

Comportamiento de los materiales bajo carga repetida

Este es un trabajo presentado al V Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, realizado en Cúcuta en octubre de 1983.

JORGE TAMAYO TAMAYO
Profesor Asociado
Ingeniero Civil
Universidad Nacional

Nuevos conceptos han surgido en el campo del diseño de la estructura del pavimento, los cuales hacen referencia específica al comportamiento de la estructura y de cada uno de sus componentes, frente a la carga repetida; otro aspecto destacado de esta evolución conceptual corresponde a la incorporación de criterios de falla que tienen real correspondencia, entre los que figuran: la deformación por tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica, asociada con la resistencia a la fatiga y la deformación por compresión a nivel de la subrasante, asociada con las deformaciones permanentes. Ver Figuras 1 y 2.

Los planteamientos anteriores han llevado al Laboratorio de Ensayo de Materiales a ocuparse del tema, tarea que se desarrolla actualmente en la etapa de recolección y análisis de la información; el interés en plantear el tema en este evento, esta orientado hacia la motivación de entidades e ingenieros, con miras a la implementación de una metodología de estudio y diseño más racional.

COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS GRANULARES BAJO CARGA REPETIDA

En las Figuras Nos. 3 y 4 se presentan resultados típicos del módulo de resiliencia, en donde se evidencia la gran dependencia que presenta el estado de esfuerzos, la expresión simplificada queda en los siguientes términos:

$$MR = K \Theta^c$$

$$\Theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$$

K y c, constantes características de cada material y de la condición de prueba.

En términos generales se pueden expresar las siguientes conclusiones referidas al módulo de resiliencia:

1. Es independiente del tiempo de aplicación de carga.
2. El **MR** determinado después de 100 ó 200 aplicaciones de carga es representativa de la esperada después de varios miles de aplicaciones de carga.
3. El **MR** depende casi totalmente del estado de esfuerzos prevalecientes.
4. Presenta alguna sensibilidad a la condición de humedad del espécimen, Figura 5B en general

