



Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares

Julián Vidal
Rodrigo Osorio

RESUMEN

Los materiales sometidos a cargas repetidas principalmente fallan por leyes de fatiga, lo cual ocurre en los materiales usados en la construcción de carreteras. Investigadores y diseñadores se han preocupado entonces por desarrollar y propender por el uso de métodos que nos ayuden a determinar el comportamiento y respuesta del suelo a dichas solicitaciones. Además de encontrar parámetros y soluciones que nos ayuden a entender el comportamiento de la estructura de los pavimentos para sus periodos de diseño. Este artículo pretende introducir a estudiantes y profesionales en el uso del Módulo resiliente para el diseño de pavimentos.

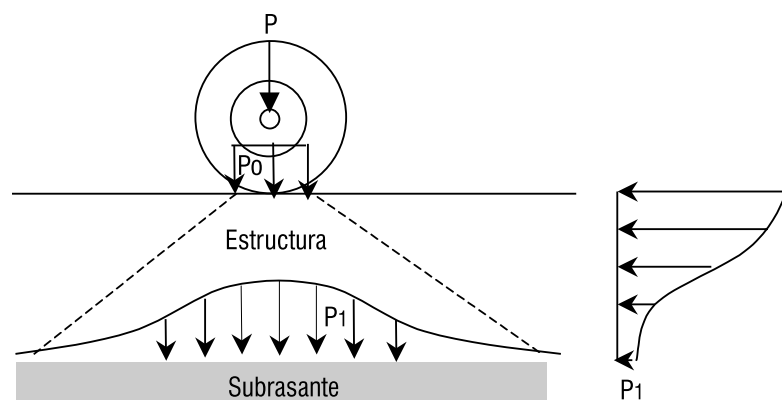
1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de los pavimentos para calles, carreteras y autopistas están sometidas a cargas repetitivas impuestas por los vehículos. Este tipo de cargas son dinámicas de corta duración, que llevan a la fatiga a la estructura del pavimento en un período de tiempo, el cual también

depende de las propiedades geomecánicas y dinámicas de los materiales, además del proceso constructivo adelantado.

La transmisión de las cargas está en función de la presión de inflado de las llantas de los vehículos, las cuales oscilan de 0,2 MPa a 0,7 MPa. En la figura 1 se presenta un esquema sobre dicha transferencia de las cargas.

FIGURA 1



JULIÁN VIDAL VALENCIA. Ingeniero Civil. Profesor, departamento de Ingeniería Civil, Universidad EAFIT.

E-mail: jvidal@eafit.edu.co

RODRIGO OSORIO MORA. Ingeniero Civil. Profesor, departamento de Ingeniería Civil, Universidad EAFIT.

E-mail: riosorio@eafit.edu.co

Las estructuras de los pavimentos para calles, carreteras y autopistas están sometidas a cargas repetitivas impuestas por los vehículos. Este tipo de cargas son dinámicas de corta duración, que llevan a la fatiga a la estructura del pavimento en un período de tiempo, el cual también depende de las propiedades geomecánicas y dinámicas de los materiales, además del proceso constructivo adelantado.

Tradicionalmente en nuestro medio, los diseños de pavimentos se han realizado bajo la aplicación de cargas estáticas a la falla de la estructura, sometida ésta a ensayos de carga axial, como es el CBR (California Bearing Ration) o a ensayos de placa con carga repetida o estática, realizados directamente sobre la subrasante y en ocasiones sobre toda o parte de la estructura. En este último caso se tiene un modelo más próximo a lo que serían las cargas cíclicas en períodos largos.

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

En 1981, The Asphalt Institute presentó en su documento MS-1 un método de diseño de espesores para pavimentos asfálticos, en el que se recomienda usar el módulo resiliente para la evaluación de la subrasante. En 1986, la AASHTO publicó un nuevo método de diseño para estructuras de pavimentos en el que usó el módulo resiliente para caracterizar las propiedades dinámicas de los materiales componentes de la estructura del pavimento, tanto para materiales finos granulares como grueso granulares. Lo anterior es una evidencia de la importancia de la evaluación de las propiedades dinámicas en el diseño de los pavimentos.

