

COMPORTAMIENTO DE UNA PISTA EXPERIMENTAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE CON BASE ESTABILIZADA CON CAL

César Augusto Hidalgo Montoya*
Carlos Arturo Pandales**
Boris Andrés Pedroza Valdés***
Mario Alberto Rodríguez Moreno****

Recibido: 10/12/2009

Aceptado: 07/05/2010

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados de una investigación realizada para determinar las propiedades de deformabilidad de bases estabilizadas con cal a partir de ensayos de campo no destructivos. Se realizaron ensayos de placa estática y viga Benkelman en un tramo de prueba de pavimento flexible de 70m de longitud. Se usaron diferentes mezclas de suelo-cal y varios espesores de la estructura para evaluar el comportamiento del pavimento. A partir de los resultados de estos ensayos fueron realizados retroanálisis del comportamiento del pavimento. El método de los elementos finitos y el modelo elástico de esfuerzos y deformaciones en sistema de capas múltiples se usaron en los retroanálisis para estimar los módulos de deformabilidad de la base estabilizada con cal. Se concluye que la adición de cal mejora sustancialmente las propiedades de los pavimentos evaluados.

Palabras clave: pavimento, bases estabilizadas, viga Benkelman, ensayo de placa, cal.

* Ingeniero civil, magíster en Geotecnia de la Universidad de Brasilia. Profesor asociado de la Universidad de Medellín. E-mail: chidalgo@udem.edu.co

** Ingeniero civil. Universidad de Medellín. E-mail: pondal17@yahoo.es

*** Ingeniero civil. Universidad de Medellín. E-mail: boris2785@hotmail.com

**** Ingeniero civil, magíster en Ingeniería de la Universidad de los Andes. Profesor de tiempo completo de la Universidad de Medellín. E-mail: marodriguez@udem.edu.co

BEHAVIOR OF AN EXPERIMENTAL TRACK OF FLEXIBLE PAVEMENT WITH LIME STABILIZED BASE

ABSTRACT

This paper presents results of a research carried out to determine the proprieties of deformation of lime stabilized bases using non destructive field tests. Static plate tests and Benkelman beam tests were made on an experimental track of flexible pavement of 70 m length. Several mixtures of soil-lime and several thickness of the stabilized base were used to evaluate the behavior of the pavement. With the results of these tests, back analysis of the behavior of pavement was carried out. The finite elements method and the elastic stress and strain in a multi layers system were used to estimate the deformation modulus of the lime stabilized bases. It is concluded that the lime addition significantly improves the properties of evaluated pavements.

Key words: pavements, stabilized bases, Benkelman beam, plate test, lime.

INTRODUCCIÓN

En la construcción de pavimentos flexibles en Colombia, las bases estabilizadas más usadas son las de suelo-cemento y las estabilizadas con asfalto. Sin embargo, recientemente se ha mostrado mediante estudios de laboratorio, realizados con mezclas de suelo residual y diferentes contenidos de cal, que los suelos estabilizados con cal presentan características mecánicas comparables con las de las mezclas de suelo-cemento [1-5]. Estos estudios han mostrado que contenidos de cal entre 6% y 9% producen incrementos sustanciales en la resistencia a la compresión simple, tracción indirecta, deformabilidad definida por el módulo de resiliencia, y a la erosión [1].

En cuanto al desempeño de estas mezclas de suelo y cal bajo acciones reales de tránsito, no existen muchos antecedentes en Colombia, y en el exterior también son relativamente pocos. Entre los trabajos en el exterior se pueden destacar los de Little y Yusuf [6] y Little et al. [7], quienes a partir de ensayos de laboratorio y de campo encontraron que el módulo resiliente se puede incrementar hasta 350% en un suelo tratado con cal en relación con su condición inicial, y el de Mooney y Toohey [8], quienes determinaron que el curado acelerado durante 5 días a 40° C es confiable para proyectar la resistencia a los 28 días de curado normal, pero que tiende a sobreestimar la resistencia.