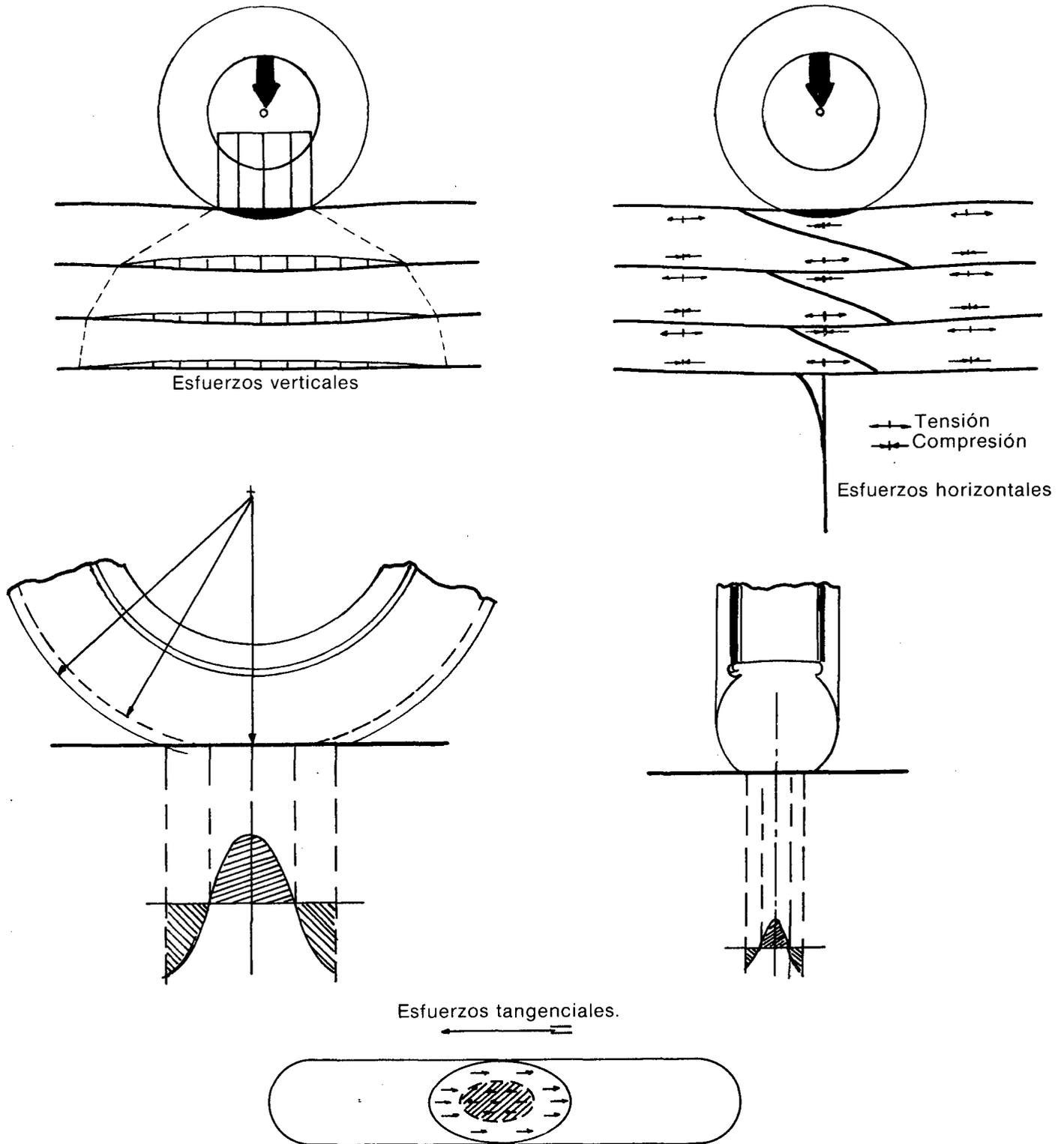


FIGURA 1.

- crece con la condición de menor humedad.
5. Tendencia similar presenta con el grado de angularidad del agregado, Figura 4B.
 6. A esfuerzos totales bajos, el **MR** se incrementa notablemente con el grado de compactación y con la mejor condición de distribución granulométrica y con el menor grado de saturación.

**COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS FINOS
BAJO CARGA REPETIDA**

La curva característica de los suelos finos que

relaciona el módulo de resistencia y el esfuerzo desviador usualmente presenta un quiebre bien definido, tal como se esquematiza en la Figura No. 5A y se observa en la Figura N^o 6B.

Lo anterior permite plantear las siguientes ecuaciones:

$$MR = K_2 + K_3(K_1 - (\sigma_1 - \sigma_3))$$

para $K_1 < (\sigma_1 - \sigma_3)$

$$MR = K_2 + K_4((\sigma_1 - \sigma_3) - K_1)$$

para $K_1 > (\sigma_1 - \sigma_3)$

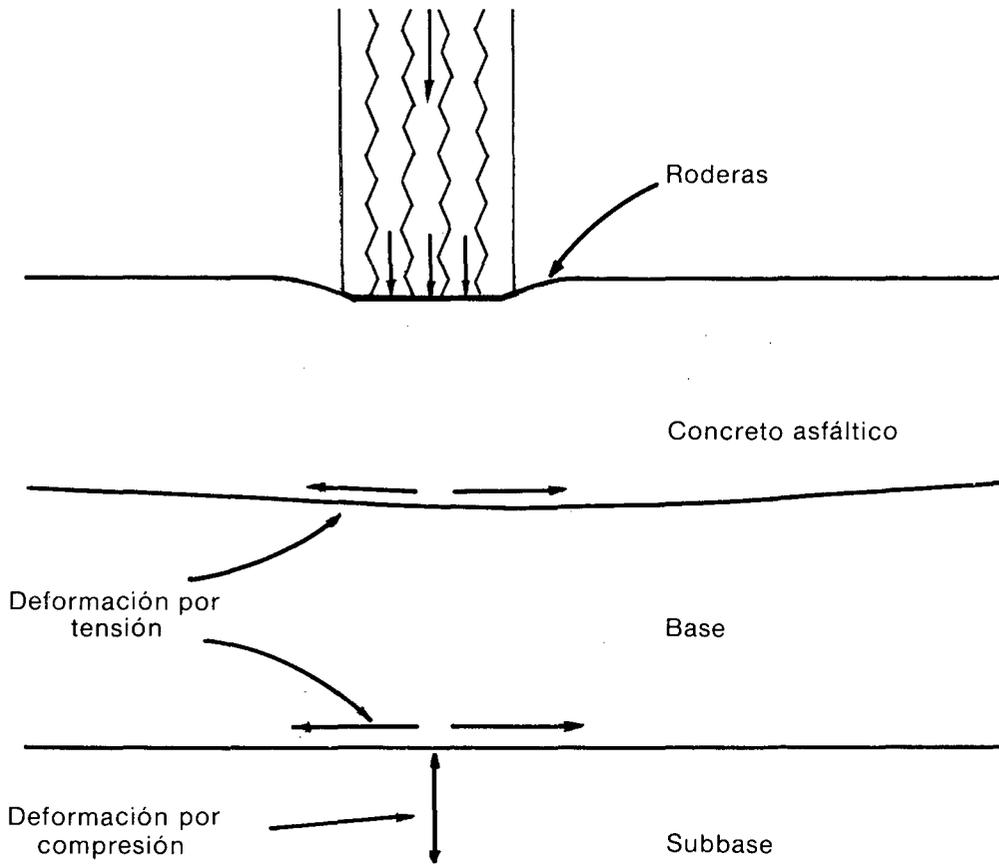


FIGURA 2. Factores a considerar en el diseño de pavimentos flexibles.

