

VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UNA SUBBASE GRANULAR DEBIDO A LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE FINOS PLÁSTICOS EN GRANULOMETRÍAS CONTROLADAS

GRANULAR SUBBASE RESISTANCE VARIATION WITH THE VARIATION OF PLASTIC FINES CONTENT IN CONTROLLED GRADATIONS

Fecha de recepción: 10 de octubre de 2013

Fecha de aprobación: 7 de enero 2014

Ing. Mónica Vega Quirós
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
monica.vega.quirós@gmail.com

RESUMEN

Los pavimentos sufren deterioros en su capa de rodamiento debido a las cargas y condiciones climáticas a las que se someten. Las características y el estado de las capas inferiores (base, subbase y subrasante) también influyen en el desempeño de la estructura. Así mismo, la influencia del contenido de finos plásticos puede afectar la deformabilidad de la estructura de pavimento y por lo tanto convertirse en un factor a tomar en cuenta en las capas de base y subbase. En este trabajo se cuantifican variaciones en la resistencia de un material de subbase con la finalidad de proponer un rango de contenido de partículas finas potencialmente utilizable en el diseño de un pavimento.

La determinación de la resistencia se llevó a cabo mediante ensayos de laboratorio de Razón de Soporte de California (CBR; por sus siglas en inglés) y Módulo Resiliente; comparando subbases con distintas granulometrías según su tipo finos (plásticos o no plásticos) y contenido de finos (4% - 12%). Para las subbases con finos plásticos se evaluó la efectividad de la cal como aditivo estabilizador.

Los resultados obtenidos muestran que cuando se sustituyen los finos plásticos por finos no plásticos se obtienen aumentos en la resistencia de la subbase. Además se observó que cuando el contenido de finos plásticos de la subbase es alto, el mejoramiento con cal tiene un efecto positivo en el incremento de la resistencia del material.

PALABRAS CLAVES: Subbases, finos, estabilización, cal, resistencia.

ABSTRACT

Pavement road surfaces wear down due to loading and weather conditions; lower layers (base, subbase and subgrade) conditions and characteristics also influence the structure performance. Influence of plastic fines content may also affect pavement structure deformability and should be a factor to take into account on base and subbase layers. This work quantifies the

resistance variation of a subbase material, to propose a potentially feasible range of fine particles content usable in pavement designs.

Determination of resistance were obtained by California Bearing Ratio (CBR) and Resilient Modulus laboratory tests, comparing different gradation subbases according to type of fines (plastic or non-plastic) and content of fines (4% - 12%). On subbases with plastic fines, effectiveness of lime as a stabilization additive was evaluated.

Obtained results show that in cases when plastic fine particles in subbases are substituted by non-plastic fines, resistance is increased. Furthermore, when subbase plastic fines content is high, stabilization with lime produce a positive effect on increasing material's resistance.

KEY WORDS: Subbases, fines, stabilization, lime, resistance.

Abreviaturas utilizadas

SB: Subbase; *FP:* Finos plásticos; *FNP:* Finos no plásticos; *FP+Cal:* Finos plásticos estabilizados con cal.

INTRODUCCIÓN

Muchas de las carreteras del país presentan problemas de deterioro en los pavimentos, puntualmente en las capas de rodamiento, debido no sólo al espesor de la carpeta sino también al estado de sus capas inferiores (bases y subbases). Según el informe acerca del "Análisis y Opinión de la Gestión de los Gobiernos Locales en el período 2010", elaborado por la Contraloría General de la República (2011), se puede observar en la figura 1 que a nivel local, la mayoría de las superficies de ruedo se encuentran: 31,2% en condiciones regulares (superficie con frecuentes baches que hacen que los conductores reduzcan su velocidad promedio de manera apreciable), 28,1% en condiciones malas (superficie muy irregular o con baches muy extensos y frecuentes, hasta tal grado que la velocidad promedio sea menor que la que permiten

desarrollar las condiciones del camino) y un 19,4% en condiciones muy malas (superficie muy deteriorada e irregular, con material suelto que hace que la velocidad promedio del camino sea menor que la que permiten desarrollar las condiciones del camino).

