

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción

Análisis técnico y de costos en carreteras de doble carril de pavimento flexible,
con o sin geotextil, sobre subrasantes débiles

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio Antonio Ruiz Bojorge

Cartago, Junio 2011.

Análisis técnico y de costos en carreteras de doble carril de pavimento flexible, con o sin geotextil, sobre subrasantes débiles



JULIO ANTONIO RUIZ BOJORGE

Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Abstract

This paper presents a technical and cost comparative analysis for dual carriage way with flexible paving roads, with and without the use of geotextile, applied on weak or moderate subgrade.

In Costa Rica, the *Ley General de Caminos Públicos* classify the public roads as a national road network and cantonal road network. The national road network also classified as primary, secondary and tertiary roads which are managed by the *Consejo Nacional de Vialidad* (CONAVI) and the cantonal road network, in charge of municipalities, classified as local roads, local streets and unclassified roads. These roads consume each year a large amount of the national budget.

Apart from making a brief review on the situation with the design of roads in the municipalities, are presented designs for road primary, secondary, tertiary and local roads using the design methodology AASHTO 1993 and the functional design of roads using geotextile as reinforcement or agent of stabilization-separation.

Budget calculations for a kilometer of road and all the alternatives of roads, finally reaching to the analysis of the results, both from the technical and cost point of view, are performed in a complementary manner.

It is expected that the results of this study and its application by road engineers, will contribute to a better management practice in all public and private roads.

Keyword: Design of roads, design with geotextile, costs of roads, roads management.

Resumen

El presente estudio presenta un análisis comparativo técnico y de costos para carreteras de doble carril con pavimento flexible, con y sin el uso de geotextil, aplicado sobre subrasantes débiles o moderadas.

En Costa Rica, la Ley General de Caminos Públicos clasifica las carreteras públicas como red vial nacional y como red vial cantonal. La red vial nacional clasifica igualmente las carreteras como primarias, secundarias y terciarias y son administradas por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI). La red vial cantonal, a cargo de las municipalidades, clasifica los caminos como vecinales, calles locales y caminos no clasificados. Estos caminos consumen año con año una gran cantidad del presupuesto nacional.

Aparte de presentar una breve revisión sobre la situación del diseño de caminos en las municipalidades, este estudio muestra los diseños para las carreteras primarias, secundarias, terciarias y vecinales aplicando la metodología de diseño AASHTO 1993 y el diseño funcional de caminos utilizando el geotextil, ya sea como refuerzo o como estabilizador-separador.

En forma complementaria se llevaron a cabo los cálculos presupuestales para un kilómetro de camino y para todas las alternativas de carreteras. Finalmente se efectuó el análisis de los resultados tanto desde el punto de vista técnico como de costos.

Poner en práctica los resultados del presente estudio por parte de todos los ingenieros que se ocupen de la gestión de caminos, sean estos públicos o privados, llevará sin duda a mejorar la forma en que estos actualmente están siendo atendidos.

Palabras Claves: Diseño de caminos, diseño con geotextiles, costos de caminos, administración de caminos.

Contenido

Prefacio	2
Resumen ejecutivo.....	3
Introducción.....	9
Marco Teórico	10
Breve revisión de los caminos en Costa Rica.....	10
El Diseño de Caminos Método AASHTO 1993.....	11
El Diseño de Caminos usando Geotextil	19
Metodología.....	33
El diseño de caminos en las municipalidades	33
Tránsito de Diseño para las carreteras	33
Características Geométricas.....	34
Propiedades de la subrasante	34
Propiedades de la mezcla asfáltica, base y subbase consideradas	34
Diseño Convencional AASHTO 1993	35
Diseño con Geotextil	36
Presupuestos	37
Resultados	38
El diseño de caminos por las municipalidades	38
Tránsito de Diseño para las carreteras	44
Propiedades Geométricas.....	44
Propiedades de la subrasante	46
Propiedades de la mezcla asfáltica, base y subbase consideradas	46
Diseño Convencional AASHTO 1993	48
Diseño con Geotextil	57
Presupuestos	62
Análisis de los resultados.....	67
Análisis Técnico	67
Análisis de Costos.....	73
Conclusiones.....	80
Recomendaciones	81
Apéndice	82
Anexos	83
Referencias	84

Prefacio

El tema de diseño de carreteras siempre presenta retos para el ingeniero. En Costa Rica existen suficientes oficinas, tanto públicas como privadas, que administran muchos recursos económicos para aplicar en caminos. No obstante, poseen poca formación técnica en materia de diseño. Además, los métodos de diseño exigen muchos insumos técnicos que normalmente no están a la mano. En consecuencia se debe realizar toda una investigación preliminar para llegar finalmente a la obtención de los espesores de las capas que componen el paquete estructural.

Las alternativas o sensibilización del diseño obtenido debe ser parte del proceso de diseño de carreteras en función de la mejora económica y de una buena solución. Los métodos convencionales para el diseño, como el AASHTO 1993, consideran el uso de materiales de origen pétreo para el soporte de las cargas. Sin embargo, existen otros materiales que colaboran grandemente en situaciones difíciles de subrasante como es el caso de los geotextiles.

Las propiedades propias de resistencia alta a la tracción de los geotextiles deben utilizarse para minimizar los espesores y, por ende, los costos de inversión. Además, como un elemento separador o estabilizador de la subrasante, le asegura al ingeniero que las características de los materiales de base y subbase se mantendrán a lo largo del período de diseño, garantizando de esta manera la calidad del paquete estructural y minimizando los problemas de mantenimiento en el uso futuro de la carretera.

Para el diseño de caminos públicos de Costa Rica se posee una normativa estipulada en decretos y manuales que brindan especificaciones técnicas que se deben cumplir a la hora de diseñarlos. Tales especificaciones aplican para un diseño convencional, como para el uso del geotextil. Este último ha demostrado ser uno de los materiales que más beneficios aporta a la ingeniería de caminos.

El uso del conocido método de diseño para caminos AASHTO 1993 y el diseño complementario que usa geotextil forman parte de este estudio. Cuáles y cómo se evalúan las variables que se originan con el uso del geotextil para el diseño de caminos, son asuntos relevantes considerados en éste.

El objetivo principal del estudio es realizar un análisis técnico y de costos en carreteras de doble carril de pavimento flexible, con o sin geotextil, sobre subrasantes débiles o moderadas.

Parte de los datos utilizados en este trabajo fueron cedidos por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte y por la casa comercial Amanco, distribuidores de los geotextiles PAVCO de Mexichem, a quienes se les agradece la colaboración brindada.

Resumen ejecutivo

Ciertamente las exigencias ambientales que se deben acatar para la explotación de canteras concesionadas, tienen a Costa Rica en una situación de desventaja en cuanto a la disponibilidad de materiales de origen pétreo que son necesarios para las carreteras nacionales. La escasez de fuentes con cantidad y calidad de este tipo de material ha originado una problemática relacionada con las distancias de acarreo para mezclas asfálticas, bases y subbases que pueden aumentar hasta los 100 km. Esta situación no debe pasar desapercibida por la ingeniería de caminos. Por ello debe considerarse el uso del geotextil como uno de los materiales alternativos, puesto que éste cumple con las especificaciones pertinentes para el diseño de caminos.

Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis comparativo técnico y de costos para un kilómetro de carretera típica de doble carril con pavimento flexible, para carreteras tipos primaria, secundaria, terciaria y vecinal, con subrasantes débiles, con o sin el uso de geotextil y fuentes de material a distancias variables de 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 y 100 km.

Como objetivos específicos se enlistan los siguientes:

- 1) Consultar, por lo menos a cinco municipios, sobre las razones por las cuales se diseñan o no los caminos vecinales del cantón.
- 2) Definir el correspondiente volumen de tránsito de diseño para el tipo de vía primaria, secundaria, terciaria y vecinal.
- 3) Definir las propiedades geométricas de la carretera de doble carril.

- 4) Definir las propiedades de la subrasante con suelos finos sobre los que se utiliza el geotextil.
- 5) Definir las propiedades del material de sub-base, base y carpeta de rodamiento para efectos de los diseños.
- 6) Realizar el diseño convencional del camino de doble carril con pavimento flexible para subrasante con CBR promedio estacional anual de 4% y 2% y para cada tipo de vía.
- 7) Realizar el diseño de la vía de doble carril con pavimento flexible y el aporte del geotextil para subrasante con CBR promedio estacional anual de 4% y 2% y para cada tipo de vía.
- 8) Realizar las estimaciones presupuestales para todas las alternativas de diseño utilizando para ello distancias a la fuente de los materiales de 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 y 100 km.
- 9) Realizar el análisis comparativo técnico y de costos de todas las alternativas de camino.

Metodología

En Costa Rica, la *Ley General de Caminos Públicos* clasifica las carreteras públicas como red vial nacional y red vial cantonal. La red vial nacional clasifica las carreteras como primarias, secundarias y terciarias, que son administradas por el *Consejo Nacional de Vialidad* (CONAVI). La red vial cantonal, a cargo de las municipalidades, clasifica sus caminos como vecinales, calles locales y caminos no clasificados. Los caminos públicos igualmente tienen complementada su normativa con el Decreto N° 13041-T, que establece los rangos del tránsito promedio diario anual (TPDA) para cada carretera, y el Decreto N° 13363, para efectos de las dimensiones y cargas máximas de los vehículos. Igualmente, el *Manual de*

Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2010) y el Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (SIECA), forman parte del marco normativo para los diseños de caminos.

La metodología aplicada para efectos del presente estudio llevó a la elaboración y aplicación de un cuestionario sobre la situación del diseño en los municipios del país. Por otro lado y de acuerdo con las investigaciones hechas el 79.26% de la red de caminos públicos de Costa Rica, están siendo administrados por las Unidades Técnicas de Gestión Vial Municipal a cargo de un Director Técnico. Esta Unidad Técnica debe realizar paralelamente una buena gestión administrativa de los recursos, como una buena gestión técnica, para garantizar la calidad. El diseño de los caminos por las municipalidades debe ser parte de la gestión técnica de los directores. Un estudio como el presente basa su justificación en el aprovechamiento que puede darle el gremio ingenieril que se dedica tanto a caminos públicos como privados.

Para conocer el tránsito de diseño de las diferentes carreteras, así como las características geométricas de las mismas, se investigó en la Subdirección de Diseño Vial y en la Dirección de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT).

Para efectos de establecer las características geométricas de las vías se visitaron algunas de ellas. Estas fueron medidas en el sitio y fotografiadas.

Se investigó la literatura correspondiente para efectos de conocer las características del geotextil y su aplicabilidad en el diseño de carretera.

Mediante el apoyo de los Manuales SIECA y CR-2010 (Véanse Referencias), se determinaron las características de los materiales que forman parte del diseño de carreteras tales como la mezcla asfáltica, base, subbase y geotextil.

Con la información recolectada se realizaron los diseños convencionalmente, aplicando el Método AASHTO 1993. Esto permitió encontrar los espesores para las diferentes capas.

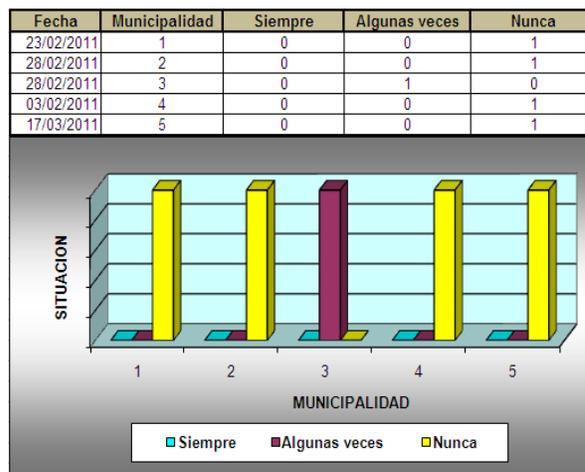
Una vez establecidos los espesores y caracterizadas las capas del paquete estructural para todas las carreteras, se diseñaron nuevamente con el aporte del geotextil para tener los nuevos espesores de capa.

Se investigaron precios de los materiales en el mercado para efectos de realizar los diferentes presupuestos. Se tomaron como precios de referencias para maquinaria la última publicación hecha por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), del 15 de abril del 2009. Los precios de base y subbase se obtuvieron en Concreteira Guanacasteca S.A. ubicada en Bagaces, Guanacaste. El precio de la mezcla asfáltica se realizó mediante consulta telefónica y los precios del geotextil a través de la casa comercial AMANCO, representantes de la marca PAVCO de Mexichem.

Finalmente se realizó el análisis comparativo de los resultados, tanto desde el punto de vista técnico como de costo, para todas las alternativas de diseño en las diferentes carreteras con y sin geotextil.

Resultados

En términos generales y considerando que se consultaron cinco municipalidades de ochenta y una que tiene el país, se puede decir que el diseño de camino no forma parte aún de la gestión técnica de estas instituciones. La Figura 1 ejemplifica lo anterior.



EXCEL y PAINT

Figura 1. Situación del diseño propio de carreteras en las municipalidades

La Figura 2, por otro lado, evidencia también la necesidad de apoyo que tienen los Directores respecto a la capacitación en el campo del diseño de caminos. La aplicación del método de diseño AASHTO 1993, el diseño con geotextil, los presupuestos y el análisis comparativo que se efectuó como parte de este estudio, pueden ayudar a los Directores de las Unidades Técnicas de Gestión Vial Municipal a mejorar su gestión.

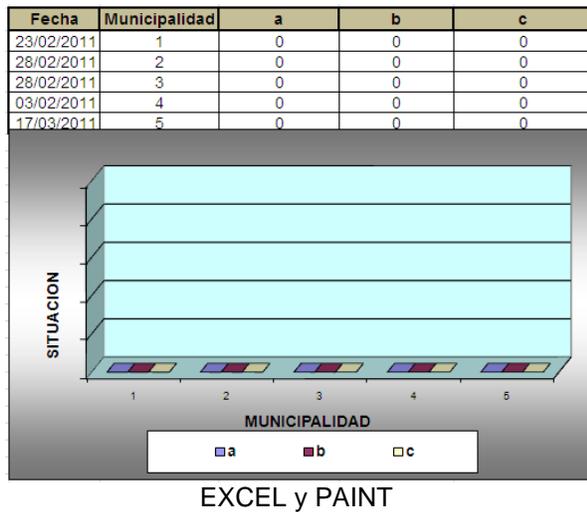


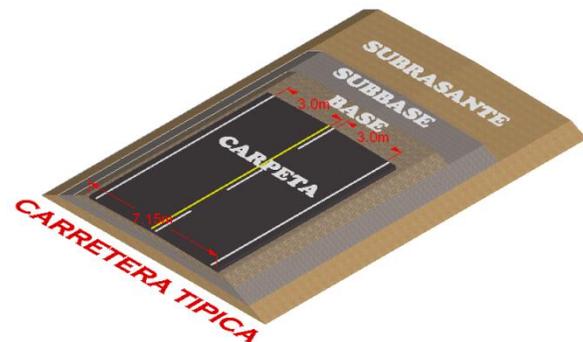
Figura 2. Situación de la capacitación en diseño de caminos

La característica geométrica, finalmente adoptada para este proyecto, fue una carretera de doble carril con dimensión libre de carril de tres metros y sin espaldones, dado que estos elementos tan importantes han sido normalmente utilizados en Costa Rica solamente en carreteras primarias. Para efectos de este análisis comparativo y tratando de controlar las variables que puedan desvirtuar la comparación, se utilizaron todas las carreteras sin espaldón. Las Figuras 3 y 4 muestran la interpretación geométrica que se dio a las carreteras de este proyecto con una carpeta total terminada de 7.15 m de ancho.