Los equipos que se requieren para determinar el módulo resiliente son de un alto costo, debido a la instrumentación de alta tecnología que poseen; razón por la cual en nuestro medio se realizan poco estos ensayos, además se debe tener en cuenta que muy pocas instituciones poseen estos equipos, es por esto que aún se sigue diseñando con métodos tradicionales o con correlaciones entre valores dinámicos y estáticos aplicados a los métodos de diseño que utilizan dicho valor.

La Universidad EAFIT, consciente de la importancia que tiene en el diseño de pavimentos el conocimiento de las propiedades dinámicas de los suelos, que conforman la estructura del mismo, adquirió a finales del año 1999, un moderno equipo triaxial dinámico y una columna resonante. Durante este tiempo se ha trabajado en el manejo y adecuación de los equipos para la implementación de diferentes ensayos. Es de entender que ésta es una labor que requiere tiempo, dedicación e investigación.

2. CONCEPTOS

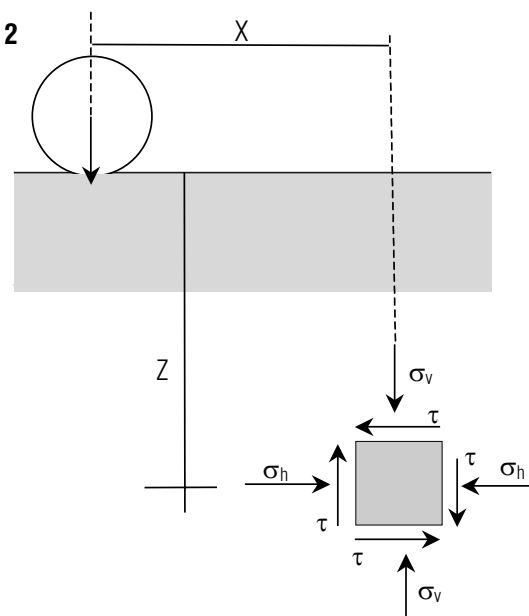
La subrasante está sometida a un estado de esfuerzos variables y por ende a un estado de deformaciones en el momento que los vehículos aplican las cargas sobre la estructura del pavimento. Debido a la característica de las cargas impuestas por los vehículos, parte de la deformación se recupera cuando la carga es retirada. En la figura 2 se presenta un esquema de esfuerzos en la subrasante.

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

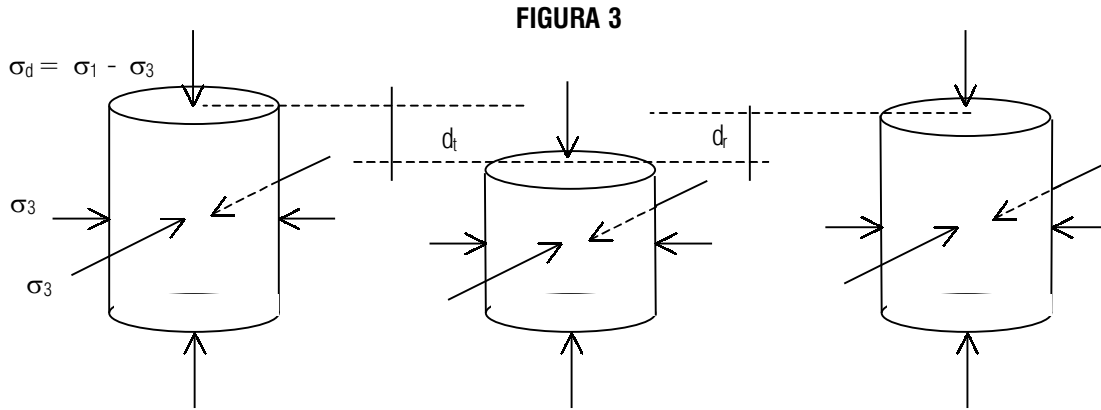
El módulo resiliente (M_r) se define como la relación entre el esfuerzo desviador (σ_d) y la deformación unitaria recuperada (ϵ_r), tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

FIGURA 2



El esquema de esfuerzos al que son sometidas las muestras de ensayo, se puede representar según lo que se muestra en la figura 3.