Para lograr una caracterización adecuada de la respuesta de los suelos finos en términos de módulo de resiliencia es necesario hacer estudios intensivos que abarquen los diferentes grupos de suelo; un estudio de esta clase se hizo en el estado de Illinois (Referencia 1) del cual se derivan las siguientes conclusiones que bien podrían tener aplicación en nuestro medio.

1. K_1 usualmente fluctúa muy poco para todos los suelos de la subrasante.
2. K_2 es muy sensible a las propiedades del suelo, siendo menor: cuando la plasticidad es baja, con los menores índices de grupo, con altos contenidos de limo y bajos porcentajes de arcilla y con altos contenidos de materia orgánica.
3. K_2 y K_3 no difieren significativamente para los distintos grupos de suelos de la USC.
4. Se pudo establecer una relación entre K_2 y el CBR sin inmersión con humedades alrededor de la óptima, pero no se logró con el CBR obtenido sobre probetas sometidas a inmersión. Sin embargo se obtuvo una mejor correlación con la compresión inconfínada y el módulo de elasticidad estático.

$$K_2 = 0,86 + 0,307 q_u \text{ (Ksi); } q_u \text{ en psi.}$$

$$K_2 = 3,46 + 1,9E \text{ (Ksi); } E \text{ en Ksi}$$

5. Con la saturación, reflejo del grado de compactación y la humedad, se alcanzó una magnífica correlación, lo cual es muy significativo para un control de la compactación.

$$K_2 = 45,2 - 0,428 Sr \text{ para } 100\% C, Sr \text{ en } \%$$

$$K_2 = 32,9 - 0,334 Sr \text{ para } 95\% C$$

Los suelos con mayor contenido de arcilla, resultaron más insensibles con el cambio en la saturación.

6. Similar relación a la anterior se pudo establecer con el contenido volumétrico de agua (volumen de agua expresado como porcentaje del volumen total); para todos los suelos ensayados se logró la siguiente expresión:

$$K_2 = 16,51 - 0,34 C_w \text{ (Ksi),}$$

contenido volumétrico en %

7. Tal como se puede corroborar con la Figura 5C, el módulo de resiliencia se incrementa con el grado de compactación, encontrándose en el estudio (Referencia 1) que esta tendencia no se observaba por igual para los suelos de los diferentes horizontes.
8. Muy notable se evidenció la incidencia del horizonte del cual provenían las muestras; para muestras del horizonte A, los K_2 y K_3 resultaron inferiores a los de los horizontes B y C.

En términos generales se puede afirmar que el módulo de resiliencia tiene un amplio espectro de variación con las propiedades de los suelos, no así con las condiciones de la prueba, es poco sensible al número de aplicaciones de carga. Todo lo planteado induce a la necesidad de evaluar el módulo de resiliencia para cada situación específica