JPEG-PAINT

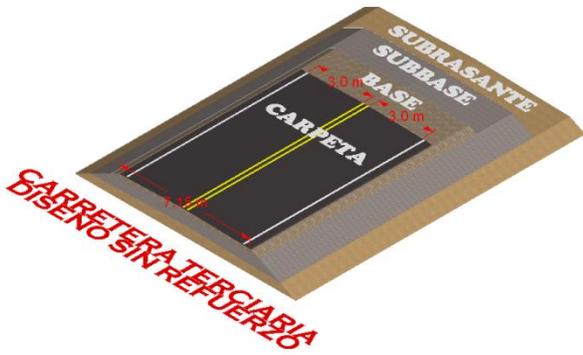
Figura 3. Vista Ruta 1 (Primaria) en La Javilla, Cañas, Guanacaste.



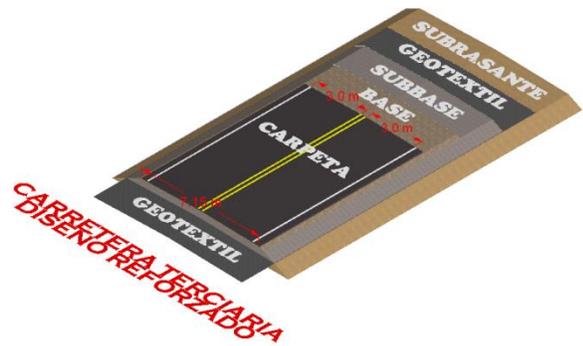
SKETCHUP y PAINT

Figura 4. Características geométricas de las vías

De acuerdo con toda la literatura técnica y legal consultada se obtuvieron las variables insumos que sirvieron para el diseño de las carreteras con el método AASHTO 1993 y con la aplicación del geotextil. Las Figuras 5 y 6 dan muestra de una condición terminada de diseño con y sin el geotextil de refuerzo para una carretera terciaria con CBR promedio anual de 2% en la subrasante.

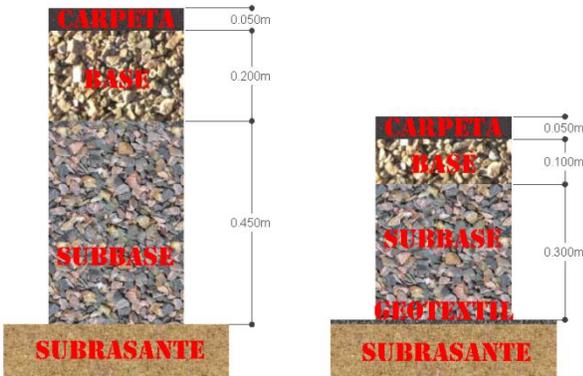


SKETCHUP y PAINT
 Figura 5. Diseño AASHTO 1993



SKETCHUP y PAINT
 Figura 6. Diseño con geotextil de refuerzo

La Figura 7 muestra la diferencia de espesores encontrados para los dos diseños.



SKETCHUP y PAINT
 Figura 7. Diseño sin y con geotextil de refuerzo, CBR=2%, carretera terciaria.

Un resumen de los diferentes espesores con o sin geotextil para subrasante con CBR=2% y CBR=4% se presentan en los Cuadros 1, 2, 3 y 4.

CUADRO N°1: ESPESORES DISEÑO CONVENCIONAL (cm)				
CBR = 2%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	45	30	20	20
Subbase	80	80	45	30

EXCEL y PAINT
 Cuadro N° 1. Espesores diseño convencional CBR=2%

CUADRO N°2: ESPESORES DISEÑO CON GEOTEXTIL (cm)				
CBR = 2%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	30	30	10	10
Subbase	0	0	30	30
Geotextil	TR4000	TR4000	TR4000	TR4000
FSg > 1.3	1.66	1.66	1.38	1.38

EXCEL y PAINT
 Cuadro N° 2. Espesores diseño refuerzo con geotextil CBR=2%

CUADRO N° 3: ESPESORES DISEÑO CONVENCIONAL ESTABILIZADO CON GEOTEXTIL (cm)				
CBR = 4%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	45	35	15	7.5
Subbase	50	45	35	30
Geotextil	NT4000	NT4000	NT4000	NT4000

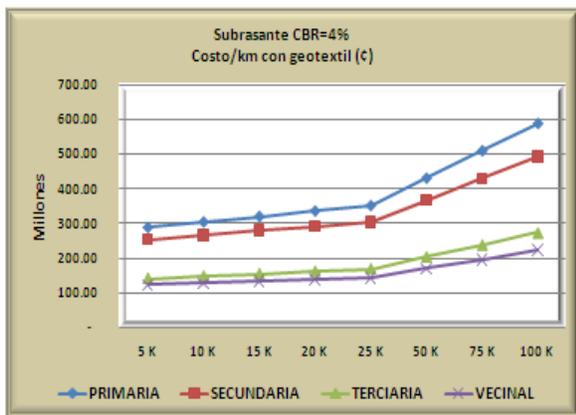
EXCEL y PAINT
 Cuadro N° 3. Espesores diseño convencional estabilizado con geotextil CBR=4%

CUADRO N°4: ESPESORES DEL DISEÑO NO ESTABILIZADO CON GEOTEXTIL (cm)				
CBR = 4%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	45	40	35	25
Subbase	132.5	97.5	70	55

EXCEL y PAINT
 Cuadro N° 4. Espesores por no uso de geotextil estabilizador CBR=4%

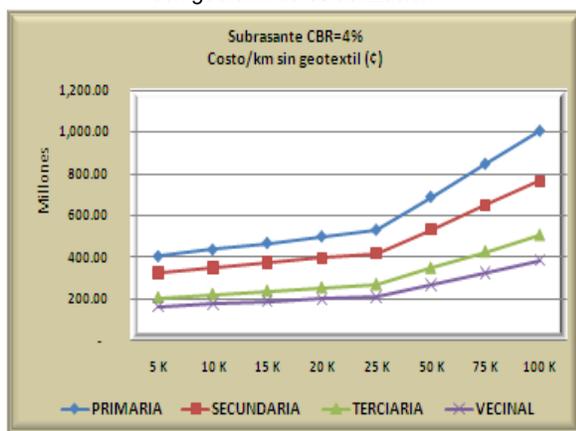
Los cuadros N° 1 y N° 2 se refieren al diseño por refuerzo con geotextil, en el cuadro N°2 se puede observar la disminución de los espesores al utilizar el geotextil. En el cuadro N° 3 se tiene un diseño convencional con geotextil de estabilización y que no permite la contaminación de la subbase y en el cuadro N° 4 se tiene un diseño convencional con los espesores requeridos si se evita colocar el geotextil que evita la contaminación de la subbase a lo largo del periodo de diseño.

Dados los espesores de diseño se calcularon todos los presupuestos y se encontraron las diferencias y las tendencias que tienen estos en razón de los acarrees planteados de 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 y 100 km. Las Figuras 8 y 9 son ejemplos del resultado presupuestal para las carreteras en donde la subrasante tiene un CBR=4%.



EXCEL y PAINT

Figura 8. Tendencias de los presupuestos de las carreteras con geotextil de estabilización



EXCEL y PAINT

Figura 9. Tendencias de los presupuestos de las carreteras sin geotextil de estabilización

Del análisis final, tanto técnico como de costos, se desprende que el geotextil se convierte en una alternativa importante cuando se tienen subrasantes débiles. Sin embargo cuando los volúmenes de material son relativamente menores y los acarrees relativamente cortos es conveniente cerciorarse, desde el punto de vista económico, si el geotextil presenta un beneficio, dado que para la carretera vecinal, se encontraron costos mayores al utilizar geotextil de refuerzo cuando el acarreo fue menor a 50 km.

Conclusiones

Seguidamente se presentan las conclusiones del estudio efectuado:

- 1.- Dado los resultados del cuestionario muchas municipalidades de Costa Rica no tienen un buen fundamento técnico en materia de diseños de caminos.
- 2.- Los ingenieros Directores Técnicos de las Unidades Técnicas de Gestión Vial Municipal requieren el apoyo inmediato en materia de diseño y gestión de caminos.
- 3.- El diseño convencional con el método AASHTO 1993 requiere la obtención de datos de diseños que conlleva responsabilidad.
- 4.- En el diseño convencional con el método AASHTO 1993, las variables insumo de diseño de mayor esfuerzo para su obtención son el Tránsito Promedio Diario Anual y el Módulo Resiliente promedio anual de la subrasante.
- 5.- Las Normas CR-2010 en su sección 714 y las Normas AASHTO M 288-06 no tipifican requerimientos para el geotextil como elemento de refuerzo. Para tal efecto se utiliza la norma ASTM D-4595 Método de la Tira Ancha.
- 6.- El diseño de carreteras con geotextil de refuerzo para subrasantes con CBR menores al 3% permite la disminución sustancial de los espesores del paquete estructural.
- 7.- El diseño de carreteras con geotextil de estabilización para subrasantes con CBR entre 3% y 8% garantiza la no contaminación del paquete estructural, tal como es considerado en el diseño convencional AASHTO 1993, provocando no colocar sobreespesores para disminuir tal efecto.

8.- Dada su capacidad a trabajar a tracción el geotextil aporta mayores ahorros en los caminos, cuando se considera como material de refuerzo y no solamente como estabilizador o separador.

9.- Para carreteras con subrasantes de CBR=2%, y acarreo de 5km, el ahorro presupuestario con el uso del geotextil de refuerzo es del orden de 38% para primarias, 31% para secundarias, 6% para terciarias y no se tiene ahorro para las vecinales.

10.- Para carreteras con subrasantes de CBR=2% y acarreo de 100 km, el ahorro presupuestario con uso del geotextil de refuerzo se incrementa con la distancia de acarreo, obteniéndose cifras del 59% para primarias, 53% para secundarias, 24% para terciarias y 6% para vecinales.

11.- Para carreteras con subrasantes de CBR=4% y acarreo de 5 km, el ahorro presupuestario con el uso del geotextil de

estabilización, que garantice la no contaminación del paquete estructural, es del orden de 40% para primarias, 28% para secundarias, 47% para terciarias y 35% para las vecinales.

12.- Para carreteras con subrasantes de CBR=4% y acarreo de 100 km el ahorro presupuestario con uso del geotextil de estabilización que garantice la no contaminación del paquete estructural, se incrementa con la distancia de acarreo, obteniéndose cifras hasta del 71% para primarias, 55% para secundarias, 85% para terciarias y 72% para vecinales.

13.- El uso de geotextil debe ser considerado siempre en el diseño de caminos como material alternativo, con subrasantes que ofrezcan CBR promedios estacionales anuales débiles, dadas las distancias de acarreo actuales que se utilizan en el país.

Introducción

Las inversiones que se realizan en la construcción de las carreteras son relativamente altas. Los países en vías de desarrollo como Costa Rica a través de sus instituciones públicas tratan de atender anualmente, mediante sus presupuestos, la responsabilidad que les compete en esta materia. Asimismo, muchas empresas privadas de diversa índole productiva deben atender este asunto en su gestión. El caso concreto de carreteras primarias, secundarias, terciarias y vecinales tienen en Costa Rica las normativas establecidas para efectos de diseño y construcción.

La aplicación del diseño convencional en los caminos y el diseño para la utilización de materiales alternativos como el geotextil, debe permanecer siempre bajo la lupa del ingeniero de caminos, en razón de la escasez presupuestaria y limitaciones ambientales con que normalmente se trabaja. Análisis comparativos como el presentado en este proyecto, le permiten a todo aquel gestor administrativo de caminos y diseñador de caminos en general, tener referencias que fortalezcan sus capacidades y formación para un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles en la construcción de caminos.

El objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis comparativo técnico y de costos para un kilómetro de carretera típica de doble carril con pavimento flexible, para carreteras tipos primaria, secundaria, terciaria y vecinal, con subrasantes débiles, con o sin el uso de geotextil y fuentes de material a distancias variables de 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 y 100 km.

Como objetivos específicos se tienen:

- 1) Consultar, por lo menos a cinco municipios, sobre las razones por las

cuales se diseñan o no los caminos vecinales del cantón.

- 2) Definir el correspondiente volumen de tránsito de diseño para el tipo de vía primaria, secundaria, terciaria y vecinal.
- 3) Definir las propiedades geométricas de la carretera de doble carril.
- 4) Definir las propiedades de la subrasante con suelos finos sobre los que se utiliza el geotextil.
- 5) Definir las propiedades del material de sub-base, base y carpeta de rodamiento para efectos de los diseños.
- 6) Realizar el diseño convencional del camino de doble carril con pavimento flexible para subrasante con CBR promedio estacional anual de 4% y 2% y para cada tipo de vía.
- 7) Realizar el diseño de la vía de doble carril con pavimento flexible y el aporte del geotextil para subrasante con CBR promedio estacional anual de 4% y 2% y para cada tipo de vía.
- 8) Realizar las estimaciones presupuestales para todas las alternativas de diseño utilizando para ello distancias a la fuente de los materiales de 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 y 100 km.
- 9) Realizar el análisis comparativo técnico y de costos de todas las alternativas de camino.

Tanto la metodología aplicada como los resultados finales de este proyecto se apoyaron en el Marco Teórico donde se explica sucintamente el método de diseño AASHTO 1993 y los métodos funcionales de diseño de caminos con el uso del geotextil, sea este para refuerzo o estabilización-separación.

Finalmente se llega a la obtención de costos para todas las alternativas de carreteras consideradas. Esto permite realizar un análisis técnico y de costos para los resultados encontrados.

Marco Teórico

Breve revisión de los caminos en Costa Rica

La ingeniería de caminos en Costa Rica se desenvuelve tanto en el ámbito privado como público. Desde la óptica privada, el sector agrícola como las fincas bananeras, piñeras, caña de azúcar y el sector de energía con las empresas de generación eléctrica (hidroeléctricas, eólicas, etc), realizan grandes inversiones tanto en construcción como en mantenimiento. Debido a lo oneroso que resultan estos dos conceptos, el ingeniero de caminos del sector privado normalmente se encuentra limitado económica, técnica y ambientalmente para realizar un buen ejercicio ingenieril en tal campo, no obstante que estas empresas deben atender decenas de kilómetros de caminos.

Por otro lado, también el sector público tiene que enfrentar una gran responsabilidad en construcción y mantenimiento de caminos. Este sector (que debe incluir el ICE, el IDA y otras instituciones) sí tiene una estructura legalmente establecida para la dinámica que exige la atención técnica de los caminos. La red vial de caminos públicos de Costa Rica, de acuerdo con la última publicación de la *Consejo Nacional de Vialidad* (CONAVI), se comporta como se muestra en la Figura 10.

De los 35 820 kilómetros de la red vial del país, 7 429 kilómetros los atiende el CONAVI y los restantes 28 391 kilómetros son atendidos principalmente por los municipios de los 81 cantones del país. Por lo que el 20.74% son rutas nacionales y el 79.26% de las rutas públicas son cantonales.