En este trabajo se presentan resultados de una investigación realizada para determinar las propiedades de deformabilidad de bases estabilizadas con cal a partir de ensayos no destructivos. Se realizaron ensayos de placa estática y viga Benkelman en un tramo de prueba de pavimento flexible. Se usaron diferentes mezclas de suelo-cal y varios espesores de la estructura para evaluar el comportamiento del pavimento. A partir de los resultados de estos ensayos fueron realizados retroanálisis del comportamiento del pavimento utilizando dos *software* diferentes para

estimar los módulos de deformabilidad de la base estabilizada con cal.

1 TRAMO DE PRUEBA

En diciembre de 2005 se construyó un tramo de prueba de 70 m de longitud y 7 m de ancho en la abscisa km12+200 de la vía que comunica los municipios de Caldas y Angelópolis en el departamento de Antioquia, Colombia. El sitio donde fue construida la pista se caracteriza por una subrasante conformada por limos y cenizas volcánicas con CBR de 3% y por un intenso tráfico de camiones madereros y volquetas carboneras de hasta 20 toneladas, clasificados como vehículos C2 y C3. Debido a estas condiciones se identificó como un lugar adecuado para evaluar el desempeño de una estructura de pavimento flexible, incluyendo base de suelo estabilizado con cal.

La pista de prueba se conformó por una retícula de 20 celdas con diferentes espesores, tipos de material y porcentajes de cal. Las dimensiones de cada celda fueron 7 m de longitud y 3.5 m de ancho. En la tabla 2 se presentan las propiedades básicas de los suelos utilizados como base, el porcentaje de cal agregado y el espesor de la base y de la carpeta asfáltica de cada celda.

Como patrón de comparación se tomó la celda número 11 que fue construida con un material para base granular sin adición de cal y con un espesor de 0.30 m. El material granular usado fue una base BG-1 que satisfacía todas las especificaciones técnicas definidas por las Normas del Instituto Nacional de Vías [9] (ver tabla 1). Este material de base granular fue denominado MS-022 y también fue utilizado en las celdas 9 y 10, 12 a 20 con diferentes adiciones de cal y espesores como se muestra en la tabla 2.

El segundo material usado como base estabilizada fue un suelo residual maduro derivado de rocas metamórficas (esquistos), que de acuerdo

Tabla 1. Características físicas de los materiales de la base del pavimento.

Características	Suelo MS-59	Material granular MS-49	Base granular MS-022
Clasificación	MH (limo elástico)	-	BG-1
Límite líquido (%)	75,2	28	21
Límite plástico (%)	52,6	25,12	-
Índice plástico	22,6	2,88	-
Límite de contracción (%)	33	-	-
Gravedad específica:	2,78	2,77	2,91
% finos	87,2	-	9,7
% de desgaste	-	16,48	-
Humedad óptima (%)	-	6,5	-
Densidad máxima (kN/m ³)	-	22,8	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Materiales componentes de las celdas de la pista de prueba.

Celda	Tipo de material	Adición de cal en %	Espesor de la base (cm)	Espesor de la carpeta asfáltica (cm)
1	MATERIAL GRANULAR MS-49	3	30	8
2	MATERIAL GRANULAR MS-49	6	30	8
3	MATERIAL GRANULAR MS-49	6	30	8
4	MATERIAL GRANULAR MS-49	9	30	8
5	MATERIAL GRANULAR MS-49	12	30	8
6	SUELO MS-59	3	30	8
7	SUELO MS-59	6	30	8
8	SUELO MS-59	9	30	8
9	BASE GRANULAR MS-022	6	20	8
10	BASE GRANULAR MS-022	9	20	8
11	BASE GRANULAR MS-022	0	30	8
12	BASE GRANULAR MS-022	3	30	8
13	BASE GRANULAR MS-022	6	30	8
14	BASE GRANULAR MS-022	9	30	8
15	BASE GRANULAR MS-022	12	30	8
16	BASE GRANULAR MS-022	3	30	8
17	BASE GRANULAR MS-022	6	30	8
18	BASE GRANULAR MS-022	9	30	8
19	BASE GRANULAR MS-022	6	25	8
20	BASE GRANULAR MS-022	9	25	8