Una de las principales causas de los deterioros en los pavimentos puede estar asociada con la inestabilidad y deficiencias en las características físico-mecánicas de las bases y subbases granulares, en muchos casos esta inestabilidad es debido a una presencia importante de finos plásticos en el material utilizado, puesto que en presencia de humedad estos materiales finos incrementan su plasticidad y su inestabilidad, provocando un aumento de la deformabilidad del pavimento y eventualmente deformaciones o fallas de la carpeta. Cuando los daños se reflejan hasta la carpeta de rodamiento se puede presentar fisuramiento y con ello permeabilidad en la carpeta, lo que puede permitir la migración de finos desde la superficie o incluso permitir que se laven los finos de los materiales de la base y subbase, generando posteriormente hundimientos, deformaciones y daños costosos por un aumento en la cantidad de vacíos o en la plasticidad del material.

Debido a los daños que causan los finos en las subbases granulares, y por ende en el pavimento en general, se consideró importante revisar los porcentajes de finos permitidos en las subbases de pavimentos de las especificaciones que se utilizan actualmente en Costa Rica y evaluar si se requiere que los ingenieros cuenten con un rango menos permisivo de la presencia de finos en las subbases granulares, para de esta forma evitar parte de los problemas posteriores en la fase de operación del pavimento.

OBJETIVO

Cuantificar variaciones en el Módulo Resiliente y CBR de un material de subbase granular para pavimento debido a la presencia de finos plásticos y no plásticos, con la finalidad de determinar un rango de finos potencialmente utilizables en el diseño de un pavimento; así como proponer alternativas de mejoramiento de estas características tal como lo puede ser el uso de la estabilización con cal.

METODOLOGÍA

Se obtuvieron materiales de subbase y de suelo (finos plásticos) y se realizaron ensayos de caracterización, tales como: Granulometría, Límites de Atterberg, Abrasión (Máquina de Los Ángeles), Durabilidad, Equivalentes de arena, Densidad, Gravedad Específica y Absorción, Caras Fracturadas, Proctor Modificado, CBR, Módulo Resiliente y Proporción de cal óptima para la estabilización de suelo.

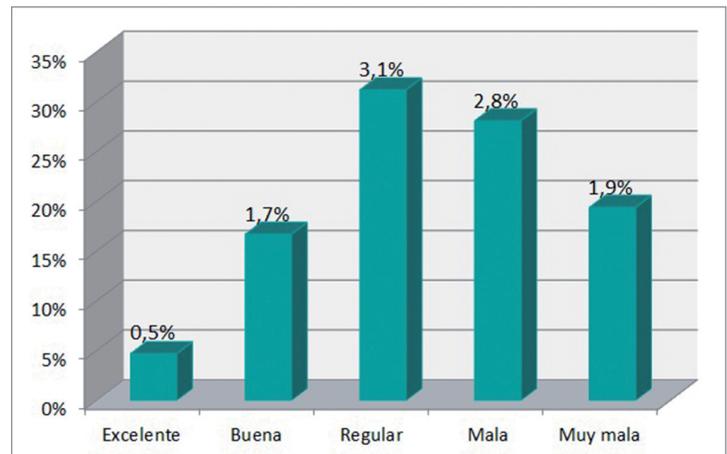


Figura 1. Condición de la superficie de rueda. Índice de Gestión Municipal Año 2010. Fuente: Contraloría General de la República, 2011.

Se tamizó el material de subbase con el fin de separar los materiales granulares de los finos. Cuando el material estuvo separado se le adicionaron diferentes contenidos de finos plásticos pasando el tamiz No. 200 (4%, 8% y 12%). A cada una de las granulometrías conformadas se le realizaron pruebas Proctor y de resistencia tales como CBR y Módulo Resiliente.

A partir de las pruebas de compactación y resistencia, se determinó la combinación subbase-finis plásticos más crítica constituida por el material para el cual se obtuvo la menor resistencia tanto para la prueba de CBR y Módulo Resiliente, debido a la presencia de finos plásticos. Se sustituyeron los finos plásticos por finos plásticos estabilizados con cal y por finos no plásticos (los finos naturales de la subbase).

Se plantearon ecuaciones que correlacionaran el CBR con el Módulo Resiliente del material analizado.