Por otra parte, el presupuesto anual de CONAVI para el 2010 puede observarse en la Cuadro 5.

En términos generales, el CONAVI programa ¢ 47 528 millones en el mantenimiento de 7 429 km, dando un promedio por kilómetro de ¢ 6.4 millones. Asimismo en construcción vial programa ¢ 33 093 millones. Estos datos brindan una idea de las inversiones que se realizan en el país en materia de rutas nacionales.

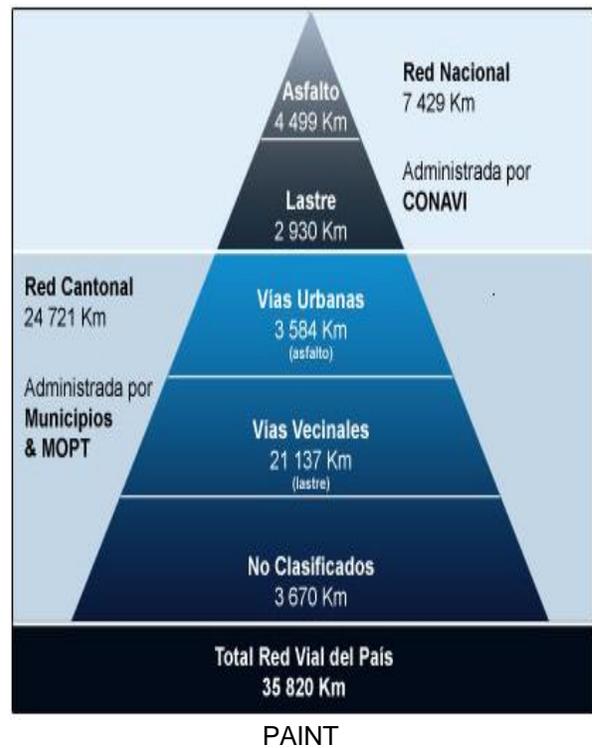


Figura 10. Pirámide de la Red Vial del país

Programa	Monto (Miles de colones)	%
Programa 1: Administración Superior	3.788.074	2,7
Programa 2: Conservación Vial	47.528.585	34,2
Programa 3: Construcción Vial	83.785.641	
Amortización, intereses y préstamo BCIE	25.892.110	18,6
Obras y consultoría financiadas con BCIE	24.800.000	17,8
Otros Programa 3. Construcción Vial	33.093.531	23,8
Programa 4: Operación e inversión en Vías de Peaje	3.839.533	2,8
Total	138.941.833	100

PAINT

Cuadro 5 Estructura presupuestal CONAVI año 2010

Por otro lado y de acuerdo con la información publicada por la Dirección Municipal del Ministerio de Obras Públicas y Transporte, para las municipalidades se programaron en el 2010 $\$$ 23 239.1 millones. Esto promedia para los 24 721 km cantonales que normalmente se atienden (no se incluyen los No Clasificados) $\$$ 940 000 por kilómetro, considerando también que este monto incluye los gastos administrativos y operativos de las Unidades Técnicas de Gestión Vial Municipal.

Los datos anteriores, en forma genérica, permiten conocer que los recursos en materia de construcción como para mantenimiento de carreteras siempre son escasos. La constante para el ingeniero de caminos siempre ha sido muchas necesidades y pocos recursos para brindar soluciones técnicamente aceptables.

Con los números gruesos que se exponen, es entendible que la ingeniería de caminos en Costa Rica debe enfocarse hacia la optimización de los recursos disponibles, sin descuidar la calidad desde todos sus ángulos. Si el 79.26% de los caminos públicos del país están en manos municipales para su administración, no debe escatimarse esfuerzo para atender las necesidades que tales instituciones requieren, maximizando la capacidad técnica de sus Unidades Gestoras de caminos, así como minimizando las influencias políticas que muchas veces las afectan.

Una pequeña encuesta realizada puede demostrar la precaria condición en que se

desenvuelven las municipalidades en materia de ingeniería de caminos, a pesar del esfuerzo que se ha hecho desde julio del año 2001, cuando comenzó a regir la Ley 8114, *Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria*, que brinda recursos para la atención vial municipal.

El Diseño de Caminos Método AASHTO 1993

De acuerdo con la norma SIECA (2002) el concepto básico para el diseño de carreteras es determinar los espesores de las capas estructurales, basado tanto en el volumen de tránsito como en las propiedades de los materiales. La metodología de diseño GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, AASHTO 1993, estipula los requerimientos para realizar un diseño de caminos. Este es un método de tipo empírico e iterativo. En la Figura 11 se muestra el nomograma que se utiliza para este procedimiento. En la parte superior del esquema se ubica la fórmula empírica utilizada para efectos de realizar el diseño matemáticamente.

La literatura referente al método de diseño es amplia debido a que tal método es usado en muchos países incluyendo Costa Rica.

El término izquierdo de la ecuación considera el efecto del tránsito o más precisamente el volumen de vehículos para lo cual una carretera se diseña en términos de EJES EQUIVALENTES de 18 000 lbs (80kN). El término derecho de la ecuación considera el efecto de las características de los materiales, los efectos estadísticos de las variables consideradas y la serviciabilidad del camino en el periodo de diseño.

La variable $\log_{10}W_{18}$ incluye un estudio serio del Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) que la carretera por diseñar soporta a la fecha del diseño y este TPDA debe estar estructurado de acuerdo con el tipo de vehículos y con sus porcentajes para conocer su conformación. Esta información normalmente se consigue en el MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTE (MOPT) pero no siempre es completa. Este dato del diseño debe ser

establecido con la mayor precisión, a efectos de tenerle “confianza” para la carga vehicular impuesta a la carretera.

El Cuadro 6 muestra la proyección en años que se recomienda en función de las condiciones de la carretera por volumen de tránsito. El TPDA debe afectarse por el Factor Sentido, que se toma como 50%, para carretera de doble carril, debido a que normalmente el tránsito es medido en ambos sentidos de la carretera. Igualmente se recomienda, según el Cuadro 7, el uso del Factor Carril en función del número de carriles. En el caso de una vía de dos carriles el Factor Carril de Diseño es 100% del TPDA.

Por otro lado, debido a que el TPDA se mide en una fecha de diseño, esta medida debe ser proyectada por el periodo de tiempo por diseñar, a una tasa establecida que debe ser calculada para cada tipo de vehículo en función de su comportamiento estadístico.

El Cuadro 9 muestra los factores de crecimiento establecidos por la AASHTO, que se utiliza para el TPDA encontrado, según el periodo de diseño considerado y para la tasa de crecimiento.

En 1993, mediante el Decreto N° 13633-MOPT, se establecieron en Costa Rica las cargas máximas, así como las dimensiones máximas para camiones de carga que deben circular en las carreteras del país. Se clasifican los camiones según sus ejes, sean estos simples, tándem, tridem, etc.

En la Gaceta N°13 del 19 de enero del año 2005, mediante Decreto N° 32191-MOPT-MI-MEIC, se presenta la última modificación al citado Decreto de 1993. De tal Decreto, en el Cuadro 8 y en el Anexo 3, se muestran las clasificaciones más importantes para efectos de Diseño de Caminos en Costa Rica.

Highway Conditions	Analysis Period (years)
High-volume urban	30-50
High-volume rural	20-50
Low-volume paved	15-25
Low-volume aggregate surface	10-20

PAINT

Cuadro 6. Periodos de diseño de la norma AASHTO

Number of Lanes in Each Direction	Percent of 18-kip ESAL in Design Lane
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

PAINT

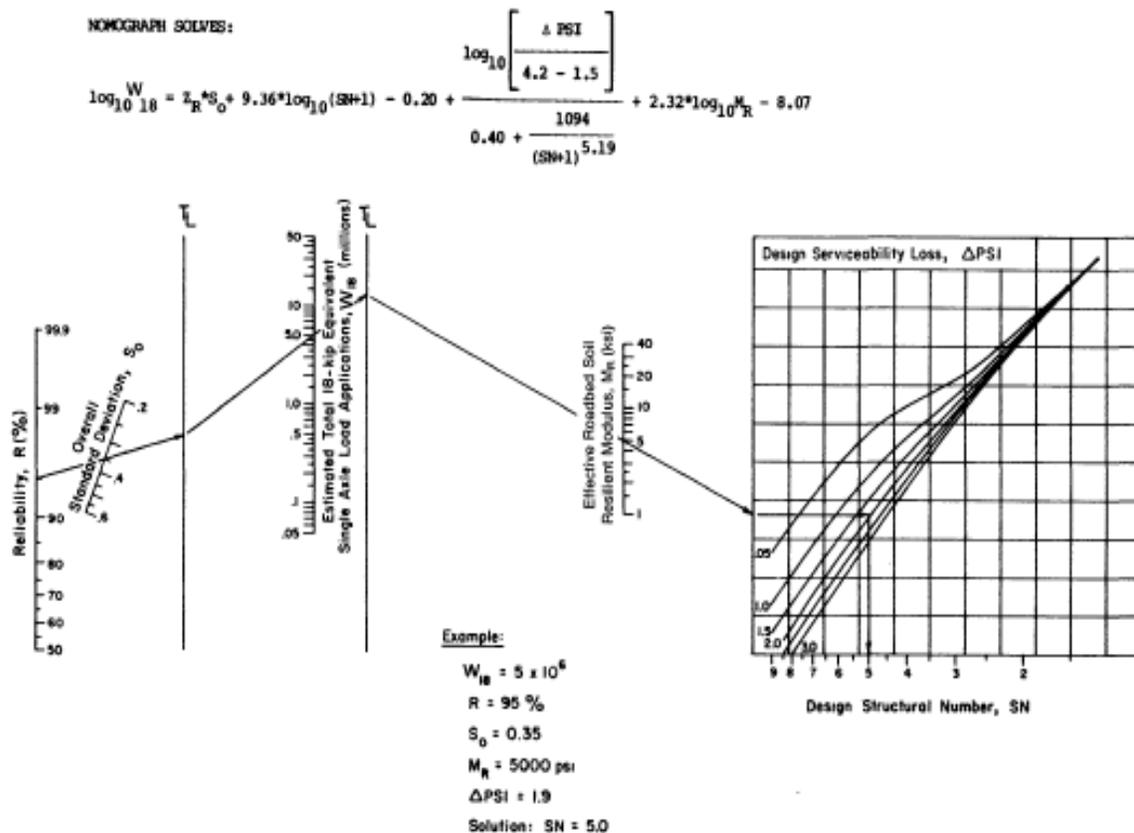
Cuadro 7 Factor carril de diseño según norma AASHTO

TRACTOCAMION CON SEMIRREMOLQUE
(Pesos máximos permisibles por tipo de vehículo)

TIPO DE VEHICULO	ESQUEMA	CONFIGURACION EJES / LLANTAS	SIMBOLOGIA DEL RODADO ¹⁾	NUMERO DE EJES	LLANTAS	PESO MAXIMOS PERMISIBLES EN TONELADAS					LONGITUD MAXIMA (L) EN METROS		
						1er	2do	3er	4to	5to			
T2-S1				1-1-1	3	10	6	10	10		26	26	21,00
T2-S2				1-1-2	4	14	6	10	17		32,5	32,5	21,00
T2-S3				1-1-3	5	18	6	10	23		39	39	21,00
T2-S1+2				1-1-1-2	5	18	6	10	10	16,5	42,5	42,5	21,00
T3-S1				1-2-1	4	14	6	16,5	10		32,5	32,5	21,00
T3-S2				1-2-2	5	18	6	16,5	16,5		39	39	21,00
T3-S3				1-2-3	6	22	6	16,5	23		45,5	45,5	21,00
T3-S1+2				1-2-1-2	6	22	6	16,5	10	16,5	49	49	21,00

PAINT

Cuadro 8. Tipos de cargas para transporte



En donde:

- W_{18} = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular.
- Z_r = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.
- S_0 = Desviación estándar de todas las variables.
- ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.
- M_r = Módulo de resiliencia de la subrasante.
- SN = Número Estructural

PAINT

Figura 11. Nomograma y Fórmula de la norma AASHTO para diseño de pavimento flexible

Traffic Growth Factors*

Analysis Period Years (n)	Annual Growth Rate, Percent (g)							
	No Growth	2	4	5	6	7	8	10
1	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0
2	2 0	2 02	2 04	2 05	2 06	2 07	2 08	2 10
3	3 0	3 06	3 12	3 15	3 18	3 21	3 25	3 31
4	4 0	4 12	4 25	4 31	4 37	4 44	4 51	4 64
5	5 0	5 20	5 42	5 53	5 64	5 75	5 87	6 11
6	6 0	6 31	6 63	6 80	6 98	7 15	7 34	7 72
7	7 0	7 43	7 90	8 14	8 39	8 65	8 92	9 49
8	8 0	8 58	9 21	9 55	9 90	10 26	10 64	11 44
9	9 0	9 75	10 58	11 03	11 49	11 98	12 49	13 58
10	10 0	10 95	12 01	12 58	13 18	13 82	14 49	15 94
11	11 0	12 17	13 49	14 21	14 97	15 78	16 65	18 53
12	12 0	13 41	15 03	15 92	16 87	17 89	18 98	21 38
13	13 0	14 68	16 63	17 71	18 88	20 14	21 50	24 52
14	14 0	15 97	18 29	19 16	21 01	22 55	24 21	27 97
15	15 0	17 29	20 02	21 58	23 28	25 13	27 15	31 77
16	16 0	18 64	21 82	23 66	25 67	27 89	30 32	35 95
17	17 0	20 01	23 70	25 84	28 21	30 84	33 75	40 55
18	18 0	21 41	25 65	28 13	30 91	34 00	37 45	45 60
19	19 0	22 84	27 67	30 54	33 76	37 38	41 45	51 16
20	20 0	24 30	29 78	33 06	36 79	41 00	45 76	57 28
25	25 0	32 03	41 65	47 73	54 86	63 25	73 11	98 35
30	30 0	40 57	56 08	66 44	79 06	94 46	113 28	164 49
35	35 0	49 99	73 65	90 32	111 43	138 24	172 32	271 02

*Factor = $\frac{(1 + g)^n - 1}{g}$, where $g = \frac{\text{rate}}{100}$ and is not zero. If annual growth rate is zero, the growth factor is equal to the analysis period

NOTE: The above growth factors multiplied by the first year traffic estimate will give the total volume of traffic expected during the analysis period

PAINT

Cuadro 9. Factores de crecimiento de la norma AASHTO

Con toda la información anterior es posible realizar los cálculos de Factor Camión, tomando para ello los factores de conversión de las Tablas D1 a la D9 de la guía AASHTO. Estos factores de conversión, denominados LEF por sus siglas en inglés (*Load Equivalency Factors*), representan el daño que provoca un eje cualquiera con una carga dada respecto al daño que causa el eje equivalente de 18 000 lbs (80 kN). La tabla por utilizar y dada por la normativa AASHTO, dependerá del SN (Número Estructural considerado para el pavimento), del tipo de eje (Simple, Tandem o Tridem), y del pt (índice de serviciabilidad final).

