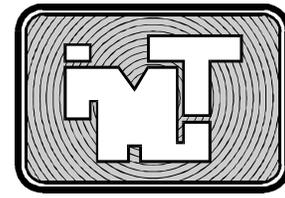
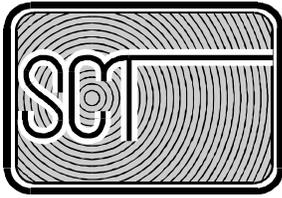


ISSN 0188-7297



MODULOS DE RESILIENCIA EN SUELOS FINOS Y MATERIALES GRANULARES

Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Instituto Mexicano del Transporte

**Publicación Técnica No. 142
Sanfandila, Qro. 2001**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Módulos de resiliencia en suelos
finos y materiales granulares**

**Publicación Técnica No. 142
Sanfandila, Qro. 2000**

El presente trabajo ha sido elaborado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Paul Garnica Anguas, Natalia Pérez García y José Antonio Gómez López.

Resumen

Las metodologías actuales para diseño de pavimentos consideran que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera o aeropista, es el parámetro denominado Módulo de Resiliencia. Tales son los casos del método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el método del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por citar los más comúnmente empleados en la práctica mexicana.

Es por ello que el especialista encargado del diseño, construcción y conservación de tales estructuras, debe de tener el conocimiento básico de lo que el parámetro módulo de resiliencia representa, de la prueba de laboratorio a partir de la cual 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. Tales son los objetivos de este trabajo.

Abstract

The actual methodologies of pavement design take into account the resilient modulus like the fundamental property to characterize the common materials that conform the structural section of a pavement. For example the AASHTO methodology (American Association of State of Highway and Transportation Officials) and the methodology of the Institute of Engineering (UNAM) among others.

This is why the specialist in design, construction and rehabilitation of such structures, must keep in mind the basic knowledge of what resilient modulus represents, the laboratory test to determine this parameter and the factors that need to be considered in the selection of a suitable value to use in any methodology. These are the objectives of this document.

Resumen Ejecutivo

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tránsito vehicular. 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, se 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.

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. Bajo carga móvil la deformación permanente 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, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente. De aquí se desprende el concepto de módulo de resiliencia, el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable.

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

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. Los principales son: número de aplicaciones del esfuerzo, tixotropía, magnitud del esfuerzo desviador, método de compactación y condiciones de compactación.

Se observó que a medida que el número de aplicaciones del esfuerzo desviador se incrementa, el módulo de resiliencia tiende a incrementarse también.

Por otro lado, Seed et al (1962) reportó que el efecto de tixotropía en el módulo de resiliencia varía con el número de repeticiones. A menos de 10,000 repeticiones, un incremento en el tiempo de almacenamiento previo a la prueba causa un aumento en el módulo de resiliencia; pero para mayor número de repeticiones los valores ya no son afectados significativamente por el periodo de almacenamiento.

La magnitud del esfuerzo desviador es otro de los factores que afectan a este parámetro. Se puede observar que a medida que el esfuerzo desviador se

incrementa, el módulo de resiliencia tiende a disminuir, pero este decremento ya no se aprecia tanto a niveles de esfuerzo desviador mayores a 40 kPa.

También es claro que la magnitud del módulo de resiliencia, para un valor de contenido de agua dado, aumenta con el peso volumétrico hasta cierto valor y después disminuye para grados de saturación elevados, en especial después del correspondiente a los óptimos de compactación.

Así entonces, la definición del valor para el módulo de resiliencia de un suelo debe tomar en cuenta los factores mencionados.

El lector deberá de tener en consideración que no se puede asignar un solo valor de módulo de resiliencia a un suelo. Se tendrá que determinar entonces un rango de variación apropiado.

Por otro lado, los factores que afectan el módulo de resiliencia de materiales granulares son: tipo de material, tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico, granulometría, magnitud del esfuerzo aplicado, contenido de agua, etc.

Por lo anterior, el valor del módulo de resiliencia asignado a un material granular también deberá de tomar en cuenta los factores anteriores.

Otro aspecto tratado en el trabajo son las metodologías para el diseño de pavimentos tanto rígidos como flexibles que consideran el parámetro módulo de resiliencia como la base para la caracterización del comportamiento de suelos y materiales granulares. Ya que este parámetro es utilizado en varias metodologías su selección se debe realizar con sumo cuidado, tomando en cuenta los factores que el él influyen.

Pareciera que la aplicación del módulo de resiliencia es simple, pero su uso se complica ya que no existe un valor único para un suelo, sino que hay un número infinito de valores dependiendo de las condiciones de prueba.

Por lo tanto, el valor apropiado de módulo de resiliencia debiera ser determinado para las condiciones que corresponden a la condición final del suelo y de acuerdo con el nivel de esfuerzos aplicados por un vehículo. Idealmente, este sería el caso. Sin embargo, la determinación del módulo de resiliencia de la forma mencionada anteriormente, no es correcta cuando se utiliza el procedimiento para diseño de pavimentos AASHTO, actualmente el procedimiento de prueba recomienda utilizar una presión de confinamiento de 3 psi para un cierto rango de esfuerzos desviadores.

Finalmente, considerando que la mayoría de las agencias, instituciones y empresas dedicadas al diseño de pavimentos no cuentan con el equipo para

realizar la prueba de módulo de resiliencia, se presentan algunas correlaciones entre este parámetro y otras características como el valor relativo de soporte y el valor de resistencia R.

Cabe señalar que todos los valores de módulo de resiliencia que se indican en el documento, son sólo valores de referencia y en ningún caso deben de usarse para diseños particulares. Siempre se deberá recurrir al estudio experimental del suelo en cuestión en cada problema particular.

Índice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
Introducción	1

CAPITULO 1 Caracterización de la sollicitación en pavimentos.

1	Naturaleza cíclica de las cargas que actúan en un pavimento	3
2	Mediciones de esfuerzos y deformaciones en casos reales	4
3	Influencia de la velocidad del vehículo en el tiempo de aplicación de la carga	7
4	Mecanismo de deformación de un material sujeto a carga cíclica	8
5	El concepto de Módulo de Resiliencia	10

CAPITULO 2 Factores que afectan el Módulo de Resiliencia en Suelos Cohesivos

1	Número de aplicaciones del esfuerzo	13
2	Tixotropía	14
3	Magnitud del esfuerzo desviador.	15
4	Método de compactación	16
5	Grado de compactación y contenido de agua	18

CAPITULO 3 Factores que afectan el Módulo de Resiliencia en Materiales Granulares

1	Tipo de material	21
2	Tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico y granulometría	23
3	Magnitud del esfuerzo aplicado	24
4	Contenido de agua	26

CAPITULO 4 Utilización de Módulo de Resiliencia.

1	Método de diseño de pavimentos AASHTO	31
2	Del tramo de prueba AASHO a la Guía AASHTO	33
3	Métodos mecanicistas	36
4	Relaciones constitutivas para suelos finos y materiales granulares utilizados en los métodos de diseño mecanicistas	37
4.1	Suelos finos	37
4.2	Materiales granulares	40
4.3	Constantes no lineales para materiales granulares	40
5	Estimación del valor de módulo de resiliencia	41
	Conclusiones	45
	Bibliografía	47

Capítulo 1

Caracterización de la sollicitación en pavimentos

1 *Naturaleza cíclica de las cargas que actúan en un pavimento*

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tránsito vehicular.

El patrón de esfuerzos inducidos a una estructura de pavimento como resultado del tráfico de vehículos es muy complejo. Un elemento de pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes.

La Figura 1.1 muestra el esquema de una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre la cual una carga se mueve a velocidad constante.

El estado de esfuerzos experimentado por el punto P -debido a la carga en el punto A- puede observarse en la Figura 1.1(a); en este punto actúan tanto esfuerzos normales como esfuerzos cortantes.

Cuando la carga se mueve al punto B, los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan los esfuerzos normales, como se presenta en la Figura 1.1(b); en este punto se tiene un estado triaxial de esfuerzos, debido a que se presentan sólo esfuerzos normales. La dirección de los esfuerzos cortantes originados en el punto C es contraria a la dirección de los esfuerzos originados en el punto A, como se muestra en la Figura 1.1(c).

En laboratorio se realizan pruebas triaxiales simulando la condición B tratando de simular las condiciones más desfavorables. Durante las pruebas debe aplicarse una presión de confinamiento que varíe con el esfuerzo desviador ; sin embargo es difícil simular en laboratorio este cambio, por lo que la presión de confinamiento se mantiene constante y el esfuerzo desviador es el que se aplica en forma repetida.

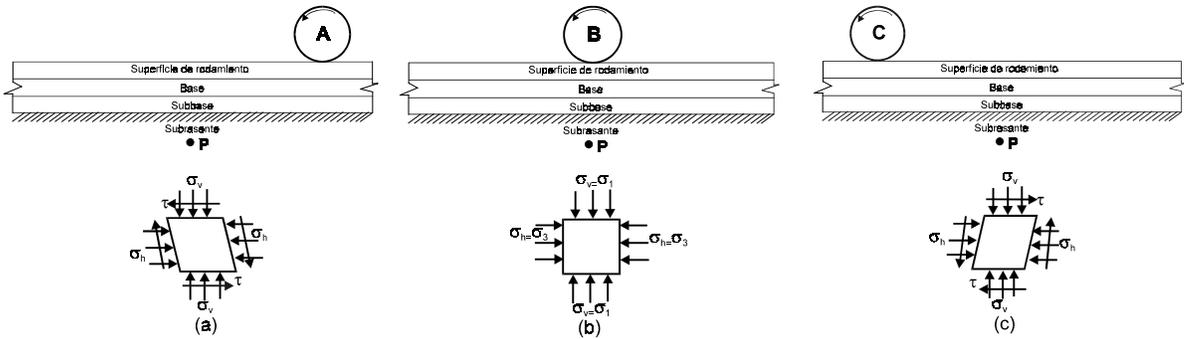


Figura 1.1 Estado de esfuerzos en la subrasante

2 Mediciones de esfuerzos y deformaciones en casos reales

Dada la forma tradicional de estructuración de los materiales que conforman el pavimento, la deformabilidad suele crecer hacia abajo. La deformabilidad interesa sobre todo a niveles profundos, pues es relativamente fácil que las capas superiores tengan niveles de deformación tolerables aún para los altos esfuerzos que en ellas actúan.

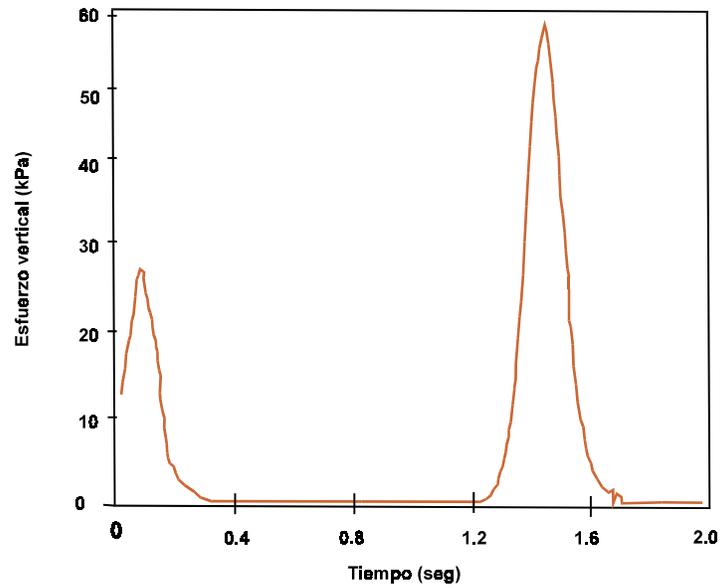
En pavimentos, las deformaciones interesan desde dos puntos de vista : por un lado, las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla y -por otro- porque es sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho (Rico A., Del Castillo H., 1992).

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, se 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.

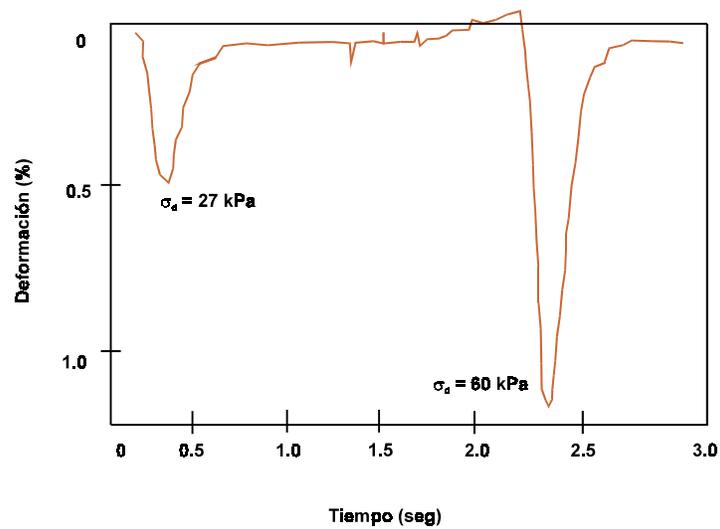
Brown (1996), reporta gráficas de esfuerzos y deformaciones obtenidas mediante la instrumentación de una estructura de pavimento sujeta a la aplicación de carga repetida por medio del paso de un tractocamión. Las Figuras 1.2(a) y 1.2(b) corresponden a las mediciones antes mencionadas en un punto ubicado a 35 cm de profundidad con respecto a la superficie de rodamiento.

Se puede apreciar que la carga que transmiten los vehículos es en forma de pulsos, cuya magnitud depende de la presión de inflado de las llantas y de la carga por eje ; además, la duración de aplicación del pulso depende de la velocidad y del nivel de tránsito diario.

También se observa que la máxima deformación registrada corresponde al valor del esfuerzo máximo.



(a)



(b)

Figura 1.2 Variación típica de la deformación vertical resiliente en un pavimento con carpeta asfáltica (Brown et al., 1987)

Otro ejemplo de mediciones de esfuerzos en campo se ilustra en la Figura 1.3 en donde se aprecia la variación del esfuerzo vertical medido en la capa subrasante de un pavimento terminado, con carpeta de 165 mm de espesor.

De esta figura se puede observar que el máximo esfuerzo registrado fue de aproximadamente 16 kPa.

