

Relación del módulo resiliente de materiales de subbase obtenido mediante retro-cálculo y el medido en el laboratorio en el "tramo de prueba inteligente de Virginia"



Flintsch, Al-Qadi, Park, Brandon y Apnea
Virginia Tech Transportation Institute
Traducción: Ing. Jenny Chaverri (LANAMME)

El proyecto del "tramo de prueba inteligente" en Virginia provee una excelente oportunidad para probar varias hipótesis en el desempeño del pavimento, las características de los materiales y sus combinaciones. El tramo del pavimento flexible incluye 12 secciones de 100 metros de longitud (aproximadamente), las cuales han sido minuciosamente estudiadas por un complejo arreglo de sensores que han sido localizados debajo de la carretera cuando se construyó. Durante la construcción del pavimento, se ha utilizado un Deflectómetro de Impacto (FWD) para recolectar información de las deflexiones, se aplicaron diferentes cargas sobre la superficie del pavimento. En adición, se ha realizado la evaluación del módulo resiliente para la subbase de material granular (21 - B). El resultado del módulo resiliente para la capa de subbase (21 - B) existente en el "tramo de prueba inteligente" de Virginia, indica que el módulo del material es función de los esfuerzos y su comportamiento se puede predecir mediante un modelo $k-\theta$. Los resultados de las deflexiones producto del ensayo con el FWD, confirman la dependencia de los esfuerzos con los módulos; sin embargo, el resultado del FWD muestra una influencia menos pronunciada del estado del esfuerzo con respecto a los módulos. En general, el módulo obtenido mediante retrocálculo, puede compararse con el módulo medido en el laboratorio.

INTRODUCCIÓN

El "tramo de prueba inteligente" en el Sur de Virginia es único, es un pavimento a escala natural para la investigación y evaluación de conceptos, tecnologías y productos de "Sistemas de Transporte Inteligente" (ITS: Intelligent

Transportation Systems). Este es el primero de su especie en ser construido, con un sistema de sensores incorporados dentro del pavimento. Cuando el tramo de prueba esté completo, será una pista de 9.6 km que conecta la autopista "Blacksburg" y la intersección I - 81, los primeros 3.2 km son designados como un tramo de prueba controlado, del cual 1.6 km es de hormigón y 1.6 km es pavimento flexible.

El proyecto de tramo experimental de Virginia proporciona una excelente oportunidad para probar varias hipótesis en el desempeño de los pavimentos, la caracterización de los materiales y sus combinaciones. La información que pueda

sensores localizados debajo del pavimento y colocados durante la construcción del mismo. En estas secciones se evalúan diferentes condiciones climáticas, por lo que se puede evaluar los efectos del clima. El arreglo de sensores (el cual incluye diferentes tipos de medidores de deformación, celdas de presión, termocuplas, y sondas de resistividad) provee información de mucha utilidad del desempeño real del pavimento bajo una carga vehicular y condiciones ambientales (1). La composición del sistema de las 12 secciones del pavimento es presentada en la **tabla 1**. Durante la construcción, se utilizó un FWD para recolectar los datos de deflexión utilizando diferentes cargas sobre la superficie de cada pavimento. En

Tabla 1. Secciones de Pavimento del "tramo de prueba inteligente"

Sección	Longitud (m)	Superficie 38 mm	BASE BM-25.0	BASE SM-9.5 A	OGDL	21A Agregado	21B Agregado	Pavimento Espesor	Fill/Cut
A	104	SM-12.5D	150	0	75	150	175	588	Fill
B	90	SM-9.5D	150	0	75	150	175/GT	588	Fill
C	87	SM-9.5E	150	0	75	150	175/GT	588	Fill
D	117	SM-9.5A	150	0	75	150	175/GT	588	Fill
E	76	SM-9.5D	225	0	0	150	75/GT	488	Fill
F	94	SM-9.5D	150	0	0	150	150	488	Fill
G	90	SM-9.5D	100	50	0	150	150/GT	488	Fill
H	90	SM-9.5D	100	50	75	150	75	488	Cut
I	98	SM-9.5D*	100/RM	0	75	150	75	488	Cut
J	92	SM-9.5D	225	0	75	0/MB	150	488	Cut
K	86	OGPC	225/SR	0	75 (+)	0	150	488	Cut
L	104	SMA-12.5+	150/RM	0	75 (+)	150	75	488	Cut

ser obtenida del tramo experimental, será una importante contribución en el intento nacional para predecir el desempeño de los pavimentos. El pavimento flexible incluye 12 secciones de 100 metros de longitud (aproximadamente). Siete de las 12 secciones están localizadas sobre un relleno, mientras que el resto de las cinco secciones están localizadas sobre un corte. Las 12 secciones son minuciosamente observadas por un complejo arreglo de s de

adición, se ejecutó la evaluación del módulo resiliente del material granular para sub base (21 - B). Este documento se enfoca en la comparación del módulo resiliente de una capa granular de espesor infinito obtenida en pruebas de laboratorio y el módulo resiliente obtenido por retrocálculo con base en las deflexiones provenientes del FWD.