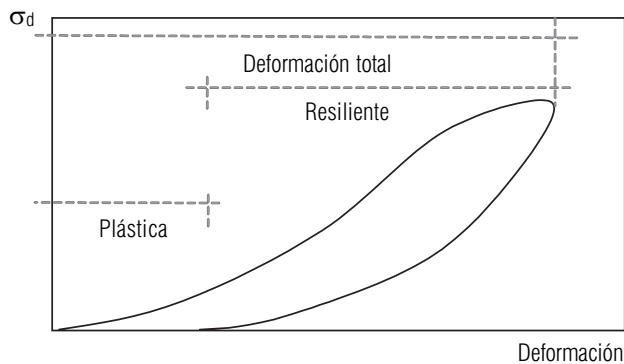


- σ_3 : Esfuerzo de confinamiento
- σ_1 : Esfuerzo axial
- $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$: Esfuerzo desviador
- d_t : Deformación total
- d_r : Deformación recuperada
- $d_t - d_r$: Deformación remanente

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

El esquema de la figura 3 se puede explicar de la siguiente manera: al aplicar una carga creciente se incrementa la deformación; cuando la carga se reduce la deformación también se reduce, pero no toda ella se recupera. Por lo tanto, la deformación total se compone de dos partes: una plástica o permanente y una elástica o resiliente. Únicamente, la resiliente o recuperada se utiliza para calcular el módulo resiliente. En la figura 4 se presenta una secuencia de carga y descarga y los parámetros asociados.

FIGURA 4



3. MÉTODO DE ENSAYO

Uno de los métodos más conocidos para la determinación del módulo resiliente en suelos finos granulares, es presentado por la AASHTO en la norma T 294. En Colombia, el Instituto Nacional de Vías presenta un método similar en la norma INV E 156.

A continuación se hace una breve descripción del equipo necesario y de los aspectos más relevantes en la realización del ensayo.

3.1 Equipo

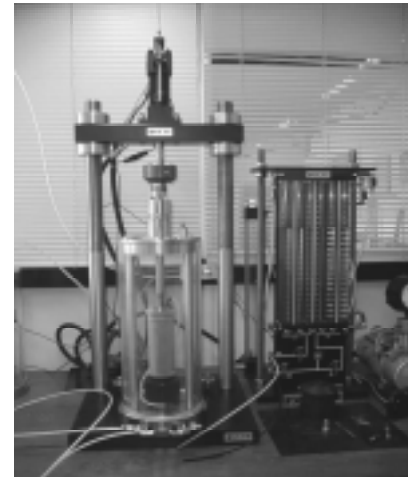
Para la determinación del módulo resiliente se utiliza un equipo que consta de una cámara triaxial para ensayos cíclicos, un marco de carga con un actuador dinámico servocontrolado para producir una onda senosoidal media en un período y frecuencia determinados, un panel de control y de mediciones de presiones de cámara, de poros y efectiva, y una unidad de adquisición de datos con software de procesamiento.

En las fotografías 1 y 2, se puede observar el equipo de la Universidad EAFIT, el cual cumple dichas condiciones.

FOTO 1



FOTO 2



3.2 Geometría de la muestra

Ésta depende de la capacidad de la cámara triaxial; generalmente se trabajan con muestras con diámetros de 38 mm, 75 mm y 100 mm, que tenga una relación de altura a diámetro o relación de esbeltez de 2 a 3.

Algunos investigadores sugieren el uso de muestras con una relación de esbeltez de 2,5 para minimizar los efectos de columna y bloque.

3.3 Estado de la muestra

El ensayo puede realizarse sobre muestras inalteradas o compactadas, saturadas o parcialmente saturadas, de acuerdo con las necesidades del proyecto.

