

## Propuesta de metodología para diseño de pavimentos flexibles empleando geosintéticos como refuerzo

Ing. Augusto Jugo B., PhD.  
Profesor de la Universidad Central de Venezuela,  
Caracas, Venezuela  
augustojugo@cantv.net

Fecha de recepción: 15 de mayo del 2010

Fecha de aprobación: 04 de mayo del 2011

### Resumen

Este trabajo presenta una propuesta de diseño estructural de pavimentos flexibles con el empleo de geosintéticos como refuerzo de materiales granulares de base y protección de la subrasante. Esta propuesta fue desarrollada mediante un trabajo de investigación teórico-conceptual del uso de geosintéticos en obras de pavimentación. Se discuten los aspectos básicos del beneficio de incorporar geosintéticos en la interfase subrasante-capa granular, en función de conceptos fundamentales de la respuesta no lineal de los materiales dependiente del estado de esfuerzos en el pavimento. Si bien el problema es complejo, el análisis realizado presenta resultados lógicos que permiten establecer los lineamientos de un procedimiento de diseño racional. En el análisis se empleó el Método AASHTO-93 y conceptos contenidos en el mismo.

**Palabras clave:** pavimentos, geosintéticos, refuerzo, diseño de pavimentos.

### Abstract

*This work presents a design proposal for the design of flexible pavements using geosynthetics to reinforce the granular base materials and protect the subgrade. The proposal was developed by a theoretical-conceptual research work of the use of geosynthetics in pavements. The basis benefits of placing geosynthetics in the subgrade-granular base interface, as a function of the non-linearity response of the materials, is discussed. Considering the complexity of the problem, the analysis presents logical results that can support to establish the principles for a rational design procedure. The analysis was conducted with the AASHTO-93 Design Procedure, and its concepts.*

**Key words:** pavements, geosynthetics, reinforcement, pavement design.

### ANTECEDENTES

El uso de diversos materiales para reforzar suelos es muy antiguo, primitivamente se empleaban troncos, pieles, tejidos orgánicos y otros materiales que cumplían funciones específicas pero de corta vida debido a sus características bioreductibles. Los avances tecnológicos han permitido, en las últimas décadas, desarrollar una amplia gama de productos de alta resistencia mecánica y ante otros agentes de deterioro (como humedad,

hongos, corrosión, etc.) que ofrecen un importante apoyo en obras de ingeniería.

En el campo de los pavimentos la utilización de geosintéticos se ha incrementado considerablemente en los últimos años, especialmente por la aparición de nuevos productos, que han extendido el ámbito de aplicación y la respuesta de los mismos al ser incorporados en los pavimentos.

En forma general un geosintético se define como: un material "planar" manufacturado con polímeros empleado con suelos, rocas u otros materiales para servir funciones de: filtración, drenaje, separación, refuerzo, bloqueo de fluidos y protección.

Para el logro de estas funciones se emplean fundamentalmente tres tipos de productos: geotextiles, geomembranas y geomallas, los cuales se definen de la siguiente forma:

-Geotextiles: telas permeables hechas de material textil usado como filtro, separación o refuerzo de suelos, para mejorar la resistencia, especialmente al corte. Estos pueden ser tejidos y no tejidos.

-Geomembranas: capa impermeable usada como barrera de fluidos.

-Geomallas: mallas de polímeros con relativa alta resistencia a tensión empleada generalmente como refuerzo.

Numerosos estudios de laboratorio, observaciones de campo y análisis teóricos indican que la colocación de geosintéticos en pavimentos propicia un mejor comportamiento de la estructura. El mecanismo de trabajo no es aun claramente entendido, lo que dificulta la formulación de procedimientos de diseño confiables.

En el caso de empleo de un geosintético en la interfase subrasante-base granular deben tomarse en cuenta diversos mecanismos de refuerzo:

- Incremento del confinamiento del material granular.
- Distribución de cargas sobre un área mayor de la subrasante.
- Confinamiento y prevención de desplazamiento lateral de la subrasante.
- Reducción de los esfuerzos cortantes en la subrasante.