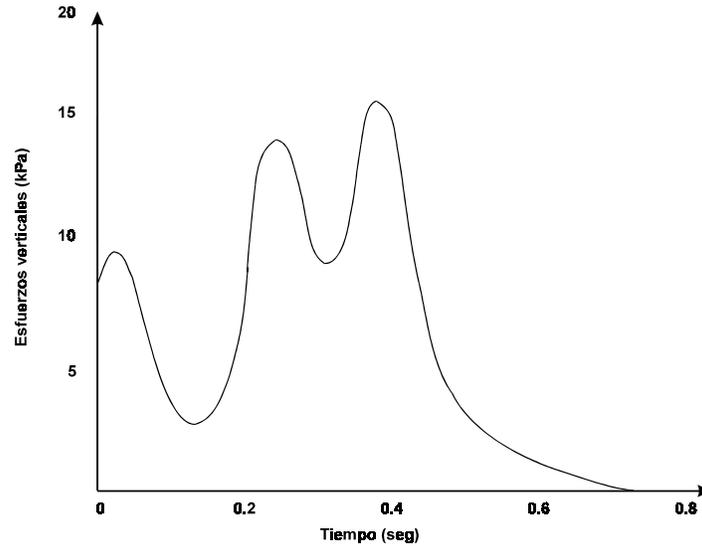


Figura 1.3 Esfuerzos verticales en subrasante bajo la carpeta de 165 mm (Brown, 1996)

En otros estudios se observó que en pavimentos parcialmente construidos, sujetos a las cargas del equipo pesado de construcción, los niveles de esfuerzo son mucho mayores (Figura 1.4). Estos datos fueron obtenidos en un tramo de prueba en una arcilla blanda (Bothkennar, Suecia).

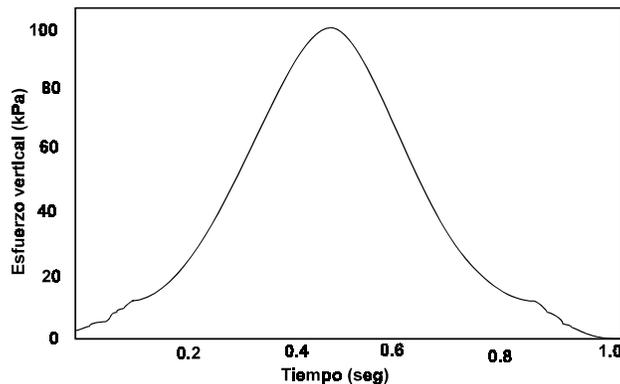


Figura 1.4 Medidas de esfuerzos verticales en subrasantes bajo una capa granular de 350 mm de espesor (Brown, 1996)

3 Influencia de la velocidad del vehículo en el tiempo de aplicación de carga

Con base en los puntos señalados anteriormente, se ha supuesto que los esfuerzos aplicados por una llanta en movimiento se aproximan a una forma

senoidal, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto al que se está haciendo referencia.

Barksdale (1971) investigó sobre los tiempos de pulsación a diferentes profundidades bajo la superficie del pavimento, así como también a diferentes velocidades. Estos resultados se muestran en la Figura 1.5. Se observa cómo a mayor velocidad del vehículo el tiempo de aplicación de la carga disminuye; también es evidente que simulando el esfuerzo vertical con una onda triangular, los tiempos de aplicación aumentan. También se puede apreciar que el tiempo de duración de la carga aumenta con la profundidad.

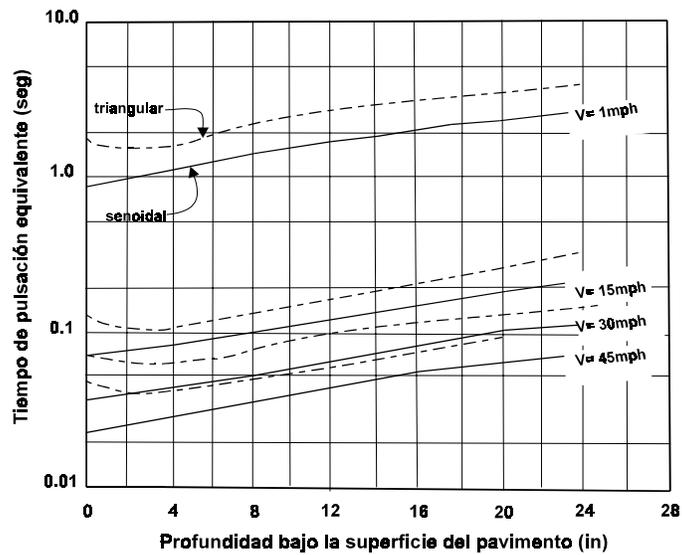


Figura 1.5 Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con carga senoidal y triangular (1 in = 25.4 mm y 1 mph = 1.6 km/hr) (Barksdale 1971)

McLean (1974) determinó el tiempo de carga simulándola con una onda cuadrada (Figura 1.6), sobre la cual sobrepuso los resultados obtenidos por Barksdale (carga triangular y una velocidad de 30 mph). Se puede ver que el tiempo de pulsación basado en una onda cuadrada es más pequeño que la basada en una triangular.

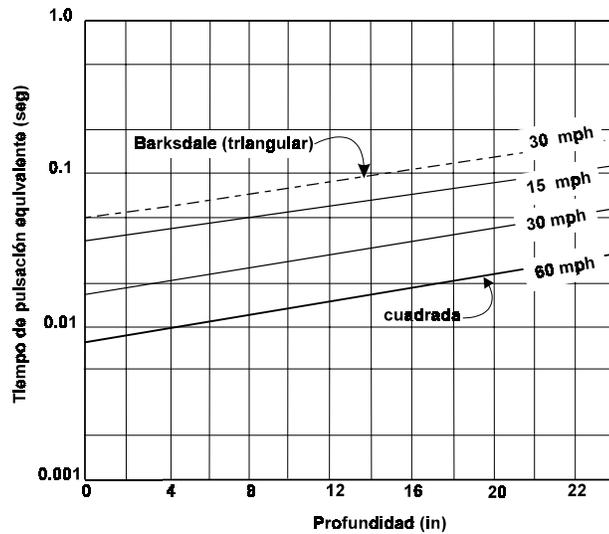


Figura 1.6 Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con onda tipo cuadrada (McLean, 1974)

En vista de que la velocidad del vehículo no es constante, se recomienda -con fines de estandarización- la onda senoidal con tiempo de duración de 0.1 segundo de aplicación de carga y un periodo de reposo de 0.9 segundos (Huang, 1993).

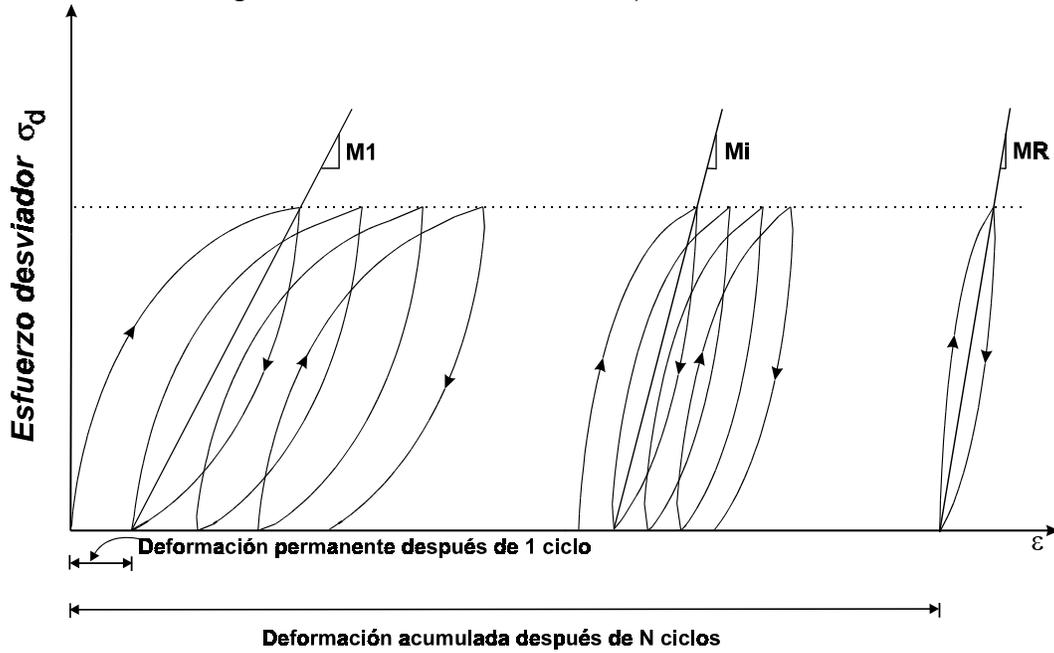
4 Mecanismo de deformación de un material sujeto a carga cíclica

De acuerdo con el diseño estructural del pavimento, el tipo y la magnitud de las sollicitaciones, repeticiones de carga acumuladas, características asociadas al clima y la localización de las diferentes capas de material; el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo puede ser de dos tipos : **resiliente y plástico**.

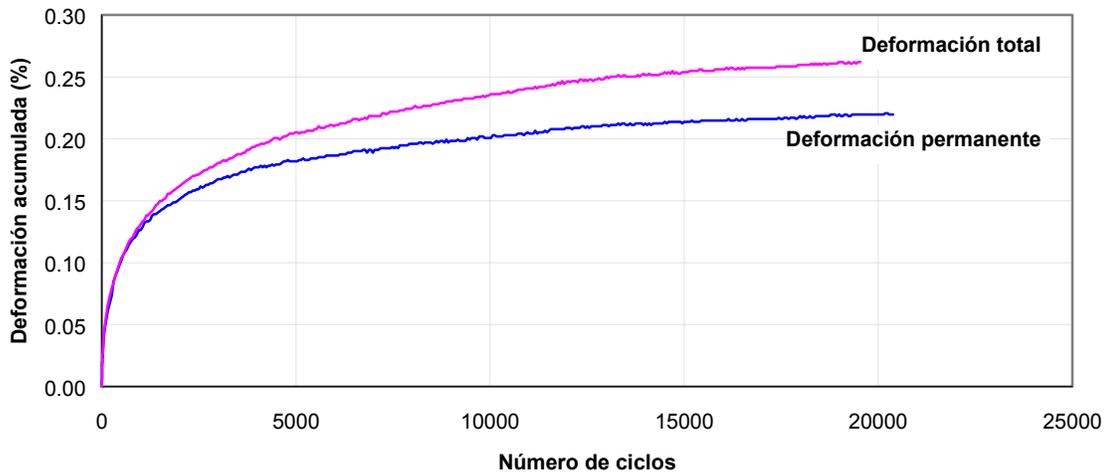
Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. Bajo carga móvil y repetida, la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles. Paradójicamente, este proceso suele ir acompañado de una “densificación” de los materiales, de manera que el pavimento fallado puede ser más resistente que el original.

En la Figura 1.7(a) se ilustra el mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando ; debe hacerse notar el hecho de que en los ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales.

La muestra de suelo llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente (en donde el módulo secante es igual al módulo de resiliencia).



(a)



(b)

Figura 1.7 Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador

En la Figura 1.7(b) se muestra la acumulación de las deformaciones total y plástica durante un cierto número de ciclos.

La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en materiales con

resistencia a la tensión -carpetas asfálticas o capas estabilizadas- colocados en la parte superior de la estructura, en los que se puede llegar a generar una falla de agrietamiento por fatiga si el número de repeticiones es importante y los materiales son susceptibles a este efecto.

La importancia que la deformación tiene en los pavimentos es debida a que en los métodos de diseño actuales la deformabilidad es el punto básico a considerar y, de hecho, la mayoría de ellos se centran en mantenerla en límites razonables.

5 El concepto de Módulo de Resiliencia

Hveem y Carmany (1948) reconocieron que el módulo dinámico de elasticidad para subrasantes es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento (por fatiga) de las superficies de asfalto y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación.

En 1955, Hveem desarrolló el tema “comportamiento resiliente de los pavimentos”. El propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes.

Seed y sus colegas de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo de resiliencia (Seed et al 1955).

Este término fue cambiado más tarde por el de módulo resiliente (Seed et al, 1962), el cual fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se representa como sigue :

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}} \quad (1)$$

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 a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece

constante se le llama **módulo de resiliencia** (Figura 1.7 (a)). 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.

Capítulo 2

Factores que afectan el módulo de resiliencia en suelos cohesivos

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. Los principales se discuten a continuación :

1 Número de aplicaciones del esfuerzo

Para analizar el comportamiento del módulo de resiliencia de un suelo, se sometieron varios especímenes de arcilla compactada a pruebas de módulo de resiliencia con la secuencia recomendada por el Programa Estratégico de Investigación de carreteras (SHRP); todos los ensayos se llevaron a cabo utilizando onda tipo senoidal con tiempo de aplicación de carga de 0.1 s y 0.9 s de periodo de reposo.

La Figura 2.1 muestra un ensaye realizado sobre una muestra de arcilla compactada con un peso volumétrico seco de 12.31 kN/m^3 y contenido de agua de 20.10 %. Se puede notar una variación importante del módulo durante todo el proceso de carga cíclica. Al aumentar el número de ciclos parece tender a un valor constante.

