos de laboratorio realizados en 1982, obtuvo las relaciones siguientes:

TABLA 3. 4: RELACIÓN CBR Y MÓDULO RESILIENTE

Tipo de Suelo	% CBR	M_R en (psi)
Arena	31	46500
Limo	20	30000
Arena magra	25	37500
Limo - arcilla	25	37500
Arcilla limosa	8	11400
Arcilla pesada	5	7800

Fuente: Texto guía de Pavimentos - Universidad Mayor de San Simón.

Para expresar la capacidad portante del suelo en términos del Valor de Soporte de California (CBR), se puede emplear además la conocida correlación establecida por Heukelom, según la cual:

$$M_R = k \text{ CBR} \quad \text{ECUACIÓN 3.10}$$

Donde:

M_R : Módulo elástico o resiliente (kg/cm²)

k : Coeficiente de correlación ($k=100$ para suelos granulares gruesos; $k=110$ para suelos granulares finos; $k=130$ para suelos finos plásticos).

CBR : Valor de Soporte de California (%).

El uso de esta correlación está ampliamente difundida en el espectro tecnológico mundial, y en particular forma parte del procedimiento para la estimación del módulo resiliente en el método para el diseño estructural de pavimentos AASHTO versión 1993.

En la última década el valor del Módulo resiliente ha sido reconocido como una forma adecuada de caracterizar los materiales no ligados. No obstante, aún requiere un mejor conocimiento sobre la forma más apropiada de llevar a cabo los ensayos de laboratorio, los modelos que representan esos resultados experimentales y la implementación de los mismos dentro de las rutinas de cálculo en los programas computacionales de dimensionamiento de pavimentos.

TABLA 3. 5: OTROS MÉTODOS MECÁNICO-EMPIRICOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

$M_r = 10 \text{ CBR}$ (MPa)	Método de diseño SHELL (de Heukelomp and Foster - 1960) (5).
$M_r = 38 \text{ CBR}^{0.711}$ (MPa)	U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (de Green and Hall - 1975) (4)
$M_r = 21 \text{ CBR}^{0.65}$ (MPa)	South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR) (6)
$M_r = 18 \text{ CBR}^{0.64}$ (MPa)	Transport and Road Research Laboratory (TRRL) (de Lister - 1987)(6)
$M_r = B \cdot \text{CBR}$ (MPa) 5.25 < B < 21 y B = 10.5 para CBR < 10	AASHTO Design Guide (7)
Para suelos cohesivos $M_r = 200 \cdot \text{DN}^{-0.5}$ (MPa)	IMAE (8)
Para materiales granulares $M_r = 400 \cdot \text{DN}^{-0.5}$ (MPa)	

Dónde:

M_R : Módulo Resiliente.

CBR : Valor soporte relativo (%).

DN : Índice de Penetración del Penetrómetro dinámico de Cono (DCP) en mm/golpe.

Si bien estas relaciones son una aproximación a la caracterización racional de este tipo de materiales, todas ellas tienen como principal limitación que proporcionan un valor único para el módulo resiliente, representativo de un modelo “lineal” (no dependiente del estado de tensiones aplicado). Sin embargo, numerosas evidencias presentadas en la bibliografía indican que los suelos y los materiales granulares muestran un comportamiento que depende del estado de tensiones aplicado, característico de los modelos “no lineales”.

Posteriormente, y con el objeto de incorporar este comportamiento no lineal, distintos investigadores han propuesto otros modelos que pueden ser clasificados como Modelos Bilineal, Semilogarítmico, Hiperbólico y Bi logarítmico Log-Log. Algunos de estos modelos tenso-dependientes se presentan en la Tabla 3.6.

Dónde:

σ_d : Tensor desviador aplicado, $(\sigma_1 - \sigma_3)$.

K_i , C_i y g_i : Constantes de ensayo.

σ_1 : Tensión principal mayor.

σ_3 : Presión de confinamiento lateral, o la tensión principal menor.

p'_{o} : Presión efectiva.

θ : Primer invariante de tensiones $(\theta = \sigma_d + 3 \sigma_3)$.

P_a : Presión atmosférica.

A, B, C : Constantes de ensayo.

τ_{oct} : Tensión de corte octaédrica.