Sin embargo, la integración y cuantificación de estos beneficios es considerablemente complicada, por lo que se sigue aceptando que el refuerzo de pavimentos con geosintéticos es un problema complejo.

### METODOLOGIA DE ANALISIS

El presente trabajo se apoya en un aspecto básico del estado del arte de diseño de pavimentos, como es el concepto empírico-mecanístico, que ha sido aceptado como un concepto fundamental para la “comprensión” del complejo ámbito de los pavimentos. En nuestro caso los conceptos básicos son:

- El comportamiento no lineal dependiente del estado de esfuerzos de suelos y materiales granulares.
- Resultados de estudios de laboratorio y evaluación empírica validan que el uso de geosintéticos mejora la resistencia y el comportamiento de un pavimento sometido a cargas.

A continuación se presenta una breve discusión de estos conceptos y su incorporación en el presente trabajo:

De acuerdo con los criterios de diseño del método AASHTO-93, el aporte estructural de una capa de base granular es función de su módulo elástico ( $E_b$ ), el cual a su vez es función directa del estado total de esfuerzos ( $\theta$ ) al que está sometido el material. A mayor  $\theta$  mayor será su módulo  $E_b$  y por consiguiente su aporte estructural.

En resumen, un geosintético colocado en la parte inferior de una capa de material granular produce un efecto de confinamiento que incrementa el estado de esfuerzos  $\theta$  dentro de la capa (al ser ésta sometida a carga)

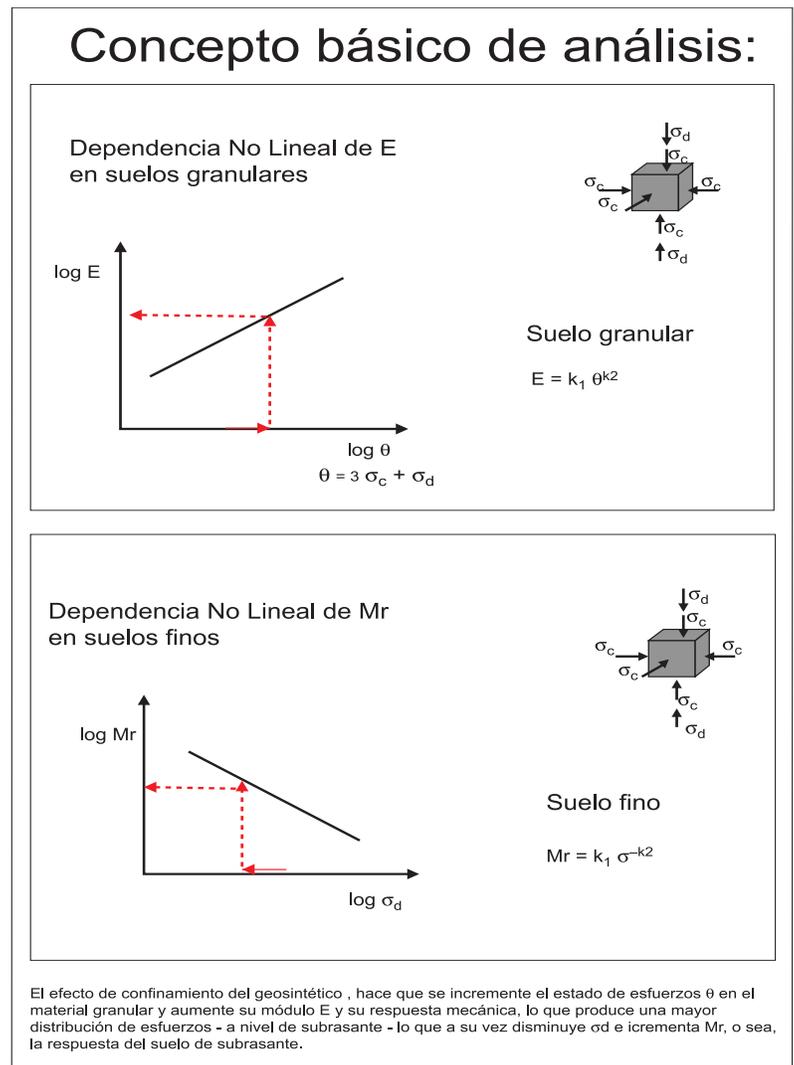
umentando su respuesta mecánica y distribuyendo los esfuerzos en una mayor área, lo que disminuye el esfuerzo actuante sobre la subrasante.