Se realizó un análisis económico utilizando cargas, espesores de carpeta y base constantes y variando el tipo y el espesor de la subbase utilizada, con el fin de realizar una comparación cuantitativa de la cantidad de material requerida tomando en cuenta escenarios donde se utilizaron: subbases con finos no plásticos, subbases con finos plásticos y subbases con finos plásticos estabilizados con cal, en diferentes contenidos de finos.

Se realizó un análisis de la variación de la vida útil del pavimento ante cargas y una estructura de pavimento con espesores constantes (incluyendo el espesor de la subbase) y se cuantificó el cambio de acuerdo con los mismos tres escenarios de tipos de subbases analizados económicamente.

Se plantearon recomendaciones acerca de los rangos de porcentajes de finos potencialmente utilizables, comparando con

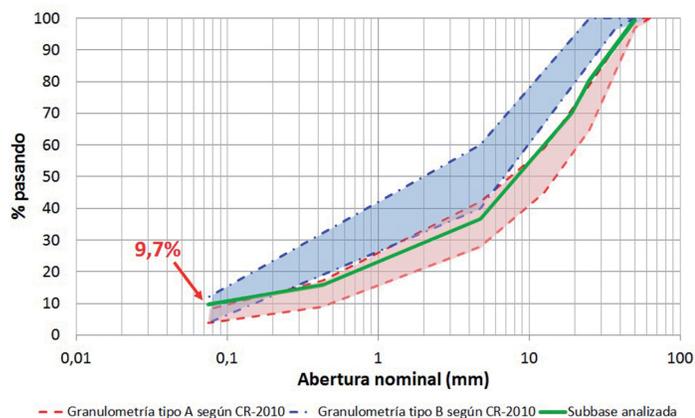


Figura 2. Análisis granulométrico del material de subbase.

los permitidos, los cuales son presentados en las Especificaciones para la Construcción de Puentes y Carreteras (CR-2010) y se aconsejó acerca del porcentaje de cal necesario para obtener un mejoramiento de las subbases granulares.

RESULTADOS

Características generales de los materiales

En el caso del material de subbase, el análisis granulométrico se realizó mediante tamizado (ASTM C136). En la figura 2 se presenta la curva granulométrica del material y las granulometrías típicas de subbase especificadas en el CR-2010 (Granulometría Tipo A y Tipo B). Tal como se puede ver en la figura, el material analizado, posee una granulometría muy similar a la Tipo A; sin embargo difiere en el contenido de partículas finas pasando el tamiz No. 200 (0,075 mm) donde el máximo permitido para una

granulometría de este tipo es de 8% y el del material de referencia es de 9,7%.

En la tabla 1 se muestra un resumen de las principales características del material de subbase analizado y se comparan los principales parámetros estudiados en laboratorio y los especificados en el CR-2010; así como su condición de conformidad o no.

En la tabla 2 se presentan las principales características del material de suelo utilizado para los finos plásticos.

De la misma manera se determinó, a partir del valor del pH, el porcentaje de cal requerido para la estabilización del material de suelo (ASTM 6276). Para llevar a cabo el ensayo, se utilizaron contenidos de cal entre 0% y 10%. Como se puede ver en la figura 3, el valor del pH inicial del suelo es de 6,5, el pH óptimo de la combinación suelo-cal es de 12,1 y el porcentaje de cal requerido para estabilizar el suelo analizado es de 8,0%.

Compactación Proctor

Para determinar los principales parámetros de compactación de las combinaciones de material, se realizaron ensayos Proctor Modificado (AASHTO T180) de donde se obtuvo los valores densidad seca máxima y humedad óptima de compactación para las siguientes combinaciones de material: i) subbase con finos plásticos (4%, 8% y 12%); ii) subbase con finos plásticos estabilizados con cal (4%, 8% y 12%) y iii) subbase con finos no plásticos (4%, 9,7% y 12%). El comportamiento obtenido se puede observar en el gráfico de la figura 4.