MÓDULO RESILIENTE DEL LABORATORIO

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Las muestras utilizadas para el ensayo del módulo resiliente consisten en material de subbase (21 - B) obtenido en el proyecto del "tramo de prueba inteligente" en Virginia. Las muestras fueron extraídas tanto de la capa terminada de la subbase, así como de la fuente de materiales. La prueba del módulo resiliente fue preparada de acuerdo con los requisitos de los especímenes cilíndricos, según las especificaciones del "American Association of State Highway and Transportation Officials" (AASHTO) (2), el cual requiere un espécimen cilíndrico de una altura dos veces el tamaño de su diámetro. Los especímenes fueron preparados utilizando un molde con un diámetro de 100 mm y una altura de 200 mm.

El tamaño máximo de partícula permitido para muestras triaxiales, no debe exceder el 1/16 del diámetro del espécimen

(16 mm para el espécimen del ensayo). Luego, el material granular 21 - B, el cual tiene un tamaño máximo de agregado de 25 mm, es tamizado usando una malla de 16 mm.

El material 21 - B es mezclado con agua para obtener el contenido de humedad deseado. La muestra fue compactada en un molde utilizando un martillo de Proctor Modificado, con una energía de compactación de 2693.3 kJ/m³ (Nota: El promedio de la máxima densidad seca del Proctor Modificado para estas muestras es de 2.46 ton/m³ y el contenido óptimo de humedad es de 6.7%). Las muestras fueron preparadas y compactadas en un rango de densidades entre 2.23 ton/m³ y 2.36 ton/m³, el cual corresponde a un rango de valores relativos de compactación de campo de 90% a 97% para el Proctor Modificado.

Luego de la compactación, la muestra fue colocada sobre una roca porosa de la celda triaxial, y otra roca porosa fue colocada sobre la parte superior de la muestra. La celda triaxial fue colocada en el centro de un plato hidráulico MTS. La barra del

pistón de la cámara fue conectado con la celda de carga, la cual es colocada en la máquina MTS. El desplazamiento relativo del pistón de la celda triaxial fue medido utilizando un extensómetro colocado en la parte superior de la celda triaxial. Finalmente, la línea de presión del aire fue conectada a la celda de presión para aplicar la presión lateral. La **tabla 2** presenta las propiedades del suelo de la muestra.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

El módulo resiliente se define como el

Tabla 2. Propiedades de las muestras ensayadas

Especímen	Contenido de	Compactación	Densidad
	Humedad (%)	Relativa (%)	Seca
1	4.46	96.17	2.36
2	5.54	93.8	2.3
3	5.44	96.11	2.36
4	4.7	97.16	2.38
5	6.22	91.67	2.25
6	5.09	94.83	2.33
7	4.54	96.74	2.37
8	5.06	96.79	2.37
9	6.18	93.06	2.28
10	3.66	91.13	2.28

esfuerzo desviador cíclico dividido por la deformación axial recuperable, tal y como se muestra en la ecuación 1:

$$Mr = q_r / \epsilon_r \quad (1)$$

Donde,

q_r = esfuerzo desviador

ϵ_r = deformación axial resiliente (o recuperable)

Mr = módulo resiliente

El módulo resiliente es función de la presión de confinamiento y el nivel del esfuerzo desviador cíclico. El AASHTO recomienda que se lleve a cabo una serie de ensayos variando la presión confinante y el nivel cíclico del esfuerzo desviador. La primera condición de carga corresponde a una etapa de carga condicionada con el fin de que ocurra un acomodo de las placas.

Debe notarse, que el esfuerzo desviador

máximo especificado para cada secuencia tiene dos componentes: el esfuerzo de contacto y el esfuerzo cíclico. El esfuerzo desviador máximo (σ_{max}) es igual al esfuerzo cíclico (σ_{cyclic}) más el esfuerzo de contacto ($\sigma_{contact}$). El esfuerzo de contacto se define como el 10% del esfuerzo máximo desviador. En otras palabras:

$$\sigma_{max} = \sigma_{cyclic} + \sigma_{contact} \quad (2)$$

Donde,

$$\sigma_{contact} = 0.1 * \sigma_{max}$$

El esfuerzo de contacto asegurará que la muestra permanezca en contacto con la cobertura superior. La carga cíclica es $(\cos \theta) / 2$, aplicada a una frecuencia de 1 Hz (ciclo/segundo). Consiste en dos etapas: un período de carga de 0.1 segundo y un período de 0.9 segundos como período de relajación.

El procedimiento de una secuencia típica del ensayo se detalla a continuación:

1. La magnitud de carga real es calculada multiplicando el esfuerzo desviador por el área de la sección transversal de la muestra.
2. Las válvulas localizadas en la parte superior e inferior de la muestra se abren para asegurar que exista la condición de presión atmosférica.
3. La presión confinante se aumenta hasta tener un valor específico para la secuencia de carga dada (por ejemplo, para la secuencia No.0 $\sigma_3 = 103.4$ kPa).

Tabla 3. Constantes del modelo K - θ (Ecuación 3)

ID	k_1	K_2	R^2	Error estándar
1	4897.8	0.656	0.991	0.0186
2	7568.3	0.59	0.978	0.0271
3	3845.9	0.703	0.984	0.0277
4	3357.4	0.583	0.967	0.0326
5	9015.7	0.558	0.969	0.0304
6	15346.2	0.489	0.947	0.0355
7	7362.1	0.609	0.993	0.0162
8	8222.4	0.589	0.986	0.0212
9	6426.9	0.623	0.981	0.0267
10	6998.4	0.6	0.977	0.0282
Average	7,304.1	0.6		

4. El esfuerzo de contacto y esfuerzo cíclico correspondiente (por ejemplo, para la secuencia No. 0, $\sigma_{contacto} = 10.3$ kPa y el $\sigma_{cíclico} = 93.1$ kPa) es fijado. El esfuerzo cíclico es adaptado con un número específico de aplicaciones de carga (500 veces para la secuencia No.0). Si la deformación permanente continúa después de la carga de 500 ciclos, entonces se deberán aplicar otros 500 ciclos. Si la deformación permanente es mayor que un 5% durante la etapa de condicionamiento (por ejemplo en la secuencia No. 0), el ensayo deberá detenerse porque la muestra no pudo ser compactada

7. Luego de realizarse el ensayo, se toma el peso de la muestra y se seca en un horno por 24 horas para obtener el contenido de humedad.