Por otra parte, en suelos finos el valor de soporte o módulo resiliente ( $Mr$ ) de la subrasante es función inversa del esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ), o sea que al disminuir  $\sigma_d$  se incrementa  $Mr$ .

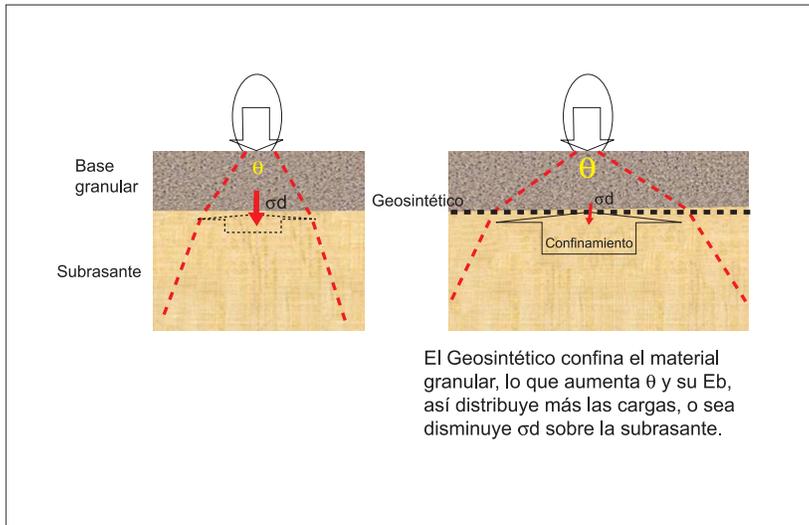
Estos conceptos que se ilustran en la Figura 1a y 1b son de gran utilidad para explicar el beneficio de un geotextil colocado sobre una subrasante.

Con la aparición de geotextiles tejidos, de mayor rigidez y resistencia, esta función se ha fortalecido considerablemente ya que potencian los dos aspectos indicados bajo el siguiente mecanismo:

Ilustración de la respuesta no lineal dependiente del estado de esfuerzos de los suelos **Figura 1a**



**Figura 1b** Efecto del geosintético en la distribución de cargas y reducción de esfuerzos



*Producen un confinamiento en la base granular aumentando su valor soporte, lo que a su vez reduce el esfuerzo sobre la subrasante, la que es adicionalmente protegida por el confinamiento y prevención de desplazamiento lateral aportados por el geotextil.*

Por su parte, los resultados de estudios de laboratorio y observaciones de pavimentos a escala natural, han servido para apoyar procedimientos empíricos de diseño con base en los denominados factores de eficiencia o factor de geosintético ( $F_g$ ).

El punto crítico está en la definición del factor  $F_g$ , pues aunque distintos trabajos muestran coincidencias en criterios y resultados, los rangos determinados son amplios. En este sentido, algunos aspectos en los que coinciden diversos trabajos son:

- El refuerzo es mas efectivo en suelos de bajo valor soporte, y disminuye a medida que el CBR de la subrasante se incrementa.
- La rigidez y resistencia del geosintético son importantes en el aporte de refuerzo.

Para la función de refuerzo pueden emplearse geotextiles tejidos, no tejidos y geomallas, aun cuando resultados de recientes trabajos de investigación indican que los geotextiles tejidos de nueva generación ofrecen mayores beneficios por su alta rigidez relativa.

A continuación se presentan factores  $F_g$  indicados o deducidos de las referencias consultadas en función de distintos criterios evaluados.