Es posible notar que las subbases con contenidos de finos no plásticos, presentaron las mayores densidades secas máximas y las menores humedades óptimas de compactación respecto a los

Tabla 1. Características de la subbase analizada y comparación con especificaciones del CR-2010

Parámetro	Especificación CR-2010	Subbase analizada	Condición
Granulometría	Tipo A / Tipo B	~ Tipo A	Cumple
Abrasión	≤ 50%	37%	Cumple
Índice de durabilidad	≥ 35	79,32	Cumple
Caras fracturadas	≥ 50%	51,44%	Cumple
IP	< 4	NP	Cumple
LL	≤ 35	NP	Cumple
CBR	≥ 30	35,6	Cumple
Equivalente de arena	-	39%	-
Gravedad específica	-	2,67	-
Clasificación SUCS	-	GP	-
Clasificación AASHTO	-	A-1-a	-

Modificado de: LanammeUCR-MOPT, 2010.

Tabla 2. Características generales del suelo utilizado

Parámetro	Valor
Pasando tamiz No.200	62,1%
Gravedad específica	2,45
IP	12
LL	50
Clasificación SUCS	ML / MH
Clasificación AASHTO	A-7-5 o - A-7-6

tres tipos de materiales analizados. Por su parte, las subbases con finos plásticos, al ser estabilizadas con cal, redujeron sus valores de densidad seca máxima y aumentaron los valores de humedad óptima de compactación respecto a las subbases con finos plásticos sin estabilizar. Cabe destacar que para los tres tipos de material analizados se mantuvo la tendencia de comportamiento de acuerdo con su contenido de finos total: contenido de finos bajo (4%), contenido de finos medio (8% y 9,7%) y, contenido de finos alto (12%).

Relación de Soporte de California (CBR)

Para conocer las principales características de resistencia del material en su condición más crítica (saturada), se realizaron ensayos CBR (AASHTO T193) en las mismas combinaciones de material utilizadas para los ensayos Proctor Modificado.

De los resultados se obtuvo que el valor del CBR disminuyó cuanto mayor fue la cantidad de finos presente en el material (figura 5). Por otra parte, los valores de CBR de las subbases con finos no plásticos superaron a las subbases con finos plásticos y finos plásticos estabilizados con cal cuando los contenidos de finos fueron bajos y medios (4%, 8% y 9,7%); mientras que las subbases con finos plásticos estabilizados con cal, presentan los valores superiores de CBR, para los casos donde los contenidos de finos en el material eran altos (12%) (figura 6).

Módulo resiliente (MR)

Para llevar a cabo los ensayos de Módulo Resiliente se utilizó el Procedimiento II del NCHRP RRD 285; el cual consiste en someter un espécimen de ensayo (probeta de 102,4 mm de diámetro y 203,2 mm de altura) a un período de acondicionamiento de 1000 ciclos de carga y posteriormente a 30 diferentes secuencias de carga de 100 ciclos cada una; esto con el fin de simular las cargas dinámicas de tránsito a las que se ven sometidas las capas que conforman la estructura de pavimento.

Para la estimación de los valores de Módulos Resiliente, se utilizaron dos modelos: Modelos $k-\theta$ (Seed et. al) y Modelo de

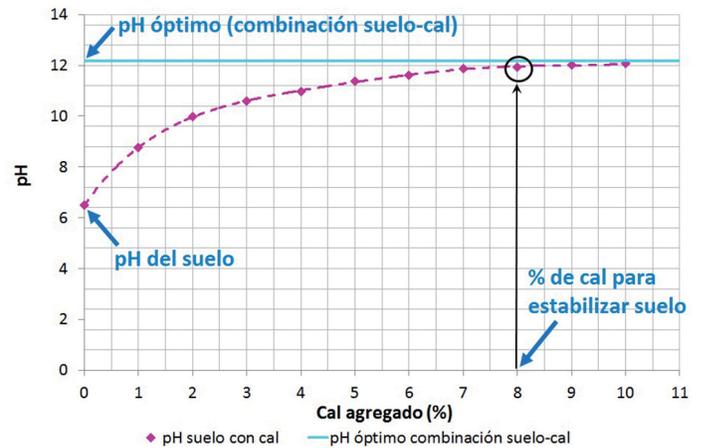


Figura 3. Variación del pH respecto al contenido de cal.