Fuente: elaboración propia.

con la clasificación unificada de suelos corresponde a un limo de alta plasticidad (MH) e identificado como suelo MS-059. Este material se utilizó en las celdas 6, 7 y 8. El tercer y último suelo fue el material que servía de base al pavimento existente en el sitio; se trataba de un material granular, tipo base, contaminado con limos y arcillas e identificado como material granular MS-49. Las características de estos materiales se presentan en la tabla 2.

Como se puede observar en la tabla 2, fueron utilizadas adiciones de cal hidratada de 3%, 6%, 9% y 12%. Estos valores fueron definidos a partir de los resultados de laboratorio obtenidos en trabajos previos mediante ensayos de compresión

simple, tracción indirecta y de módulo resiliente [1, 2], buscando incrementos hasta del 250% en la resistencia a la tracción y de 300% en la compresión simple.

2 ENSAYOS DE CAMPO

En cada una de las celdas se realizaron ensayos de placa estática y de viga Benkelman siete meses después de la construcción del pavimento.

2.1 Ensayos de placa

El ensayo de placa se realizó de acuerdo con la norma INVE 168-7. En la figura 1 se muestran los resultados de carga aplicada en la placa en fun-

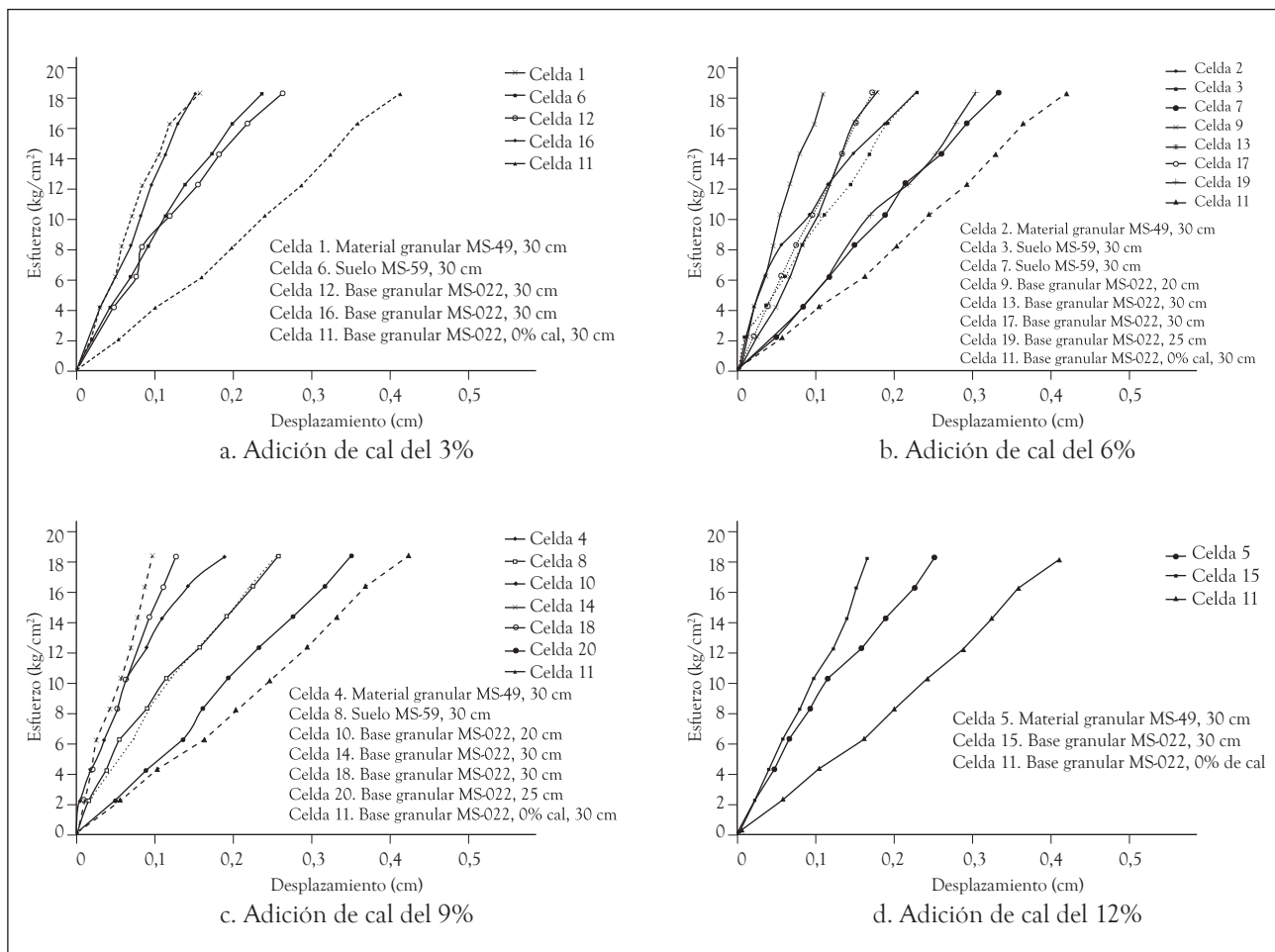


Figura 1. Curvas tensión-deformación de los ensayos de placa

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Resultados de ensayos de viga Benkelman.