CBR-Subrasante	TIF	FEG
1	5 - 9	2.1 - 6.8
3	3 - 4	
6	2 - 3	

TIF: Traffic Improvement Factor, por ahuellamiento.

FEG: Factor de Efectividad de Geosintético, por fatiga en función del producto.

Posiblemente, los trabajos más concluyentes en este sentido han sido elaborados y publicados por el Prof. Robert Koerner, quien en su libro "Designing with Geosynthetics", considera un procedimiento, para pavimentos flexibles, que se apoya en el Método AASHTO-93. El procedimiento consiste en emplear un factor de geosintético ( $F_g$ ) determinado experimentalmente, en función del incremento en número de repeticiones de carga que una estructura reforzada resiste comparada con una sin refuerzo. En el procedimiento de diseño, este concepto es empleado en forma inversa, o sea reducir el número de repeticiones esperadas, empleando la siguiente ecuación:

$$REE' = REE / F_g$$

Donde:

REE = Repetición de Ejes Equivalentes (EE) en el periodo de diseño.

$F_g$  = Factor de geosintético.

REE' = Número de repeticiones o ciclos de carga ajustados.

Otro criterio empleado, para considerar el beneficio de un geosintético, es el uso de un factor ( $F_{ba}$ ) que incrementa el coeficiente estructural ( $a_2$ ) de una base granular, o sea el coeficiente empleado en el método AASHTO para caracterizar el aporte por pulgada, lo que en definitiva induce una reducción del espesor. Este factor,  $F_{ba}$ , varía entre 1.3 y 1.7 y se emplea en la determinación del Número Estructural (SN) de acuerdo con las siguientes ecuaciones, aun cuando su determinación esta muy poco documentada.

$$SN_g = a_1 \times e_1 + a'_2 \times e_2 \times m_2 + a_3 \times e_3 \times m_3$$

$$a'_2 = a_2 \times F_{ba}$$

Donde:

$SN_g$  = número estructural con base reforzada

$a_1$ ;  $e_1$  y  $m_1$  = coeficiente estructural, espesor y coeficiente de drenaje de la capa  $i$ .

$a'_2$  = coeficiente estructural de base granular ajustado por Fba.

En resumen—como se ha indicado- en la actualidad no se cuenta con un procedimiento de diseño universalmente aceptado, se reconoce y se ha demostrado -tanto en laboratorio como en obras- que los geosintéticos ofrecen beneficio a la estructura de un pavimento, lo cual se refleja en mayor resistencia, incremento de vida, mejor comportamiento, o en economía por reducción de espesores para obtener estructuras equivalentes; sin embargo la dificultad de cuantificar el aporte y beneficio, y la falta de procedimientos de diseño establecidos limitan su empleo.

Esta dificultad obliga a usar los geosintéticos en forma conservadora por lo que en algunos casos la relación beneficio/costo (B/C) puede verse negativamente afectada.

## PROCEDIMIENTO DE ANALISIS

El procedimiento de análisis de este trabajo se adelantó en base a los conceptos antes presentados. Como elemento de soporte se empleó el método de Diseño de Pavimentos AASHTO-93, con el apoyo del programa PAS-5, que resuelve la ecuación de diseño AASHTO-93 facilitando las modelaciones presentadas.

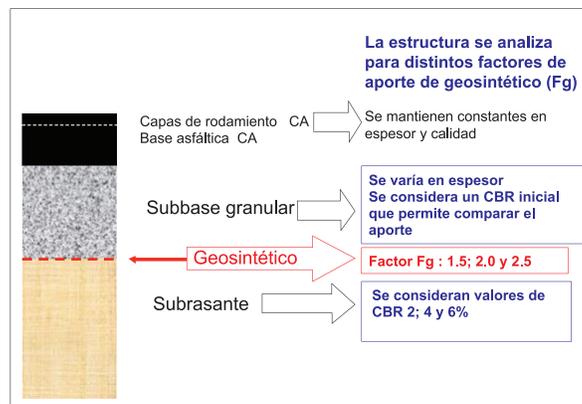
Se analizó una estructura compuesta por una capa de mezcla asfáltica y una subbase granular soportada sobre una subrasante de suelo fino. La capa asfáltica se mantuvo constante en espesor y calidad, mientras que el espesor de subbase y el valor CBR de la subrasante se modificaron para el análisis. Las Figuras 2a y 2b muestran la estructura analizada y sus variantes.