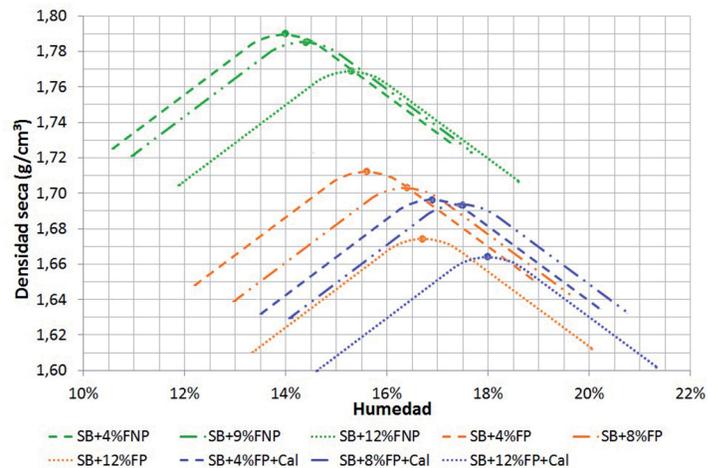


Figura 4. Variación de humedad óptima de compactación y densidad máxima seca del material.

la Guía AASHTO 2002. Los modelos correlacionan variables como la presión atmosférica (p_a), el invariante de esfuerzos (θ) y el esfuerzo cortante octaédrico (τ_{oct}). A partir de estos modelos determinados se obtuvieron los valores de las constantes k_1 , k_2 y k_3 los cuales varían para las diferentes combinaciones de material.

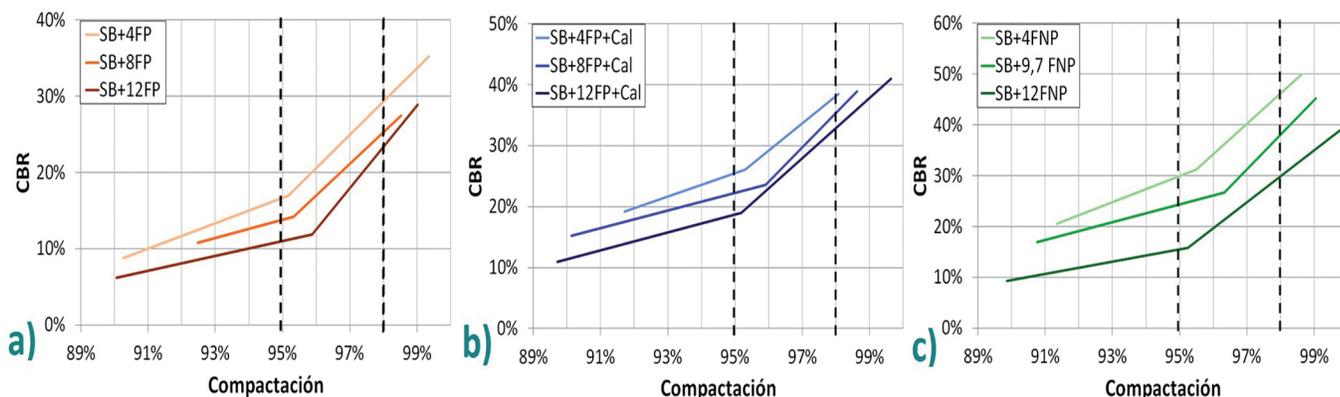


Figura 5. Variación del CBR de acuerdo con el contenido de finos en la subbase: a) subbases con finos plásticos; b) contenido medio; c) contenido alto.

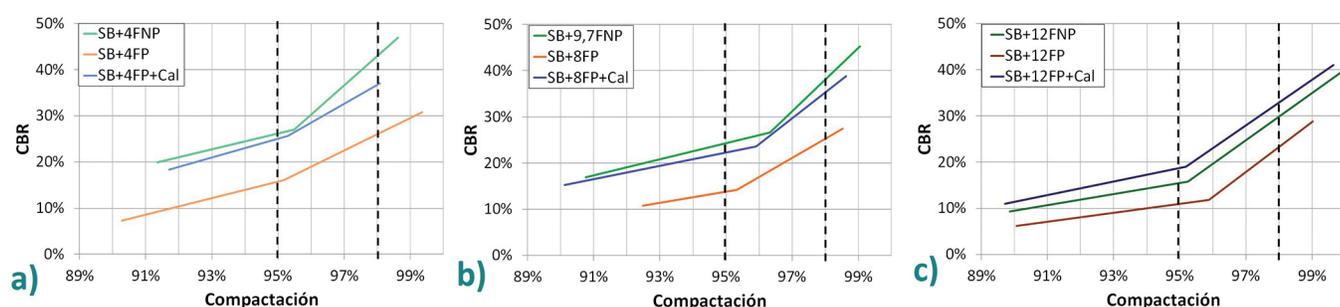


Figura 6. Variación del CBR de acuerdo con el tipo de finos presente en la subbase.