Celda	Tipo de material	Cal %	Deflexiones		Radio de curvatura	Espesor estructura
			D0	D25		
1	MATERIAL GRANULAR MS-49	3	34	27	205	30
2	MATERIAL GRANULAR MS-49	6	31	19	135	30
3	MATERIAL GRANULAR MS-49	6	50	42	203	30
4	MATERIAL GRANULAR MS-49	9	31	19	134	30
5	MATERIAL GRANULAR MS-49	12	35	15	81	30
6	SUELO MS-59	3	58	46	135	30
7	SUELO MS-59	6	92	54	41	30
8	SUELO MS-49	9	50	38	135	30
9	BASE GRANULAR MS-022	6	30	27	410	20
10	BASE GRANULAR MS-022	9	57	46	137	20
11	BASE GRANULAR MS-022	0	117	42	21	30
12	BASE GRANULAR MS-022	3	79	53	59	30
13	BASE GRANULAR MS-022	6	38	36	828	30
14	BASE GRANULAR MS-022	9	30	15	104	30
15	BASE GRANULAR MS-022	12	38	34	414	30
16	BASE GRANULAR MS-022	3	23	11	138	30
17	BASE GRANULAR MS-022	6	30	23	207	30
18	BASE GRANULAR MS-022	9	34	30	414	30
19	BASE GRANULAR MS-022	6	49	42	207	25
20	BASE GRANULAR MS-022	9	91	60	52	25
Deflexiones en mm/100, radio de curvatura en metros, espesor de la estructura en centímetros						

Nota: D_0 es la medida de la deflexión en el centro del área cargada y D_{25} es la deflexión a 0.25 m del centro del área cargada.

Fuente: elaboración propia.

ción del desplazamiento medido. En estos gráficos se compara el comportamiento de todas las celdas con la celda 11. Se observa claramente que todas las celdas presentan una rigidez mayor, inclusive las que fueron construidas con el limo de alta plasticidad el cual es un suelo residual maduro.