3.4 Condición de esfuerzos

Las muestras a ensayar se deben someter a secuencias de esfuerzos combinados de confinamiento y desviadores. En las tablas 1, 2 y 3 se presentan algunas secuencias sugeridas por la SHRP (Strategic Highway Research Program) y la AASHTO.

TABLA 3
SHRP TP46 - Suelos tipo 2

Combinación de esfuerzos	Presión de confinamiento (kPa)	Esfuerzo Desviador (kPa)				
Primera	41,4	13,8	27,6	41,4	55,2	68,9
Segunda	27,6	13,8	27,6	41,4	55,2	68,9
Tercera	13,8	13,8	27,6	41,4	55,2	68,9

TABLA 2
AASHTO T294 -Suelos tipo 1

Combinación de esfuerzos	Presión de confinamiento (kPa)	Esfuerzo Desviador (kPa)		
Primera	20,7	20,7	41,4	62,1
Segunda	34,5	34,5	69	103,5
Tercera	68,9	69	137,9	206,8
Cuarta	103,5	69	103,5	206,8
Quinta	137,9	103,5	137,9	275,8

TABLA 3
AASHTO T294 -Suelos tipo 2

Combinación de esfuerzos	Presión de confinamiento (kPa)	Esfuerzo Desviador (kPa)				
Primera	41,4	13,8	27,6	41,4	55,2	68,9
Segunda	20,7	13,8	27,6	41,4	55,2	68,9
Tercera	0	13,8	27,6	41,4	55,2	68,9

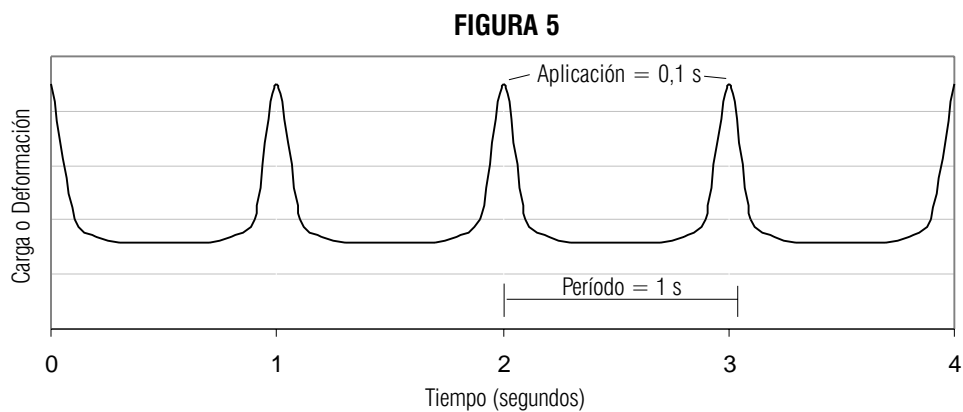
3.5 Duración y aplicación de las cargas

Los métodos de ensayo sugieren que el tiempo de duración de la aplicación de la carga sea de 0,1 segundo y el período para repetir dicha aplicación sea de 1,0 segundo.

El número de repeticiones de carga por secuencia sugerido por las anteriores instituciones es de 100. La norma INV E 156 sugiere 200 repeticiones por secuencia. Antes de someter las muestras a la secuencias de ensayo, se deben someter como mínimo a 1000 ciclos de carga con el fin de disminuir la tixotropía.

3.6 Monitoreo durante el ensayo

En el transcurso del ensayo, muchos equipos esquematizan el comportamiento del esfuerzo desviador y la deformación axial. Éstos, generalmente, tienen la forma que se presenta en la figura 5, que corresponde a una onda senosoidal media.