MODELO DEL MÓDULO RESILENTE

En esta investigación, fueron modelados tres ensayos de módulo resiliente. El primer modelo utilizado fue el modelo de respuesta k- θ , el cual ha sido extensamente usado para materiales granulares:

$$M_r = k_1 * \theta^k \quad (3)$$

resiliente versus la suma de los esfuerzos principales. Las constantes k_1 y k_2 fueron encontradas usando un análisis de regresión.

El segundo modelo utilizado es el modelo Uzan (6) (ecuación 4), en este caso, el módulo resiliente depende de la suma de los esfuerzos principales (θ) y el esfuerzo desviador.

$$M_r = k_2 * \theta^k * \sigma_d^{k_3} \quad (4)$$

Donde,

θ : es la suma de los esfuerzos principales (kPa);

σ_d es el esfuerzo desviador (kPa);

M_r es el módulo resiliente (kPa); y

k_1 , k_2 y k_3 son parámetros de regresión determinados mediante el uso de un análisis de regresión.

En el modelo propuesto por Witczak y Rada (7), el módulo resiliente también depende del grado de saturación y densidad. Este modelo contiene cuatro constantes y es dado por la siguiente ecuación:

$$\log M_r = C_0 + C_1 * S + C_2 * PC + C_3 * \log \theta \quad (5)$$

Donde,

M_r es el módulo resiliente (kPa);

S , es el grado de saturación (%);

PC es la compactación relativa modificada (%);

θ es la suma de los esfuerzos principales (kPa); y

C_0 , C_1 , C_2 y C_3 son los parámetros de regresión utilizando un análisis de regresión.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE LABORATORIO

Todas las constantes de las ecuaciones 3 a la 5 fueron determinadas usando un análisis de regresión. Los resultados de la regresión para los modelos k - θ , Uzan y Witczak y Rada son presentados en las *tablas 3 a la 5*, respectivamente.

El coeficiente de correlación (R^2) en todos los casos es mayor que 90%, eso significa que todos los modelos se correlacionan

Tabla 4. Constantes del modelo UZAN (Ecuación 4)

ID	k_2	k_1	k_3	R^2	Error estándar
1	5035	0.619	0.04026	0.992	0.0182
2	7447.3	0.609	-0.021	0.978	0.028
3	3944.6	0.671	0.0389	0.984	0.0283
4	3365.1	0.58	0.00315	0.967	0.034
5	9550	0.485	0.07827	0.974	0.0289
6	15170.5	0.505	-0.017	0.947	0.0368
7	7464.5	0.591	0.01958	0.993	0.0166
8	8091	0.609	-0.021	0.987	0.0218
9	6698.8	0.572	0.05434	0.983	0.0264
10	7834.3	0.461	0.149	0.993	0.0166

Table 5. Constantes del modelo Witczak y Rada (Ecuación 5)

ID	Valores
Parámetros estadísticos	150
C_0	0.506
C_1	0.0001707
C_2	0.003661
C_3	0.6
R^2	0.95
Error estándar	0.0368

apropiadamente.

5. Para la secuencia 1, el esfuerzo de contacto es fijado a 2.1 kPa, y la carga cíclica a 18.6 kPa. Se aplican cien ciclos de carga y se anotan los desplazamientos para los últimos cinco ciclos. Luego, la siguiente secuencia se inicia.

6. El rango para obtener la información para las muestras es de 100Hz.

Donde,

θ : es la suma de los esfuerzos principales (kPa);

M_r es el módulo resiliente (kPa); y

k_1 y k_2 son parámetros de regresión.

La ecuación 3 demuestra que el módulo resiliente es función de la suma de los esfuerzos principales (θ) (3, 4, 5). Esta ecuación es muy común porque es sencilla y puede aplicarse en un gráfico de módulo

apropiadamente con los datos. Como todos los modelos son apropiados estadísticamente, el modelo $k-\theta$ que es el más simple, fue seleccionado para hacer la comparación entre el módulo resiliente obtenido mediante retro cálculo y el obtenido en el laboratorio. Con base en este modelo y con el promedio de los coeficientes de todas las muestras se concluye que el módulo resiliente está en función de la suma de los esfuerzos principales.

cambiada por recomendaciones del SHRP (0, 203, 305, 457, 610, 914, 1524 mm para el plato de 0.3 m; y 0, 254, 305, 457, 610, 914, 1524 mm para el plato de 0.45 m) para las mediciones de las secciones I, J, K y L. Previo al ensayo, se ha procurado que el material tenga el contenido de humedad y la temperatura adecuado, de manera que existan las condiciones anteriormente señaladas en el momento en que se va a realizar la prueba.

utilizando diferentes procedimientos para proveer estimaciones iniciales del módulo elástico efectivo del material in-situ. El análisis de la deflexión medida sobre la subrasante fue inicialmente utilizado para determinar la combinación del módulo de la subrasante y la profundidad de la capa rígida que produce la mejor combinación de impacto usando la deflexión con el FWD. Se determinó el módulo en sitio de la segunda capa 21 - B construida (utilizando el espesor de capa medida), las deflexiones medidas sobre esta capa concuerdan con las deflexiones obtenidas en el retrocálculo del módulo, utilizando las propiedades determinadas en el paso anterior.