Comparando los resultados obtenidos para los diferentes materiales con un mismo contenido de cal, se observa que el material granular MS-49 presenta mayores valores del módulo elástico de la estructura del pavimento que los del suelo MS-59. Al comparar los tres tipos de suelo con porcentajes de cal del 6% y 9%, y un mismo espesor de la base,

se aprecia que la base granular MS-022 presenta módulos elásticos mayores que los de los otros suelos. Resultado lógico si se considera la calidad de la base seleccionada.

En las celdas cuya base está compuesta con material granular MS-49 y suelo MS59, se observa una leve tendencia a disminuir la rigidez con el incremento de la adición de cal. En los pavimentos con base granular MS-022 no se aprecia una influencia clara del espesor de la base estabilizada con la rigidez del pavimento, lo cual se podría explicar por la variabilidad de las propiedades del suelo de la subrasante.

2.2 Ensayo de viga Benkelman

El ensayo de viga Benkelman se realizó de acuerdo con la norma INVE 795 y los resultados obtenidos son presentados en la tabla 3. Se observa una amplia dispersión de los resultados, sin una tendencia clara que se pueda asociar al aumento de las adiciones de cal. Al igual que en caso de los ensayos de placa, la única razón que explicaría esta dispersión, considerando que el proceso constructivo del pavimento fue bastante riguroso, es la variabilidad de los suelos de la rasante.

Usando los resultados de estos ensayos de viga Benkelman, Pandales y Pedroza [10] realizaron una evaluación a esta pista considerando un período de diseño de 12 años y encontraron que para dicho período el pavimento presentaría condiciones para un buen funcionamiento desde que el tránsito no superase $2,5 \times 10^6$ ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño.

Por otro lado, con base en los radios de curvatura y considerando el criterio según el cual valores inferiores a 80 m indican la presencia de zonas débiles bajo las capas asfálticas, se observa que entre los suelos utilizados el material granular MS-49 es el de mejor comportamiento, pues con sólo una adición de cal de 3% los radios de curvatura obtenidos son superiores a 80 m; para los otros dos materiales el comportamiento fue aleatorio.

Aunque se observa la disminución de las deflexiones en el pavimento al adicionarse porcentajes de cal entre 3% y 12%, no se evidencia una tendencia clara de la influencia del contenido de cal sobre las deflexiones en el pavimento. El material granular MS-49 presentó las menores deflexiones y la menor variabilidad en las mediciones, lo cual indica su mejor comportamiento cuando es estabilizado con cal. El material granular MS-49 y el suelo MS-59 presentan resultados homogéneos en las celdas con adición de cal del 3% y 9%. En el material granular MS-49 se puede establecer similar homogeneidad si se tiene en cuenta la adición de cal en 12%.

Los resultados de la base granular MS-022 son muy heterogéneos y presentan valores de deflexión altos y bajos para celdas con las mismas adiciones de cal y el mismo espesor.

3 RETROANÁLISIS

Los resultados de los ensayos de campo se usaron para realizar retroanálisis mediante el método de los elementos finitos y el modelo elástico de esfuerzos y deformaciones en sistema de capas múltiples. En el caso de los elementos finitos fue usado el programa Plaxis 8.2 [11], y para el modelo de capas múltiples fue usado el programa WINDEPAV 2.0 [12].

3.1 Retroanálisis del ensayo de placa

Para este proceso fue usado el método de los elementos finitos considerando elementos con simetría axial y se adoptó una geometría compuesta por tres capas: subrasante, base y carpeta de rodadura. Dado que las deformaciones producidas por el ensayo de placa se encuentran en el rango elástico se adoptó un modelo de comportamiento lineal elástico para cada una de las capas de la estructura. Los parámetros de los materiales fueron asumidos de acuerdo con su clasificación y se presentan en la tabla 5. Más detalles de los modelos empleados pueden ser consultados en [10].