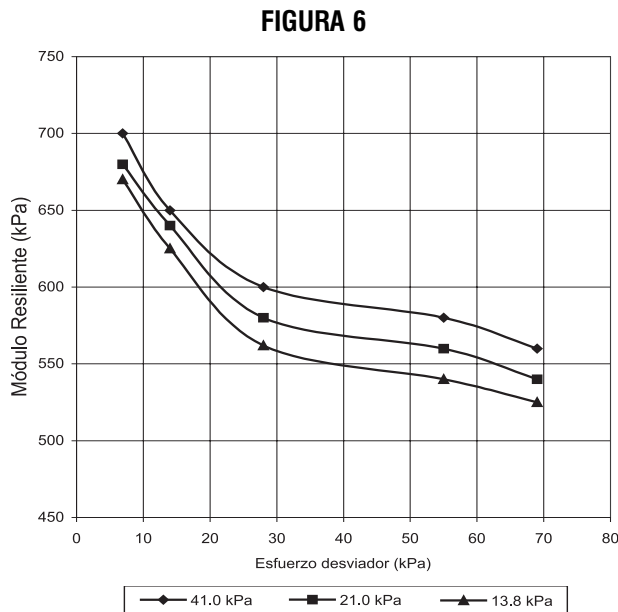


4. RESULTADOS

Para cada secuencia del ensayo, se calcula el esfuerzo desviador y la deformación recuperada, con el fin de determinar el módulo resiliente para diferentes condiciones de esfuerzos que pueden estar de acuerdo con las que se presentan en las tablas 1, 2 y 3, del numeral 3.4. Los valores se deben relacionar en gráficos con el fin de tener una mejor visión del comportamiento del suelo, los cuales se presentan a continuación.

4.1 Gráfico de esfuerzo desviador contra Mr para cada presión de cámara

Los puntos que conforman una cualquiera de las curvas, representan la relación entre el esfuerzo desviador y el módulo resiliente para un mismo esfuerzo de confinamiento, a diferentes estados de esfuerzo axial cíclico. En la figura 6 se presenta una gráfica obtenida en un ensayo de Mr.



4.2 Gráficos de Mr contra esfuerzo desviador y suma de esfuerzos principales (θ) y ecuación constitutiva del suelo

Esta gráfica tipo log-log se obtiene al relacionar la sumatoria de los esfuerzos principales ($\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$) y el módulo resiliente para cada punto de las curvas que se presentan

en la figura 6. Se determina posteriormente la ecuación, de tipo exponencial de la línea de tendencia del comportamiento del suelo bajo las condiciones del ensayo. Algunos autores aplican este modelo a los suelos gruesos granulares, donde se pueden apreciar mejores resultados. Un gráfico similar se puede realizar al relacionar el esfuerzo desviador con el Mr, tal como se muestra en la figura 8. El cual es ampliamente usado en suelos finogranulares.

FIGURA 7

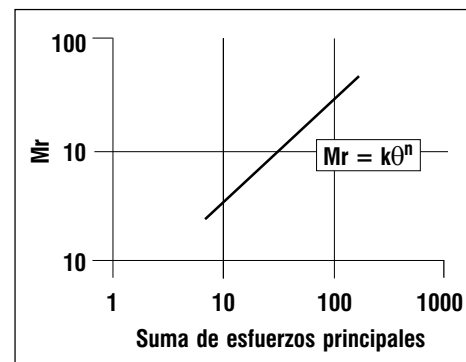
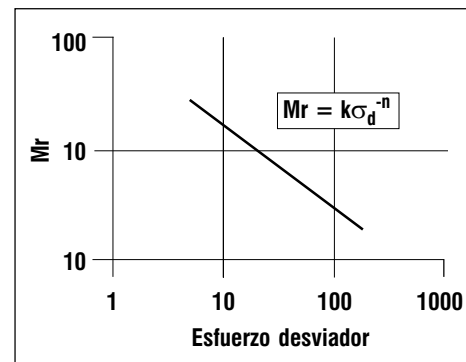