Tabla 3. Ecuaciones para estimación del MR a partir del CBR

Tipo de material	Ecuación (kPa)
SB+FNP	$MR = 56,349 \cdot CBR - 831,76$
SB+FP	$MR = 696,66 \cdot CBR + 41098,00$
SB+FP+Cal	$MR = 696,66 \cdot CBR + 45461,00$

Las expresiones matemáticas de los modelos se muestran en las ecuaciones (1) y (2):

$$M_R = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$M_R = k_1 p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad \text{Ecuación (2)}$$

La estimación se realizó para los especímenes que cumplieron con los supuestos de cada uno de los modelos en cuanto a los valores de k_1 , k_2 y k_3 se refiere.

Los resultados mostraron, para ambos modelos, que los valores de MR para las subbases con finos plásticos fueron inferiores

respecto a los de las subbases con finos no plásticos. Así mismo, se puede observar que los valores de resistencia MR, fueron similares entre las subbases con finos plásticos y finos plásticos estabilizados con cal; cabe destacar que los especímenes difieren en el contenido total de finos del material, puesto que la subbase con finos plásticos poseía 4% de partículas pasando el tamiz No. 200 y la subbase con finos plásticos estabilizados con cal, 12% (figura 7).

Correlación CBR-MR

Debido a que la mayoría de los laboratorios solamente cuentan con equipos para la determinación del CBR y al alto costo que representan los equipos de laboratorio para la medición del Módulo Resiliente; se plantearon modelos que correlacionaran los valores de CBR-MR del material. Para los modelos se tomó en cuenta que en la prueba de CBR los esfuerzos axiales en todas las direcciones son de igual magnitud. El valor de esfuerzo axial (σ) utilizado fue de 35,5 kPa y su respectivo invariante de esfuerzos (θ) de 106,5 kPa; este valor se obtuvo de calcular el promedio de los esfuerzos presentados durante los ensayos CBR.

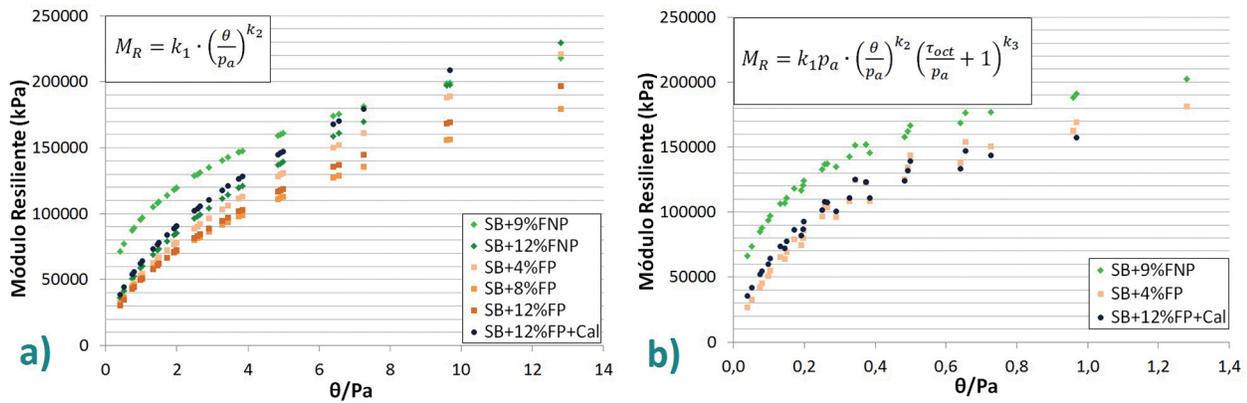


Figura 7. Estimación de Módulo Resiliente: a) Modelo K-θ; b) Modelo Guía AASHTO 2002.