El proceso de retroanálisis consistió en aplicar una carga uniformemente distribuida en la superficie del pavimento y calcular el desplazamiento vertical de la superficie en el eje de simetría. Este proceso se repitió de forma iterativa, variando el módulo de elasticidad de la base estabilizada y manteniendo los otros parámetros constantes, hasta determinar la carga necesaria para producir el desplazamiento impuesto durante el ensayo. Se dispuso que el error de aproximación aceptable sería el 1.5% del valor de la carga del ensayo de placa que fue 133.92

Tabla 5. Parámetros mecánicos de las capas del pavimento para análisis por elementos finitos.

Parámetros	Símbolo	Carpeta asfáltica	Base estabilizada	Subrasante	Unidad
Modelo del material	Elástico lineal				-
Tipo de comportamiento del material	Tipo	Drenado	Drenado	Drenado	-
Peso específico del suelo saturado	γ_{unsat}	20,0	20,0	16,5	KN/m ³
Peso específico del suelo saturado	γ_{sat}	23,0	24,0	20,0	KN/m ³
Permeabilidad en dirección horizontal	K _x	1,0	0,5	1,0	m/día
Permeabilidad en dirección vertical	K _y	1,0	0,5	1,0	m/día
Módulo de Young's	E _{ref}	1300000	(*)	72000	KN/m ²
Relación de Poisson	N	0,35	0,30	0,20	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Módulos de bases estabilizadas con cal obtenidos en el retroanálisis con el programa Plaxis.

Celda N°	Tipo de material	Cal %	Espesor de estructura	Módulos (kg/cm ²)	Carga (KN)
1	MATERIAL GRANULAR MS-49	3	30	11420	135,00
2	MATERIAL GRANULAR MS-49	6	30	4311	133,98
3	MATERIAL GRANULAR MS-49	6	30	4311	133,98
4	MATERIAL GRANULAR MS-49	9	30	7415	134,00
5	MATERIAL GRANULAR MS-49	12	30	3300	134,24
6	SUELO MS-59	3	30	3800	134,78
7	SUELO MS-59	6	30	1742	134,32
8	SUELO MS-59	9	30	3300	134,24
9	BASE GRANULAR MS-022	6	20	38500	133,72
10	BASE GRANULAR MS-022	9	20	5300	134,24
11	BASE GRANULAR MS-022	0	30	1020	133,43
12	BASE GRANULAR MS-022	3	30	2850	133,42
13	BASE GRANULAR MS-022	6	30	8450	133,61
14	BASE GRANULAR MS-022	9	30	51000	133,60
15	BASE GRANULAR MS-022	12	30	10000	133,74
16	BASE GRANULAR MS-022	3	30	12200	133,76
17	BASE GRANULAR MS-022	6	30	9000	133,53
18	BASE GRANULAR MS-022	9	30	22500	133,33
19	BASE GRANULAR MS-022	6	25	2400	134,58
20	BASE GRANULAR MS-022	9	25	1750	133,87

Fuente: elaboración propia.

KN. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

En los resultados se observa que los módulos de deformabilidad de las bases estabilizadas con cal son mayores que los de la base sin estabilizar. También se aprecia que las bases con material granular MS-49 presentan mayores valores del módulo que los del suelo MS-59 para un mismo porcentaje de cal. Para porcentajes de cal del 6% y 9%, con el mismo espesor de base, los valores de los módulos de la base granular MS-022 son mayores que los de los materiales MS-49 y MS-59.

3.2 Retroanálisis del ensayo de viga Benkelman

Para este análisis fue usado el modelo elástico de esfuerzos y deformaciones en sistema de capas múltiples. Los parámetros usados fueron asumidos por comparación con materiales similares [10] y de acuerdo con los resultados obtenidos en numeral 4.2, lo cual se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de las capas del pavimento para el modelo en Windepav 2.0

Capa	Parámetros de la estructura de pavimento		
	Módulo de elasticidad E (kg/cm^2)	Relación de Poisson μ	Espesor de la carpeta (cm)
Carpeta asfáltica	13000	0,35	8
Base	Variable	0,3	30, 25 o 20
Subrasante	720	0,2	-

Fuente: elaboración propia.