FIGURA 8



5. CORRELACIONES DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL ENSAYO CBR

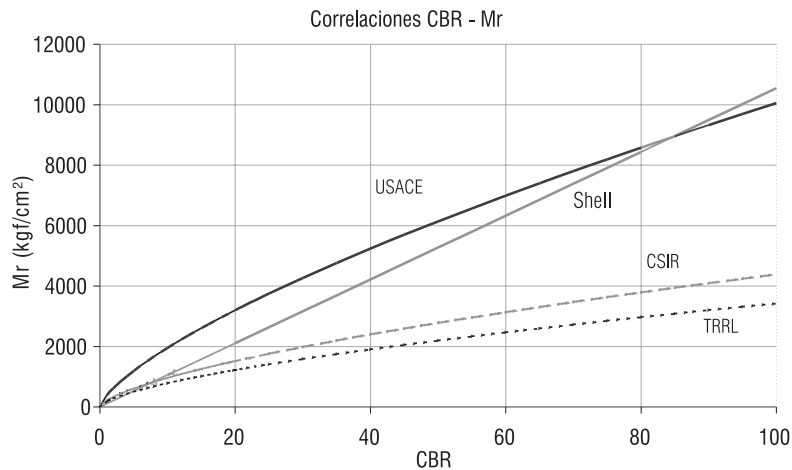
Muchos investigadores se han preocupado por establecer correlaciones del módulo resiliente con otros ensayos utilizados normalmente en el diseño de los espesores de la estructura de pavimentos. Dentro de éstas, la más utilizada ha sido la correlación con el CBR. Es importante tener en cuenta que muchas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

Es importante tener en cuenta que muchas de las correlaciones son más de tipo regional, lo que debe limitar el uso indiferente para cualquier tipo de suelo. Solamente, con una gran experiencia y criterio, el ingeniero podrá seleccionar la correlación más adecuada para un proyecto específico.

- Shell (Heukelomm y Foster 1960)
 $Mr \text{ (psi)} = 1500 \text{ CBR}$
- U.S. Cuerpos de Ingenieros (USACE) (Green y Hall 1975)
 $Mr \text{ (psi)} = 5409 \text{ CBR}^{0.711}$
- Concilio Sur Africano de Investigaciones Científicas e Industriales (CSIR)
 $Mr \text{ (psi)} = 3000 \text{ CBR}^{0.65}$
- Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL) (Lister 1987)
 $Mr \text{ (psi)} = 2555 \text{ CBR}^{0.64}$

A continuación se presentan algunas correlaciones empíricas entre el CBR y el valor del módulo resiliente. En la figura 9 se esquematizan las mismas.

FIGURA 9



Shell, CSIR y TRRL presentan una modificación a las anteriores correlaciones, teniendo en cuenta el número de ejes equivalentes (N) de 8,2 toneladas durante el período de diseño, tal como se muestra en la tabla 2. Es importante destacar que la representación de las ecuaciones tiene la siguiente forma: $Mr = K * CBR^n$

donde K varía con el valor de N.

Proponente	Valor recomendado de K para diferentes N			
	1×10^5	1×10^6	1×10^7	5×10^7
Shell $Mr = K * CBR$	1500	1750	2300	2900
CSIR $Mr = K * CBR^{0.65}$	3200	3700	4700	5800
TRRL $Mr = K * CBR^{0.64}$	3250	3800	4800	5900

6. DETERMINACIÓN DEL VALOR MR PARA APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS

La determinación del valor del Mr a utilizar para el diseño de la estructura de pavimento, se logra a partir de la utilización de la ecuación constitutiva del ensayo que puede estar en función del esfuerzo desviador o de la sumatoria de esfuerzos principales. Algunas instituciones recomiendan valores base de esfuerzos desviadores y otros valores medios de deformaciones unitarias.

También se puede agotar el recurso de modelar la estructura del pavimento por programas de computadores, utilizando programas de elementos finitos y otros, que nos muestren la distribución de esfuerzos dentro de la estructura. Es labor del ingeniero elegir el valor de diseño que considere adecuado a las características del proyecto.

7. RESULTADOS DE UN ENSAYO

En las figuras 10, 11 y 12, se presentan los resultados gráficos de un ensayo realizado a una muestra de un limo parcialmente saturado, realizado en los equipos de la universidad EAFIT.