Las ecuaciones para los materiales analizados se presentan en la tabla 3.

En la figura 8, se presenta la estimación del MR a partir del CBR de acuerdo con el contenido de finos presente en el material de subbase. Es posible notar como se sigue la tendencia obtenida para los ensayos de CBR y MR anteriormente comentada.

Análisis de costo y vida útil

Con el fin de conocer la variación en el costo por kilómetro de carretera y en la vida útil del pavimento de acuerdo con el tipo de subbase utilizada, se realizó un diseño para cada tipo de subbase con valores de carpeta, base y subrasante constantes, a partir de los valores de MR estimados (figura 9) y tomando en cuenta los

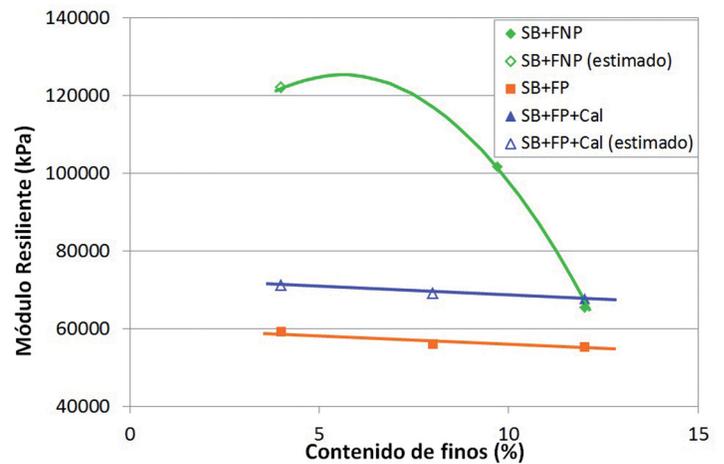


Figura 8. Estimación MR a partir del CBR de acuerdo con el contenido de finos.

Tabla 4. Valores típicos para carreteras de alto tránsito

Parámetro	Valor
Nivel de confianza (R)	90%
Estadístico Nivel de confianza (Zr)	-1,28
Desviación estándar global (S)	0,4
Índice de serviciabilidad inicial (Pi)	4,2
Índice de serviciabilidad final (Pf)	2,5
Coefficiente de drenaje subrasante (m)	1
Ejes Equivalentes diarios (ESAL/día)	1529
Factor de distribución por sentido (LDF)	0,5
Factor de distribución por carril (DS)	0,9
Tasa de crecimiento vehicular (r)	3%
Período de diseño (Y)	20 años
Ejes Equivalentes Acumulados (CESAL)	7 500 000
Número estructural de diseño (SND)	4,764

Fuente: AASHTO, 1993

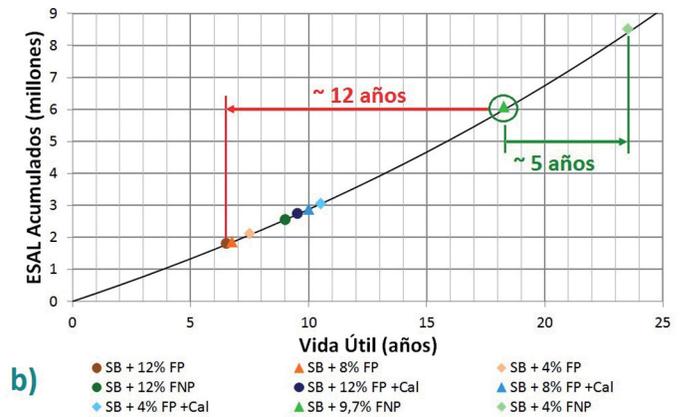
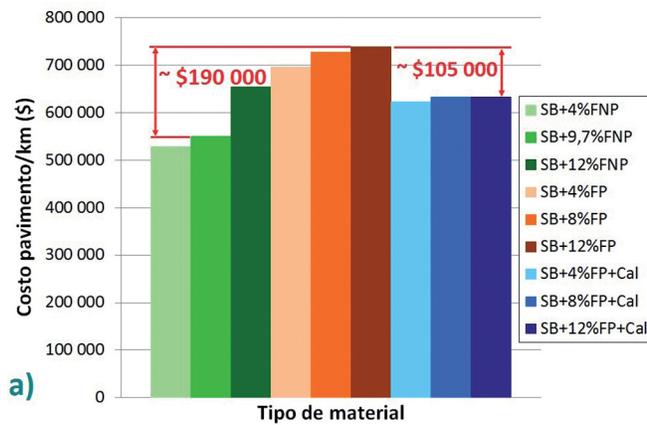