El proceso de retroanálisis se realizó usando un modelo de tres capas: subrasante, base y carpeta de rodadura. En el proceso sólo es requerido introducir datos de los materiales dado que los otros parámetros del modelo como son el radio del área de carga, la distancia entre ruedas y la presión de contacto vienen incorporadas en el programa WINDEPAV y se mantienen constantes.

Posteriormente se procedió a variar el módulo de elasticidad de la capa de base, realizando un proceso iterativo, manteniendo constantes los otros parámetros hasta obtener valores de deflexión aproximadamente iguales al valor de la deflexión obtenido en el ensayo de viga Benkelman (D_0). Como en el caso del análisis por elementos finitos, se dispuso que el error de aproximación aceptable sería el 1.5% del valor de la deflexión medida en el ensayo. Mediante este proceso se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 8.

De los resultados se observa que los módulos resilientes de las bases estabilizadas con cal son mayores que el módulo de la base sin estabilización de cal y que las celdas con bases con material granular MS-49 presentan mayores valores del módulo resiliente que las bases del suelo MS-59 para un mismo porcentaje de cal. También se observa que en los pavimentos con base granular MS-022 la variación del espesor de la base de cal no muestra una relación clara con la variación del módulo y el porcentaje de cal.

4 CONCLUSIONES

En general, los suelos adicionados con cal presentaron incrementos en los módulos de elasticidad en relación con los mismos suelos sin cal. Esto se evidenció tanto en los ensayos de placa, viga Benkelman como en los retroanálisis realizados. Esto sumado a los resultados obtenidos en investigaciones anteriores y publicados por Hidalgo [1] e Hidalgo y Rodríguez [2], muestran que la cal utilizada como estabilizante mejora significativamente el comportamiento de los suelos, lo cual la convierte en una alternativa para la construcción de pavimentos.

La utilización de materiales estabilizados con cal puede viabilizar el uso de suelos que no cumplen las especificaciones exigidas para bases granulares en la construcción de capas estructurales de pavimentos flexibles. De acuerdo con evaluaciones

realizadas con los resultados de viga Benkelman, las estructuras analizadas pueden desempeñarse adecuadamente con tránsitos del orden de $2,5 \times 10^6$ ejes, equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño para períodos de diseño de 12 años.

Aunque de los resultados obtenidos no se evidencia un valor óptimo de la adición de cal, el rango establecido previamente de 6%-9% continúa presentando desempeños satisfactorios para los suelos usados.

A partir de los resultados obtenidos, no es posible establecer relaciones claras desde el punto de vista estadístico entre el contenido de cal y los

valores medidos en los ensayos o calculados, por lo cual es recomendable que se realicen nuevas investigaciones en las cuales se haga un mayor número de mediciones para verificar posibles correlaciones y se controle la influencia de la variabilidad de los suelos de la rasante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Medellín y a la empresa Argos S. A. por la financiación del proyecto de investigación del cual se derivaron los resultados presentados en este trabajo.

Tabla 8. Módulos resilientes obtenidos en el retroanálisis con el programa Windepav.