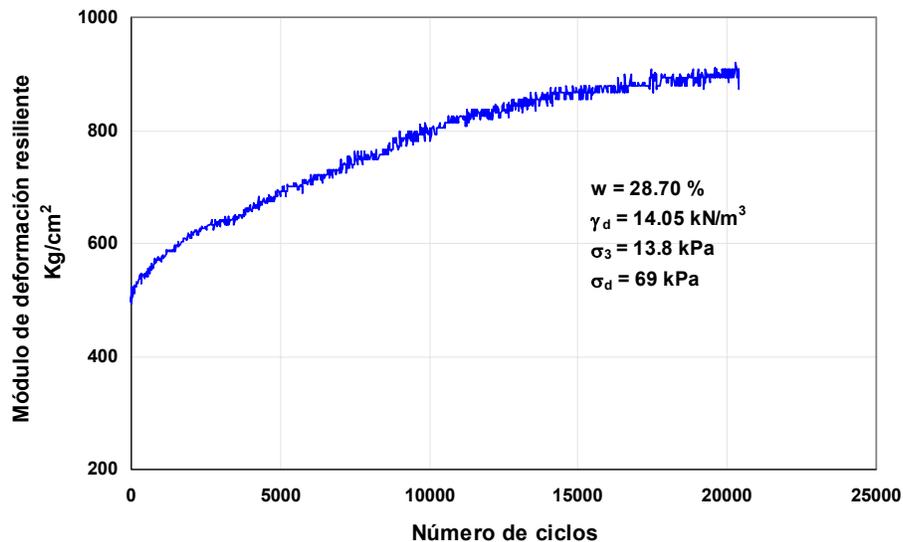


Figura 2.1 Variación del módulo con el número de ciclos

2 Tixotropía

En estudios previos sobre arcillas compactadas se ha encontrado que las muestras compactadas a altos grados de saturación, particularmente por métodos de compactación que inducen cortantes en el suelo, muestran un pronunciado incremento en la resistencia si se permite un periodo de reposo. Este incremento en resistencia es atribuido a la tixotropía y al cambio progresivo en los arreglos de las partículas y presiones de poro del agua dentro del suelo en un tiempo prolongado. Efectos similares han sido observados en estudios acerca de las características resilientes de arcillas compactadas ; como se ilustra en la Figura 2.2 para muestras de subrasante del tramo de prueba AASHO preparadas por amasado.

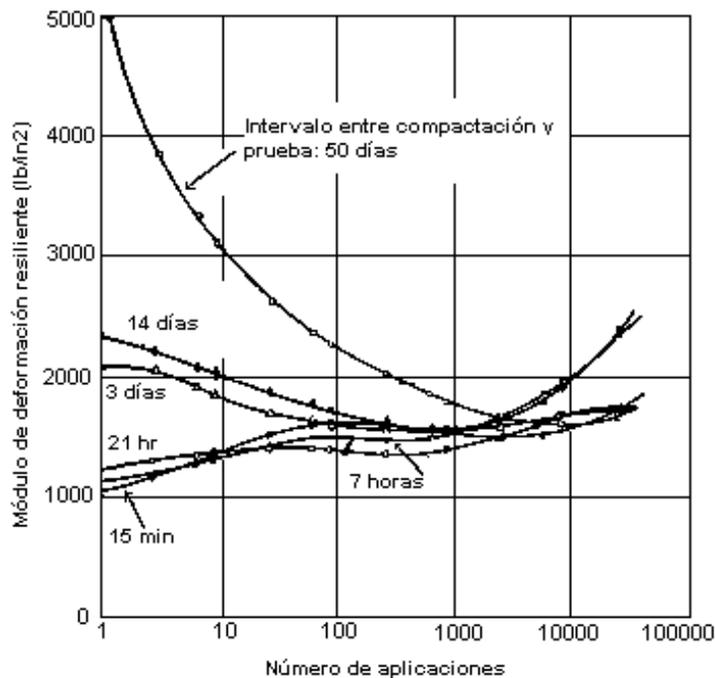


Figura 2.2 Efecto de la tixotropía en las características de resiliencia de un suelo de subrasante en el tramo de prueba AASHO (Seed, Chan and Lee)

En el trabajo de Seed et al (1962) se reportaron muestras que se prepararon con características semejantes y que fueron ensayadas bajo las mismas condiciones a intervalos de tiempo de 15 minutos, 7 horas, 21 horas, 3 días, 14 días y 50 días después de la compactación. El efecto de la tixotropía en el módulo resiliente varía con el número de repeticiones. A menos de 10,000 aplicaciones, un incremento en el tiempo de almacenamiento previo a la prueba causa un aumento en el módulo resiliente ; pero para mayor número de repeticiones los valores ya no son afectados significativamente por el periodo de almacenamiento. Esto probablemente es debido a que las deformaciones inducidas por la carga repetida progresivamente destruyen en gran medida la resistencia ganada. Sin embargo,

vale la pena hacer notar que para un bajo número de repeticiones de carga y el nivel de esfuerzo usado en estas pruebas, la diferencia en el módulo de resiliencia entre muestras probadas inmediatamente o un día después de la compactación y muestras probadas después de 50 días puede variar entre 300 y 400%.

3 Magnitud del esfuerzo desviador

La Figura 2.3 fue generada con una muestra arcillosa que fue compactada con un contenido de agua de 29.9 % y para la cual se obtuvo un peso volumétrico de 13.93 kN/m³.

De la Figura 2.3 se puede notar la clara dependencia que presenta el módulo de resiliencia del esfuerzo desviador aplicado y la poca influencia del esfuerzo de confinamiento en el mismo módulo.

Por otro lado, los valores del módulo de resiliencia decrecen rápidamente con el incremento del esfuerzo desviador. Sin embargo, la variación ya no se aprecia tanto a niveles de esfuerzo desviador mayores a 40 kPa.

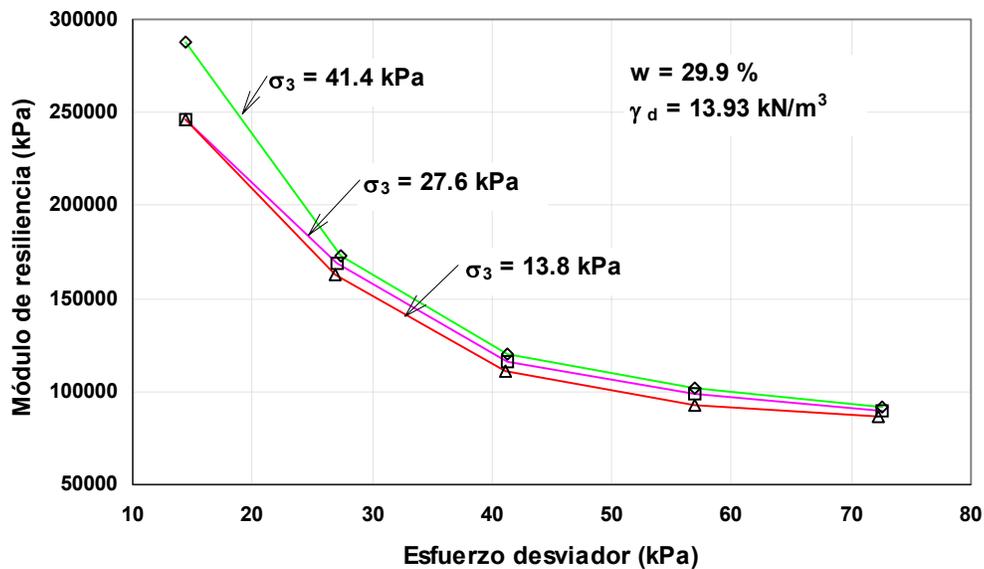


Figura 2.3 Efecto de la intensidad del esfuerzo en la características de resiliencia

Generalmente para valorar el módulo de resiliencia se utiliza un esfuerzo desviador de 69 kPa (10 psi). Sin embargo, el esfuerzo desviador debe de valorarse de acuerdo con el estado de esfuerzos que ocurre en la subrasante.

4 Método de compactación

Estudios recientes de las características de resistencia de las arcillas compactadas han mostrado que, para muchos suelos, el método de compactación tiene un profundo efecto en el arreglo que adoptan las partículas de las arcillas.

Los cambios en la estructura parecen ser debidos, en gran medida, al cortante inducido en el suelo durante la compactación. Por ejemplo, cuando las muestras se compactan a bajos grados de saturación no hay una deformación apreciable inducida por el método de compactación y las partículas de arcilla asumen un arreglo al azar, como se indica en la Figura 2.4. Este tipo de arreglo de las partículas ha sido llamado estructura floculada. Sin embargo, cuando las muestras son compactadas a altos grados de saturación (arriba de 85%), como ocurre en el lado húmedo de la curva de compactación, la resistencia al esfuerzo cortante inducida durante la compactación puede variar considerablemente. Para suelos compactados por medio de amasado, el pisón penetra en el suelo y causa levantamiento adyacente de la superficie del suelo como resultado de las deformaciones. Las partículas de arcilla tienden a alinearse en forma paralela, como se indica en la Figura 2.4(a). Este tipo de estructura es llamada estructura dispersa. Sin embargo, si el mismo suelo es compactado estáticamente no hay posibilidad de que exista ningún desplazamiento lateral y las partículas tienden a conservar su estructura floculada, como se muestra en la Figura 2.4(b).

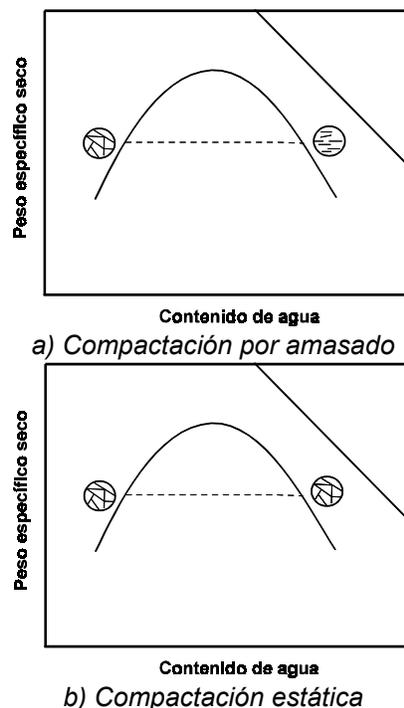


Figura 2.4 Orientación de las partículas en arcillas compactadas

En la literatura se presentan una gran cantidad de datos experimentales que sustentan lo comentado anteriormente.

Al comparar la resistencia a la compresión simple que se obtuvo en muestras compactadas (del lado seco) con métodos estático y por amasado, es posible apreciar una diferencia poco significativa; sin embargo, si a las muestras compactadas -mediante ambos métodos- se les incrementa el grado de saturación a valores cercanos al 100%, las resistencias presentan una gran variación. Lo mismo se puede decir de las características de resiliencia de las arcillas compactadas. La Figura 2.5 muestra los valores de módulo de resiliencia desarrollados a 60000 aplicaciones, en muestras preparadas para toda la curva de compactación. Para contenidos de agua entre 16 y 18% la variación en módulos de resiliencia obtenidos por ambos métodos presentan diferencias muy marcadas.

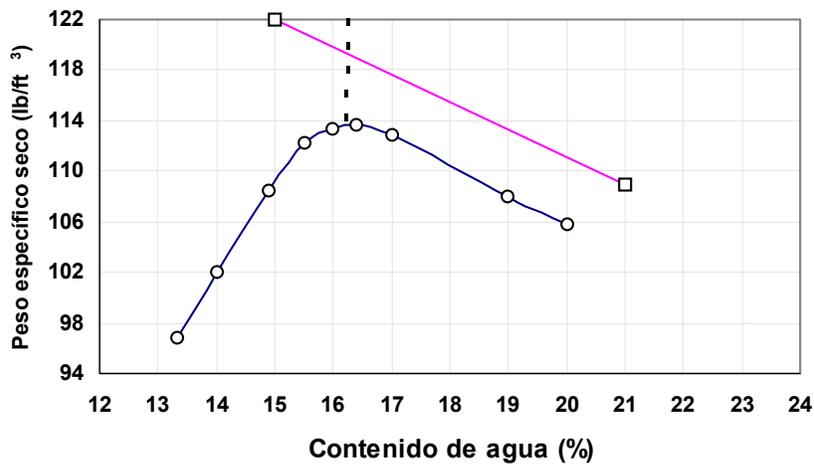
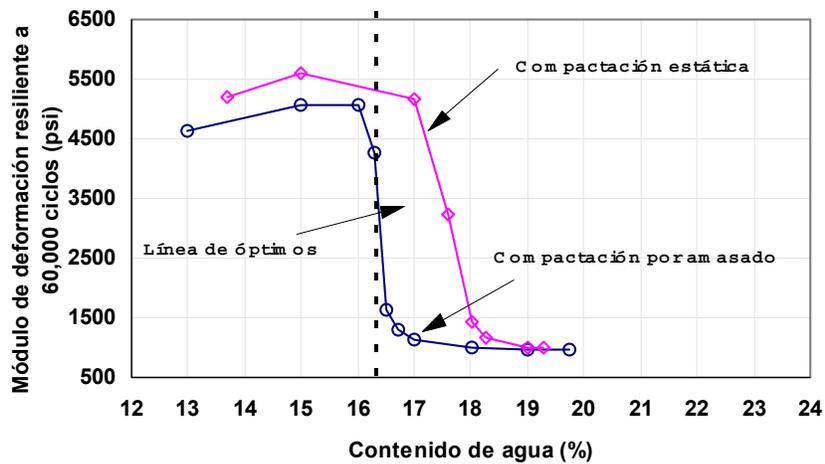


Figura 2.5 Efecto del método de compactación en las características de resiliencia
 5 Grado de compactación y contenido de agua

Se sabe que el módulo de resiliencia de los suelos no es una propiedad constante, sino que es dependiente de varios factores, entre otros el peso específico seco y el contenido de agua.

Se llevó a cabo un estudio, en el cual se probaron 35 muestras de arcilla de alta compresibilidad. Los pesos volumétricos variaron entre 12 y 15 kN/m³ y los contenidos de agua entre 14 y 36%. Las muestras se sometieron a 20000 ciclos con un esfuerzo desviador de 69 kPa y una presión de confinamiento de 13.8 kPa.

El rango de variación del parámetro módulo de resiliencia fue de 33800 kPa a 186000 kPa, para los rangos de contenido de agua y peso específico seco utilizados.

Tomando como base los datos de módulo de resiliencia obtenidos, se trazaron líneas isocaracterísticas de igual valor de módulo de resiliencia y así observar su comportamiento en el espacio de compactación. Dicho comportamiento se muestra en la Figura 2.6.