Como puede observarse, se emplearon factores de geosintético (Fg), 1.5; 2.0 y 2.5, los cuales corresponden a valores conservadores, o sea, en el rango bajo de los sugeridos por trabajos de investigación y procedimientos de diseño consultados.

Para ilustrar el procedimiento de análisis usaremos la estructura E1, para el caso de CBR 2%. La estructura analizada como ilustración del procedimiento es la siguiente:

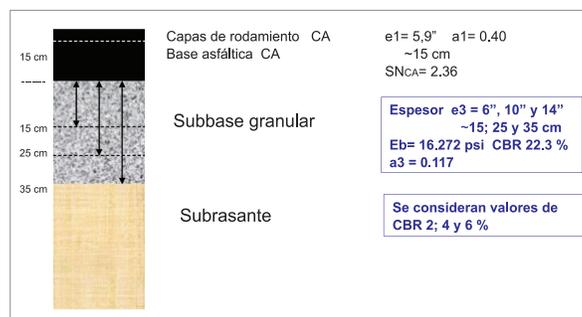
Estructura e hipótesis de análisis

Figura 2a



Variación de parámetros en la estructura analizada

Figura 2b



•Capa asfáltica de 15 cm (5.9") con un coeficiente estructural  $a_1=0.40$ . Estos valores se mantiene constante en todos los casos.

•Subbase granular de 15 cm, con material de CBR 22.3 %, coeficiente estructural  $a_3=0.117$ , al que corresponde un  $E_{sb}$  de 16.272 psi.

•Subrasante de CBR 2%, equivalente a un Mr de 3.120 psi.

En definitiva se trata de una estructura con un  $SN=3.062$ , la que está sobre una subrasante de  $Mr=3.120$  psi, resistiría, según el modelo AASHTO 264.100 repeticiones de Ejes Equivalentes (EE), con una confiabilidad R de 50%, para una reducción de Serviceabilidad  $\Delta PSI$  de 2.0.

Si consideramos el uso de un factor geosintético (Fg) 1.5, tendríamos que la estructura reforzada, con un geosintético, resistiría  $REE' = 396.150$  EE. Con este valor podemos determinar, mediante un proceso inverso:

Cual sería el valor soporte de la subrasante ( $Mr'$ ), para que la estructura original (de  $SN=$

Tabla 1 Factores FMr y Fb para los distintos casos analizados

Factores FMr y Fb para Fg = 1.5				
CBR		E1	E2	E3
2; 4 y 6	FMr	1.191		
	Fb	1.389	1.25	1.188
Factores FMr y Fb para Fg = 2.0				
CBR		E1	E2	E3
2; 4 y 6	FMr	1.348		
	Fb	1.80	1.49	1.36
Factores FMr y Fb para Fg = 2.5				
CBR		E1	E2	E3
2; 4 y 6	FMr	1.484		
	Fb	2.21	1.69	1.52

Tabla 2 Factor combinado Fc para distintas combinaciones y factor Fg

Fc (factor cambiando de aporte) para Fg= 1.5			
	33-33	50-50	67-67
Fc	1.34	1.54	1.75
Fc (factor cambiando de aporte) para Fg= 2.0			
	33-33	50-50	67-67
Fc	1.71	2.17	2.70
Fc (factor cambiando de aporte) para Fg= 2.5			
	33-33	50-50	67-67
Fc	2.11	2.91	3.83

3.062) resista el nuevo número de EE, lo que nos permite cuantificar el aporte del geotextil en términos de incremento en Mr o CBR. De esta forma se determina el Factor (FMr) de incremento en el valor soporte de subrasante, mediante la relación entre Mr' y Mr.