Tabla 6. Módulo de subrasante y profundidad de la capa rígida

Sección	Plato de 0.45 m		MSE	Plato de 0.3 m		MSE
	M _i (40 kN)	D _i (m)		M _i (40 kN)	D _i (m) ⁽¹⁾	
A	276	∞	1.5	345	∞	3.6
B	345	∞	2.7	345	∞	6.8
C	207	2.54	6.1	276	∞	13.5
D	241	∞	3.2	276	∞	7.7
E	172	1.78	13	241	∞	7.6
F	138	1.78	46.7	241	∞	3.3
G	172	1.78	4	207	∞	12.1
H	276	∞	25.6	276	∞	34.2
I	96	∞	1.8	1034	∞	2
J	379	2.54	1.5	345	∞	16.3
K	345	∞	14	276	∞	10.7
L	172	∞	24.9	172	∞	19.1

D_i: Profundidad de la capa rígida

DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE IN SITU

La evaluación de la capacidad estructural in situ de los materiales de subbase y subrasante fue evaluada mediante el FWD modelo 8000 de la compañía Dynatest. Los ensayos fueron realizados sobre la superficie del pavimento conformado por la subrasante y subbase (21 - B). Se ha seleccionado para el ensayo del FWD un punto localizado aproximadamente a 25 metros del inicio de la sección, lo anterior se aplica a cada sección y para todos los ensayos. Para el ensayo se ha utilizado aproximadamente cinco niveles de carga (22, 30, 40, 49 y 58 kN) y dos tamaños de plato (0.3 y 0.45 metros de diámetro). Para todos los casos, se utilizaron tres caídas de las pesas del FWD, más una inicial para estabilizar el sistema. El ensayo es realizado utilizando dos tipos de modelos estándar de posición de los geófonos. La configuración estándar VDOT (0, 305, 457, 610, 914, 1219 y 1524 mm) fue utilizada para el ensayo inicial, sin embargo, la configuración del espaciamiento de los geófonos fue

El ensayo del FWD empleado sobre la capa de subbase fue realizado justo después de su construcción (en marzo de 1999) sobre las primeras ocho secciones (de la A a la H); y en agosto de 1999 sobre las remanentes cuatro secciones (de la I a la L). Las deflexiones sobre la base granular fueron también medidas justo después de su construcción: en abril de 1999 sobre las secciones de la A a la H y en agosto de 1999 en las secciones de la I a la L. Un número limitado de ensayos fueron realizados en las secciones B y D debido a las operaciones constructivas que se realizaron en el momento del ensayo.

RETRO CALCULO DEL MÓDULO RESILIENTE

Los resultados del FWD fueron analizados

MÓDULO DE LA SUBRASANTE

Se utilizaron tres aproximaciones para estimar el módulo de la subrasante construida para todas las secciones experimentales:

1. Utilizando solamente la máxima deflexión (D₁) sobre un sistema de una capa homogénea, elástica, lineal y semi-infinita.
2. Utilizando todos los sensores (asumiendo un punto de carga) sobre un

Tabla 7. Módulo de la subrasante utilizando diferentes métodos

Sección	D ₁ & todos	Elsym5	Todos los sensores	D ₁ -D ₄ & todas
	Cargas	(40 kN)	& Cargas	Cargas
A	313	310	377	351
B	312	345	395	424
C	271	241	293	306
D	253	259	280	296
E	236	207	258	273
F	242	190	274	292
G	233	190	352	398
H	329	276	268	261
I	987	1000	780	675
J	359	362	478	553
K	333	310	341	381
L	202	172	203	228

sistema de una sola capa.

3. Usando un sistema de dos capas (modelado con el programa ELSYM5) para determinar tanto el módulo de la subrasante como la profundidad de la capa rígida.

Tabla 8. Módulo de la subbase utilizando el plato de 0.3 m de diámetro (Mpa)

Sección	Espesor (mm)	ELSYM5 (40 kN)	ELMOD4 (Todas las cargas)	Promedio. M _r (40 kN)
A	178	138	187	253
B	178	207	230	254
C	178	207	246	253
D	178	N/A	N/A	253
E	76	103	186	345
F	152	207	314	266
G	152	103	136	265
H	76	> 1.000	> 1.000	345
I	76	---	> 1.000	345
J	152	---	150	266
K	152	---	127	266
L	76	---	54	345

En general, los coeficientes de variación (COV) para las secciones fueron menores del 15%, excepto para algunas pocas secciones. Por tal motivo, los módulos para las secciones con COV mayores fueron cuidadosamente estudiados para identificar posibles causas. Por ejemplo, el módulo calculado con todos los niveles de carga para la sección I es muy alto. Esto podría atribuirse a la presencia de roca en una parte específica en donde se aplicó la carga.