Figura 9. Variación de costo y la vida útil del pavimento según el tipo de subbase utilizada: a) Costo; b) Vida útil.

parámetros recomendados en el AASHTO 93 para el diseño de carreteras de alto tránsito, los cuales se presentan en la tabla 4.

Se presentaron cambios significativos en los costos por kilómetro de carretera entre las subbases con distintos tipos de finos. Algunas de estas variaciones se pudieron observar entre el material de referencia (subbase con 9,7% de finos no plásticos) y el material con el costo más crítico (material de subbase con 12% de finos plásticos) en donde se presentaron diferencias de \$190 000/km y entre el material de subbase con 12% de finos plásticos y la subbase con 12% de finos plásticos estabilizados con cal una diferencia de \$105 000/km (figura 9-a).

En cuanto a la variación de la vida útil se obtuvieron diferencias de hasta 12 años entre el material de referencia (subbase con 9,7% de finos no plásticos) y el material con la vida útil más crítica (material de subbase con 12% de finos plásticos). Por su parte, las diferencias entre la vida útil del material de referencia y el material con la condición más positiva (subbase con 9,7% de finos no plásticos) es de aproximadamente 5 años (figura 9-b).

CONCLUSIONES

El valor de CBR para subbases con finos plásticos, se encuentra por debajo del mínimo especificado en el CR-2010 el cual es de 30.

El porcentaje crítico de finos dentro del rango de finos analizado es 12%, ya que para las subbases con este contenido se obtuvo los menores valores de CBR y MR.

Al adicionar cal a los finos plásticos los valores de CBR y MR aumentaron respecto a las subbases con finos plásticos sin estabilizar.

Al sustituir los finos plásticos por finos no plásticos se obtuvieron variaciones positivas en el CBR y el MR del material.

Existen altas diferencias de costos por kilómetro de pavimento de acuerdo con el tipo y contenido de finos presente en la subbase.

La vida útil del pavimento es mayor cuando la subbase contiene finos no plásticos y se reduce conforme aumenta el contenido de finos en el material.

RECOMENDACIONES

Se recomienda llevar a cabo ensayos adicionales para materiales con finos plásticos estabilizados con cal tras un período de cura para determinar variaciones de resistencia del material a largo plazo.

Se recomienda utilizar otros métodos de estabilización de partículas finas tales como el cemento para evaluar su efectividad en la estabilización de materiales de subbase.

Dentro del rango del contenido finos permitido para un material de subbase se sugiere ubicarse hacia la parte inferior (4% - 8%), ya que la variación de la resistencia dependiendo del contenido de finos es muy sensible.

REFERENCIAS

1. American Association of State and Highway Transportation Officials. Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos 1993. Washington D.C.: AASHTO. 1993.
2. American Association of State and Highway Transportation Officials. Guía de Diseño de Pavimentos Mecánica-Empírica 2002. Washington D.C.: AASHTO. 2002.
3. American Association of State and Highway Transportation Officials. AASHTO T180-10: Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop. Washington D.C.: AASHTO. 2010.
4. American Association of State and Highway Transportation Officials. AASHTO T193-10: Standard Method of Test for The California Bearing Ratio,. Washington D.C.: AASHTO. 2010
5. American Society for Testing and Materials. ASTM D6276-99a (2006): Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Estados Unidos: ASTM. 2006.
4. Contraloría General de la República. Análisis y Opinión sobre la Gestión de los Gobiernos Locales en el período 2010. San José, Costa Rica. 2011.
5. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) & Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010). 2010.
6. National Cooperative Highway Research Program. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. Washington, D.C.: NCHRP. 2005.
7. Seed H. B., Mitry F. G., Monismith C. L., and Chan C. K. Prediction of Flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated-Loads Tests. NCHRP Report 35, Highway Research Board. 1967.