TABLA 3. 6: MODELO TENSO DEPENDIENTES PARA LA DETERMINACIÓN DEL MR

<u>Modelo Bilineal</u>	$Mr = K_2 + K_3 (K_1 + \sigma_3) \quad K_1 \geq \sigma_3$ $Mr = K_2 + K_4 (\sigma_3 - K_1) \quad K_1 < \sigma_3$	Univ. de Illinois (Thompson and Robert 1979-Thompson 1989) (10)
<u>Modelo Semilogaritmico</u>	$\text{Log } Mr = C_1 + C_2 \cdot \sigma_3$	Universidad de Illinois.(4)
<u>Modelo Hiperbólico</u>	$Mr = (g_1 + g_2 \sigma_3) / \sigma_3$ (cambio de variable $y = Mr \cdot \sigma_3$)	Universidad de Tennessee (Boateng, Poku and Drumm-1989) (4)
<u>Modelos bilogaritmicos Log-log</u>	$Mr = A \sigma_3^{-B}$	Seed y otros, Univ. de California, 1962, para suelos cohesivos(11)
	$Mr = A (\sigma_3 / p'_o)^{-B}$	Brown y otros, Univ. de Nottingham, 1975, para suelos cohesivos (12).
	$Mr = A \sigma_3^B$	Monismith y Seed, Univ. de California, 1967, para suelos granulares y por Dunlap en la Univ. de Texas, en 1963.
	$Mr = A (\theta / p_a)^B$	Duncan y Chan, Univ. de California, 1970, para suelos granulares (14).
	$Mr = A \theta^B$	Hicks y Monismith (1971), Kalcheff y Hicks (1973) y Allen y Thompson, Univ. de Illinois, 1974, (15)
	$Mr = A \sigma_3^{-B} \theta^C$	Uzan, 1985 en la Univ. de Maryland (16) (17)
	$Mr = K_2 + K_3 (K_1 + \sigma_3) \cdot \sigma_3^{K5}$ Para $K_1 > \sigma_3$ $Mr = K_2 + K_4 (\sigma_3 - K_1) \cdot \sigma_3^{K5}$ Para $K_1 < \sigma_3$	Aranovich, COPPE, UFRJ, Univ. Federal de Rio de Janeiro, 1985 (18), modelo bilineal, incorporando la dependencia con σ_3
	$Mr = A \sigma_3^{-B} \sigma_3^C$	Laboratorio Vial - Imae (Angelone y Martínez- 1990 - FCEIA-UNR (19))
$Mr = A \tau_{oct}^{-B} \theta^C$	Shackel, Australian Road Research 1973, (17). En 1992, Witczak y otros, Univ. de Maryland	

Al considerarse el Modulo de Resiliencia (MR) como una medida de la rigidez del suelo de subrasante, se emplea una ecuación para su cálculo, que la correlaciona con el CBR, recomendada por el MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide):

$$Mr(\text{psi}) = 2555 * CBR^{0.64}$$

ECUACION 3.11

A continuación el cálculo de módulo de resiliencia para diferentes tipos de CBR.

Tabla 3. 7 MÓDULO DE RESILENCIA OBTENIDO POR CORRELACIÓN CON CBR

CBR% SUBRASANTE	MÓDULO RESILENTE SUBRASANTE (MR) (PSI)	MÓDULO RESILENTE SUBRASANTE (MR) (MPA)	CBR% SUBRASANTE	MÓDULO RESILENTE SUBRASANTE (MR) (PSI)	MÓDULO RESILENTE SUBRASANTE (MR) (MPA)
6	8,043.00	55.45	19	16,819.00	115.96
7	8,877.00	61.20	20	17,380.00	119.83
8	9,669.00	66.67	21	17,931.00	123.63
9	10,426.00	71.88	22	18,473.00	127.37
10	11,153.00	76.90	23	19,006.00	131.04
11	11,854.00	81.73	24	19,531.00	134.66
12	12,533.00	86.41	25	20,048.00	138.23
13	13,192.00	90.96	26	20,558.00	141.74
14	13,833.00	95.38	27	21,060.00	145.20
15	14,457.00	99.68	28	21,556.00	148.62
16	15,067.00	103.88	29	22,046.00	152.00
17	15,663.00	107.99	30	22,529.00	155.33
18	16,247.00	112.02			

Una vez definido el valor del CBR de diseño, para cada sector de características homogéneas, se clasificará a que categoría de subrasante, según lo siguiente:

TABLA 3. 8 CATEGORIAS DE SUBRASANTE

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

Para el ensayo de validación se usará la siguiente normativa:

- S0302. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (ASTM D422 AASHTO T88)
- S0404. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR DE LABORATORIO) (ASTM D1883 AASHTO T193)

El ensayo de validación se realizará a través de la obtención de muestras de la subrasante.

A partir de los resultados obtenidos con los ensayos realizaremos un análisis de los resultados por ambos métodos