Para estudiar una posible correlación entre determinados módulos y presiones aplicadas, se ha dibujado en la figura 3 el módulo calculado con base en la deflexión máxima D₀ contra la presión aplicada (no se toma en cuenta la sección I). Aunque el módulo tiende a incrementarse con la magnitud de la presión aplicada (coeficiente positivo en la ecuación de

MÓDULO SUPERFICIAL USANDO LA DEFLEXIÓN MÁXIMA (D₀)

Asumiendo un espacio semi-infinito, la teoría de la distribución de presión vertical debajo de un plato rígido (utilizado en el FWD) puede ser expresado como en la siguiente ecuación (8):

$$q(r) = \frac{q^*a}{2 * (a^2 - r^2)^{3/2}} \quad (6)$$

de,
a = radio del plato; y
r = distancia desde el centro del plato.

Si la solución para un punto de carga sobre un espacio homogéneo es integrado sobre el área de un plato rígido, tal como el del FWD, con la distribución de la presión dada en la ecuación 6, la máxima deflexión se expresa en la siguiente ecuación:

$$D_0 = \frac{\pi * (1 - \nu^2) * q^* * a}{2 * E} \quad (7)$$

Donde,
E = módulo de elasticidad; y
 ν = Radio de poisson.

De esta manera, en el ensayo FWD se conoce la deflexión máxima, D₀, y por lo

Tabla 9. Módulo combinado de la subbase y subrasante (Mpa)

Sección	Usando D ₀ y Todas las cargas	Todos los sensores y cargas	Usando D ₂ -D ₀ Y todas las cargas
A	195	322	363
B	230	328	358
C	183	226	244
D	129	192	218
E	162	249	278
F	194	323	364
G	138	238	279
H	342	299	282
I	1087	746	671
J	444	391	414
K	370	336	360
L	203	210	231

tanto es posible calcular el módulo elástico (E). Bajo repetidas aplicaciones de cargas, la mayoría de las deformaciones son recuperables (9). Entonces, el módulo elástico puede ser aproximado al módulo resiliente bajo la velocidad de las cargas aplicadas. El módulo de todas las secciones experimentales se puede calcular mediante la ecuación 7. Se utilizó para cada nivel de carga y tamaño del plato, el promedio de la carga aplicada y la deflexión en el centro del plato de carga. En la figura No.2 se muestra el promedio de diferentes valores de módulos para diferentes niveles de carga.

regresión), el coeficiente de correlación (R²) para la línea de tendencia indica que no existe una correlación estadística significativa entre el módulo y la presión aplicada.

MÓDULO SUPERFICIAL USANDO TODAS LAS DEFLEXIONES (D₀) Y UN PUNTO DE CARGA

La segunda aproximación evaluada calcula el módulo utilizando la ecuación para la deflexión superficial sobre un espacio lineal, homogéneo, elástico para un punto

de carga:

$$D_r = \frac{(1-\nu^2) \cdot P}{\pi \cdot r \cdot E} \quad (8)$$

donde,

P: es la carga aplicada;

r: es la distancia al centro de la carga; y

D_r: es la deflexión a una distancia r del centro del plato de carga.

Ullidtz (8) ha demostrado que la ecuación proporciona resultados que corresponden con aquellos utilizando una carga uniforme circular para puntos localizados a más de dos radios desde el centro de la aplicación de carga. Por lo tanto, el módulo fue calculado utilizando esta ecuación para sensores del uno al ocho para todos los impactos, y promediados por sección. Los valores para la deflexión D_r fueron obtenidos tal y como se indicó en secciones previas, utilizando la ecuación 7.

Para estudiar la no linealidad del módulo potencial de la subrasante, se dibujó el módulo calculado contra la distancia de los sensores al centro de la carga aplicada (Ver figura 4). El promedio de los valores para todos los sensores ha sido dibujado como una línea punteada. La subrasante presenta un comportamiento no lineal debido a que el módulo calculado tiende a incrementarse proporcionalmente conforme aumenta la distancia desde el punto de aplicación de la carga. Esto es más pronunciado para las secciones I a la L, que se ubican mayormente en el área de corte.

ANÁLISIS MULTICAPA ELÁSTICO

La presencia de una capa rígida fue investigada en el tercer método de estudio. La subrasante fue analizada como un sistema de dos capas, utilizando un programa de un modelo multicapa elástico, llamado ELSYM5. La subrasante fue modelada como una capa de espesor finito de carácter lineal y elástico, colocada sobre una capa rígida. Cada capa de pavimento fue caracterizada por su espesor, módulo resiliente, y módulo de Poisson.

Las deflexiones obtenidas por el geófono número siete, fueron calculadas con

diferentes espesores y módulos para la subrasante, se utilizó una carga de 40 kN mediante el FWD, para ambos platos (300 mm y 457 mm de diámetro) para simular el efecto del tamaño de plato. El módulo de la primera capa fue variado de 138 a 345 MPa en incrementos de 35 MPa. Se asumió que el módulo de la capa rígida (segunda capa)

comparados con las deflexiones medidas debajo de un plato rígido. Se ha obtenido el error estándar promedio (MSE) entre el retrocálculo y las mediciones de campo para cada modelo, se seleccionó el modelo con el menor MSE para cada sección, los resultados se resumen en la tabla 6. Aquellos resultados obtenidos mediante el