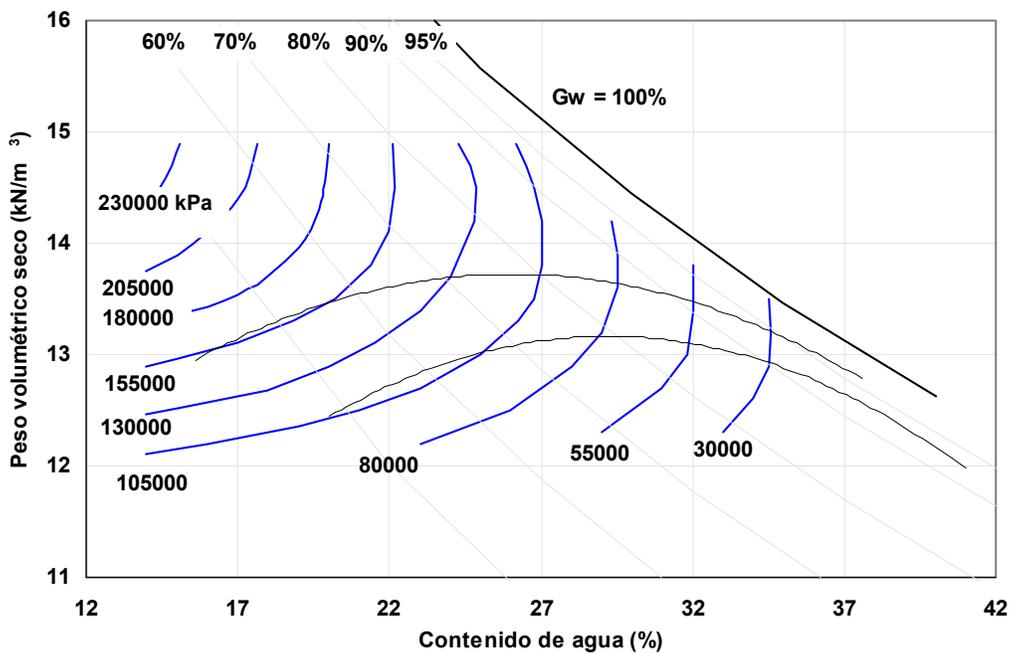


Figura 2.6 Líneas isocaracterísticas para las condiciones de $\sigma_d = 69$ kPa y $\sigma_3 = 13.8$ kPa

La figura anterior muestra claramente la influencia del contenido de agua y del peso específico seco en la magnitud del módulo de resiliencia. Es claro que la magnitud del módulo de resiliencia para un valor de contenido de agua dado, aumenta con el peso volumétrico hasta cierto valor y después

disminuye para grados de saturación elevados, en especial después del correspondiente a los óptimos de compactación (Figura 2.7).

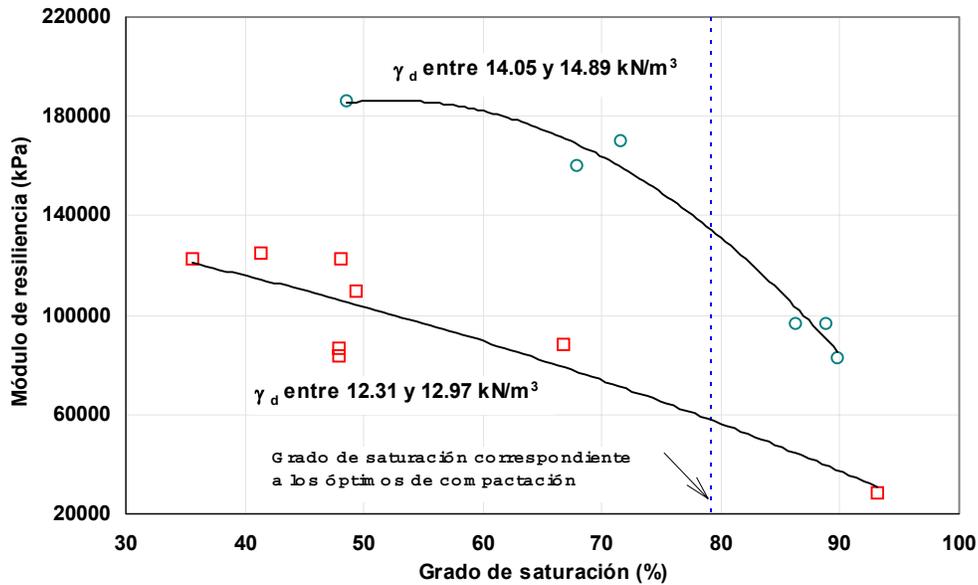


Figura 2.7 Comportamiento del módulo de resiliencia respecto al grado de saturación

Así entonces, la definición del valor para el módulo de resiliencia de un suelo debe de tomar en cuenta los factores mencionados.

El lector debe tener en consideración que no se puede asignar un solo valor de módulo de resiliencia a un suelo. Se tendrá que determinar entonces un rango de variación apropiado.

Capítulo 3

Factores que afectan el Módulo de Resiliencia en Materiales Granulares

Varios son los factores que afectan el módulo de resiliencia de un material granular, los cuales pueden clasificarse en dos grupos: en uno se pueden considerar los factores inherentes al tipo de material y sus características y, en el otro, el nivel de esfuerzos aplicado, duración del pulso de carga y el procedimiento de prueba general.

1 Tipo de material

En relación con el tipo de material y sus características, influyen la naturaleza de la roca, el grado de sanidad (índice de solidez de los granos) y tamaño máximo de las partículas, su angulosidad y rugosidad, composición granulométrica, etc.

Musharraf et al (1994) llevaron a cabo un estudio en el que utilizaron seis tipos de agregados los cuales consistieron de tres calizas, una arenisca, un granito y una riolita, estos materiales son los comúnmente usados en la construcción de bases y subbases de pavimento de carreteras en Oklahoma, USA.

En las Figuras 3.1 y 3.2 se presentan las curvas granulométricas de los materiales estudiados.

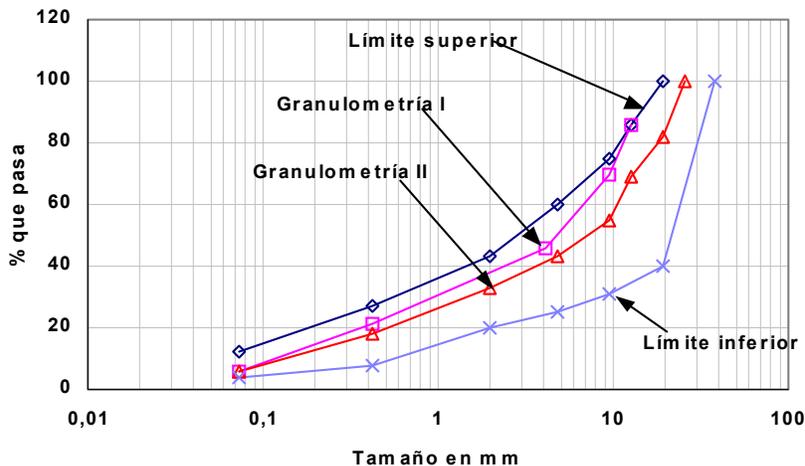


Figura 3.1 Granulometrías I y II utilizadas en el estudio (Materiales tipo A)

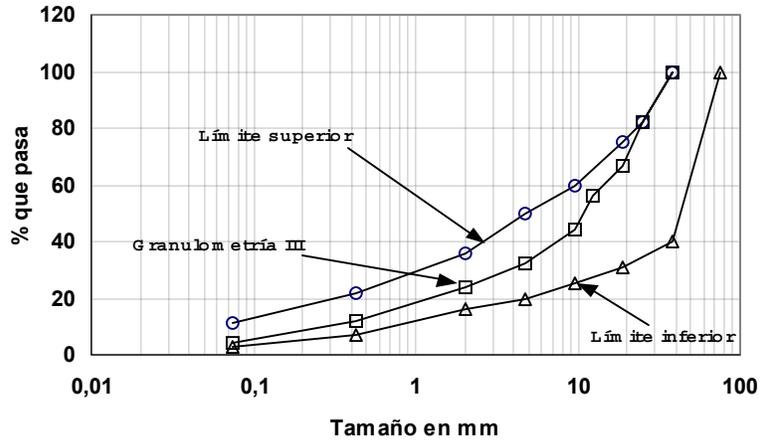


Figura 3.2 Material tipo B (Granulometría III)

En la Figura 3.3 (Musharraf, et al, 1994) se presentan valores de módulo de resiliencia obtenidos al probar los seis materiales granulares mencionados anteriormente.

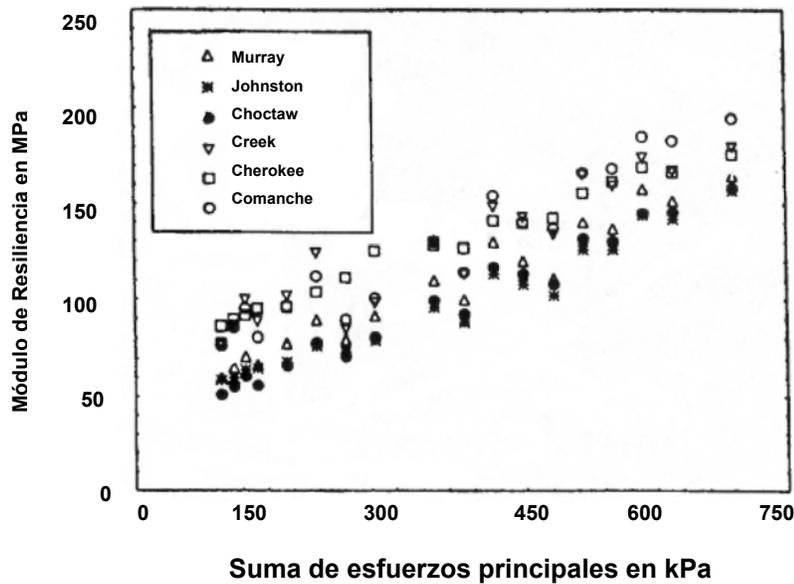


Figura 3.3 Módulos de resiliencia obtenidos en seis tipos de agregados

Se aprecia en la figura la variación del módulo de resiliencia con el estado de esfuerzos, así como las diferencias debidas al tipo de material. Las diferencias en el módulo de resiliencia debido al tipo de material, varían entre 20 y 50%.

Es importante notar que contrariamente a lo observado en suelos finos, el módulo de resiliencia aumenta con el nivel de esfuerzos en materiales granulares.

De acuerdo con varios investigadores (Corro, et al, 1985), una grava arcillosa puede tener módulos de resiliencia del orden de 375 MPa, en tanto que una grava arenosa alcanza valores de 650 MPa. Es evidente que estos datos son incompatibles con los determinados de acuerdo con otros criterios ; por ejemplo, Brown y Pappin sugieren módulos del orden de 100 MPa para bases de buena calidad y de 40 MPa para bases granulares deficientes.

2 Tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico y granulometría

Para observar el efecto de tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico y granulometría, Musharraf et al (1994), llevaron a cabo una serie de ensayos de módulo de resiliencia. Las características de cada uno de los especímenes se muestran en la tabla siguiente.

(1)	Tipo de pruebas						
	A (2)	B (3)	C (4)	D (5)	E (6)	F (7)	G (8)
Procedimiento	T292-91I	T292-91I	T292-91I	T292-91I	T292-91I	T292-91I	T294-92I
Compactación	T180-90D	T180-90D	vibratoria	vibratoria	vibratoria	vibratoria	vibratoria
Tamaño del espécimen	10.16	15.24	10.16	15.24	15.24	15.24	15.24
Granulometría	I	II	I	II	I	III	II
Peso específico (g/cm ³)	2.444	2.408	2.304	2.387	2.310	2.355	2.387

En la Figura 3.4 se puede observar el comportamiento del módulo de resiliencia de cada uno de los especímenes probados.

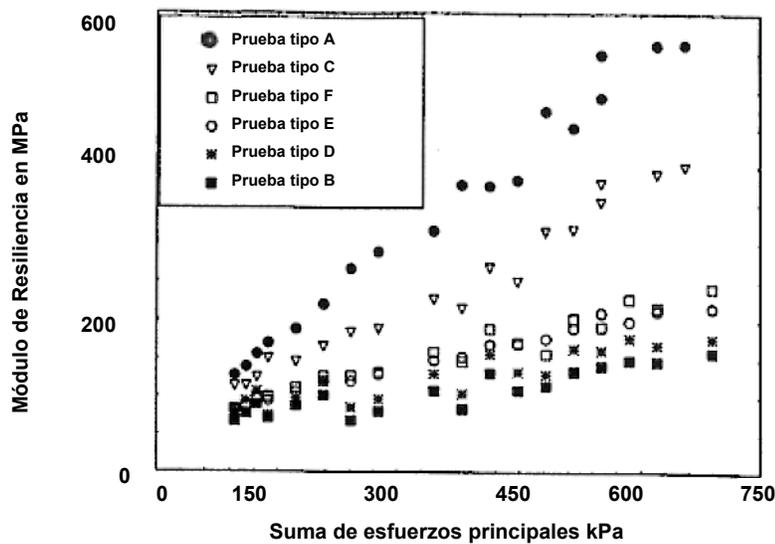


Figura 3.4 Efecto de la compactación y granulometría (I, II y III) en el módulo de resiliencia, para muestras de 10.16 cm y 15.24 cm de diámetro (agregados de caliza)

De la figura se puede notar que para un nivel de esfuerzos dado, el módulo de resiliencia para muestras con 15.24 cm de diámetro (pruebas tipo B y D) fueron

más bajos que los obtenidos en los especímenes de 10.16 cm de diámetro (pruebas tipo A y C). A valores bajos de esfuerzo (menores de 137.8 kPa), sin embargo, las diferencias fueron pequeñas. Los valores más altos de módulo de resiliencia para especímenes de 10.16 cm pueden ser atribuidos a la diferencia en granulometrías para los diferentes especímenes. Los valores de módulo de resiliencia se incrementaron utilizando una granulometría tipo I para especímenes de 15.24 cm (pruebas tipo E) comparadas con especímenes del mismo tamaño pero con granulometría tipo II (prueba tipo D). Usando el método de compactación vibratoria, en los especímenes de 10.16 cm siempre se obtuvieron bajos pesos volumétricos, comparados con los que se obtuvieron para los especímenes de 15.24 cm para el mismo contenido de agua. Sin embargo, si la granulometría tipo I para especímenes de 15.24 cm fuera usada, el peso específico seco para las muestras llega a ser similar a los de muestras de 10.16 cm. Por lo tanto, el peso específico seco fue dominado por la granulometría utilizada más que por el tamaño del espécimen.

Una comparación de los valores de módulo de resiliencia para las granulometrías II y III (pruebas tipo D y F) se presentan en la Figura 3.4, la cual muestra que la graduación III produce valores de módulo de resiliencia ligeramente más altos que los de la granulometría tipo II. Sin embargo, el efecto de la granulometría sobre el módulo de resiliencia pareciera tener menos importancia.