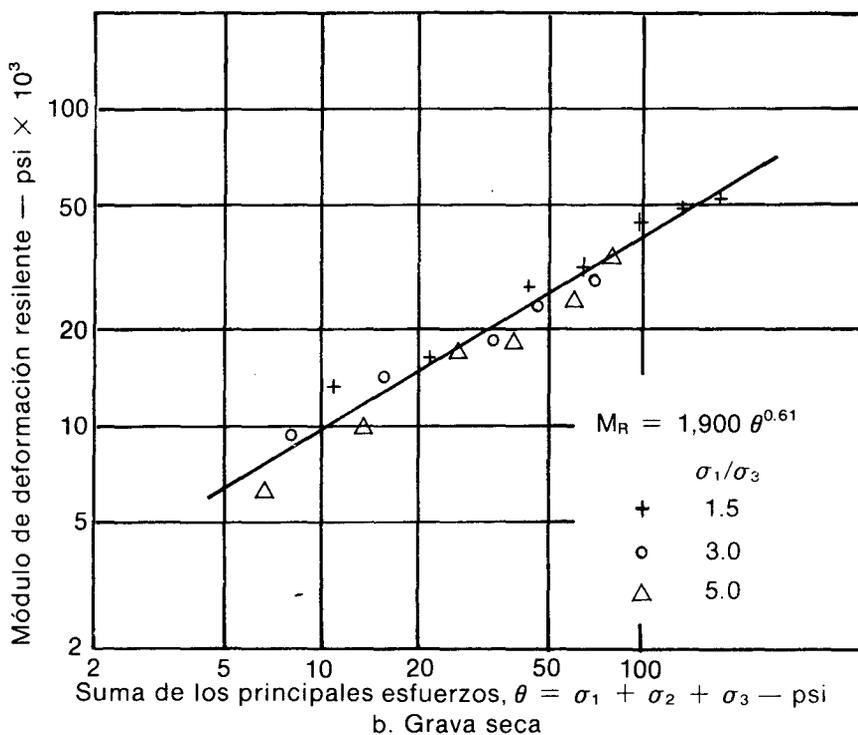
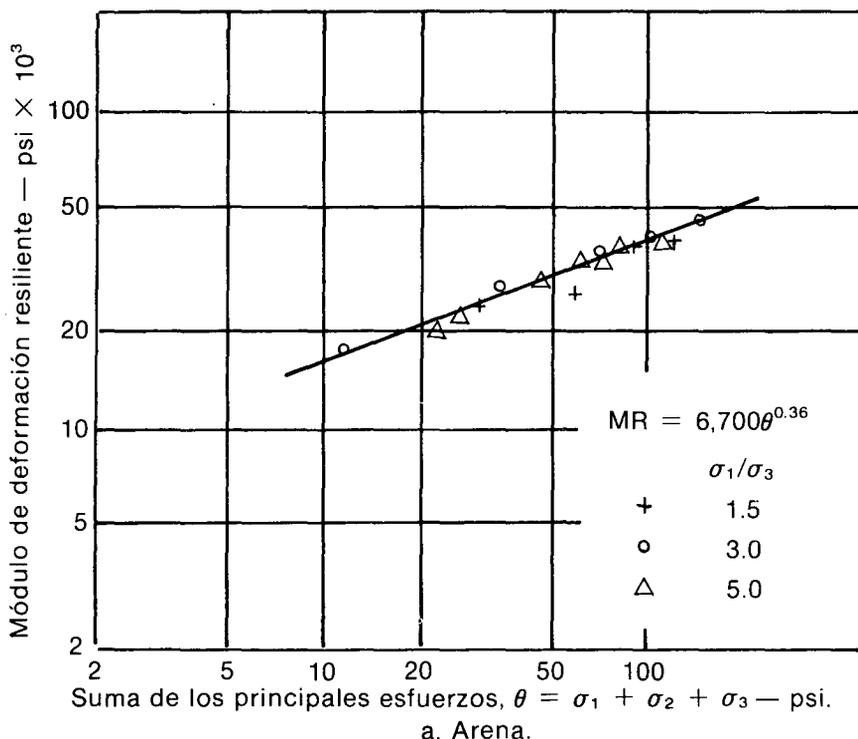


FIGURA 3. Efecto de la suma de los principales esfuerzos sobre el módulo de resiliencia de la arena y la grava en pruebas de carga repetida triaxiales.

y establecer correlaciones con otras pruebas más sencillas a fin de facilitar el control.

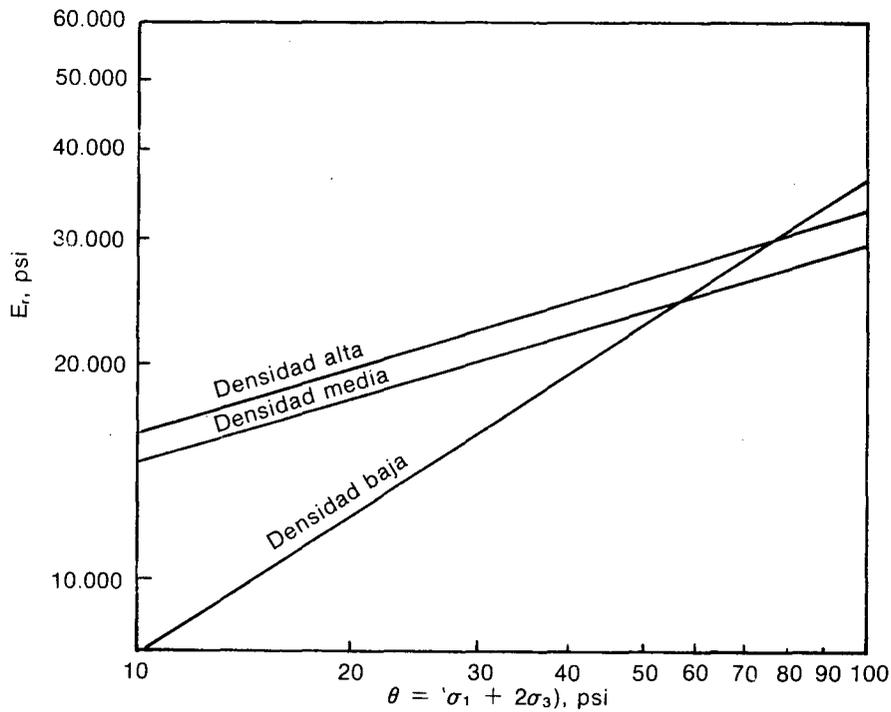
COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS BAJO CARGA REPETIDA

Depende fundamentalmente de la clase de sollicitación aplicada, de la temperatura y del tiempo de carga; las dos últimas son evidentes dada la naturaleza, viscoelástica, del asfalto el cual impone su condición como componente de la mezcla.