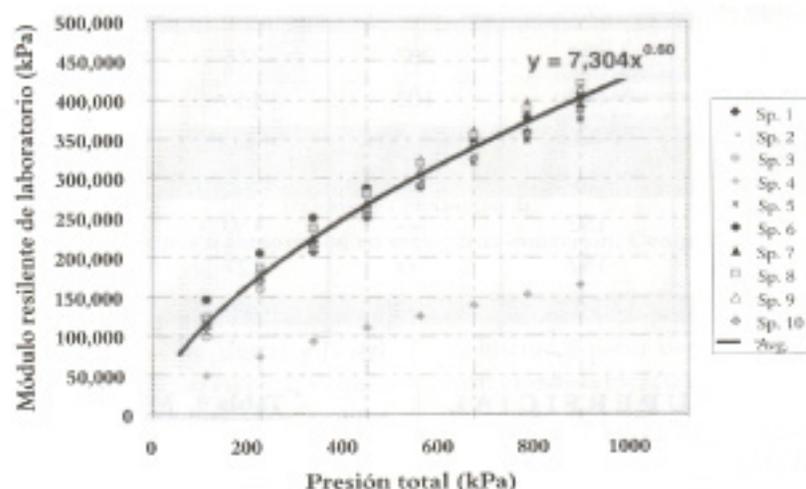


Figura 1. Módulo resiliente de laboratorio versus presión total

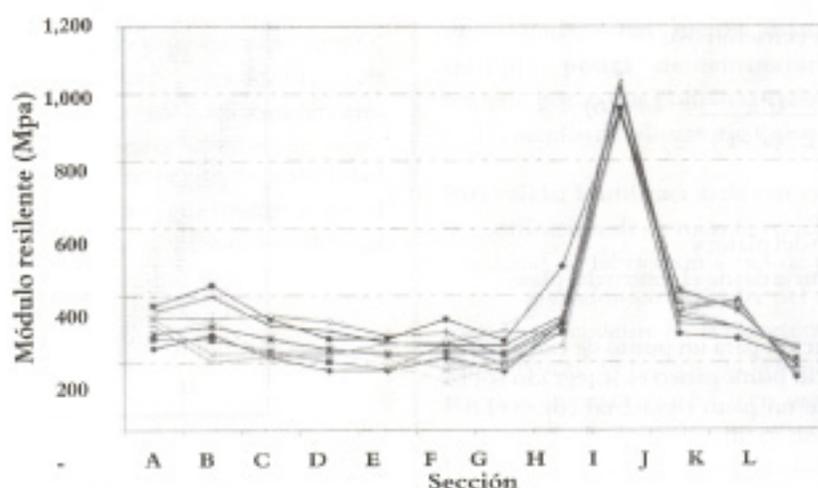


Figura 2. Módulo de la subrasante in situ utilizando la deflexión D_r.

sea de 6900 MPa. Para cada valor de módulo resiliente, el espesor de la primera capa fue variado según los siguientes valores: 0.25, 0.76, 1.78 y 2.54 m a una profundidad semi-infinita. Para materiales granulares se utilizó un módulo de Poisson de 0.35. Las deflexiones máximas producto del ELSYM5 (D_r) fueron corregidas utilizando los factores recomendados por Ullidtz (8) por lo tanto, ellos pudieron ser

plato de 300 mm y el de 475 mm presentan un comportamiento no lineal; no obstante, en algunas secciones los resultados obtenidos del plato de 457 mm aparenta indicar la presencia de una capa rígida, 1.8 a 2.5 m por debajo de la superficie. Debe notarse que los platos de 457 mm son los usualmente recomendados para el ensayo de la subrasante.

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE LA SUBRASANTE

Los resultados obtenidos de acuerdo a las diferentes aproximaciones se resumen en la *tabla 7*. La tabla muestra que los resultados son consistentes generalmente. Se observaron diferencias significativas para unas pocas secciones. El módulo calculado utilizando todos los sensores para la sección I es mucho más alto que para aquel obtenido sin los primeros dos sensores. Esto sugiere que debajo de los dos primeros sensores hay un pequeño espacio rígido. Por lo tanto, las deflexiones para aquellos dos sensores no fueron consideradas en los análisis subsiguientes.

BASE GRANULAR (21-B)

El módulo resiliente "in situ" para la base granular (21 - B) fue calculado basado en las deflexiones medidas sobre esa capa. El pavimento fue modelado como un sistema de dos capas: una capa de subbase y una de subrasante, utilizando el módulo anteriormente mencionado. En adición, el módulo de la combinación de la subbase y subrasante fue determinado utilizando las deflexiones medidas sobre la capa 21 - B pero asumiendo un semi-espacio.

SISTEMA DE DOS CAPAS

En esta aproximación, el pavimento para cada sección fue modelado como un sistema de dos capas, el cual consiste en una capa granular de espesor finito colocado sobre la parte superior de un semi-espacio con el módulo elástico mostrado en la última columna de la *tabla 7*. El módulo de la capa 21 - B fue estimado utilizando el programa ELSYM5 y ELMOD4 (*Tabla 8*). Para cada sección seleccionada, el módulo de la capa 21 - B resultó ser el de más bajo MSE. Utilizando el programa ELSYM5, se obtiene el promedio del módulo de la capa 21 - B para el rango de 100 a 200 MPa en las secciones A a la G, y de 400 MPa en las secciones de la J a la K. Algunos de los resultados, para las secciones H, I y J, son ilógicamente altos. Aquellas secciones que tienen un espesor delgado para la capa 21 - B (75 mm), usualmente causan problemas en los procedimientos de retrocálculo. También, el módulo de la subrasante calculado para las siguientes siete secciones, de la A a la G, son considerablemente más bajas que precisas las cuales fueron obtenidas para la