Por otro lado, Thompson (citado en Dar-Hao Chen, et al.) reportó que para una granulometría dada (material triturado o no) el tipo o naturaleza del material (caliza, arenisca, granito, etc.) generalmente no es un factor significativo en términos del módulo de resiliencia. Thompson y Smith observaron que los módulos de resiliencia de varios agregados son similares y el tipo de agregados utilizados como base de pavimentos carreteros tienen efectos limitados en el módulo de resiliencia.

3 Magnitud del esfuerzo aplicado

En el Instituto Mexicano del Transporte se desarrollaron investigaciones en las que se estudio la influencia del esfuerzo aplicado en el módulo de resiliencia, para lo cual se utilizaron cuatro granulometrías (Figura 3.5). Las curvas identificadas como GW1 y GW2 corresponden a materiales bien graduados. La mayor parte de la curva GW1 se localiza en la zona 1 especificada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y totalmente dentro de la zona 1 recomendada por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Las curvas GP1 y GP2 corresponden a materiales uniformes, se localizan fuera de las zonas granulométricas especificadas por la SCT y recomendadas por el IMT.

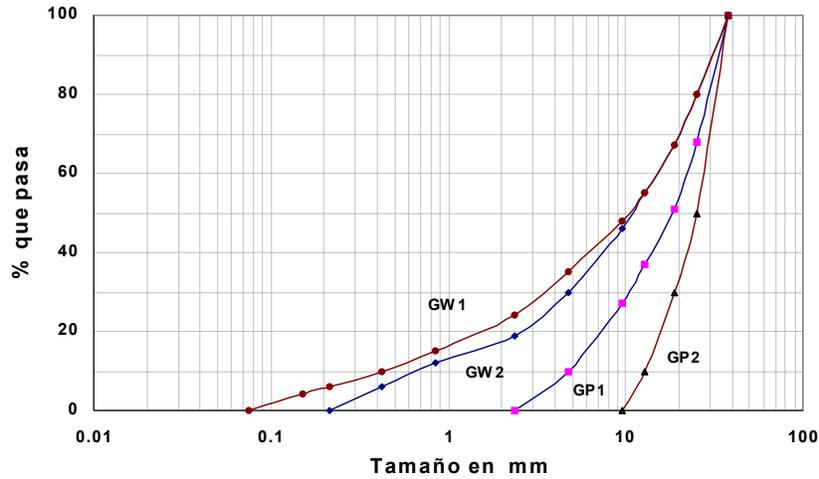


Figura 3.5 Curvas granulométricas de los materiales estudiados

De los resultados obtenidos se encontró que el módulo de resiliencia que alcanza un material granular una vez que la deformación recuperable llega a un valor estable, aumenta en razón directa al nivel del esfuerzo aplicado. Lo anterior puede apreciarse en la Figura 3.6, elaborada con resultados de pruebas de carga cíclica en 3 muestras de igual granulometría, sometidas a esfuerzos cíclicos de 277, 547 y 1114 kPa.

El módulo de resiliencia de un material granular es entonces dependiente del nivel de esfuerzo aplicado y no se le puede considerar como una propiedad intrínseca del material.

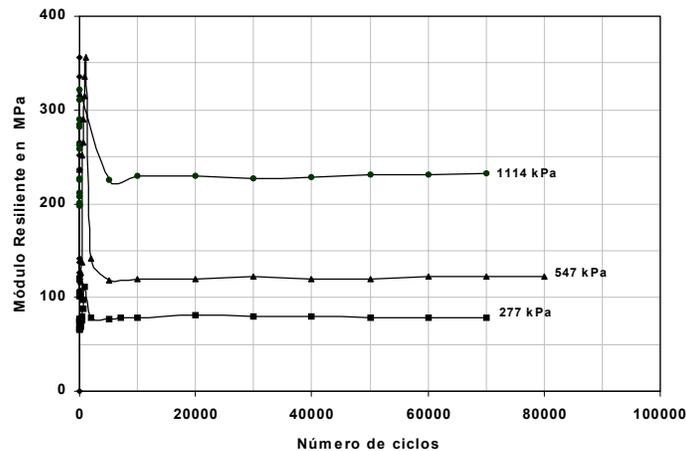


Figura 3.6 Evolución del módulo de resiliencia con el número de ciclos, para esfuerzos verticales de 277, 547 y 1114 kPa

En la Figura 3.7 se muestra la evolución del módulo de resiliencia con la magnitud del esfuerzo aplicado, para las cuatro granulometrías utilizadas.

Se observa que el módulo de resiliencia se incrementa al aumentar la magnitud del esfuerzo. Los materiales con granulometría similar tienden a agruparse, como es el caso de GW1 y GW2 (bien graduados) y de GP1 y GP2 (mal graduados).

Para el máximo nivel de esfuerzos aplicados (1100 kPa) es de esperarse módulos de resiliencia del orden de 300 MPa en materiales bien graduados y de 240 MPa en materiales uniformes. La investigación mostró cierta influencia de la granulometría en los valores de módulo de resiliencia.

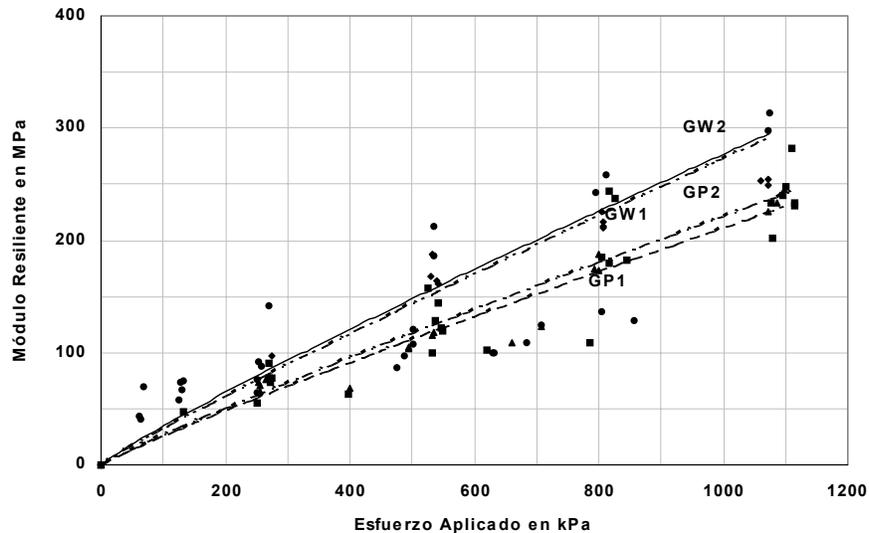


Figura 3.7 Evolución del módulo de Resiliencia con el nivel de esfuerzos aplicado

4 Contenido de Agua

Ping Tiam, reporta los resultados de un estudio realizado con dos materiales granulares que se utilizan comúnmente en la construcción de subbases y bases de pavimento en Oklahoma, los cuales se trabajaron con tres granulometrías y tres contenidos de agua diferentes, a fin de conocer la influencia de estas características en su comportamiento esfuerzo-deformación.

Las tres diferentes granulometrías empleadas se muestran en la Figura 3.8. Los contenidos de agua fueron los correspondientes a la óptima (4.6 a 6.3 %), 2% menor y 2% mayor.

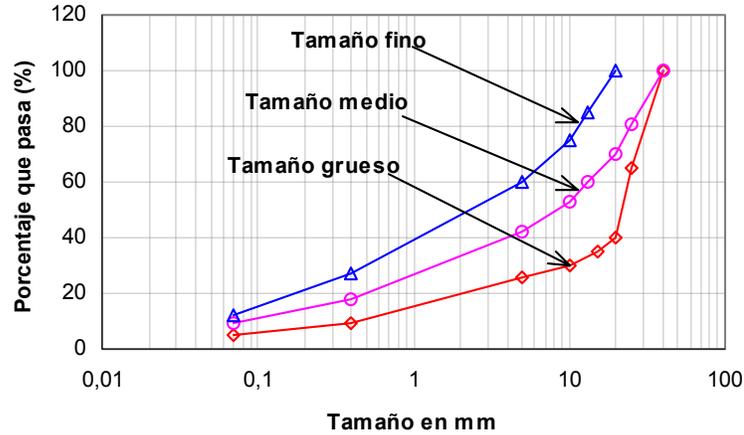


Figura 3.8 Diferentes granulometrías utilizadas en el estudio

El procedimiento de prueba en todos los ensayos fue el AASHTO T294-94 para materiales tipo 1.

En los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se observó que la variación del módulo de resiliencia debida a las diferencias de granulometría, fue de 10 a 50% y de 0 a 22% para los materiales 1 y 2, respectivamente.

La Figura 3.9 muestra gráficamente los valores de módulo de resiliencia obtenidos para diferentes niveles de esfuerzo, en el material preparado con tres diferentes granulometrías.

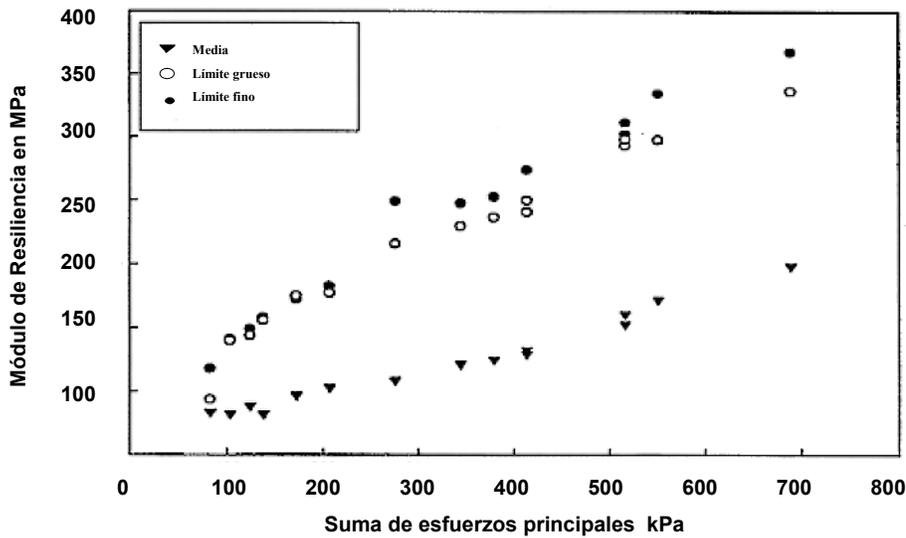


Figura 3.9 Valores medios de módulo de resiliencia para diferentes granulometrías

Se aprecia la gran diferencia de los módulos de resiliencia obtenidos con materiales de granulometría fina en relación con los obtenidos en materiales de granulometría media y gruesa, los cuales difieren entre sí ligeramente.

En la Figura 3.10 se presentan los resultados de módulo de resiliencia obtenidos al variar los contenidos de agua en 2% abajo y 2% por arriba de la óptima de compactación.

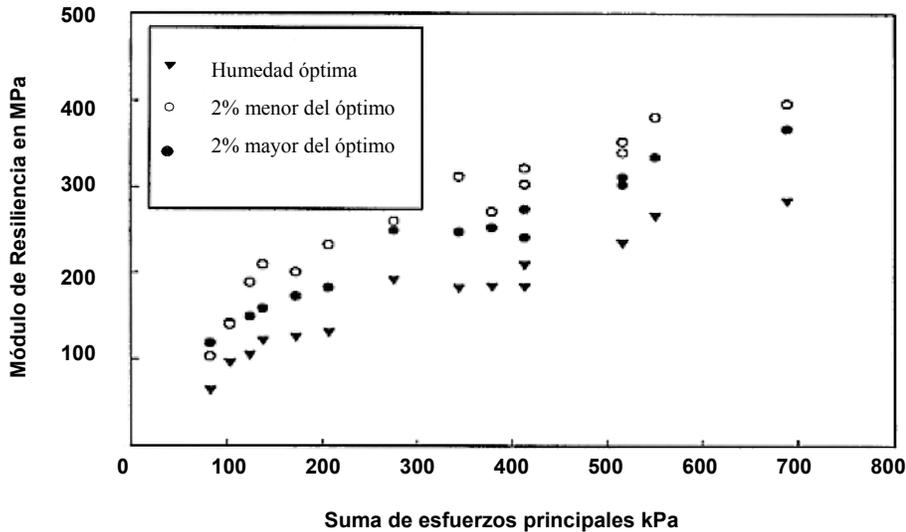


Figura 3.10 Valores medios de módulos de resiliencia obtenidos para diferentes contenidos de agua en los materiales estudiados

Se aprecia que salvo para niveles de esfuerzo muy pequeños, el módulo de resiliencia disminuye conforme el contenido de agua se incrementa.

Rada y Witczac (citados en Ping Tiam, et al) evaluaron 271 resultados de pruebas obtenidos de 10 diferentes agencias de investigación y encontraron que las variables que más influyen en el módulo de resiliencia de los materiales granulares son : el estado de esfuerzo, el grado de saturación y el grado de compactación. Para materiales triturados angulosos, un incremento en el contenido de agua conduce a una disminución del módulo de resiliencia. Especímenes con alto peso volumétrico seco tendrán altos valores de módulo de resiliencia.

Resultados similares fueron reportados por Zaman (citado en Ping Tiam et al), encontrando además que el peso volumétrico seco estuvo determinado por la granulometría usada, independientemente del tamaño del espécimen, para la misma energía de compactación.

Thompson (citado en Ping Tiam et al) reportó que para granulometrías que solamente difieren en porcentajes permisibles de material menor que 0.075 mm,

se tienen pequeñas diferencias en el módulo de resiliencia ; sin embargo, materiales de granulometría más abierta, con pocos finos, son menos sensibles a los cambios de humedad y generalmente constituyen base granulares de mejor comportamiento.

Corro, 1985, analizó tres materiales de diferente procedencia, identificados como base natural de banco, grava-arena de río y basalto vesicular triturado, cuyas características son similares a las de los materiales que se usan como bases de pavimento en nuestro país.

Como resultado de la experimentación se concluye que para las condiciones estudiadas (materiales de base con porcentajes de agua cercanos al óptimo de compactación), la base natural de banco, la cual no cumple con las especificaciones vigentes en lo referente a granulometría y equivalente de arena, es la que tiene mejor comportamiento resiliente, plástico y de resistencia estática al esfuerzo cortante.