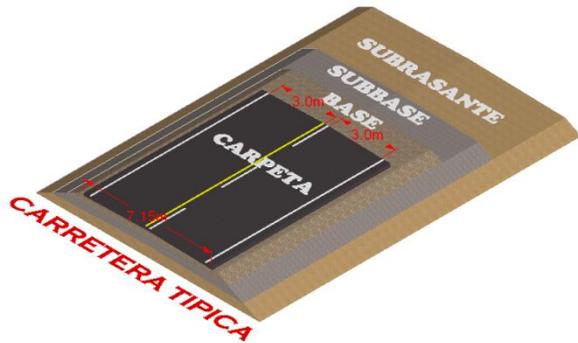
La clasificación típica en Costa Rica para encontrar el Factor Camión es (Ver Anexo 4):

- Pasajeros
- Carga liviana
- C2
- Buses
- C3
- C4
- T3-S2

Realizados los cálculos se tendrán finalmente los Ejes Equivalentes de Diseño (EEQ) o *Equivalent Single-Axle Load* (ESAL), que servirán para entrar al nomograma de la Figura 11 y al término izquierdo ($\log_{10} W_{18}$) de la fórmula de la misma figura.

Respecto al término derecho de la ecuación de diseño, se deben establecer los siguientes significados para las variables SN,

ΔPSI , Z_r y S_o , considerando las Figuras 12, 13 y 14 que se muestran.



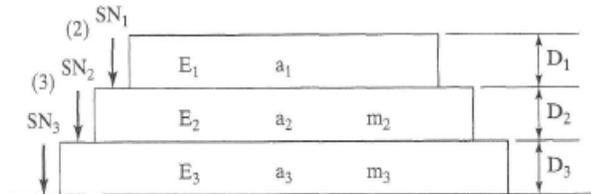
SKETCHUP y PAINT

Figura 12. Estructura típica de un pavimento flexible



SKETCHUP y PAINT

Figura 13. Estructura típica de un pavimento flexible



PAINT

Figura Nº14. Ubicación del SN sobre las capas

SN = Número estructural que es función del espesor de capa D_i , del coeficiente de capa a_i , y del coeficiente de drenaje de cada capa m_i . Cada capa de la estructura de pavimento (subbase, base y carpeta asfáltica) tiene su aporte al SN total del paquete estructural. En términos generales el SN representa la calidad estructural de un pavimento flexible y se representa mediante la ecuación 1 de espesores.

$$SN = D_1a_1 + D_2a_2m_2 + D_3a_3m_3 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$SN_1 = D_1a_1$ es considerado el Número Estructural aplicado sobre la base o sea el aporte estructural de la carpeta asfáltica

$SN_2 = D_2a_2m_2$ es considerado el Número Estructural sobre la subbase o sea el aporte estructural de la base.

$SN_3 = D_3a_3m_3$ es considerado el Número Estructural sobre la subrasante o sea el aporte estructural de la subbase.

a_i = es el coeficiente estructural de cada capa (carpeta asfáltica, base y subbase). Esta variable es función de la resistencia y rigidez de un material y debe ser determinado para cada capa con las gráficas establecidas por la AASHTO (Véanse Figuras 15, 16 y 17) y que requieren otra variable de entrada siendo normalmente el California Bearing Ratio, CBR, para las base y subbases y el Módulo de Rigidez, MR, para la carpeta asfáltica.

El CBR es una medida muy común, realizada por los laboratorios de suelos tanto para subrasantes, bases y subbases. Mide la relación de esfuerzo de penetración de una muestra testigo con respecto a una muestra patrón. El Anexo 1 muestra la relación entre el CBR y los tipos de suelos según la clasificación AASHTO. (Yang, 2004).

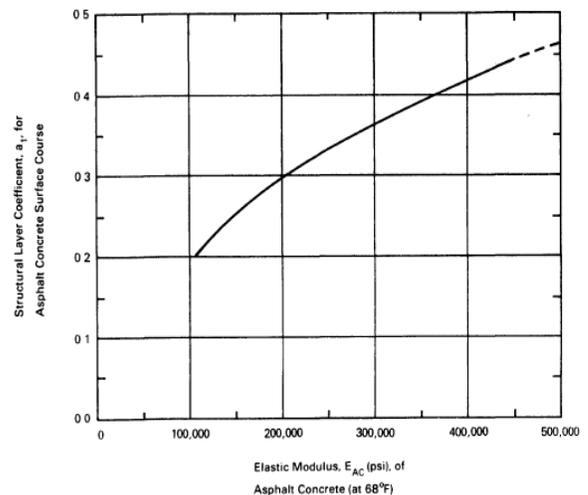


Chart for Estimating Structural Layer Coefficient of Dense-Graded Asphalt Concrete Based on the Elastic (Resilient) Modulus (3)

PAINT

Figura 15. Coeficiente estructural mezcla asfáltica AASHTO

El MR, conocido también como Módulo Resiliente, es el módulo de elasticidad basado sobre deformaciones recuperables bajo cargas repetidas (Yang, 2004).

$$Mr = \sigma_d / \epsilon_t \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

σ_d = Esfuerzo desviador para una prueba de compresión triaxial.

ϵ_t = Deformación unitaria recuperable después de 100 a 200 repeticiones de carga sobre la muestra en el laboratorio.

El MR puede ser determinado para todos los materiales que componen las capas estructurales de un pavimento mediante la norma AASHTO T-274-82.

La subrasante, tal y como se muestra en las Figuras 12 y 13, es la capa de soporte para la carretera, por lo tanto, dadas las características de MR para la carpeta asfáltica, base y subbase, y de acuerdo con su capacidad o MR, así resultarán los espesores de las diferentes capas que estarán sobre ella. Es por tanto imprescindible en el diseño de carreteras por el METODO AASHTO 1993, determinar los valores MR para cada una de las capas.

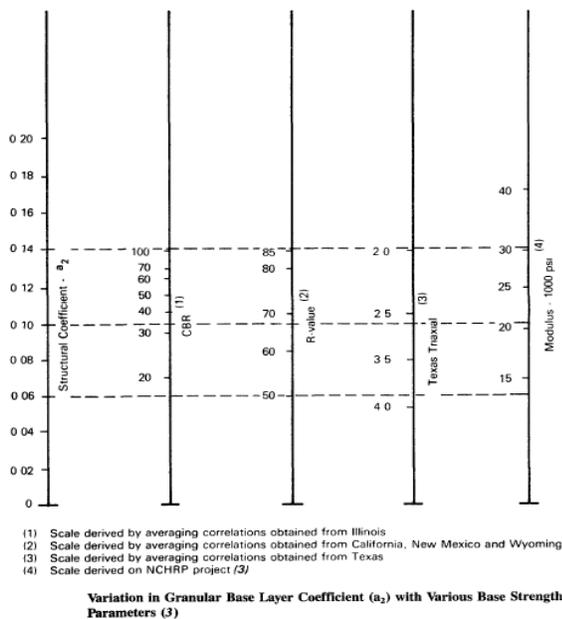


Figura 16. Coeficiente estructural base granular AASHTO

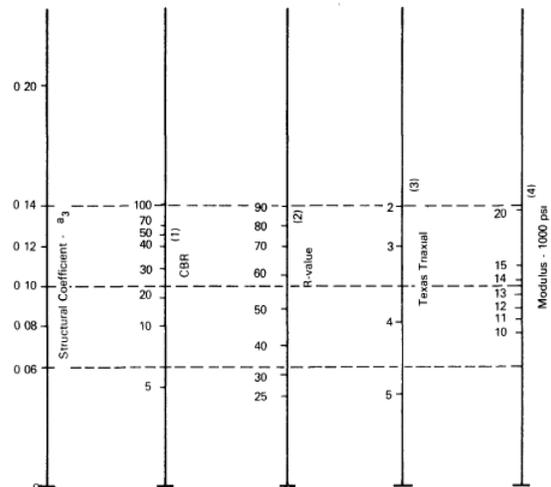


Figura 17. Coeficiente estructural subbase granular AASHTO

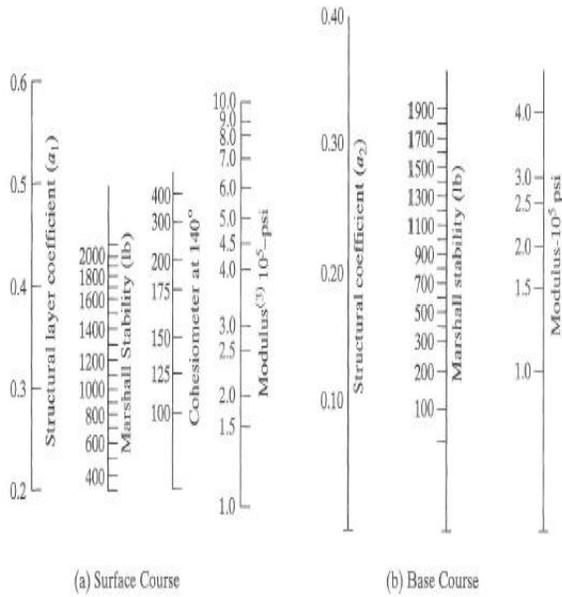
Para bases y subbases es método común encontrar los MR correspondientes utilizando para tal fin el valor CBR del material y entrando a los nomogramas de las Figuras 16 y 17, respectivamente. En el caso del MR para la carpeta asfáltica lo ideal es realizar la prueba en laboratorio; no obstante, puede relacionarse con la prueba de Estabilidad Marshall que se realiza a las pastillas de mezclas asfálticas, utilizando el nomograma de la Figura 18 (Yang, 2004).

Respecto al MR de la subrasante es de suma importancia determinar un valor lo más certero posible para el diseño. El material de subrasante de un pavimento se comporta de forma heterogénea a lo largo de la ruta, lo que provoca mucha variación en el valor de MR considerando que la presencia de agua en los suelos altera su comportamiento físico-mecánico. Es entonces un asunto de compromiso ingenieril determinar su valor MR dado el comportamiento de los suelos y las condiciones de humedad a lo largo de las estaciones anuales. La AASHTO, mediante la Figura 19 que se presenta, ofrece la forma en que se debe determinar el valor promedio anual del MR para una subrasante. Como se puede observar, es una metodología exigente y con mucha dedicación en estudios básicos. Por otra parte, mediante el nomograma

de la Figura 20 (Yang, 2004), y utilizando el valor común de ensayo CBR, se puede estimar el MR correspondiente a la subrasante.

En Costa Rica, mediante el apartado 301.03 del Manual CR-2010, se establecen las características físico-mecánicas que deben tener tanto la base como la subbase. Así, no son aceptables bases con CBR menores a 80%, límite líquido máximo de 35 e índice plástico de 4 a 9. Igualmente la subbase debe tener un CBR mayor a 30, límite líquido máximo de 35 e índice plástico de 4 a 10.

De acuerdo con el tipo de mezcla asfáltica que se use según la norma CR-2010 y mostrado en las Cuadro 10, se tienen los valores mínimos de Estabilidad Marshall, por lo que utilizando el nomograma de la Figura 18 se establecen los valores MR para diseño o en su defecto la prueba MR con la norma ASTM D 4123-82 (*Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*). Valores entre 300 000 y 500 000 psi (2070 y 3450 MPa) para MR de la mezcla asfáltica son usuales.



Correlation charts for estimating resilient modulus of HMA (1 lb = 4.45 N, 1 psi = 6.9 kPa). (After Van Til et al. (1972).)

PAINT

Figura 18. Determinación MR carpeta asfáltica

Parámetros de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
(a) Hveem (AASHTO T 246 y T 247)			
(1) Estabilómetro, mínimo	37	35	30
(2) Porcentaje de vacíos de aire	3,0 - 5,0	3,0 - 5,0	3,0 - 5,0
(3) Vacíos en el agregado mineral, min. %	Ver Tabla 402-2		
(b) Marshall (AASHTO T 245)			
(1) Estabilidad, kN min.	8,00	5,34	4,45
(2) Flujo, 0,25 mm	8 - 14	8 - 16	8 - 20
(3) Porcentaje de vacíos de aire	3,0 - 5,0	3,0 - 5,0	3,0 - 5,0
(4) Vacíos en el agregado mineral, min. %	Ver Tabla 402-2		
(5) Compactación, número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo	75	50	50
c) Inmersión - Compresión (AASHTO T 165 y T 167)			
(1) Resistencia a la compresión, kPA min. (seco)	2100	1700	1400
(2) Resistencia a la tensión diametral retenida min. %	75	75	75
(d) Relación polvo-asfalto (2)	0,6 - 1,3	0,8 - 1,6	0,8 - 1,6

PAINT

Cuadro 10. Normas CR-2010 para mezclas asfálticas

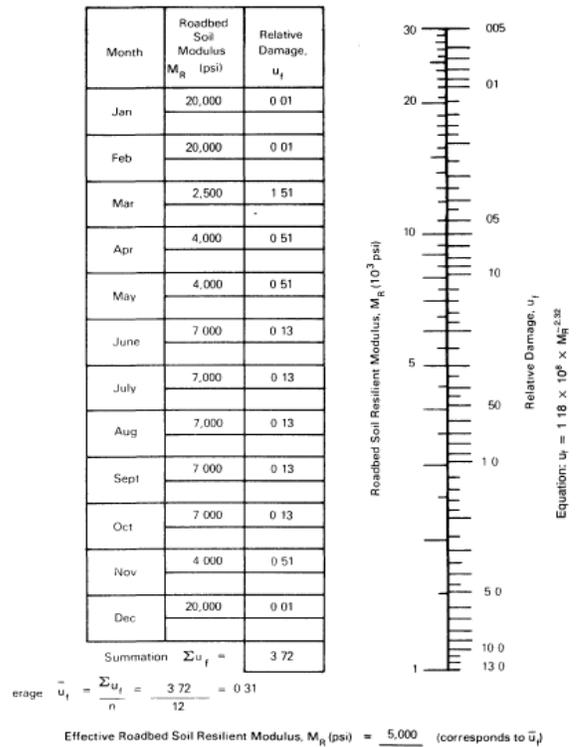


Chart for Estimating Effective Roadbed Soil Resilient Modulus for Flexible Pavements Designed Using the Serviceability Criteria

PAINT

Figura 19. Estimación de MR estacional para subrasantes

Para la determinación del Número Estructural SN se debe afectar la capacidad de cada capa de acuerdo con las características de drenaje que tenga y según las condiciones de humedad del sitio mediante el uso del coeficiente de drenaje m_i . El Cuadro 11 establece los coeficientes de drenajes recomendados por la AASHTO en función de las condiciones de drenaje que se consideren.

Recommended m_i Values for Modifying Structural Layer Coefficients of Untreated Base and Subbase Materials in Flexible Pavements

Quality of Drainage	Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			
	Less Than 1%	1-5%	5-25%	Greater Than 25%
Excellent	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Good	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Fair	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Poor	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Very poor	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

PAINT

Cuadro 11. Determinación m_i para el SN

Δ PSI = Es la serviciabilidad por cumplir por parte de la estructura de pavimento a través del período de diseño. De acuerdo con la AASHTO:

$$\Delta\text{PSI} = p_o - p_t \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

PSI = Índice de Serviciabilidad Presente

p_o = Serviciabilidad inicial

p_t = Serviciabilidad final

La medición de la serviciabilidad se realiza mediante una fórmula establecida (Yang, 2004) que incluye variables en la superficie de ruedo tales como varianza de las pendientes de rugosidad, agrietamiento, baches y profundidad promedio de las roderas. De acuerdo con Yang (2004), el p_o para pavimento flexible se determina en 4.2 y un rango de 2 hasta 3 para p_t dependiendo de la importancia de la carretera en diseño.