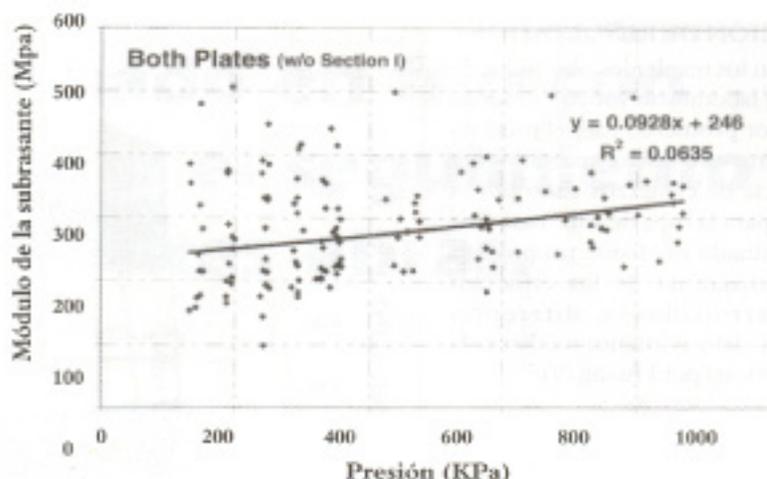


Figura 3. Módulo de la subrasante Versus Presión

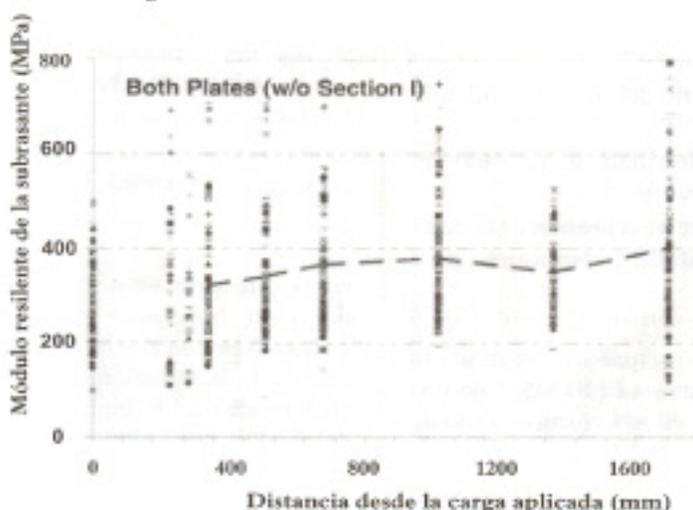


Figura 4. Módulo resiliente utilizando todas las cargas

subrasante.

El segundo grupo de resultados corresponde al análisis realizado mediante el programa ELMOD4. Este programa utiliza el método de retrocálculo de Odemark Boussinesq, permitiendo elegir un radio de curvatura (procedimiento por "defecto") o una deflexión basada en técnicas apropiadas. Los resultados, basados en el radio de curvatura, son dados en la *tabla 8*. Como se puede observar, los resultados son variables. En particular, los valores calculados para las secciones de la H a la I son ilógicamente altos y son aquellas secciones que han sido construidas sobre un relleno.

SISTEMA DE UNA SOLA CAPA

Dada una gran variabilidad de los resultados obtenidos mediante el

programa ELSYM5 y ELMOD4, y añadiendo el factor que se ha usado un material 21 - B colocado debajo de la sub base 21 - B; y similarmente entre el material 21 - B y las propiedades del material de relleno (comunmente 21 - B con agregado grueso), se ha considerado la posibilidad de tomar una subbase y una subrasante y estudiarla como una sola capa.

El módulo calculado utilizando sólo la máxima deflexión (ecuación 7), el promedio de todos los sensores, y los otros cinco sensores se resumen en la *tabla 9*. El promedio del módulo combinado calculado para cada sensor (todas las caídas) para las deflexiones medidas sobre la subbase (combinada) son similares a aquellas calculadas solamente por la subrasante.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Se compararon los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio y mediciones de campo. El valor promedio para el módulo resiliente, asumiendo un comportamiento de dependencia de esfuerzos dado por el modelo $k - \theta$ para la capa de sub base 21-B, fue determinado mediante un proceso iterativo. La magnitud de los esfuerzos fueron desarrollados a diferentes profundidades del pavimento mediante la ecuación propuesta por Huang (9):

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \gamma^* z^* (1 + K_s) \quad (10)$$

donde,

σ_1, σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales de una carga aplicada;

γ es el peso unitario del suelo (asumiendo 17.267 N/m^3)

z es la profundidad a la cual el esfuerzo es aplicado; y

K_s es el coeficiente de la presión de la tierra sobre la profundidad z (se asume aquí como 0.6)

El esfuerzo principal fue calculado mediante el programa ELSYM5, bajo una carga circular de 40 kN, y un módulo de 207 MPa y 306 MPa para la subbase y subrasante, respectivamente. Los esfuerzos fueron determinados utilizando una malla de puntos espaciados a 25 mm