Así entonces, tampoco a un material granular se le puede asignar un módulo de resiliencia único. Su selección debe tomar en cuenta los factores antes mencionados.

Capítulo 4

Utilización del Módulo de Resiliencia

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

En este capítulo se indican las condiciones requeridas para la determinación del módulo de resiliencia de acuerdo al método de diseño de la American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO) y también de acuerdo a los llamados métodos de diseño mecanicistas basados en cálculos elásticos de esfuerzos y deformaciones en la sección estructural de un pavimento.

1 Método de diseño de pavimentos AASHTO

El actual método de diseño AASHTO, versión 1993, describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles. Este diseño está basado principalmente en encontrar el número estructural SN para que el pavimento flexible pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona la ecuación básica siguiente :

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10}(M_r) - 8.07 \quad (1)$$

donde :

- W_{18} = Número esperado de aplicaciones de carga de ejes sencillos equivalentes a 18 kip
- Z_R = Desviación estándar normal
- S_o = Error estándar por la predicción de tránsito y comportamiento
- ΔPSI = Diferencia entre el índice de servicio inicial de diseño (p_o) y el índice de servicio final (p_t)
- M_r = Módulo resiliente en libras/pulg² (psi)
- SN = Número estructural, que indica el espesor total requerido
- Donde : $SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$
- a_i = Coeficiente de las capas de pavimento (carpeta, base y subbase)

D_i = Espesor de capa en pulgadas (carpeta, base y subbase)
 m_i = Coeficiente de drenaje de las capas de base y sub-base

La misma Guía proporciona el nomograma de diseño mostrado en la Figura 4.1, que resuelve la ecuación para encontrar el número estructural para pavimentos flexibles. Dicho parámetro es un número abstracto que expresa la resistencia estructural del pavimento requerido para una combinación dada la capacidad de soporte del suelo en términos de módulo de resiliencia (M_r), tránsito expresado en ejes sencillos equivalentes de 18 kip, índice de servicio al final de la vida útil y condiciones ambientales. El número estructural se convierte a espesores de carpeta, base y subbase de pavimento mediante coeficientes que representan la resistencia relativa de los materiales que se utilizan en la construcción.

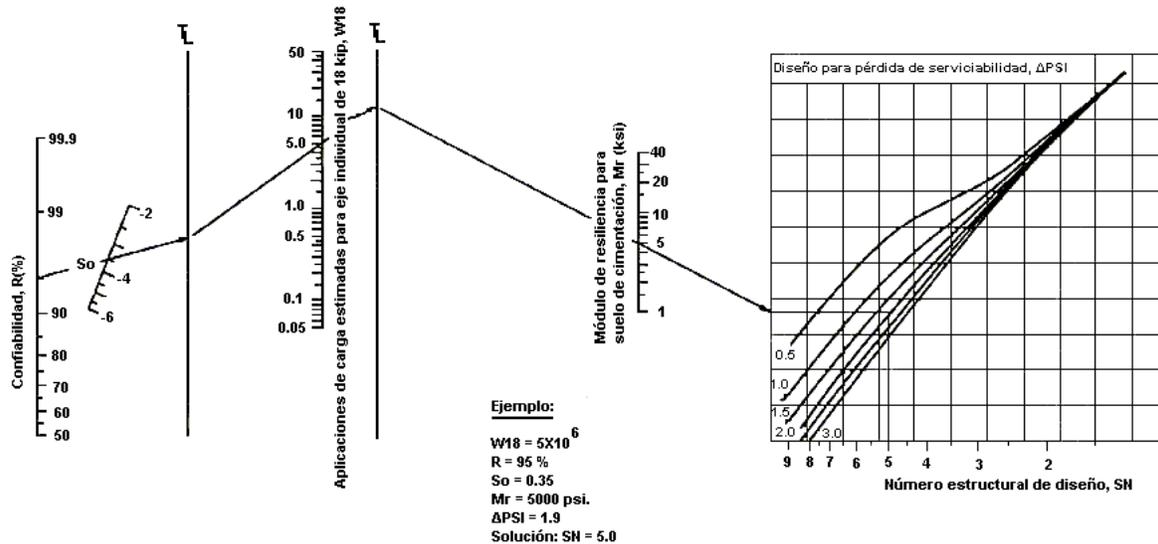


Figura 4.1 Nomograma para diseño Guía AASHTO

Al utilizar el método AASHTO, la propiedad fundamental para caracterizar los suelos de subrasante para diseño de pavimentos es el módulo de resiliencia.

Muchas de las discusiones respecto al módulo de resiliencia han estado centradas en métodos de prueba, equipo, repetibilidad de resultados, etc. Sin embargo, hay otras preguntas fundamentales que necesitan discutirse, preguntas que seguramente fueron consideradas al desarrollarse la Guía AASHTO de 1986, pero que hasta ahora no han sido entendidas. Estas preguntas están relacionadas con la selección del valor “correcto” del módulo de resiliencia para ser usado en el diseño de pavimentos.

Pareciera que la aplicación del módulo de resiliencia es simple, pero su uso se complica ya que no existe un valor único para un suelo, sino que hay un número infinito de valores dependiendo de las condiciones de la prueba.

Por lo tanto, el valor apropiado de módulo de resiliencia debiera ser determinado para las condiciones que corresponden a la condición final del suelo y de acuerdo con el nivel de esfuerzo aplicado por un vehículo. Idealmente, este sería el caso. Sin embargo, la determinación del módulo de resiliencia de la forma mencionada anteriormente, no es correcta cuando se utiliza el procedimiento para diseño de pavimentos AASHTO.

2 Del tramo de prueba AASHO a la Guía AASHTO

El tramo de prueba AASHO fue construido cerca de Ottawa, Illinois, entre los años 1956 y 1958 ; las pruebas empezaron en octubre de 1958 y se terminaron a fines de 1960. Teniendo entre sus objetivos el determinar la relación entre el número de repeticiones de carga -para determinadas configuraciones- y el comportamiento de los diferentes espesores de materiales en pavimentos flexibles y rígidos. El tramo fue operado hasta el 30 de noviembre de 1960, para esa fecha el número de repeticiones aplicadas fue de 1,114,000.

Con base en los estudios realizados en este tramo de prueba, se desarrolló el procedimiento de diseño de pavimentos de la guía AASHTO. Al adoptar las ecuaciones para diseño, la guía AASHTO simplemente utiliza una escala de soporte del suelo para representar los cambios de condiciones, sin definir completamente la escala o qué prueba debería ser utilizada con ésta.

Con la guía de 1986, esa escala es abandonada y reemplazada por una relación basada en el módulo de resiliencia. Se utilizó un valor de 3000 psi para caracterizar a la subrasante del tramo de prueba ya mencionado. Por lo tanto, para que esta guía sea usada correctamente, el módulo de resiliencia de la subrasante debe de ser consistente con 3000 psi. En los apéndices de la guía AASHTO no se indica cómo fue obtenido ese valor, tal vez los primeros que sugirieron este valor fueron Skok y Finn (1962), que derivaron dicho valor a partir de los datos de deflexiones obtenidos con Viga Benkelman.

En 1962, en la primera conferencia internacional sobre diseño de pavimentos (llevada a cabo en Michigan), Seed et al (1962) presentaron datos de pruebas de laboratorio sobre módulo de resiliencia de materiales empleados en la subrasante del tramo correspondiente a la prueba AASHO. Dentro de los datos presentados destacan los factores que influyen en la determinación de las características resilientes de una muestra de suelo, en los que juegan un papel muy importante la tixotropía, las condiciones de compactación, el nivel de esfuerzos aplicado, etc., tal y como se discute en el capítulo 2.

Un ejemplo es la Figura 4.2, en la cual se puede observar la influencia del tipo de compactación en la determinación del módulo de resiliencia. Los datos mostraron el valor de 3000 psi como un valor razonable, si el esfuerzo desviador es mayor a

12 psi (82.8 kPa) -cuando se compacta por amasado- ó 25 psi -cuando se utiliza compactación estática.

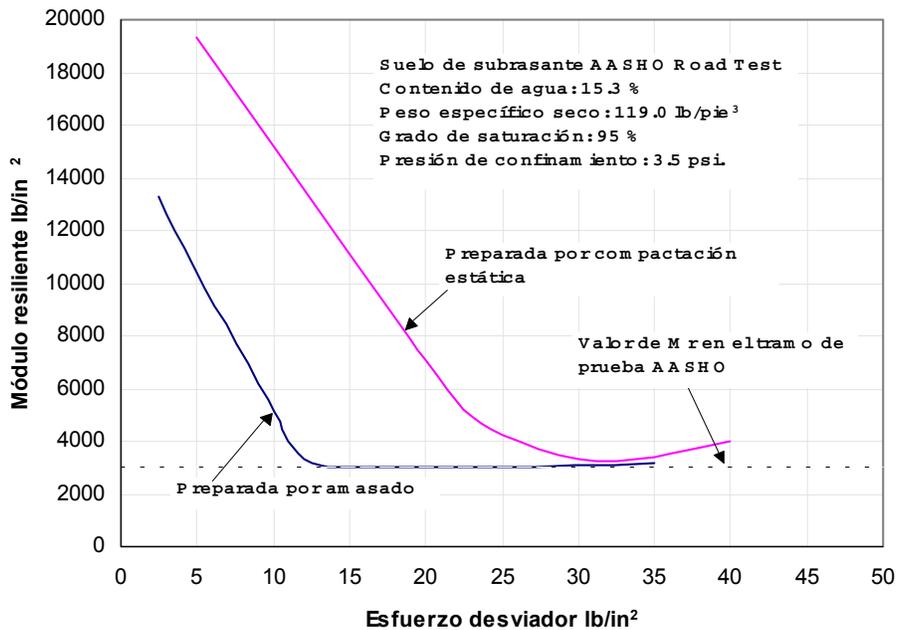


Figura 4.2 Pruebas de módulo de resiliencia para la subrasante del tramo de prueba AASHO reportadas por Seed et al (1962)

Thompson y Robnett reportaron un estudio más completo sobre el comportamiento resiliente de la subrasante del tramo de prueba AASHO. Ellos desarrollaron pruebas de módulo de resiliencia en suelos de Illinois (Figura 4.3). De los datos se puede concluir que 3000 psi es un valor apropiado para ese suelo cuando el contenido de agua es 1% mayor al óptimo y está sujeto a un esfuerzo desviador de 6 psi o más.

Lo que no es discutido por Thompson y Robnett es que los resultados obtenidos están basados en pruebas sin confinamiento. Sin embargo, el procedimiento actual de prueba AASHTO recomienda utilizar una presión de confinamiento de 3 psi para un cierto rango de esfuerzos desviadores.

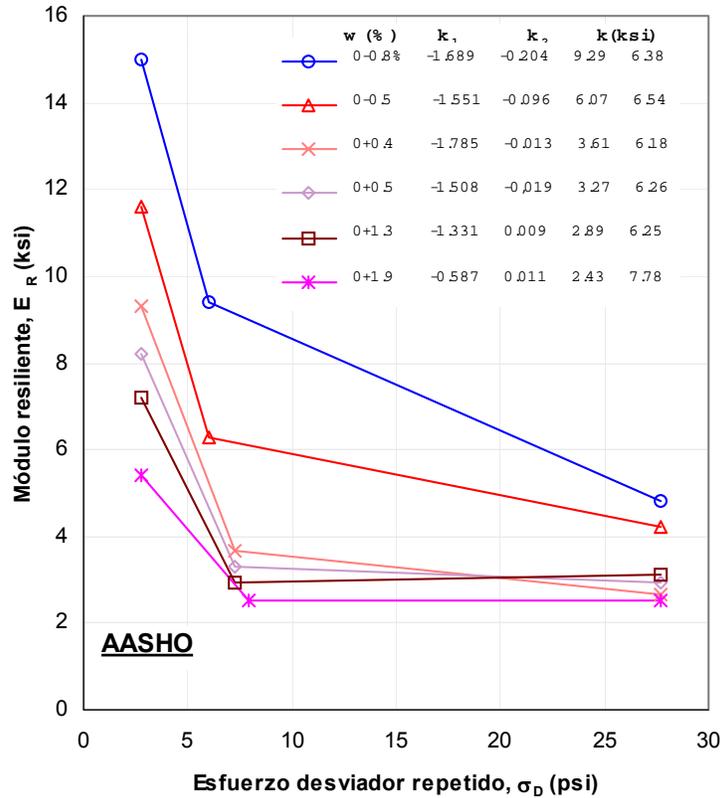


Figura 4.3 Módulos de resiliencia del tramo de prueba AASHO reportados por Thompson y Robnett (1 ksi = 1000 psi)

Para suelos granulares, la selección de las condiciones apropiadas para la prueba aún son más complejas y cuestionables. De hecho la Guía AASHTO no da ninguna sugerencia para su selección.

Finalmente, como el procedimiento de diseño de la Guía AASHTO fue desarrollado como una modificación del comportamiento de la ecuación obtenida de los resultados del tramo de prueba AASHO, los datos de entrada deben de ser consistentes con las condiciones de prueba del tramo de prueba AASHO. En particular, el valor del módulo de resiliencia de la subrasante debe de ser consistente con el valor usado para representar la subrasante del tramo de prueba AASHO. Así entonces, el módulo de resiliencia debe de ser determinado para niveles de esfuerzo desviador de 6 psi, o más, y en condiciones de compresión no confinada. De no ser así, la metodología puede conducir a secciones estructurales subdiseñadas.

3 Métodos mecanicistas

El diseño apropiado de los pavimentos depende en gran medida del entendimiento de la respuesta de los materiales ante cargas repetidas. Para caracterizar los materiales deben tomarse en cuenta los dos aspectos siguientes : los parámetros del material -para usarlos al establecer los criterios de falla- y las características esfuerzo-deformación de cada uno de los materiales utilizados en la sección estructural, para el cálculo de la respuesta física del sistema.

Los procedimientos mecanicistas están basados en la suposición de que un pavimento puede ser modelado como una estructura multicapa elástica o viscoelástica sobre una cimentación elástica o viscoelástica. Suponiendo que los pavimentos pueden ser modelados de esta manera, es posible calcular los esfuerzos, deformaciones o deflexiones debidas al tránsito en cualquier punto del pavimento. Sin embargo se sabe que hay factores que no pueden ser modelados, por lo tanto es necesario calibrar los modelos con observaciones de campo.