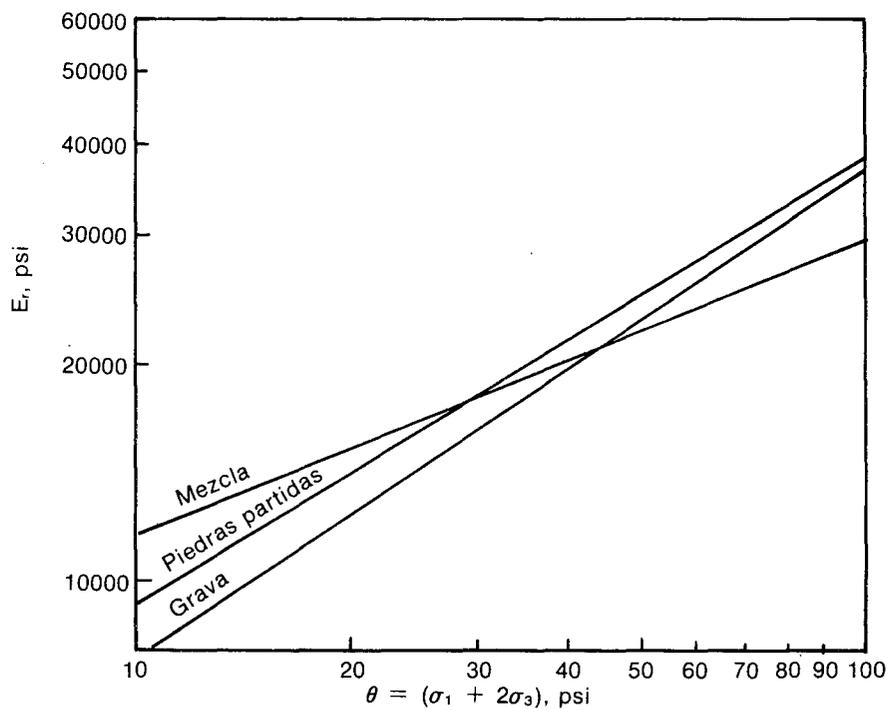
Las pruebas en el laboratorio pueden ser hechas bajo dos condiciones de carga: esfuerzo o deforma-

ción controlada, en la práctica se ha establecido una correspondencia entre las pruebas y las características físico/mecánicas de las carpetas asfálticas.

Se acepta que el estudio del comportamiento de las carpetas delgadas, menos de 5 cms., cae dentro de la condición de deformación controlada y el de las carpetas gruesas, más de 10 cms. se ubica dentro del campo de aplicación de la prueba tensión controlada. Para espesores intermedios, la respuesta de la carpeta a carga repetida, resulta incierta y puede presentar características intermedias a los dos mecanismos típicos.



Efecto de la densidad sobre las relaciones entre E_r y θ , resultados VCP, sobre muestras de grava.