En relación con el producto de las variables $Z_r S_o$ en la ecuación de la Figura 11 (Yang, 2004), estadísticamente se establece que:

Z_r = Es la desviación normal o área bajo la curva de la distribución normal para un nivel de onfianza establecido tal y como se muestra en el Cuadro 12.

S_o = Es la desviación estándar de las mediciones, se recomienda usar entre 40 y 50% para pavimento flexibles, SIECA (2002).

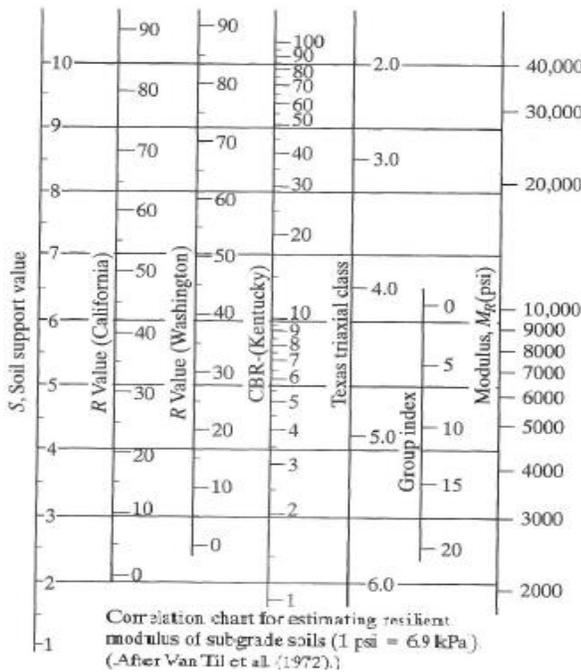


Figura 20. Determinación MR para subrasantes

Standard Normal Deviates for Various Levels of Reliability			
Reliability (%)	Standard normal deviate (Z_R)	Reliability (%)	Standard normal deviate (Z_R)
50	0.000	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

PAINT

Cuadro 12. Valores Z_r niveles de confianza R

Una vez establecidas todas las variables se puede utilizar el nomograma de la Figura 1.2.1, así como la fórmula indicada. De esta manera se logra realizar el diseño convencional utilizando el Método AASHTO 1993.

El Diseño de Caminos usando Geotextil

Breve introducción

Los geotextiles forman parte de la amplia gama de productos geosintéticos que existen en el mercado para uso ingenieril, tales como las geomallas, geomembranas, georedes y otros geocompuestos que se generan de la combinación de los anteriores. Los geosintéticos se componen de fibras de polímeros a base de polipropileno, poliéster, poliamida o polietileno.

El geotextil, específicamente, se fabrica con fibras de polipropileno (92% aprox.), poliéster (5% aprox.), Polietileno (2%) y poliamida o nylon (1% aprox.), (Koerner, 2005). La Figura 21 muestra los tipos de fibras poliméricas utilizadas para la fabricación del geotextil

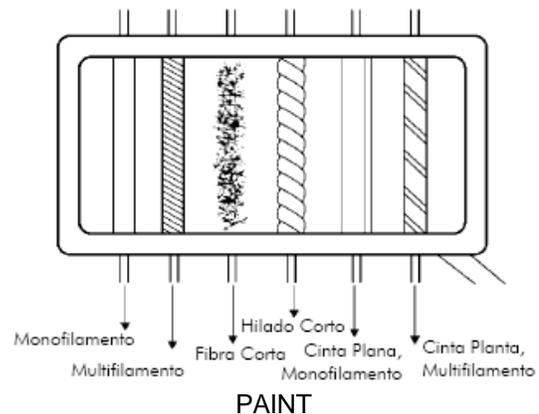
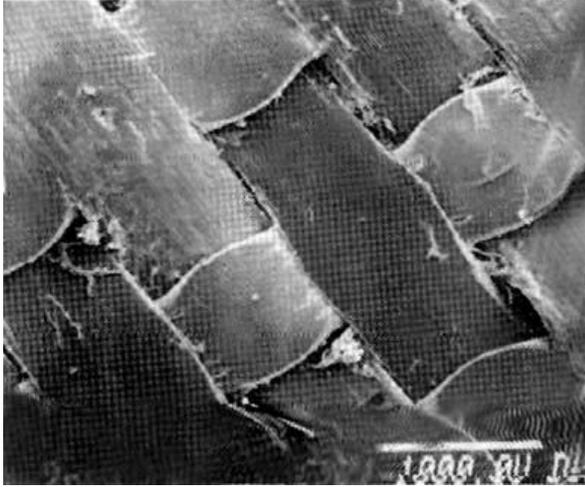


Figura 21. Tipos de fibras poliméricas usadas para fabricar el geotextil

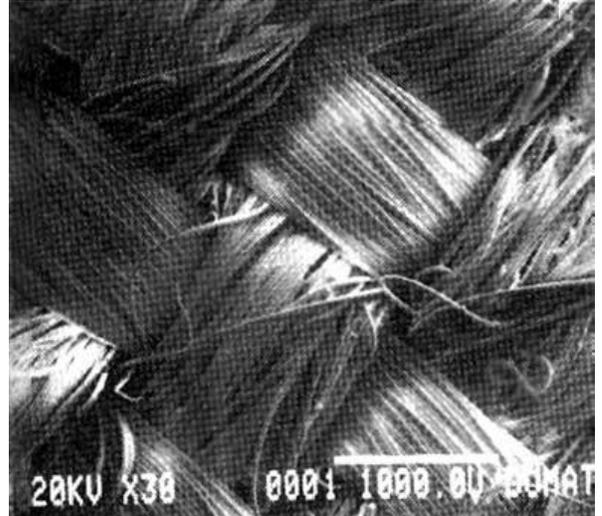
El avance tecnológico de los geotextiles ha crecido rápidamente desde finales de 1950. Hoy día existen grandes fabricantes de estas telas con departamentos de ingeniería e investigación que dedican gran parte de su esfuerzo en el mejoramiento del geotextil como en la asesoría técnica para el buen uso de estos materiales. Entre estos fabricantes se encuentran Maccaferri, Mexichem-Pavco, Amoco, Propex, etc.

En Costa Rica las dos marcas más posicionadas son la Maccaferri y Mexichem-Pavco. Debe aclararse que la información acerca de esta última marca y los productos pueden accederse por internet o a través de su representante a nivel nacional.

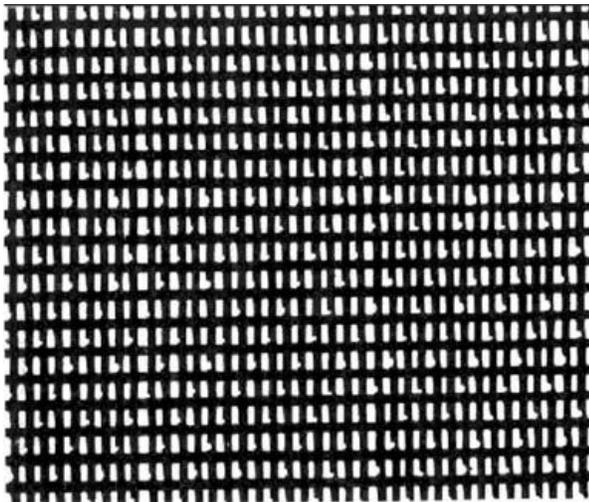
Desde el punto de vista ingenieril el geotextil debe ser caracterizado como una tela permeable, tejida o no tejida, que se utiliza en contacto con el suelo (sea tierra o piedras) en soluciones geotécnicas. La Figura 22 muestra los diferentes tejidos para fabricar el geotextil.



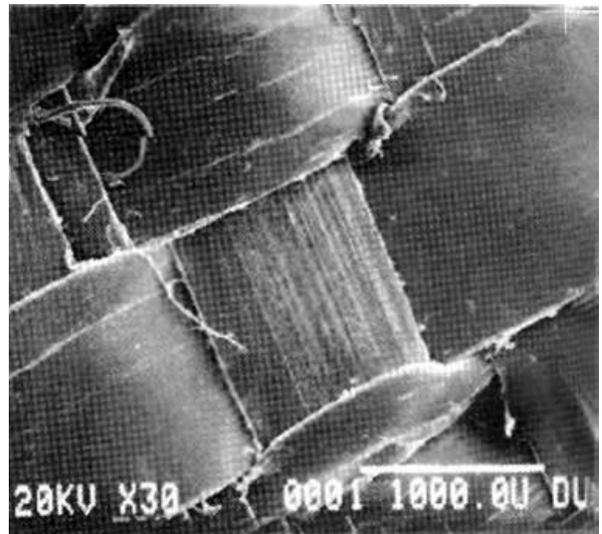
a) Monofilamento tejido calandrado



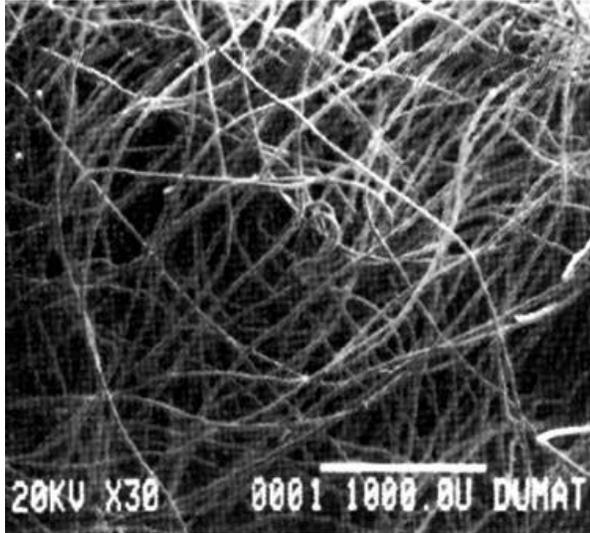
c) Multifilamento tejido



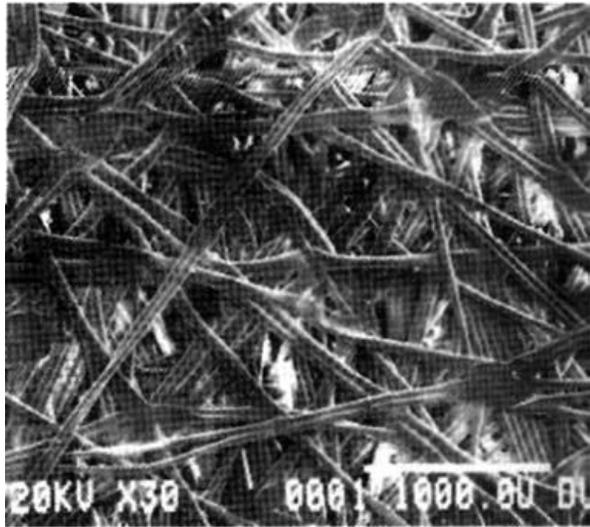
b) Monofilamento tejido



d) Tejido plano



e) No tejido punzonado con agujas



f) No tejido unido por calor

PAINT

Figura 22 Tipos de tejidos en el geotextil según Koerner

Diseño con Geotextil

El geotextil tiene definidos sus usos en diferentes formas. Para una comprensión rápida de ello se presenta la Cuadro 13 sobre el uso que se da a este producto en Estados Unidos.

Aplicaciones	1987	1990	1992	1995	2000
Separación / Estabilización	65	85	87	115	130
Refuerzo	12	16	18	25	35
Filtración / Drenaje	31	35	37	55	62
Protección de geomembranas	14	30	58	85	90
Control de erosión	12	15	16	20	35
Cortina para sedimentos	12	15	17	23	30
Cubiertas asfálticas	75	88	88	77	60
Mercado total*	221	284	321	400	442

*En millones de metros cuadrados

PAINT

Cuadro 13 Uso del geotextil en Estados Unidos según su área de aplicación del Manual Pavco

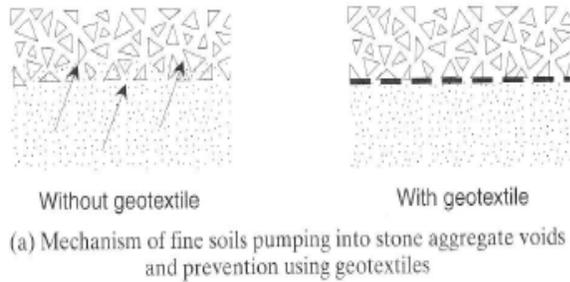
Todos los usos del geotextil pueden aplicarse en el diseño de carreteras. Pero para efectos del presente estudio solo atañen la separación, la estabilización y el refuerzo.

La Figura 13 muestra la típica sección transversal de un paquete estructural de una carretera. Es sabido de los requisitos físico-mecánicos que cada una de estas capas debe cumplir para ejercer su trabajo. La granulometría de constitución de bases y subbases tiene relación intrínseca con la capacidad de soporte o aporte estructural de cada una de ellas.

Cuando se tienen caminos en los cuales la subrasante tiene un alto contenido de finos, normalmente se presenta la penetración de finos en la subbase disminuyendo de este modo su capacidad de soporte que se consideró en su diseño. Existen dos mecanismos que se muestran en las Figuras 23 y 24 con los cuales se genera la contaminación de la subbase.

- a) Existe migración del material fino hacia arriba producto de las presiones generadas por el tránsito con o sin la presencia de agua.
- b) Existe penetración del agregado de subbase dentro del material fino producto

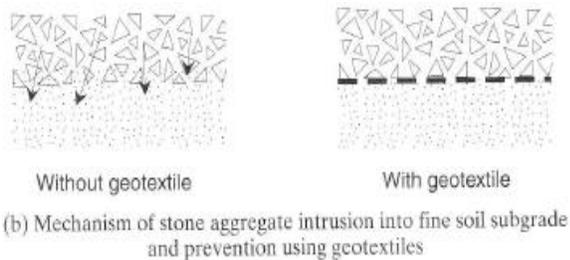
de las presiones de tránsito y la debilidad del material de subrasante.



PAINT

Figura 23. Migración de finos hacia arriba en la subbase con material fino de subrasante según Koerner.

Dado lo anterior, y debido a sus características de duración, capacidad de filtración y resistencia a esfuerzos de tensión, el geotextil se presenta como una alternativa adecuada para permitir el drenaje y evitar la contaminación de la subbase, manteniendo limpio el material y de este modo las características físico-mecánicas con que fue concebido en el diseño. Esto le permite al ingeniero diseñador de carreteras a confiar en que su diseño cumplirá el periodo para el cual fue concebido.



PAINT

Figura 24. Penetración del agregado de subbase sobre los finos de la subrasante según Koerner

Existen tres métodos de diseño para el uso de los geotextiles, según Koerner (2005):

1) Por costo y disponibilidad

Este método es empírico y simplista dado que teniéndose el presupuesto para la compra de geotextil se estiman los metros cuadrados por colocar. Por supuesto que es una metodología que ha dejado de utilizarse.