FIGURA 10

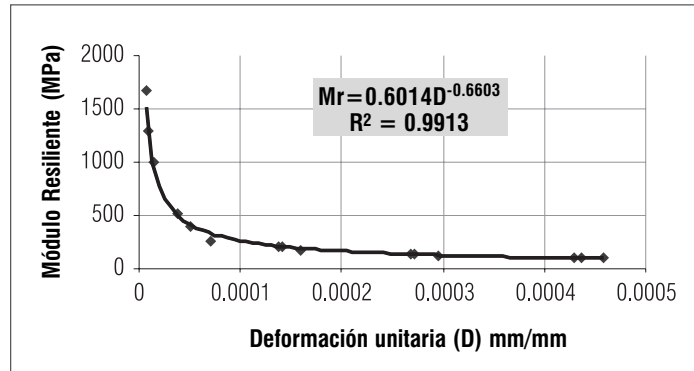


FIGURA 11

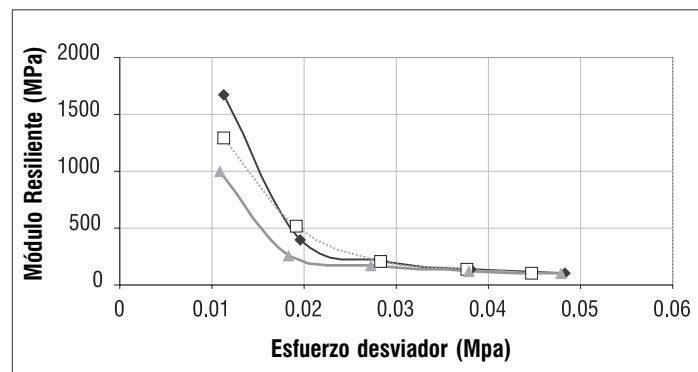
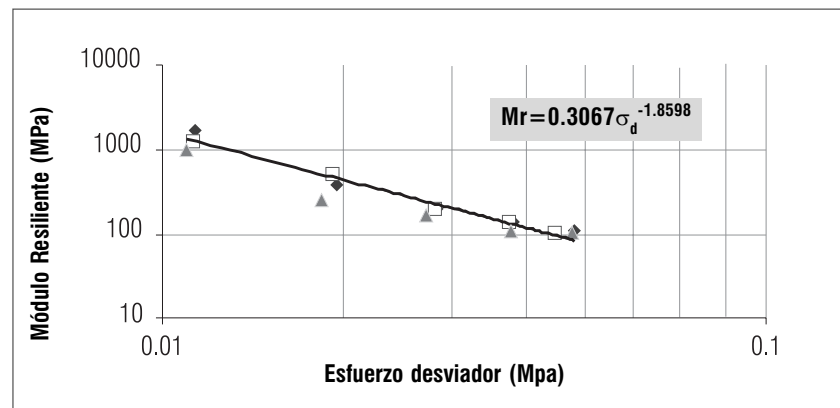


FIGURA 12



BIBLIOGRAFÍA

- Angelone, Silvia; Martínez, Fernando y Tosticarelli, Jorge. Módulo Resiliente de Suelos y Materiales no Tratados. Su aplicación al diseño estructural de pavimentos en Argentina.
- ASCE (1998). Application of Geotechnical Principles in Pavement Engineering. Edited by A. T. Papagiannakis and C. W. Schwartz.
- ASTM (1981). Special Technical Publication 807. Properties of Flexible Pavement Materials. Editor by John J. Emery, Trow Ltd.
- Instituto Nacional de Vías. (1998). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, Tomo I: Suelos, Norma I.N.V.E - 156 "Módulo Resiliente de Suelos de Subrasante".
- Li, Dingqin and Seling, Ernest T. (1994). Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils. Journal of Geotechnical Engineering. June, p 939 - 957.
- Lee, Woojin, Bohra, N.C, Altschaeffl, A.G and White, T.D. (1997). Resilient Modulus of Cohesive Soils.. Journal of Geotechnical Engineering. Feb, p. 131 - 136.
- Montejo Fonseca, Alfonso (1998). Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, 2da edición, Universidad Católica de Colombia.
- Sánchez Guando, Juan y Vigo, Jauregui. Características Dinámicas (Mr) de los Materiales para construcción de Pavimentos. Oficina de Control de Calidad. Dirección General de Caminos del Perú.