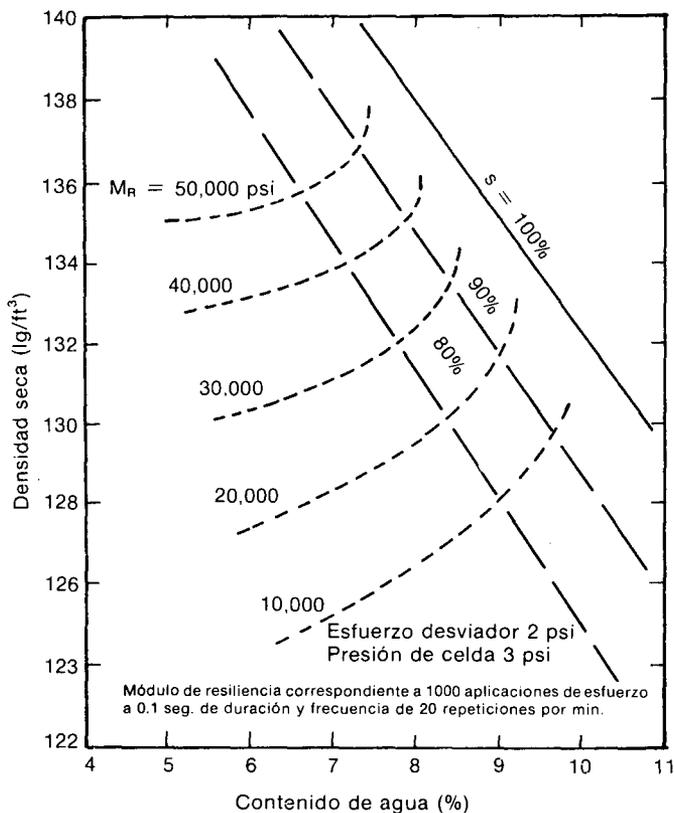
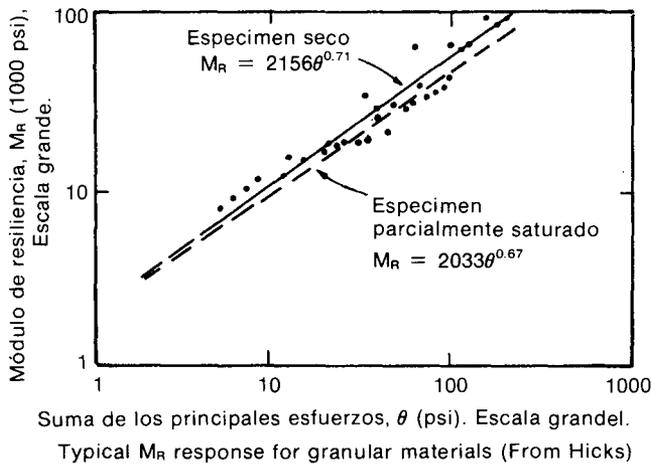
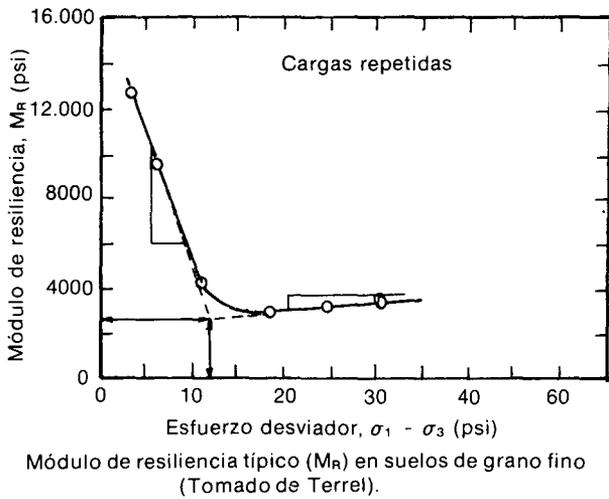
Efecto de la clase de material en la relación E_r y θ en especímenes a densidades bajas.

FIGURA 4.

El estudio del comportamiento de las carpetas asfálticas frente a carga repetida, resulta complejo por la gran cantidad de factores incidentes, lo cual ha llevado a formular recomendaciones no concordantes por los investigadores del tema.

Algunas de las conclusiones más importantes son las siguientes:

1. Antes de entrar a estudiar el comportamiento es necesario ubicar la condición de trabajo de la carpeta, bien sea a esfuerzo o deformación controlada.
2. A esfuerzo controlado, la resistencia a la fatiga se ve favorecida con el incremento en el módulo de rigidez.
3. A deformación controlada se presenta una situación completamente contraria, a mayor módulo de rigidez menor número de aplicaciones de carga en la falla, tal como se muestra en la Figura 6A.
4. Lo anterior parece explicarse en razón de la energía consumida en cada ensayo y a la velocidad de propagación de la grieta; a esfuerzo controlado se produce un incremento de



Efecto del contenido de agua y densidad seca sobre el módulo de resiliencia (Tomado de Monismith).

FIGURA 5.

esfuerzos en el punto de grieta, lo cual da lugar a una propagación rápida del agrietamiento. A deformación controlada la formación de la grieta resulta por la disminución del esfuerzo y por lo tanto la propagación del agrietamiento se hace en forma lenta.