2) Por especificaciones

Este método es aplicado mediante normas existentes para cada aplicación en particular. Por ejemplo la AASHTO M 288-06 y el CR-2010 en su Sección 714 brindan especificaciones para la utilización del geotextil. Estas especificaciones se muestran en los Anexos 1 y 2, respectivamente.

El ingeniero diseñador debe considerar con esta metodología que las especificaciones solicitan los requerimientos mínimos, mientras que los fabricantes en sus tablas de caracterización del material muestran el valor promedio por rollo (conocido como MARV por sus siglas en inglés *Minimum Average Roll Value*).

3) Por función

Este método consiste en considerar la función principal para la cual se va a utilizar el geotextil (Separación, Estabilización, Refuerzo, etc) y con ello realizar los cálculos numéricos para el cumplimiento. Con esta metodología se atienden tanto requerimientos cuantitativos como cualitativos. Por lo tanto, normalmente con esta metodología se deben cumplir varias funciones en forma mancomunada.

En términos generales el procedimiento de diseño consta de los siguientes pasos:

- a) Determinar la función principal del geotextil considerando las características de los materiales que van a estar en contacto con él.
- b) Considerar el factor de seguridad deseado, dependiendo de la importancia de la obra.
- c) Calcular numéricamente el valor de la propiedad requerida del geotextil basándose en su función primaria.
- d) Obtener el valor por ensayo de la propiedad permisible.
- e) Calcular el factor de seguridad como cociente del valor de propiedad permisible.
- f) Comparar el factor de seguridad obtenido con el deseado.
- g) Reiniciar de nuevo con un geotextil de mayor capacidad, si el resultado no es el esperado.

- h) Revisar las demás funciones que pueden volverse críticas y asegurar el mejor geotextil cuando se tenga el cumplimiento de la función principal.

En términos generales los geotextiles funcionan cuando se tienen subrasantes débiles y moderadas que normalmente tienen altos contenidos de material fino y con CBR muy bajos. De este modo y dependiendo del valor de CBR de la subrasante se puede esclarecer la función principal para un geotextil. En el Cuadro 14 (Koerner, 2005), se establecen los criterios para el uso del geotextil como elemento de separación, estabilización o refuerzo en subrasantes débiles ($CBR \leq 8\%$) o moderadas ($CBR \geq 8\%$). En la Figura 25 se muestra una interpretación gráfica para la función de un geotextil.

Geotextile Function(s)	CBR - Value	
	Unsoaked	Soaked
Separation	≥ 8	≥ 3
Stabilization*	8-3	3-1
Reinforcement (and separation)	≤ 3	≤ 1

*A frequently used but poorly defined transition term that always includes separation, some unknown amount of reinforcement, and usually filtration as well.

PAINT

Cuadro 14. Función del geotextil según la calidad de subrasante dado por Koerner.

Los resultados de laboratorio que constituyen el valor promedio por rollo (MARV) y que brindan los fabricantes en sus tablas técnicas, no son representativos del comportamiento del geotextil en el sitio. Por tal motivo dicho valor debe ser afectado por diversos factores de reducción y obtener así un Valor Admisible. Estos factores de reducción estarán en relación directa con la función principal (separación, estabilización, refuerzo, etc.) que tiene el geotextil

$$\text{Valor admisible} = \frac{\text{Valor de Fabricante}}{\text{Factores de reducción}} \quad (\text{Ec. 4})$$



SKETCHUP y PAINT

Figura 25. Función del geotextil según el CBR de subrasante

Los factores de reducción considerados para el geotextil son los siguientes:

- a) Daños por instalación

Este factor estará en función de la naturaleza de la subrasante, del material de recubrimiento y de la posibilidad de que exista tránsito de maquinaria pesada durante la instalación. El Manual CR-2010 en su apartado 207.04 establece como mínimo un recubrimiento de 30 cm sobre el geotextil. Este factor no es una constante y deberá ser establecido por el ingeniero. Para proyectos de importancia será necesario realizar pruebas de comportamiento para establecer dicho factor.

- b) Daños por fluencia o creep

Este factor tiene que ver con la fluencia que pueda tener el geotextil bajo cargas o esfuerzos constantes en el tiempo. Los geotextiles en las carreteras están sometidos a este efecto en mayor o menor medida. Es un valor que deberá establecer el ingeniero dado que ha sido difícil establecer normativa en tal sentido.

c) Daños por degradación química o biológica

Aunque se ha demostrado que los geotextiles no sufren mayor alteración de sus propiedades por efectos biológicos (Koerner, 2005), la degradación química sí se presenta cuando en el sitio se tienen aguas con PH muy bajos o muy altos. Esta situación debe llevar al ingeniero a tener criterio para establecer el factor necesario.

d) Daños por costura

Este factor debe considerarse en la resistencia a la tensión del geotextil. La norma AASHTO M 288-06 establece para tal cumplimiento un 90% de la resistencia a tensión Grab del geotextil utilizado. En todo caso si se utiliza el traslape en la colocación no se necesita tal factor. En cuanto al traslape, el Manual CR-2010 en su apartado 207.04 estipula traslapos mínimos longitudinalmente así como para paños adyacentes de 50 cm.

En el Cuadro 15 se presentan los factores de reducción recomendados (Pavco, 2006).

Factores de reducción para geotextiles en aplicaciones de separación y refuerzo

Area	Daños por instalación FR_{ID}	Fluencia FR_{FL}	Degradación Química/Biológica FR_{DCB}
Separación	1.1 a 2.5	1.5 a 2.5	1.0 a 1.5
Caminos no pavimentados	1.1 a 2.0	1.5 a 2.5	1.0 a 1.5
Muros de contención	1.1 a 2.0	2.0 a 4.0	1.0 a 1.5
Terraplenes sobre suelos blandos	1.1 a 2.0	2.0 a 3.5	1.0 a 1.5
Fundaciones	1.1 a 2.0	2.0 a 4.0	1.0 a 1.5
Estabilización de taludes	1.1 a 1.5	2.0 a 3.0	1.0 a 1.5
Ferrocarriles	1.5 a 3.0	1.0 a 1.5	1.5 a 2.0

PAINT

Cuadro 15. Factores de reducción por aplicación según Manual Pavco.

Las tabulaciones de datos por los fabricantes clasifican los geotextiles como tejidos y no tejidos. Este concepto es de suma importancia, dado que los geotextiles no tejidos sufren más elongación que los tejidos ante los mismos esfuerzos. Cuando se estipula en las especificaciones de la AASHTO y el Manual CR-2010 elongaciones >50% se está considerando geotextiles no tejidos y <50% los tejidos. En el diseño de carreteras deben usarse los geotextiles tejidos cuando se utilicen para refuerzo debido a la relativa poca elongación que sufren ante los esfuerzos. Si el caso es estabilización o separación pueden utilizarse los no tejidos preferiblemente por su posible menor precio. En el caso del Manual CR-2010 muestra los valores mínimos solicitados en las tablas separadas por raya inclinada "slash" (Véase Anexo 2).

Diseño por Refuerzo

Cuando se está utilizando un diseño por refuerzo se debe recurrir al tipo de diseño por función, dado que ni la AASHTO ni el Manual CR-2010 brinda directrices en tal sentido.

El principio de diseño con geotextil para refuerzo se fundamenta en la capacidad que tiene el material a la tensión y que no tienen los materiales por reforzar, como son los suelos de subrasantes. La Figura 26 muestra la forma en que las subrasantes sufren ante las cargas aplicadas por el peso de las llantas.

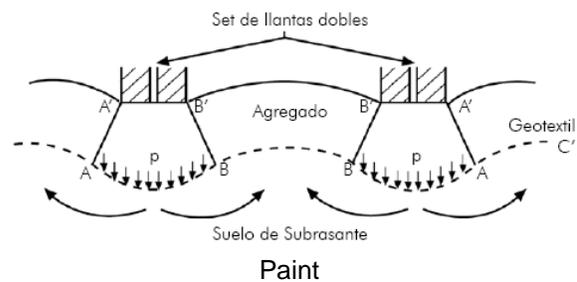


Figura 26. Comportamiento de los esfuerzos en la subrasante ante las cargas aplicadas según Koerner.

Los métodos racionales de diseño de caminos se iniciaron con la teoría de Boussinesq, en 1885. Esta fue propuesta como teoría de análisis multicapa por Burmister, en 1943 (Yang, 2004). Dicha teoría indica que los esfuerzos,

deformaciones unitarias y deflexiones que sufren las diferentes capas de un pavimento pueden ser encontrados matemáticamente o utilizando nomogramas. Cuando se trata de un análisis de hasta tres capas, tales cálculos pueden realizarse en forma manual; sin embargo son extremadamente tediosos y pueden llevar al ingeniero diseñador a cometer errores de cálculo. Hoy existen en el mercado muchos software que realizan esta tarea. En tal sentido se debe valorar la eficacia de cada uno de ellos. Entre estos se pueden citar algunos como: CEDEM, KENPAVE o el EVERSTRESS.

El valor de esfuerzo normal dado por el programa y aplicado sobre la subrasante es el parámetro que se tiene para conocer el esfuerzo a que será sometido el geotextil. Con este valor y recurriendo al valor de resistencia por el método de la TIRA ANCHA dado por el fabricante (Norma ASTM D-4595), se pueden realizar los cálculos considerando los factores de reducción mencionados y así encontrar el geotextil adecuado para refuerzo.

En términos generales, para poder encontrar los esfuerzos a que será sometido el geotextil se debe tener el diseño de pavimento realizado. Los software lo que hacen es tomar las variables que se obtienen en el diseño convencional para calcular los esfuerzos en los diferentes estratos o niveles.

Con la capacidad del geotextil por el método de la tira ancha, dada por el fabricante, se realiza el cálculo de la Resistencia Admisible utilizando la ecuación 5 (Pavco, 2006) y los factores de reducción indicados en el Cuadro 15.

$$T_{adm} = T_{ult} / (FR_{ID} \times FR_{DQB})$$

Donde:

T_{adm}	=	Resistencia admisible para emplear en el diseño
T_{ult}	=	Resistencia última obtenida en laboratorio
FR_{ID}	=	Factor de reducción por daños de instalación
FR_{DQB}	=	Factor de reducción por degradación química y biológica

(Ec. 5)

Una vez que se obtiene la Resistencia Admisible y la Resistencia Requerida dadas por el software, se calcula el Factor de Seguridad Global (FS_g) como la relación de las dos resistencias. Este

factor de seguridad se recomienda que sea mayor a 1.3. (Pavco, 2006).

$$FS_g = \frac{\text{Resistencia Admisible}}{\text{Resistencia Requerida}}$$

$$FS_g > 1.3$$

(Ec. 6)

Los cálculos deben ser iterativos hasta encontrar el geotextil adecuado si tal factor de seguridad global es muy alto o viceversa.

Aparte de su capacidad como refuerzo el geotextil debe cumplir con su función de estabilización. Se debe recordar que para efectos de refuerzo con geotextil se está en el umbral de CBR para subrasante < 3% (Véase Figura 25). Para cumplir con los requisitos de estabilización, para el caso de Costa Rica, se debe seguir lo estipulado en el Manual CR-2010 que se muestra en el Anexo 2. Como se puede observar en tales especificaciones, la diferencia entre separación y estabilización es de solamente dos variables como son la permisividad y la abertura aparente. Por lo tanto una carretera diseñada por refuerzo y que cumpla con los requerimientos mínimos de estabilización, también cumplirá su rol de separación.

Es muy posible que el ingeniero encuentre que el geotextil especificado para estabilización tiene capacidad muy alta por el método de la tira ancha y, por ende, quede sobrediseñado para los esfuerzos que recibe. Ante esta situación lo recomendable es optimizar la capacidad del geotextil encontrado para cumplir como estabilizador, disminuir los espesores de la subbase y no permitir que el factor de seguridad global baje de 1.3. Puede ocurrir que se llegue a eliminar por completo la capa subbase y se trabaje únicamente con la base. Para esto no se debe olvidar que sobre el geotextil se solicita colocar capas mayores a 30 cm según el apartado 207.04 del Manual CR-2010.

Diseño por Estabilización / Separación

Cuando se diseña una carretera por estabilización con geotextil, automáticamente se está diseñando por separación, dado que las variables de permisividad y abertura aparente son las únicas que hacen la diferencia (Véase Anexo 2). El umbral de CBR para la subrasante se visualiza en la Figura 25. Para estabilización el CBR debe estar entre 8% – 3% según Koerner (2005) y mostrado en el Cuadro 14. Este concepto de estabilización es entendido por el autor Koerner como una zona de transición en la que se tiene un poco de refuerzo, separación y filtración pero sin mucho conocimiento del valor aportado.

Cuando se diseña por separación específicamente se tienen subrasantes con resistencias moderadas altas o sea $CBR > 8\%$. En este rango se entiende que la deformación del suelo no es tan importante como para provocar grandes tensiones en el geotextil.

Dado que en Costa Rica en el Manual CR-2010 se especifican los requisitos mínimos para diseño por estabilización o separación (Véase Anexo 2), lo recomendable es buscar el geotextil tejido o no tejido que cumpla tales requerimientos y con menor precio. Sin embargo, utilizando el método de diseño por función, debe revisarse la capacidad de cumplimiento para cada variable especificada.

Seguidamente se presenta el formato de diseño por función para las siguientes variables incluida en la consideración de un diseño por estabilización/separación.

- Resistencia a la tensión Grab (ASTM D-4632)
- Resistencia a juntas cocidas (ASTM D-4632)
- Resistencia al rasgado trapezoidal (ASTM D-4533)
- Resistencia al punzonamiento (ASTM D-4833)
- Resistencia al estallido método Mullen-Burst (ASTM-D-3786)
- Criterio de Permisividad (ASTM D-4491)
- Criterio de Retención o Tamaño de Abertura Aparente (ASTM D-4751)
- Resistencia a rayos ultravioleta (ASTM D-4355).

En términos generales el diseño por separación se determina igualmente al diseño por refuerzo, en el sentido de que se debe tener un factor de seguridad global (FS_g). Obviamente este factor debe ser mayor que 1.

La resistencia admisible (T_{adm}) se obtiene de acuerdo con la ecuación 6 y la resistencia requerida es el valor obtenido según la condición real a que está sometido el geotextil.

$$FS_g = \frac{\text{Resistencia Admisible}}{\text{Resistencia Requerida}} \Rightarrow FS_g > 1$$

(Ec. 7)

Al producto de los factores de corrección de la resistencia admisible (T_{adm}) según la ecuación 6 se le denomina factor de seguridad parcial FS_p (Pavco, 2006), y presentado en la ecuación 8 en donde FR_p equivale a FS_p .

$$T_{odm} = \frac{T_{ult}}{FS_p}$$

$$FS_p = FS_{ID} \times FS_{DQG}$$

Donde:

T_{adm}	=	Resistencia admisible para emplear en el diseño
T_{ult}	=	Resistencia última obtenida en laboratorio
FR_p	=	Factor de reducción parcial
FR_{ID}	=	Factor de reducción por daños de instalación
FR_{DQG}	=	Factor de reducción por degradación química y biológica

(Ec. 8)

La resistencia última T_{ult} es el valor obtenido en laboratorio y tabulado por el fabricante en sus tablas.