En estos métodos, la caracterización de los materiales que conforman las capas de un pavimento se realiza tomando como propiedad básica al **módulo de resiliencia** que es una medida de las propiedades elásticas de un suelo, pero tomando en consideración la existencia de características no lineales en su comportamiento, fundamentalmente su dependencia con el nivel de esfuerzos.

En la Figura 4.4 se muestra una sección típica de un pavimento. Cada una de las capas está caracterizada por las propiedades del material que la forman -módulo de resiliencia, relación de Poisson y espesor de la capa. Por lo tanto, si se desea realizar un diseño del pavimento rigurosamente elástico, el módulo a utilizar para cada uno de los materiales que conforman las capas será precisamente **el módulo de resiliencia**.

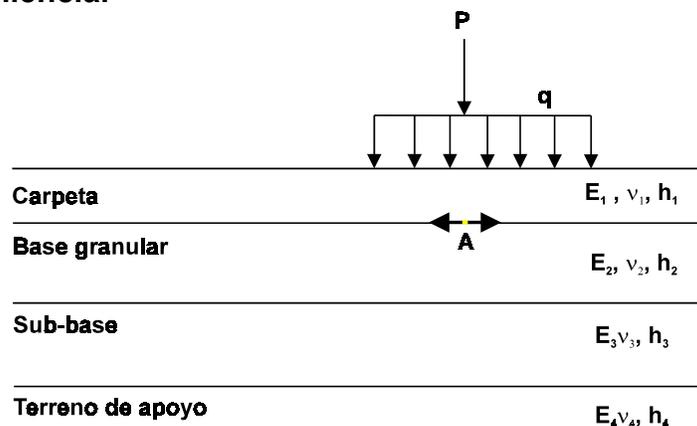


Figura 4.4 Sección típica de un pavimento flexible

4 Relaciones constitutivas para suelos finos y materiales granulares utilizados en los métodos de diseño mecanicistas

Es bien sabido que los materiales granulares y los materiales de subrasante tienen un comportamiento no lineal y que el módulo de elasticidad varía con el nivel de esfuerzos. El módulo de elasticidad que se utiliza en los sistemas multicapa es el módulo de resiliencia, el cual se obtiene de una prueba triaxial en carga repetida. Las relaciones constitutivas no lineales para suelos finos y materiales granulares usuales se presentan a continuación :

4.1 Suelos Finos

El módulo de resiliencia de suelos finos decrece con el incremento en el esfuerzo desviador σ_d . En el laboratorio $\sigma_2 = \sigma_3$, por lo tanto, el esfuerzo desviador se puede definir como :

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

La Figura 4.5 muestra la relación general entre módulo de resiliencia y esfuerzo desviador para suelos finos obtenidos en pruebas de laboratorio en carga repetida.

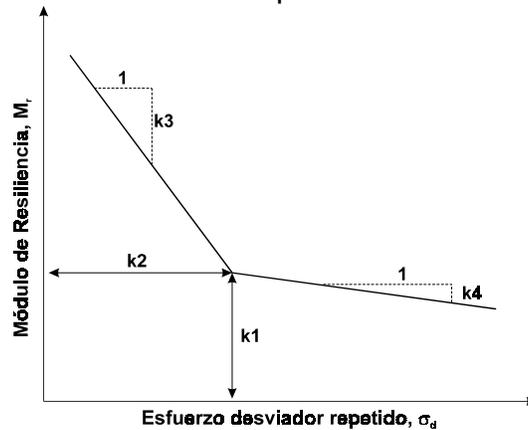


Figura 4.5 Relación general entre módulo de resiliencia y esfuerzo desviador para suelos finos

El comportamiento bilineal puede ser expresado como :

$$M_r = K_1 + K_3(K_2 - \sigma_d) \quad \text{cuando } \sigma_d < K_2 \quad (3a)$$

$$M_r = K_1 - K_4(\sigma_d - K_2) \quad \text{cuando } \sigma_d > K_2 \quad (3b)$$

en los cuales K_1 , K_2 , K_3 y K_4 son constantes del material.

Thompson y Elliot (1985) indicaron que el valor del módulo de resiliencia en el punto de quiebre de la curva, como se indica por K_1 en la Figura 4.5, es un buen indicador del comportamiento resiliente, mientras que las otras constantes K_2 , K_3 y K_4 , muestran menos variabilidad que K_1 . Ellos clasificaron los suelos finos en

cuatro según su consistencia, muy blandos, blandos, medios y rígidos, como se puede apreciar en la Figura 4.6. El máximo valor de módulo de resiliencia está gobernado por un esfuerzo desviador de 2 psi (13.8 kPa). El mínimo módulo de resiliencia está limitado por las presiones de confinamiento, las cuales son 6.21 psi (42.8 kPa), 12.90 psi (89.0 kPa), 22.85 psi (157 kPa) y 32.8 psi (226 kPa) para los cuatro suelos.

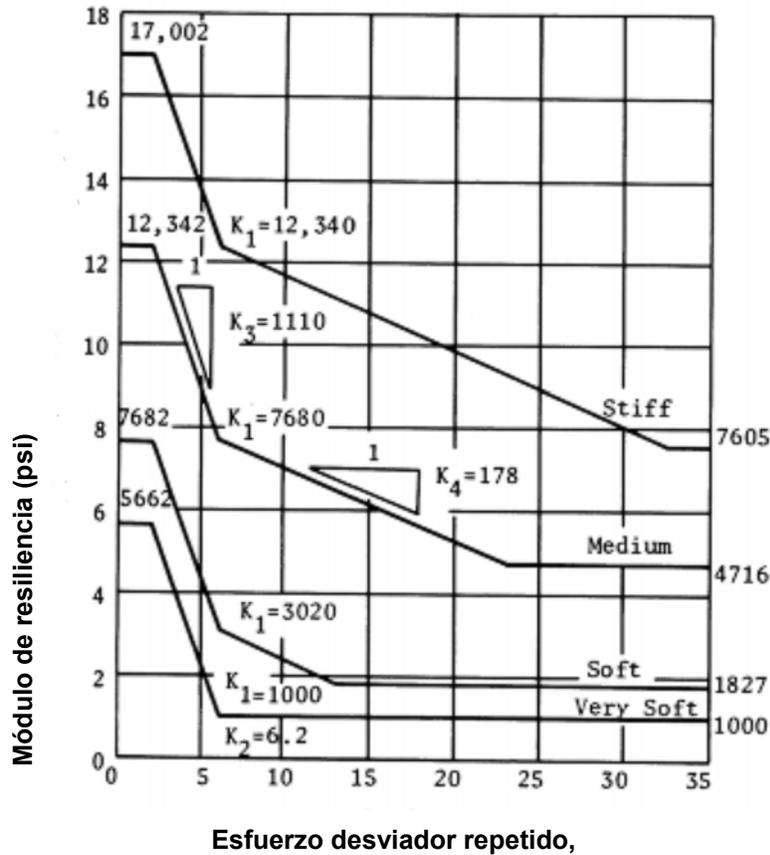


Figura 4.6 Relación entre esfuerzo y módulo de resiliencia para cuatro tipos de materiales de subrasante (según Thompson y Elliot)

La tabla 4.1 muestra algunos de los valores típicos de los parámetros de la ecuación (3), de acuerdo a la consistencia del material.

Consistencia	K_1 kPa	K_2 kPa	K_3	K_4	M_{rmax}	M_{rmin} .
Muy blanda	6900	43	1110	0	39000	6900
Blanda	21000	43	1110	178	53000	12600

Media	53000	43	1110	178	85000	32500
Rígida	85000	43	1110	178	117000	52500

Tabla 4.1 Valores típicos de módulo de resiliencia

4.2 Materiales granulares

Una relación simple entre módulo de resiliencia y la suma de esfuerzos principales puede expresarse como :

$$E = K_1 \theta^{K_2} \tag{4}$$

en donde K_1 y K_2 son obtenidas experimentalmente y θ es la suma de los esfuerzos principales, el cual puede ser la suma de los tres esfuerzos normales, σ_x , σ_y y σ_z o la suma de los tres esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 :

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{5}$$

incluyendo el peso del sistema de capas es :

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \gamma z(1+2K_0) \tag{6}$$

en donde γ es el peso volumétrico promedio, z es la profundidad a la cual se determina el módulo y K_0 es el coeficiente de presión de tierra en reposo.

4.3 Constantes no lineales para materiales granulares

Basados en análisis estadísticos de datos publicados, Rada y Witczak (1981) presentaron la desviación estándar promedio del módulo de resiliencia para varios materiales granulares, como se muestra en la Tabla 4.2. Se reportó (Finn et al. 1986) que el módulo de resiliencia de materiales de base y subbase en el tramo de prueba AASHO puede ser representado con la ecuación (4) con $K_2 = 0.6$ y K_1 con valores de 3200 a 8000 psi, dependiendo de los contenidos de agua.

Tipo de material	No. de datos	K_1 (MPa)		K_2	
		media	desviación estándar	media	desviación estándar
Arena limosa	8	11.17	0.54	0.62	0.13
Grava arenosa	37	30.89	29.65	0.53	0.17
arena-grava	78	30.00	18.13	0.59	0.13

Roca triturada	115	49.70	51.64	0.45	0.23
----------------	-----	-------	-------	------	------

Tabla 4.2 Constantes no lineales K_1 y K_2 para materiales granulares (Según Rada y Witczak 1981)

Otros valores de K_1 y K_2 se presentan en la Tabla 4.3

Referencias	Material	K_1 (MPa)	K_2
Hicks (1970)	Grava parcialmente triturada, roca triturada	11.03-34.48	0.57-0.73
Hicks y Finn (1973)	Base no tratada, tramo de prueba (San Diego)	14.48-37.23	0.61
Allen (1973)	Grava, roca triturada	12.41-55.16	0.32-0.70
Kalcheff y Hicks (1973)	Roca triturada	27.58-62.06	0.46-0.64
Boyce et al (1976)	Caliza triturada bien graduada	55.16	0.67
Monismith y Witczak (1980)	Materiales de base y subbase en servicio	20.00-53.44	0.46-0.65

Figura 4.3 Rangos de K_1 y K_2 para materiales granulares no tratados (Shook et al, 1982)

5 Estimación del valor de Módulo de Resiliencia

Considerando que en la mayoría de las agencias, instituciones y empresas dedicadas al diseño de pavimentos no cuentan con el equipo para realizar la prueba de módulo de resiliencia, se han desarrollado investigaciones tendientes a establecer correlaciones entre éste y otras características como el valor relativo de soporte y el valor de resistencia R.

Heukelom y Klomp han reportado correlaciones entre el Valor Relativo de Soporte (VRS) y el módulo de resiliencia (usando pruebas de compactación dinámica). La correlación está dada por la siguiente relación :

$$M_r (\text{psi}) = 1500 \times \text{VRS} \quad (7)$$

Esta correlación es razonable para suelos finos con un VRS menor de 10 (condición saturada).

Una relación similar ha sido desarrollada por el Instituto del Asfalto la cual relaciona el valor de resistencia R y el Módulo de Resiliencia como sigue :

$$M_r (\text{psi}) = A + B \times (\text{Valor de R}) \quad (8)$$

donde :

A = 772 a 1,155 y,

B = 369 a 555

Para propósitos de la Guía AASHTO se puede utilizar la siguiente correlación para suelos finos (R igual a 20 o menor) :

$$M_r = 1,000 + 555 X (\text{Valor de R}) \quad (9)$$

Para materiales de base y subbase se tienen las siguientes correlaciones para convertir VRS o valor de R a Módulo de Resiliencia.

θ (kPa)	Módulo de Resiliencia	
690	740XVRS	1,000 + 780XR
207	440XVRS	1,100 + 450XR
138	340XVRS	1,000 + 350XR
69	250XVRS	1,000 + 250XR

donde θ es la suma de los esfuerzos principales, $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$.

Tabla 4.4 Correlaciones para módulo de resiliencia

Por otro lado Woojin Lee, et al (1997) llevaron a cabo un estudio en el que desarrollaron una serie de pruebas de módulo de resiliencia para suelos típicos de Indiana en Estados Unidos. Se utilizaron cinco suelos cohesivos y un suelo granular.

El programa experimental de laboratorio consistió de pruebas de compresión no confinada, pruebas triaxiales repetidas de módulo de resiliencia, etc. En la prueba de compresión no confinada, la muestra se deformó 1.5 mm -a una velocidad de deformación de 1% de deformación por minuto- después se llevó a cabo la prueba de módulo de resiliencia siguiendo el procedimiento AASHTO T274-82. Con los datos obtenidos, se determinaron una serie de correlaciones entre el módulo de resiliencia y pruebas de compresión no confinada para todos los suelos estudiados.

Un ejemplo se presenta en la Figura 4.7, en la cual se observa que existe una buena correlación entre módulo de resiliencia y la resistencia en compresión simple a 1% de deformación.

Estos datos sugieren que podría usarse una correlación entre una prueba de compresión simple y módulo de resiliencia para estimar este último.