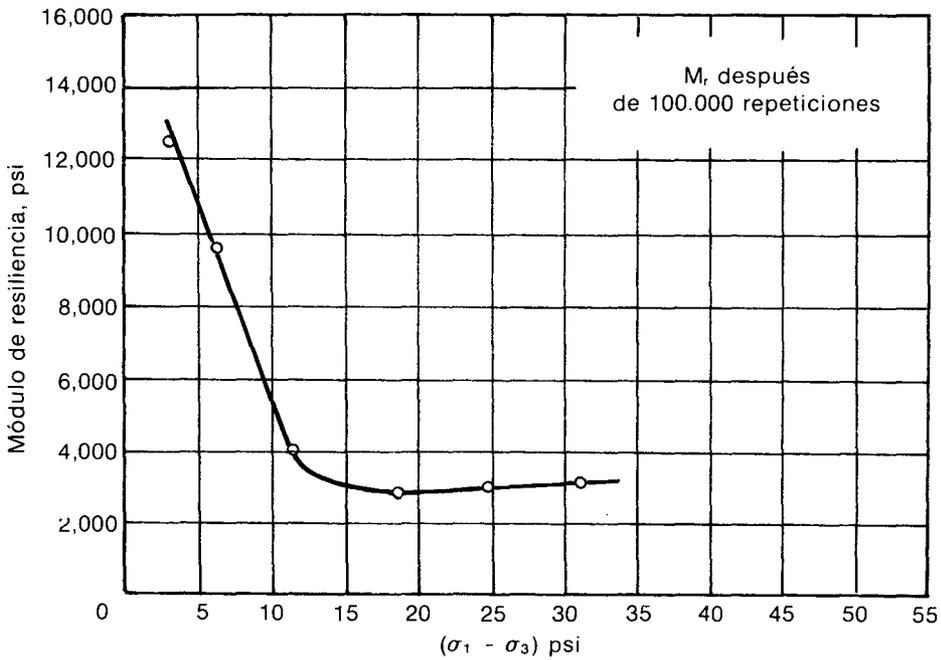
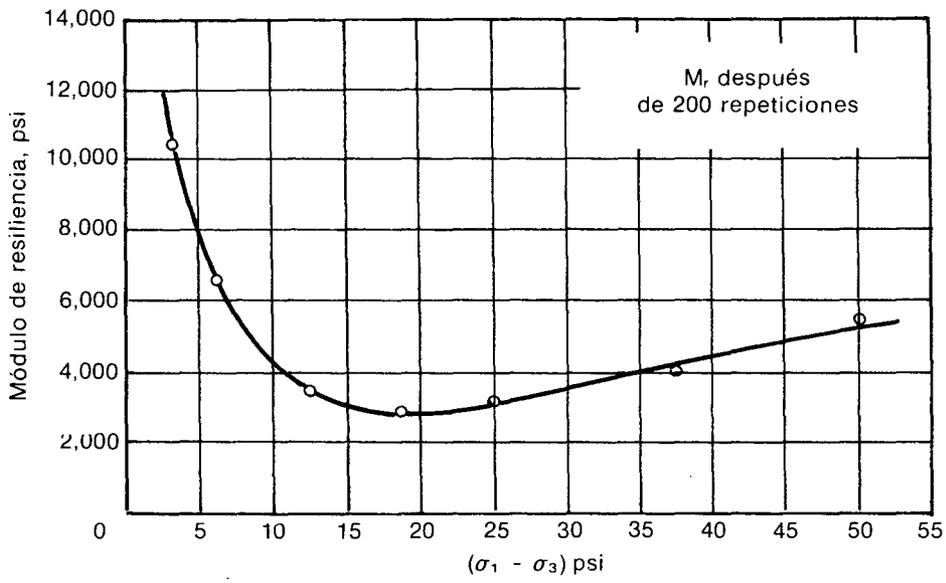
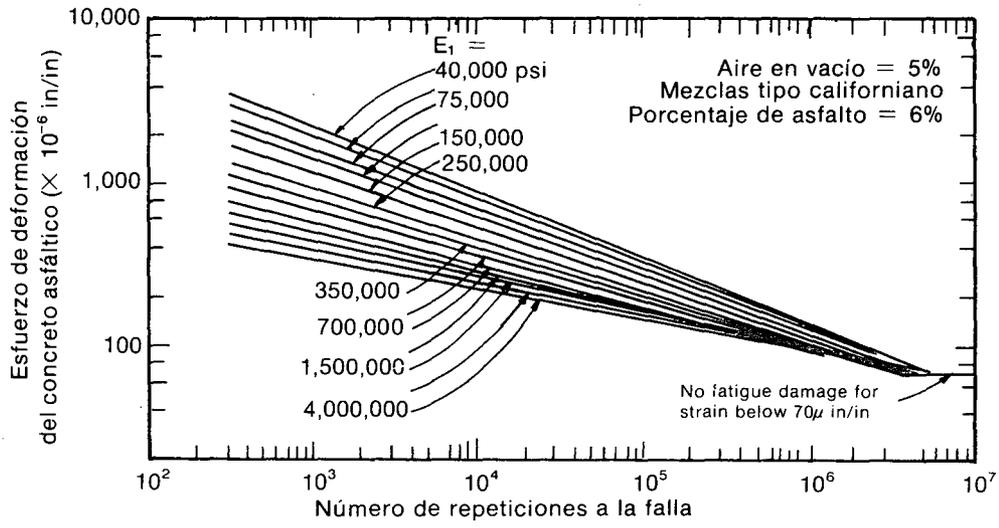
5. Por lo planteado se concluye que en el estudio de la resistencia a la fatiga, lo más importante es la velocidad de propagación del agrietamiento.
6. Según Finn a tensión controlada la resistencia a la fatiga aumenta con: el contenido del ligante, la rugosidad y angularidad del agregado y la continuidad en la distribución granulométrica, y disminuye con la menor consistencia del ligante y la mayor temperatura.
7. A deformación controlada la tendencia es totalmente contraria ya que se consigue una mayor resistencia a la fatiga con asfaltos blandos, gradaciones abiertas y agregados lisos y redondeados.
8. Existe un margen de espesores, usualmente lo ubican entre 5 y 10 cms. que presentan el comportamiento más desfavorable con respecto a la resistencia bajo carga repetida; la gran mayoría de los diseños nuestros contemplan espesores que caen dentro de dicho margen.