Celda	Tipo de material	Cal %	Deflexiones (mm/100)		Radio de curvatura	Espesor de estructura	Módulos (kg/cm ²)
			D ₀	D ₂₅			
1	MATERIAL GRANULAR MS-49	3	34	27	205	30	11420
2	MATERIAL GRANULAR MS-49	6	31	19	135	30	4300
3	MATERIAL GRANULAR MS-49	6	50	42	203	30	3153
4	MATERIAL GRANULAR MS-49	9	31	19	134	30	4300
5	MATERIAL GRANULAR MS-49	12	35	15	81	30	2150
6	SUELO MS-59	3	58	46	135	30	3500
7	SUELO MS-59	6	92	54	41	30	724
8	SUELO MS-59	9	50	38	135	30	3153
9	BASE GRANULAR MS-022	6	30	27	410	20	25700
10	BASE GRANULAR MS-022	9	57	46	137	20	4400
11	BASE GRANULAR MS-022	0	117	42	21	30	440
12	BASE GRANULAR MS-022	3	79	53	59	30	1009
13	BASE GRANULAR MS-022	6	38	36	828	30	7540
14	BASE GRANULAR MS-022	9	30	15	104	30	18830
15	BASE GRANULAR MS-022	12	38	34	414	30	7540
16	BASE GRANULAR MS-022	3	23	11	138	30	4400
17	BASE GRANULAR MS-022	6	30	23	207	30	6800
18	BASE GRANULAR MS-022	9	34	30	414	30	18400
19	BASE GRANULAR MS-022	6	49	42	207	25	4168
20	BASE GRANULAR MS-022	9	91	60	52	25	741

Deflexiones en mm/100, radio de curvatura en metros, espesor de la estructura en centímetros

Nota: D₀ es la medida de la deflexión en el centro del área cargada y D₂₅ es la deflexión a 0.25 m del centro del área cargada.

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] C. Hidalgo. "Suelos Estabilizados como Material de Construcción". En *Tenth International Conference on Non-Conventional Materials and Technologie-NOCMAT 2008: Materials Valorization for Sustainability*. Cali. Centro Editorial de la Universidad del Valle, 2008, pp.1-11.
- [2] C. Hidalgo y M.A. Rodríguez. "Comportamiento mecánico de suelos residuales estabilizados". En *Nuevas Tendencias en el Diseño de Materiales y Estructuras*. Medellín. Sello Editorial Universidad de Medellín, 2008, p. 174.
- [3] C. Hidalgo y M.A. Rodríguez. "Comportamiento de algunos suelos residuales de área de Medellín estabilizados con cal". En *Avances de la Investigación en Ingeniería*. Medellín. Sello Editorial Universidad de Medellín, 2006, p 361-379.
- [4] C. Hidalgo y M.A. Rodríguez. "Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo". *Rev. Ing. Univ. de Medellín*, vol. 4, N° 6, pp. 111-122, jul.-dic., 2005.
- [5] C. Hidalgo y M.A. Rodríguez. "Comportamiento de algunos suelos residuales colombianos estabilizados con cal". Presentado al XIII Congreso Ibero-Latinoamericana del Asfalto. Costa Rica, 2005.
- [6] D. Little y M. Yusuf. *Example Problem Illustrating the Application of the National Lime Association Mixture Design and Testing Protocol (MDTP) to Ascertain Engineering Properties of Lime Treated Subgrades for Mechanistic Pavement Design/Analysis*. National Lime Association. 2001. pp. 29-33. Disponible: <http://www.lime.org/AMDTP.pdf>.
- [7] D. Little, B. Snead, A. Godiwalla, P. Oshiro y P. Tang. "Characterization of Design Properties (Compressive Strength and Resilient Modulus) Of Lime, Cement, Fly Ash Stabilized Structural Recycled Concrete Base As A Function Of Curing Time". Presentada en The 2002 Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference. 2002. pp. 5-17.
- [8] M. A. Mooney y N. M. Toohey. *Accelerated Curing And Strength-Modulus Correlation For Lime-Stabilized Soils*. Report No. CDOT-2010-1. Final Report. Colorado Department of Transportation, Denver, 2010, pp 40-43.
- [9] INVIAS. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá. 1998.
- [10] C. Pandales y B. Pedroza. *Calibración de Módulos Resilientes de Suelos Estabilizados con Cal a Partir de Ensayos de Placa y Viga Benkelman*. Trabajo dirigido de Grado. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia, 2009, pp. 30-33.
- [11] R. Brinkgreve. *Manual de referencia de Plaxis*. Delft, Países Bajos. 2004.
- [12] L. R. Vásquez. "WINDEPAV 2.0". Presentado al XVI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de pavimentos. Manizales.