2. Respecto al material de subbase, el análisis mantiene constante el valor soporte de la subrasante, y se determina cual sería el nuevo SN' para que la estructura resista el nuevo valor de cargas REE'. De esta forma se puede estimar el incremento en la calidad (Esb o CBR) de la subbase granular para lograr el nuevo valor de SN', por cuanto, como se indicó, la capa asfáltica se mantiene constante.

De esta forma, para el caso de la estructura E1, subrasante de CBR 2 y factor geosintético (Fg) 1.5 se obtienen los siguientes resultados:

1. El Mr de la subrasante debe incrementarse a un valor Mr' de 3.716 psi, lo que corresponde a un 19.1%, o sea un Factor de Mr (FMr) = 1.191.

2. Por su parte el nuevo SN' es de 3.26, del cual corresponde 0.90 al material granular (SNsb'), comparado con 0.702 original. De esta forma se determina que para el espesor de 6", el nuevo valor a<sub>3</sub>' de 0.15, y un valor Esb' de 22.272 psi, o sea un incremento de 38.9%, o un Factor subbase (Fb) = 1.389.

Es relevante indicar acá que los factores FMr y Fb calculados corresponden a la presunción que el beneficio del incremento en la respuesta del pavimento se debe entera e individualmente a cada uno de ellos por separado, sin embargo de acuerdo con la lógica del concepto de análisis propuesto es evidente que existe una interacción de ambas hipótesis.

El siguiente paso consistió, en aplicar el mismo procedimiento para las 3 estructuras (E1, E2 y E3) con espesor de subbase de 15, 25 y 35 cm. Considerar valores de CBR de subrasante de 2; 4 y 6%, y usar factor geosintético (Fg) 1.5; 2.0 y 2.5. Así se obtuvieron los factores independientes FMr y Fb para las distintas combinaciones.

Los resultados de todos los casos analizados se incluyen en la Tabla 1. Como puede observarse, el FMr es dependiente del factor geosintético empleado, y se mantiene constante para los distintos valores de CBR, mientras que el Fb depende del factor geosintético y del espesor del granular, lo que resulta lógico si se considera que al aumentar el espesor disminuye el confinamiento en la subbase.

El siguiente paso consistió en combinar los distintos aportes individuales, con la finalidad de evaluar en forma lógica como éstos pueden armonizarse. Así se analizaron 3 hipótesis racionales, para estimar – mediante similar metodología- el Factor de aporte Combinado (Fc), en cada una de las siguientes hipótesis:

Conservadora: Se asume que el aporte combinado corresponde a la sumatoria del 33% del aporte individual de cada factor.

Moderada: Se asume que el aporte combinado corresponde a la sumatoria del 50% del aporte individual de cada factor.

Optimista: Se asume que el aporte combinado corresponde a la sumatoria del 67% del aporte individual de cada factor.

De esta forma se obtuvieron los valores de Fc que se muestran en la Tabla 2.

De los resultados mostrados, se consideró –en una primera instancia- como valor aplicable para un procedimiento de diseño, el aporte ofrecido por la hipótesis de 50-50 para un factor geosintético (Fg) de 2.0. O sea, el procedimiento propuesto se apoya en la conjetura que el aporte combinado del geosintético corresponde con la sumatoria de la mitad del incremento en valor soporte de la subrasante y de la respuesta mecánica del material granular de subbase, para el factor geosintético indicado, lo que produce un Factor Combinado,  $F_c = 2.19$ . Los valores de FMr y Fb para esta hipótesis son: FMr = 1.348 para la subrasante y  $F_b = 1.80; 1.49$  y  $1.36$  para espesores de subbase 15; 25 y 35 cm respectivamente.

Para completar la propuesta, se desarrollaron 2 gráficos de diseño; uno para ajuste del valor soporte de la subrasante (FMr), y otro para ajuste del espesor de subbase granular (Fb), considerando los siguientes criterios:

En FMr, figura 3, se incorpora el concepto de que el aporte del geosintético sobre la subrasante disminuye a medida que el CBR de esta aumenta. Así se consideró que para CBR 2; 4 y 6%, los aportes corresponden a 67; 50 y 33% del aporte del FMr 1.348 antes indicado.