DEFORMACION PERMANENTE Y ESTABILIDAD VOLUMETRICA

El comportamiento de la estructura del pavimento y el de cada uno de los componentes no solo debe ser observado en el campo de las deformaciones recuperadas, sino que debe estudiarse la evolución que éste presenta con las deformaciones permanentes debidas a las cargas del tráfico y a la incidencia del medio ambiente sobre la estructura. Esta acumulación de deformación se traduce en una mayor densificación y por consiguiente en una rigidización de la estructura, que la va inhabilitando para asimilar los cambios volumétricos secuenciales que se producen en las cargas subyacentes.

QUE IMPLICACIONES SE DERIVAN DE LA INCORPORACION DE ESTOS NUEVOS CRITERIOS

1. Se concede la mayor atención a la subrasante, quedando la superestructura del pavimento dependiendo completamente de las propiedades geomecánicas de la misma y de las adquiridas con los mejoramientos que necesariamente se le deben incorporar a su comportamiento; en síntesis la superestructura debe acomodarse al comportamiento de la subrasante.
2. Toda la estructura del pavimento debe presentar concordancia y las propiedades de sus componentes deben estar de acuerdo con el comportamiento de las capas sub y suprayacentes.
3. Un tratamiento muy especial merece el estudio de las carpetas asfálticas, dada la disimilitud que exhiben en su comportamiento de acuerdo a la sollicitación aplicada y al mecanismo de trabajo.
4. En la parte resolutiva del diseño se pasa de



Módulo de resiliencia como una función de $(\sigma_1 - \sigma_3)$, suelo subgrado AASHO.

FIGURA 6.

colocar un "paquete de solución" de acuerdo a la capacidad portante de la subrasante al estudio y diseño de una estructura integral; lo anterior obliga a proceso iterativo que busca concertar los criterios de diseño y las propiedades de los componentes.

5. Respecto a la resistencia de la estructura del pavimento frente a cargas repetidas parece haber coincidencia sobre las propiedades que debe presentar la estructura: o presentan *gran flexibilidad* para acomodarse a las deformaciones inducidas o *gran resistencia* para asimilar las tensiones que se generan y afectan principalmente a las capas superiores.
6. Si una estructura ha fallado por fatiga su

reestructuración no debe hacerse colocando sobre-carpetas, porque con ello se están creando condiciones aun más propicias para la falla por fatiga, proceso que ocurrirá en lapso menor.

7. Es necesario que las entidades estatales relacionadas con este ramo empiecen a trabajar en estos aspectos y adopten políticas más racionales y consecuentes en el diseño y construcción de los pavimentos. En la situación actual se observa cómo nos hemos ido quedando en el mismo punto trabajando con elementos inapropiados a la espera que se establezcan correlaciones milagrosas o recetas de éxito probado.

BIBLIOGRAFIA

1. Thompson, M. y Robnett, Q. *Resilient properties of subgrade soils*. University of Illinois. 1976.
2. Yoder, E. y Witczak, M. *Principles of pavement design*. Editorial Wiley. 1975.
3. University of Nottingham. *Bituminous materials and flexible pavement design*. 1974
4. Allen, J. y Thompson, M. *The resilient response of granular materials*. University of Illinois. 1974.
5. Freeme, C. y Marais, C. *Thin surfaces: Their fatigue behaviour and prediction*. NIRR. 1973.
6. Pell, P. *Fatigue of asphalt mixes*. 2a. Conferencia Internacional de Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos. Ann Arbor, Michigan. 1967.