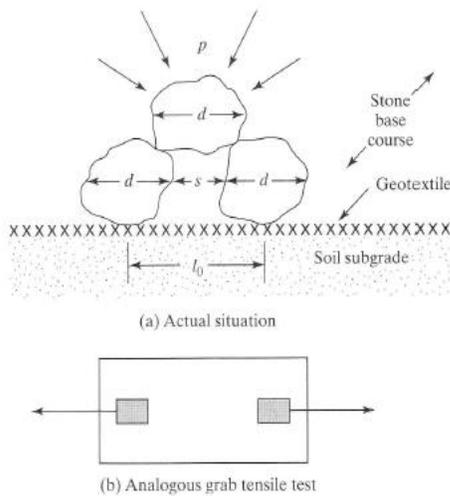
Resistencia a la tensión Grab (ASTM D-4632)

Cuando se aplica una carga vehicular sobre la estructura de pavimento se generan esfuerzos en las diferentes capas. El geotextil, ubicado entre la subbase y la subrasante, está

sometido a estos esfuerzos tal y como muestra la Figura 27. (Koerner, 2005). Este esfuerzo puede ser determinado con el uso de los programas de computación ya descritos; pero, conservadoramente, se utiliza la presión de llanta de trabajo sobre la capa de rodamiento para valorar la capacidad del geotextil, dado que obviamente es mayor a cualquier otra presión generada.

De acuerdo con Pavco (2005), la fórmula para calcular la tensión requerida a la tensión Grab se muestra en la ecuación 9.

El cuadro 16 muestra los valores $f(\epsilon)$ en relación con el porcentaje de la deformación unitaria que se desea que sufra el geotextil.



PAINT

Figura 27. Comportamiento de los esfuerzos en el geotextil ante las cargas aplicadas según Koerner

$$T_{req} = p' \cdot 10^{-3} \cdot (d_v)^2 \cdot [f(\epsilon)]$$

Donde:

- T_{req} = Resistencia Grab requerida (N)
- p' = Presión aplicada (KPa)
- d_v = Diámetro máximo de los vacíos: $d_v \cong 0.33 d_s$ (mm)
- d_s = Diámetro máximo de las partículas de agregado (mm)
- $f(\epsilon)$ = Función de deformación (elongación) del geotextil

(Ec. 9)

ϵ (%)	$f(\epsilon)$	ϵ (%)	$f(\epsilon)$
0		25	0.55
2	1.47	30	0.53
4	1.23	35	0.52
6	1.08	40	0.51
8	0.97	45 - 70	0.5
10	0.9	75	0.51
12	0.8	90	0.52
14	0.73	100	0.53
16	0.69	110	0.54
18	0.64	120	0.55
20	0.58	130	0.56

PAINT

Cuadro 16. Valores $f(\epsilon)$ en función de la % ϵ esperado del geotextil según Manual Pavco.

Con la ecuación 10 se puede estimar el porcentaje de elongación del geotextil

$$\% \epsilon = (l_f - l_o) / l_o \quad \text{(Ec. 10)}$$

Donde:

l_f = Longitud deformada del geotextil

l_o = Longitud no deformada del geotextil, según Figura 27.

Es importante recordar que los geotextiles tejidos tienen elongaciones menores al 50% (Véanse Anexos 1 y 2) y los no tejidos mayores a 50%.

Con las consideraciones dadas se verifica el factor de seguridad global, según la ecuación 7, convertida en la ecuación 11 o, en su defecto, se aplica un factor de seguridad global mayor que uno y se encuentra luego la resistencia última T_{uit} .

$$FS_g = \frac{T_{uit}}{FS_p \times p' \times 10^{-3} \times (0.33 d_v)^2 \times [f(\epsilon)]} \Rightarrow FS_g > 1$$

(Ec. 11)

Resistencia a Juntas Cocidas (ASTM D-4632)

La resistencia a las costuras, cuando se utiliza en lugar de traslape, y de acuerdo con el apartado 8.1.2 de la norma AASHTO M 288-06 (Véase Anexo 1) se debe cumplir una resistencia a la tracción con un valor mayor o igual al 90% de la resistencia GRAB.

Resistencia al Rasgado Trapezoidal (ASTM D-4533)

Aunque Koerner (2005) determina una metodología considerando la energía del impacto generada por una caída de piedras sobre el geotextil, la resistencia al rasgado trapezoidal es más un índice que una consideración de diseño, pues la prueba no determina información suficiente para una consideración de diseño (Pavco, 2006). Por lo tanto, cuando se tienen especificaciones como las de la AASHTO M 288-06 (Véase Anexo 1) o del Manual CR-2010 (Véase Anexo 2) el geotextil seleccionado debe cumplir con tales valores mínimos.

Resistencia al Punzonamiento (ASTM D-4833)

Materiales punzocortantes como las piedras angulares, trozos de ramas, trozos de raíces, desechos constructivos, etc. pueden generar rompimiento en el geotextil durante su colocación o al recibir las cargas en su periodo de diseño.

En la Figura 28 se presenta la forma en que el geotextil puede sufrir la ruptura por objetos punzocortantes. De acuerdo con Koerner (2005), la resistencia requerida para punzonamiento se obtiene con la ecuación 12.

$$T_{req} = p' d_a^2 S_1 S_2 S_3 \quad \text{(Ec. 12)}$$

Donde:

p' = presión ejercida sobre el geotextil que se toma conservadoramente como la presión de llanta sobre capas delgadas en Pascales, Pa.

d_a = diámetro promedio del objeto punzonante en m.

S_1 = factor de penetración del objeto cortante.

S_2 = factor de escala para ajustar el valor de ensayo de la prueba ASTM D-4833 que usa un pistón de punzonamiento de 8 mm de diámetro al objeto punzonante.

S_3 = factor de forma para ajustar la forma plana del pistón de prueba de la ASTM D-4833 a la forma del objeto punzonante.

El Cuadro 17 se utiliza para los factores S_1 , S_2 y S_3 . Las ecuaciones 7 y 8 se aplican para efectos de los cálculos y para encontrar la resistencia requerida al punzonamiento de acuerdo con la ecuación 12.

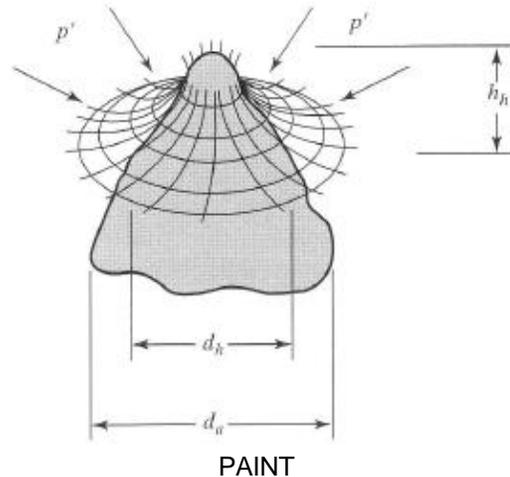


Figura 1.3.8 Comportamiento del punzonamiento en el geotextil ante las cargas aplicadas

De esta manera se tiene que:

$$T_{ult} = FS_g * FS_p * T_{req} \quad \text{(Ec. 13)}$$

Donde:

T_{ult} = Valor de laboratorio dado en las tablas de los fabricantes.

RECOMMENDED VALUES FOR INDEPENDENT FACTORS USED IN PUNCTURE ANALYSIS (DIMENSIONLESS)

Puncturing Object	S ₁	S ₂	S ₃
Angular and relatively large	0.9	0.8	0.9
Angular and relatively small	0.6	0.6	0.7
Subrounded and relatively large	0.7	0.6	0.6
Subrounded and relatively small	0.4	0.4	0.5
Rounded and relatively large	0.5	0.4	0.4
Rounded and relatively small	0.2	0.2	0.3

S₁ = protrusion factor

S₂ = scale factor

S₃ = shape factor

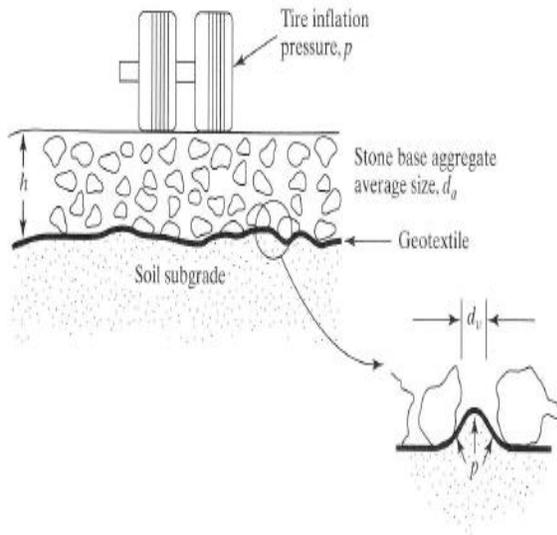
PAINT

Cuadro 17. Factores S para la condición de punzonamiento sobre el geotextil dados por Koerner

Se debe recordar que un Pascal es N/m² y que un Newton es kgm/s².

Resistencia al Estallido (Mullen-Burst) (ASTM D-3786)

Cuando el material de subbase se coloca sobre la subrasante, generalmente quedan vacíos entre dos partículas gruesas adyacentes tal y como se muestra en la Figura 29. (Koerner, 2005).



PAINT

Figura 29 Forma de estallido sobre el geotextil según Koerner

La resistencia requerida para tal situación se muestra en la ecuación 14 (Koerner, 2005 y Pavco, 2006).

De acuerdo con las ecuaciones 7, 8 y utilizando la ecuación 14, se obtiene la ecuación 15, en la que el factor de seguridad parcial FS_p se puede estimar con ayuda del Cuadro 15. Así finalmente, se obtiene la ecuación 116 para encontrar el p_{test} equivalente al t_{ult} que, según Koerner (2005) es el valor de tabla para los fabricantes.

$$T_{req} = \frac{p' d_v [f(e)]}{2}$$

$$T_{ult} = \frac{P_{test} d_{test} [f(e)]}{2}$$

Donde:

- T_{req} = Resistencia requerida del geotextil (KPa)
- p' = Esfuerzo en la superficie del geotextil: p < p (KPa)
- p = Presión de inflado (KPa)
- d_v = Diámetro máximo de los vacíos ≅ 0.33 d_s (mm)
- d_s = Diámetro máximo de las partículas de agregados (mm)
- f(e) = Función de deformación (elongación) del geotextil
- T_{ult} = Resistencia última del geotextil (KPa)
- P_{test} = Presión del ensayo Mullen Burst (KPa)
- d_{test} = Diámetro del diafragma – ensayo Burst (30.48 mm)

(Ec. 14)

$$FS_g = \frac{P_{test} \times d_{test}}{FS_p \times p' \times d_v}$$

(Ec. 15)

$$T_{ult} = FS_g \times FS_p \times p' \times d_v / d_{test}$$

(Ec. 16)

Criterio de Permitividad (ASTM D-4491)

La permitividad del geotextil es la relación de la permeabilidad normal al geotextil (k_g) en cm/s y el espesor del mismo (t) en cm (Koerner, 2005). La ecuación 17 muestra tal relación.

$$\Psi = k_g/t \quad (\text{Ec. 17})$$

En otras palabras, este valor es realmente el coeficiente de permeabilidad del geotextil en relación con su espesor. Se estipula de esta manera dado que el geotextil viene en diferentes espesores y pueden tener el mismo k_g . La unidad resultante de esta medida es $1/S$ o S^{-1} . El k_g debe ser, obviamente, mayor que el k_s del suelo.

Si el geotextil es utilizado como separador, el valor mínimo establecido por el Manual CR-2010 (Véase Anexo 2) es menor que para el caso de que sea utilizado como estabilizador. Se estipula $0.02 S^{-1}$ para la separación y $0.05 S^{-1}$ para la estabilización. Con esto se debe tener presente que las condiciones de estabilización son más críticas en la capacidad de la subrasante, lo que debe permitir mayor capacidad de filtración.

Los suelos finos tienen diferentes coeficientes de permeabilidad. Algunos rangos conocidos se presentan en el Cuadro 18. (Crespo, 2006).

VALORES PROMEDIO DEL COEFICIENTE K EN CM/SEG.

Gravas limpias	De 10^{-2} a 1.0
Arenas limpias, mezcla de arena y gravas limpias	De 1.0 a 1×10^{-3}
Arenas muy finas, limos, mezcla de arena, limo y arcilla, depósitos de arcilla estratificada	De 1.0×10^{-3} a 1.0×10^{-7}
Suelos impermeables como las arcillas homogéneas bajo la zona de meteorización	De 1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-9}
Suelos impermeables que han sufrido alteración por la vegetación y la meteorización	De 1.0×10^{-2} a 1.0×10^{-7}

PAINT

Cuadro 18. Coeficientes de permeabilidad K para diferentes suelos según Crespo

En el Cuadro 18 se puede observar la baja capacidad de permeabilidad que tienen los suelos finos o arcillas, que normalmente son las que van a requerir el uso de geotextil. De esta manera la permeabilidad que ofrecen los geotextiles es usual que vaya a estar por encima de lo solicitado por las especificaciones (Véase Anexo 5).

El coeficiente de permeabilidad del geotextil se puede estimar utilizando el dato de permitividad y el espesor del geotextil, dado por el fabricante en las tablas de uso normal (Véase Anexo 5). Para ello se utiliza la ecuación 17. Normalmente es un dato que viene estipulado en las tablas del fabricante.

Criterio de Retención o Tamaño de Abertura Aparente (ASTM D-4751).

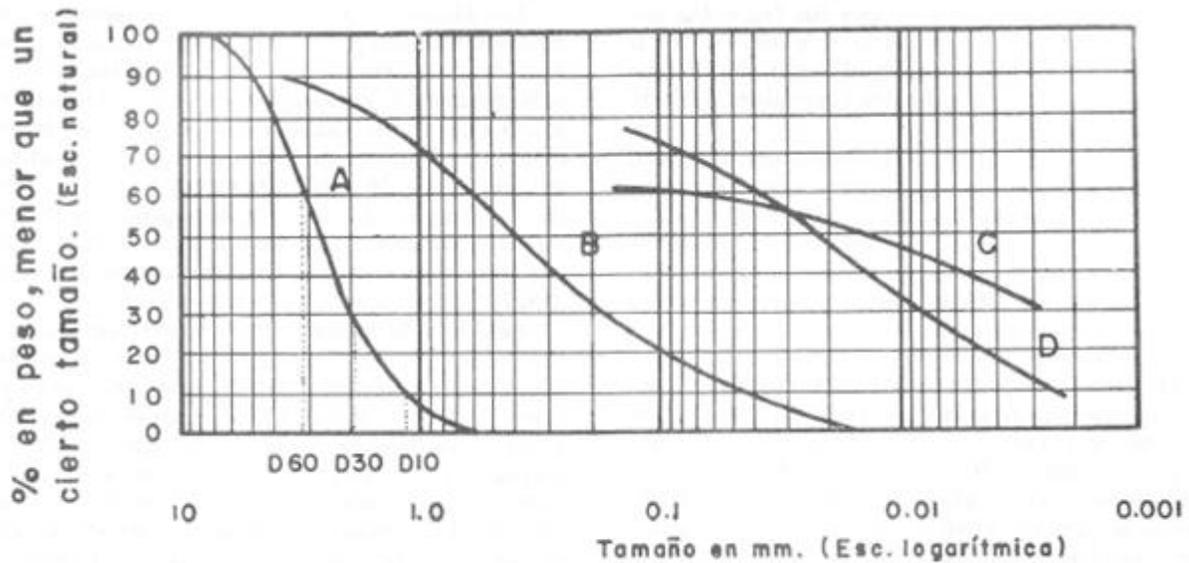
El criterio de retención o de tamaño de apertura aparente (TAA), permite revisar las aberturas del geotextil de tal manera que no se permita la migración de finos desde la subrasante hacia la subbase. Este dato viene estipulado en mm. Igualmente que en el caso de la permitividad, el criterio de retención hace la diferencia en las especificaciones del Manual CR-2010 (Véase Anexo 2). Para el caso de separación se tipifica 0.6 mm y 0.43 mm para estabilización. Este dato debe ser revisado con mucho atino en el geotextil elegido ya que puede eventualmente no cumplirse, a pesar de que su cumplimiento para los esfuerzos anteriormente expuestos se estén dando. Debe recordarse siempre que la función estabilización y/o separación es fundamental en la conservación de la subbase para efectos de que brinde su trabajo, tal y como lo considera el diseñador, a lo largo del periodo de diseño.