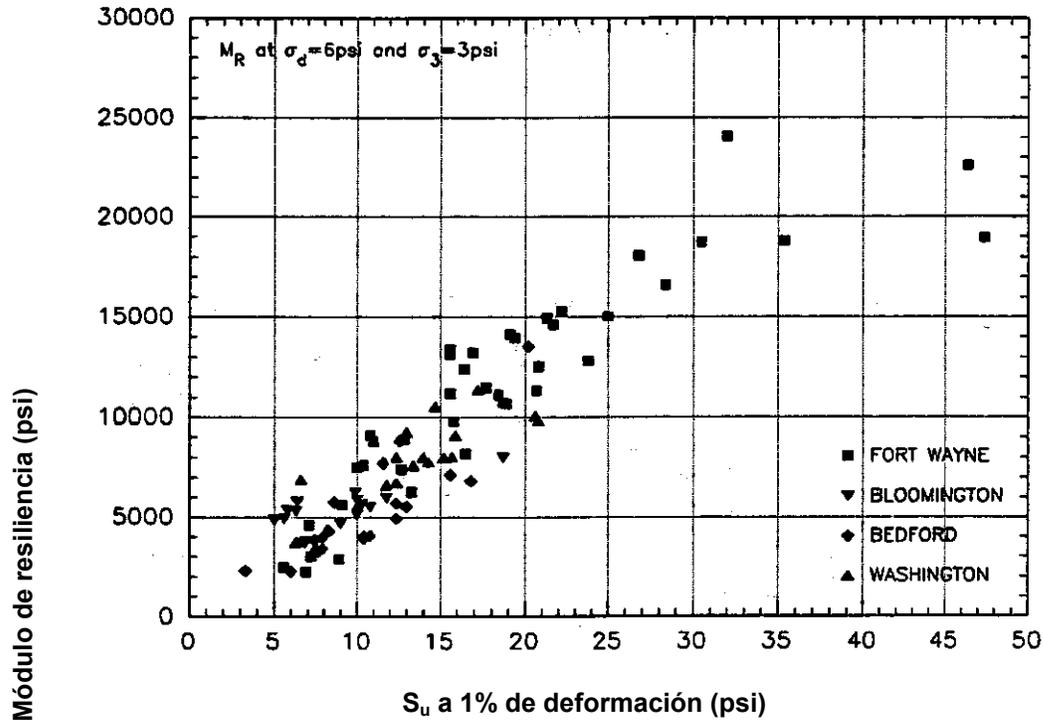


Figura 4.7 Relación entre M_r ($\sigma_d = 6$ psi, $\sigma_3 = 3$ psi) y $S_{u1.0\%}$

En la Reunión del TRB (Transportation Research Board), celebrada en junio de 1998, en Washington, D.C., fue presentado un Catálogo de recomendaciones para el diseño de pavimentos flexibles. Dicho documento fue elaborado por la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), con base en varias fuentes, tales como las opiniones de un amplio grupo de expertos en diseño, datos obtenidos en tramos de prueba de los Estados Unidos de Norteamérica, revisión de manuales de diseño de la FHWA (Federal Highway Administration), revisión de la Guía AASHTO (1993) para diseño de estructuras de pavimento (American Association of State Highway and Transportation Officials), etc.

La Tabla 4.5 proporciona valores típicos de módulo de resiliencia y otras características, para diferentes tipos de suelos susceptibles de usarse en la construcción de terracerías y capas granulares de pavimentos.

Todos los valores de módulo de resiliencia que se han indicado son sólo valores de referencia y en ningún caso deben usarse para diseños particulares. Siempre se deberá recurrir al estudio experimental del suelo en cuestión en cada problema particular.

En México, las dependencias de construcción y diseño de pavimentos pueden recurrir actualmente al Instituto Mexicano del Transporte para realizar pruebas de

módulo de resiliencia para la caracterización de los suelos regionales que son comúnmente utilizados en la construcción de carreteras y aeropistas.

Tipo de suelo AASHTO	Descripción	SUCS	γ_d (kN/m ³)	VRS %	Valor K (MPa/m)	Módulo resiliente (MPa)
Suelos de grano grueso						
A-1-a , bien graduado	Grava	GW, GP	19.6-22	60 - 80	81.44-122.16	70.37-140.74
A-1-a , mal graduado			18.9-20.4	35 - 60	81.44-108.58	70.37-140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3-20.4	20 - 40	54.29-108.58	42.23-105.55
A-3	Arena fina	SP	16.5-18.9	15 - 25	40.72-81.44	35.18-14.07
Suelos A-2 (materiales granulares con alto porcentaje de finos)						
A-2-4 , gravosa	Grava limosa	GM	20.422.8	40 - 80	81.44-135.73	70.37-211.11
A-2-5 , gravosa	Grava areno limosa					
A-2-4 , arenosa	Arena limosa	SM	18.9-21.2	20 - 40	81.44-108.58	70.37-140.74
A-2-5 , arenosa	Arena limosa con grava					
A-2-6 gravosa	Grava arcillosa	GC	18.9-22.0	20 - 40	54.29-122.16	56.29-140.74
A-2-7 gravosa	Grava arcillosa con arena	SC	16.5-20.4	10 - 20	40.72-95.00	35.18-105.55
A-2-6 arenosa	Arena arcillosa					
A-2-7 arenosa	Arena arcillosa con grava					
Suelos de grano fino *						
A-4	Limo	ML , OL	14.1-16.5	4 - 8	6.79-44.79	14.07-42.22
	Grava-arena-limo		15.7-19.6	5 - 15	10.86-59.72	28.14-56.29
A-5	Limo alta compresibilidad	MH	12.6-15.7	4-8	6.79-51.58	14.07-42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7-19.6	5-15	6.79-69.22	14.07-70.37
A-7-5	Arcilla baja compresibilidad	CL, OL	14.1-19.6	4-15	6.79-58.36	14.07-70.37
A-7-6	Arcilla alta compresibilidad	CH, OH	12.6-17.3	3-5	10.86-59.73	28.14-70.37

Tabla 4.5 Valores de módulo de resiliencia y otras características de materiales para pavimentación

Conclusiones

Las siguientes son las principales conclusiones del trabajo :

- 1 El módulo de resiliencia se obtiene a partir de un ensaye triaxial en el que el esfuerzo de confinamiento se mantiene constante y el esfuerzo desviador se aplica cíclicamente. Este parámetro se define como el cociente del esfuerzo desviador aplicado y la magnitud de la deformación unitaria recuperable.
- 2 En suelos cohesivos, el módulo de resiliencia disminuye al aumentar el nivel de esfuerzo desviador y es, en general, poco sensible a la magnitud del esfuerzo de confinamiento. También depende de las condiciones de compactación, del número de ciclos aplicado y es afectado por el fenómeno de tixotropía.
- 3 En suelos granulares, el módulo de resiliencia aumenta con el nivel del esfuerzo aplicado. También influye la naturaleza de los agregados, el grado de solidez, forma de la partícula, composición granulométrica, contenido de agua y peso volumétrico.
- 4 La selección del valor adecuado del módulo de resiliencia a utilizar para fines de diseño depende de la metodología a seguir. En el método AASHTO, el módulo de resiliencia se debe de obtener en condiciones de compresión no confinada para niveles de esfuerzo desviador mayores a 6 psi (42 kPa) en caso de tratarse de suelos cohesivos. Para materiales granulares la Guía no establece ninguna recomendación. En los análisis elásticos para la sección estructural de un pavimento, los módulos de resiliencia se deben considerar tomando en cuenta los factores de influencia mencionados, tanto para suelos cohesivos como para materiales granulares.
- 5 Para suelos de una región se puede determinar una correlación para estimar los valores de módulo de resiliencia a partir de otros ensayes de laboratorio más comunes. La validez de la correlación será únicamente para condiciones locales de una región determinada.
- 6 El lector debe tener en cuenta que el uso de las correlaciones que se encuentran en la literatura especializada para estimar los valores de módulo de resiliencia, sólo es admisible en etapas de anteproyecto y nunca para el diseño final de un pavimento.

Bibliografía

AASHTO, (1986). "Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils". AASHTO Designation T 274-82 (1986).

AASHTO, (1992). "Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Sub-base Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46". AASHTO Designation : T294-92 I, Interim Specification 1992.

Behzadi, G. and Yandell W.O., (1996). "Determination of Elastic and Plastic Subgrade Soil Parameters for Asphalt Cracking and Rutting Prediction". Transportation Research Record 1540, pp. 97-104.

Boateng-Poku, Yaw and Drumm Eric C., (1989). "Hyperbolic Model for the Resilient Modulus Response of Fine-Grained Subgrade Soils". Geotechnical Special Publication No. 24.

Brodsky, Nancy S., (1989). "Resilient Modulus Measurements on Cohesive Soils". Geotechnical Special Publication No. 24.

Brown, S.F., (1994). "Behaviour of Layered Systems Under Repetitive Loading". XIII ICSMFE. New Delhi, India, pp. 321-325.

Burczyk, James M., et al (1994). "Factors Influencing Determination of a Subgrade Resilient Modulus Value". Transportation Research Record 1462, pp. 72-78.

Carmichael, R. F., and Stuart E., (1985). "Predicting Resilient Modulus : A Study to Determine the Mechanical Properties of Subgrade Soils". Transportation Research Record 1043, pp. 145-148.

Castañeda F., Jorge (1986). "Importancia de la Subrasante en la Construcción de Pavimentos". VII Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres. Querétaro. pp. 229-231.

Corro C., Santiago, (1985). "Comportamiento de bases granulares para carretera". Publicación del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Chen, Dar-hao, Zaman, M.M., and Laguros J.G., (1994). "Resilient Moduli of Aggregate Materials : Variability Due to Testing Procedure and Aggregate Type". Transportation Research Record 1462, pp. 57-64.

Daleiden, F. Jerome, et al (1994). "Analysis of Procedures for Establishing In Situ Subgrade Moduli". Transportation Research Record 1462, pp. 102-107.

De Buen Richkarday, O., (1995). "Control y Verificación de Calidad en Obras a Cargo de la SCT". Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Subsecretaría de Infraestructura.

Drumm, E.C. et al (1990). " Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests". Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 116. No. 5.

Elfino, Mohamed K. and Davidson, John L., (1989). "Modeling Field Moisture in Resilient Moduli Testing". Geotechnical Special Publication No. 24.

Elliott, R.P. and Thornton, Sam I. (1988). "Simplification of Subgrade Resilient Modulus Testing". Transportation Research Record 1192, pp. 1-7.

Fischer, J.A., et al (1984). " K_R : The Resilient Modulus of Subgrade Reaction". Transportation Research Record 954, pp. 1-10.

Fredlund, D.G., Bergan, A.T. and Sauer, E.K., (1974). "Deformation Characterization of Subgrade Soils for Highways and Runways in Northern Environments". Presented to the 27th Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, Alberta., pp. 213-223.

Hewes, Laurence I. and Oglesby, Clarkson H., (1958). "Highway Engineering". New York.

Houston, William N. et al (1993). " Stress State Considerations for Resilient Modulus Testing of Pavement Subgrade". Transportation Research Record 1406, pp. 124-132.

Jin, Myung S. et al (1994). "Seasonal Variation of Resilient Modulus of Subgrade Soils". Journal of Transportation Engineering. Vol 120. No. 4.

Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., (1987). "Mecánica de Suelos". Tomo II. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Segunda Edición. Editorial Limusa. México.

Kim, Dong-Soo, Drabkin Sergey, (1994). " Accuracy Improvement of External Resilient Modulus Measurements Using Specimen grouting to end platens". Transportation Research Record 1462, pp. 65-71.

Lee, Woojin, Bohra N.C., Altschaeffl, A.G. and White, T.D., (1995). "Resilient Modulus of Cohesive Soils". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 2., pp. 131-135.

Lee, Woojin, et al (1995). "Resilient Characteristics of Dune Sand". Journal of Transportation Engineering, pp. 502-506.

Lentz, W. Rodney and Baladi Gilbert Y., (1981). "Constitutive Equation for Permanent Strain of Sand Subjected to Cyclic Loading". Transportation Research Record 810, pp. 50-54.

Li, Dingqing and Selig Ernest T., (1993). "Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 6.

Li, Dingqing and Selig Ernest T., (1996). "Cumulative Plastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils". Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 122, No. 12.

M. A. Kamal, A.R. Dawson, O.T., Farouki, D. A. B., Hughes, and A.A. Sha'at (1993). "Field and Laboratory Evaluation of the Mechanical Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavements". Transportation Research Record No. 1406.

Mohammad, Louay N., et al (1994). "Influence of Testing Procedure and LVDT Location on Resilient Modulus of Soils". Transportation Research Record 1462, pp. 91-101.

Monismith, C.L., et al (1975). "Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading". Transportation Research Record No. 537, Washington, D.C., pp. 1-38.

Monismith, C. L., (1992). "Analytically Based Asphalt Pavement Design and Rehabilitation : Theory to Practice, 1962-1992". Transportation Research Record 1354, pp. 5-26.

Moossazadeh, Jan and Witczak Matthew (1981). "Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behaviour". Transportation Research Record 810, pp. 9-17.

Musharraf , Zaman, Dar-Hao Chen, and Joakim Laguros (1994). "Resilient Moduli of Granular Materials". Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 6.

Nazarian, S. and Feliberti, Manuel, (1993). "Methodology for Resilient Modulus Testing of Cohesionless Subgrades". Transportation Research Record 1406, pp. 108-115.

Orozco Santoyo, R.V. (1986). "Construcción y Control de Calidad de Pavimentos". XIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Vol. 1. Mazatlán.

Orozco Santoyo, R.V., (1989). "Prevención de la fatiga en pavimentos flexibles". Revista técnica de la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres. México.

Pandey, B.B., et al, (1987). "A Pneumatically Operated Laboratory Apparatus for Testing Soils under Repeated Loading". Indian Geotechnical Journal.

Prado Ollervides, Guillermo (1990). "Diseño de Pavimentos Flexibles". Las Vías Terrestres en el Desarrollo de México. IX Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres. Veracruz.

Ruz V., Francisco (1986). "Características de Materiales para la Sección Estructural de Carreteras". Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C. VII Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres. Querétaro.

Seed, H.B. et al (1967). "Prediction of Flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated-Load Test". Highway Research Board. Report 35.

Sosa Garrido, Roberto, (1986). "Dimensionamiento de las Estructuras Viales". XIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Vol. 1. Mazatlán.

Sothgate, Herbert F. and Mahboub Kamyar C., (1994). "Proposed Uniform Scale for Stiffness of Unbound Pavement Materials for Pavement Design". Journal of Transportation Engineering. Vol. 120. No. 6.

Thompson, Marshall R. and Robnett Quentin L., (1979). "Resilient Modulus of Subgrade Soils". Transportation Engineering Journal. Vol. 105, No. TE1.

Torres Velázquez, R. (1997). "Capacidad Estructural de Pavimentos". Ingeniería Civil No. 336, pp. 13-18.

Vásquez, Carlos, (1996). "Criterios y Factores en el Diseño de Pavimentos Flexibles". Boletín de Vías No. 86. Vol XXIII., pp. 6-15.

Witczak Matthew, W. et al (1995). "Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure". Journal of Transportation Engineering. Vol 120, No. 3.

Yoder, E.J. and Withczak M. W, (1975). "Principles of Pavement Design". United States of America.

Zafir, Zia, et al (1994). "Dynamic Pavement-Strain Histories from Moving Traffic Load". Journal of Transportation Engineering. Vol 120. No. 5.

Zaman, Musharraf, et al (1993). "Resilient Moduli of Granular Materials". Journal of Transportation Engineering. Vol. 120, No. 6.