Tramo experimental de ensayo para Ingeniería de Pavimentos

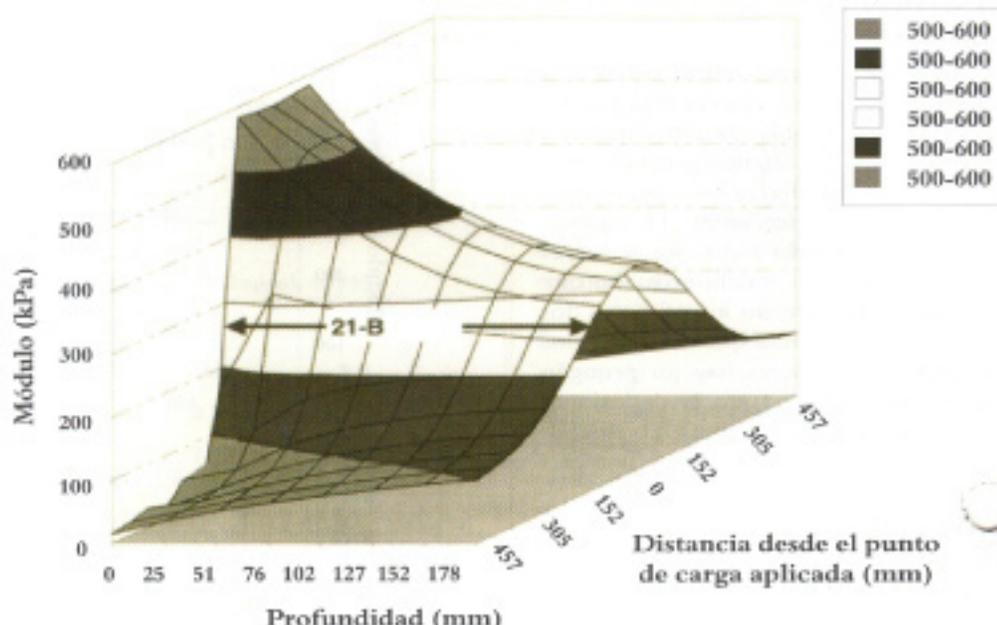


Figura 5. Distribución teórica del módulo resiliente

en la dirección vertical y 50 mm en la dirección horizontal. La suma de los esfuerzos principales (θ) fue utilizada para calcular la distribución del módulo basado en el modelo $k - \theta$ (Figura 5). El promedio del módulo sobre el área de influencia de la carga aplicada (considerando una línea de distribución de 30°) con la capa de subbase es de 253 MPa. El esfuerzo principal fue

recalculado utilizando el nuevo módulo de la capa 21-B. Se determinó la distribución de los esfuerzos principales y el promedio del módulo fue recalculado como un valor de 252 MPa, este valor es muy cercano al módulo obtenido previamente. Estos valores son aproximados a los valores determinados mediante el programa ELMOD4 (246MPa) o cuando se consideró una sola capa (244 MPa). Sin embargo, el módulo resiliente promedio estimado (última columna de la tabla 8) no concuerda con el módulo del retrocálculo para las capas de subbase de espesor pequeño (75 mm).

RESUMEN

Los resultados del módulo resiliente del laboratorio para la capa de subbase en el tramo de Virginia indica que el esfuerzo depende del tipo de material. En adición, su comportamiento se puede predecir mediante un modelo $k - \theta$. Los resultados de las deflexiones analizadas del FWD confirman la dependencia entre el módulo y el esfuerzo; sin embargo, los resultados del FWD muestran una influencia menos significativa del estado de esfuerzos. En general, se encontró que el módulo obtenido por retrocálculo es similar con el obtenido en el laboratorio. No obstante, esto no puede ser aplicado para subbases

menores a 100 mm.

AGRADECIMIENTOS

La construcción e instrumentación del proyecto del "tramo de prueba inteligente" de Virginia, ha sido posible a través de un esfuerzo cooperativo de algunas organizaciones federales y organizaciones, incluyendo el Centro de Virginia de Innovación Tecnológica, el Departamento de Transportes de Virginia (VDOT), el Consejo de Investigación de Transportes de Virginia (VTRC), la Administración Federal de Carreteras, y Virginia Tech. Hay un especial agradecimiento a Tom Freeman de la VTRC, y Dave Thacker de DOT.

REFERENCIAS

1. Al Qadi, I.L., Nassar, W.M., Loulizi, A., Flintsch, G.W. And Freeman T.E., "Flexible Pavement Instrumentation at the Virginia Smart Road", preprint 00 1275. *Transportation Research Board 79th Annual Meeting*, January 2000, Washington, DC, 2000.
2. AASHTO, Standart Test Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, AASHTO Designation: TP46 94, AASHTO Provisional Standard, 1994.
3. Hicks, R.G., Factors Influencing Resilient Response of Granular Materials, *Ph.D thesis*, University of California, Berkeley, CA, 1970.
4. Allen, J. J., and Thompson, M. R., Resilient Response of Granular Materials Subjected to Time Dependent Lateral Stresses, *Transportation Research Record*, no. 510, pp 1-13, 1974.
5. Khedr, S., 1985, Deformation Characteristics of Granular Base course in Flexible Pavements, *Transportation Research Record*, no. 1043, pp 131-138.
6. Uzan, J., Characterization of Granular Materials, *Transportation Research Record*, no. 1022, pp 52-59, 1985.
7. Witczak, M. W. and Rada, G., 1981, Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for

Granular Material, *Transportation Research Record* No. 810, pp 23-33.

8. Ullidtz, P., 1998, Modeling Flexible Pavement Response and Performance, *Polyteknisk Forlag, Lyngby, Denmark*.

9. Huang, Y. J., Pavement Analysis and Design. *Prentice Hall, Inc., NJ*, 1993.

Materiales de sondeo en sección transversal de un pavimento.