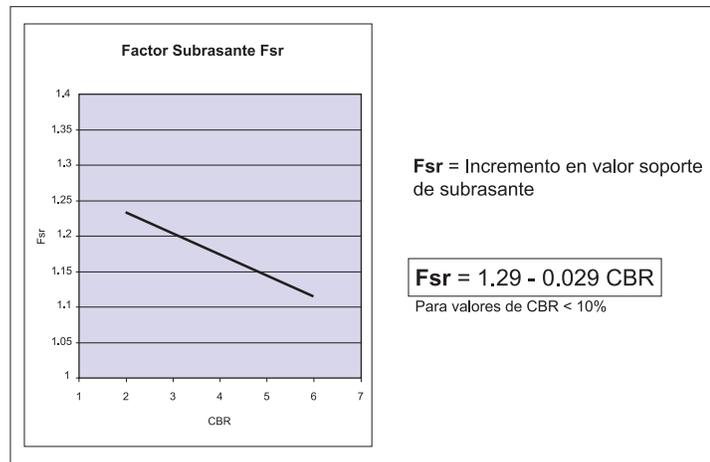
Con respecto al ajuste del espesor de subbase granular, Fb, figura 4, por una parte se consideró sólo un aporte del 50 % del los factores Fb indicados para cada espesor; adicionalmente se tomó se cuenta que el aporte disminuye al aumentar el espesor del granular.

## CONCLUSIÓN

El presente trabajo muestra los resultados de un análisis teórico-conceptual del aporte del uso de geosintéticos como refuerzo en pavimentos flexibles con bases granulares. Si bien el problema es complejo, los resultados obtenidos, en acuerdo con las hipótesis y criterios presentados, muestran valores razonablemente lógicos y sustentables.

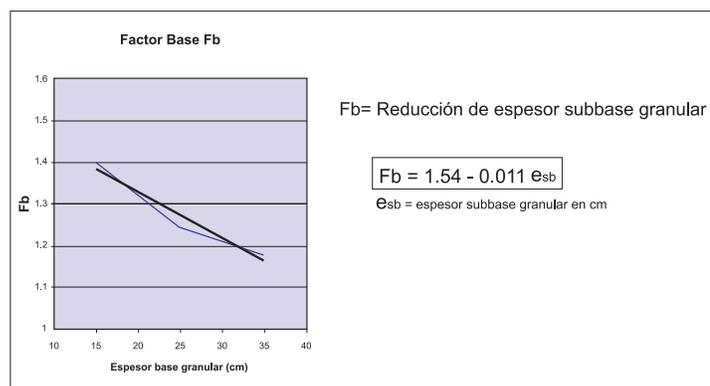
Factor de aporte a la subrasante Fsr en función del CBR

Figura 3



Factor de reducción del espesor de granular Fb en función del espesor original considerado

Figura 4



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **AAASHTO**. Pavement Design Guide 1993.
2. **Designing for Roadway Reinforcement**; Cap. 2. Designing with Geotextiles.
3. **Designing with Geosynthetics**; Koerner, Robert M; 3ª Edición, 1994; PRENTICE HALL.
4. **Dot-USA**. Manual de Diseño y Construcción de Autopistas con Geosintéticos. Cap 6: Geotextiles para Repavimentación.
5. **Industrial Fabric Asociación Internacional (IFAI)**. A Design Primer, Baremberg, Ernest. Subgrade Stabilization. Section 3. Fowler, Jack. Embankments Over Soft Soils. Section 4. Forsyth, Raymond A. Asphalt Overlay. Sección 13.
6. **Manual de Diseño Geotextiles**. Pavco. 6ª Edición
7. **Tenax**. Simplified Design of Flexible Road Pavements with Tenax Geogrids. TDS 006b.