El TAA del geotextil se puede calcular utilizando la ecuación 18. (Pavco, 2006).

$$TAA = D_{85} \times B \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

D_{85} = Tamaño de partículas que pasan el 85% al ser tamizado, en mm.



Curvas granulométricas de algunos suelos. A) Arena muy uniforme de Ciudad Cuauhtémoc, México. B) Suelo bien graduado, Puebla, México. C) Arcilla del Valle de México (curva obtenida con hidrómetro). D) Arcilla del Valle de México (curva obtenida con hidrómetro).

PAINT

Figura 30. Curvas granulométricas típicas

B = Coeficiente que varía de 1 a 3 y depende del tipo de suelo por filtrar (subrasante), de las condiciones de flujo y del tipo de geotextil por utilizar. Así:

- Para arenas, arenas gravosas, arenas limosas y arenas arcillosas (con menos del 50% pasando el tamiz #200), B es función del coeficiente de uniformidad, C_u , donde $C_u = D_{60} / D_{10}$. Estos valores se obtienen de la curva granulométrica del material de subrasante. Una muestra de curvas granulométricas típicas se muestra en la Figura 30. (Rico, 1999) donde también se expone el D_{60} y el D_{10} y donde se puede proyectar el D_{85} .

Donde:

$$2 < C_u \leq 8 \implies B = 1$$

$$2 < C_u \leq 4 \implies B = 0.5C_u$$

$$4 < C_u \leq 8 \implies B = 8/C_u$$

- Para suelos arenosos mal graduados B está entre 1.5 y 2.

- Para suelos finos (menos del 50% pasa el tamiz #200) B es función del tipo de geotextil.

Para Tejidos: $B = 1 \implies TAA \leq D_{85}$

Para No Tejidos: $B = 1.8 \implies TAA \leq 1.8D_{85}$

- Para aplicaciones de separación la norma AASHTO recomienda $TAA < 0.60$ mm.

Dadas las características de la subrasante se pueden realizar las estimaciones del TAA para efectos de revisar lo solicitado por las especificaciones del Manual CR-2010

Resistencia a los Rayos Ultravioleta (ASTM D-4355)

Los geotextiles que se exponen por períodos prolongados a la acción de la luz y al agua pierden su resistencia a la tensión. El efecto de estas incidencias sobre el geotextil depende del tiempo de exposición, del ángulo de exposición sobre el horizonte, de las condiciones de la topografía y atmosféricas y de la geografía del sitio en donde se tiene expuesto.

Las especificaciones de la Norma AASHTO M 288-06 y del Manual CR-2010 especifican una

resistencia a la tensión Grab mayor al 50% después de 500 hrs de exposición. En tal sentido, el geotextil siempre debe permanecer aislado de la luz y del agua.

Las tablas técnicas suministradas por los fabricantes (Véase Anexo 5) muestran la resistencia de cada tipo de geotextil. Con esto se puede revisar el cumplimiento de las especificaciones. Normalmente los geotextiles cumplen a cabalidad con estas exigencias.

Metodología

El diseño de caminos en las municipalidades

Antes de que se promulgara la Ley 8114, *Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria*, y específicamente la reglamentación al artículo 5º, inciso b., las municipalidades destinaban los recursos según las influencias políticas, dado que tales recursos estaban bajo la supervisión y gestión del Ejecutivo Municipal de ese entonces.

La mencionada ley y su reglamentación, obliga al Estado a la transferencia presupuestaria anual para la atención de los caminos cantonales. De acuerdo con el reglamento es obligatoria la creación de una Unidad Técnica de Gestión Vial Municipal. Esta, como mínimo, debe tener un profesional en caminos, un asistente y un promotor social.

A la fecha y a nivel nacional, las Unidades Técnicas están funcionando, unas de mejor manera que otras. No obstante, es por medio de estas que las municipalidades adquieren los recursos para atender los caminos. Por otra parte (Véase Marco Teórico), el 79.26% de los kilómetros de la red vial nacional están en manos de las municipalidades y los presupuestos asignados no necesariamente cumplen su cometido por diversas situaciones.

El diseño de los caminos es una función que los ingenieros a cargo de las Unidades Técnicas Municipales deberían tener a su cargo para levantar la calidad de tan alto porcentaje de carreteras.

Con la finalidad de cuantificar la función técnica en materia de diseños de caminos por parte de los municipios, se realizó una pequeña encuesta utilizando un cuestionario (Véase Apéndice 3) y se aplicó a las municipalidades por ser estas las entidades públicas que más kilómetros de caminos atiende anualmente. Se realizó tal consulta escrita a cinco municipios

sobre la justificación por la cual se diseñan o no los caminos vecinales del cantón y otros asuntos más de importancia. Específicamente se consultó a los ingenieros(as) y directores(as) de las Unidades de Gestión Técnica de Gestión Vial Municipal.

Tránsito de Diseño para las carreteras

De acuerdo con el artículo primero de la Ley General de Caminos Públicos, las carreteras primarias, secundarias y terciarias conforman la Red Vial Nacional. Por su parte la Red Vial Cantonal está compuesta por las vecinales junto con las calles locales y caminos no clasificados.

El Decreto Ejecutivo Nº 13041-T del 20 de octubre de 1981 especifica los rangos de Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) que las carreteras deben tener para su clasificación como primaria, secundaria, terciaria o vecinal. El Cuadro 19 muestra estos rangos.

CUADRO 19: CLASIFICACIÓN DE CAMINOS PÚBLICOS SEGÚN SU TPDA		
Primaria	Mayor a 4000	
Secundaria	200	3999
Terciaria	50	199
Vecinal	Menor a 50	

WORD

Cuadro 19. TPDA para cada categoría de carretera pública

El Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT), específicamente la Unidad de Diseño Vial, es el organismo nacional encargado de los diseños de carreteras públicas de Costa Rica.

Por otro lado la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT es la fuente a la que se debe

recurrir para encontrar datos que permitan realizar las estimaciones del volumen de tránsito necesario para el diseño de vías públicas.

Se solicitó información sobre este aspecto a la Dirección de Planificación Sectorial. Se obtuvo la información con la cual se realizaron las estimaciones de los Ejes Equivalentes de Diseño (EEQ) para los respectivos diseños que se realizaron.

En el Anexo 4 se presentan los TPDA obtenidos para las carreteras nacionales. Igualmente se dan los valores de Factor Camión utilizados para el cálculo de los Ejes Equivalentes de Diseño (EEQ) que se basaron en las cargas máximas del Decreto N° 32191-MOPT-MI-MEIC y utilizando para ello los valores LEF de las Tablas AASHTO, explicado en la Sección 1.2 de este documento.

Características Geométricas

De acuerdo con el Decreto N° 32191-MOPT-MI-MEIC el ancho máximo para un vehículo debe ser de 2.6 m. Esta medida debe ser la mínima para efectos del ancho efectivo de un carril. Aunque el MOPT tiene tabuladas las medidas, la realidad de las carreteras del país muestra configuraciones muy distintas, inclusive para los mismos tipos de carreteras. Sin tener un formato muy rígido en este sentido, se optó por realizar un recorrido por distintas rutas nacionales y cantonales y se tomaron medidas del ancho efectivo del carril en el caso de las carreteras pavimentadas y el ancho total en aquellas donde no existía pavimento. Además se tomaron fotografías que muestran el formato típico de caminos del país.

Con base en tales datos se propuso una medida que representara una carpeta de rodamiento constante para efectos de realizar los diseños y las comparaciones de costos respectivas.

Propiedades de la subrasante

La subrasante utilizada, para efectos de los diseños del presente estudio, se propuso con dos CBR que representara una condición de soporte pobre y una condición moderada. En la Figura 25 se visualiza en qué condiciones de CBR se debe realizar la incorporación del geotextil en un diseño de caminos.

Con la Tabla de Relación Yang (2004) del Anexo 1 y utilizando el valor de CBR de la subrasante es posible determinar el tipo de suelo AASHTO que se posee. De acuerdo con ello se puede decir que el uso de geotextil como separación, estabilización y refuerzo sirve cuando se tienen suelos finos clasificados como A-4, A-5, A-6, A-7.5 y A-7.6 de la norma AASHTO.

Por su parte la Figura 19 indica que los datos relativos al Módulo Resiliente de una subrasante, para efectos del diseño de capas superiores, es un valor representativo de las estaciones y, debe ser, por lo tanto, determinado con un alto grado de investigación ingenieril cuando se trata del diseño de una carretera.

Propiedades de la mezcla asfáltica, base y subbase consideradas

El apartado 402 del Manual CR-2010 especifica que las mezclas asfálticas en caliente para las carreteras del país pueden ser diseñadas por el método Hveem o el Marshall. El Cuadro 10 muestra los requisitos mínimos que debe reunir la mezcla según el Manual. Por otro lado, la Figura 18 muestra la correlación que existe entre el valor de la estabilidad de la Prueba Marshall y el Módulo Resiliente (MR) de la mezcla asfáltica, asimismo con el coeficiente estructural de capa de la mezcla asfáltica (a_1).

En el caso particular del presente trabajo, se consideró que un valor MR de 400 000 psi cumple a cabalidad con los mínimos establecidos para una mezcla clase A cuyo mínimo valor de

estabilidad Marshall es de 8 000 N (1800 lbs) de acuerdo con el Cuadro 10.

Para el cálculo de coeficiente estructural de capa de la mezcla asfáltica (a_1) se utilizó también el nomograma de la Figura 18.

Respecto a las características que deben poseer la base y la subbase, en el apartado 301.03 del Manual CR-2010 se establecen los valores mínimos de CBR, Límite Líquido e Índice de Plasticidad que estos materiales deben cumplir. De esta manera se pudieron establecer los valores mínimos de CBR para efectos de este proyecto y que permitieron entrar a los nomogramas de las Figuras 16 y 17 para encontrar los MR de la base y subbase respectivamente, así como los coeficientes estructurales de capa a_2 y a_3 .

La calidad de estas partes del paquete estructural de la vía se mantuvo constante. Por lo tanto, para todos los perfiles de vías que se utilicen en los diseños, estas propiedades de los materiales permitirán un análisis coherente.

Diseño Convencional AASHTO 1993

Se efectuó el Diseño Convencional de las cuatro carreteras con pavimento flexible para los valores CBR = 2% y CBR = 4% estipulados para este proyecto. Estos valores se consideran promedios estacionales anuales.

Los Ejes Equivalentes de Diseño utilizados fueron calculados con base en la información adquirida en la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT y utilizando las tablas LEF (Load Equivalency Factors) de la AASHTO.

El diseño de un camino específico exige datos de diseños lo más certeros posible. Para efectos de este proyecto, que es de tipo comparativo, más que una situación de diseño específico, se consideraron suficiente los datos obtenidos en el MOPT. De las variables que más exigencia requieren, es el establecimiento de los Ejes Equivalentes de Diseño (EEQ) que utiliza la fórmula AASHTO y el nomograma de la Figura 11. Para comenzar, según el Decreto 13041-T, el límite máximo de TPDA para una carretera secundaria son 4 000 vehículos. Sin embargo en

el Anexo 4 se pueden observar los datos de TPDA brindados por la estación de medición 5, ubicada sobre la ruta secundaria 141, donde se indica que la cantidad para el año 2009 es de 10 927 vehículos. Estos datos muestran que es una carretera colapsada para su condición de secundaria y debería ser atendida como carretera primaria.

Como se muestra también en el Anexo 4, la dispersión de los datos es muy alta, sobretodo en la tasa de crecimiento en cada tipo de vehículo para las vías primarias y secundarias consideradas. Asimismo la composición vehicular resulta diferente para cada tipo de carretera.

Por lo tanto, cuando atañe un diseño específico en una zona geográfica definida con carreteras tributarias bien identificadas, el estudio para la identificación plena de los Ejes Equivalentes de Diseño (EEQ) requiere mucha afinación.

Respecto a este proyecto comparativo en particular, es aceptable, por lo dicho, tomar un valor promedio de la tasa de crecimiento relativamente alto y a la mitad de la Tabla AASHTO mostrado en el Cuadro 9 de 5%. Los EEQ obtenidos así para las cuatro diferentes carreteras que se están considerando son mostrados en el Anexo 4.

Se utilizó la fórmula AASHTO y el nomograma de la Figura 11 para encontrar los Números Estructurales (SN) de cada capa del pavimento.

Las características físico-mecánicas de los materiales utilizados fue de acuerdo con lo descrito en el apartado anterior y utilizando los coeficientes estructurales de capa (a_i) y los módulos resilientes (MR) encontrados mediante los nomogramas de las Figuras 15, 16, 17, 18 y 20.

Los coeficientes de drenajes (m_i) Para obtener los espesores de cada capa se consideró de acuerdo con una condición de humedad al año mayor al 25%, una base buena y una subbase aceptable. Estos coeficientes son 1 y 0.8 respectivamente (Véase Cuadro 11).

Una vez encontrados los espesores mínimos establecidos por el diseño, estos se sensibilizaron para tener espesores típicos de trabajo, manteniendo, por supuesto, el número estructural (SN) sobre la subrasante igual o mayor a lo permitido por el diseño.

El cuadro 20 muestra los espesores mínimos recomendados por la AASHTO y el manual SIECA para las capas asfálticas y las bases granulares en función de los ejes equivalentes de diseño (EEQ) (ESAL del inglés *Equivalent Single Axle Loads*). Esta condición fue, obviamente considerada para los diseños.

Esposores mínimos sugeridos

Número de ESAL's	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50,000	3.0 cm	10 cm
50,000 - 150,000	5.0 cm	10 cm
150,000 - 500,000	6.5 cm	10 cm
500,000 - 2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000 - 7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

Fuente: Guía para diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993.

PAINT

Cuadro 20. Espesores mínimos recomendados por la AASHTO y dados por SIECA.

Diseño con Geotextil

Se efectuó el diseño con el aporte de geotextil en las cuatro carreteras con pavimento flexible para los valores de CBR = 2% y CBR = 4% estipulados para este proyecto.

El diseño con geotextil es aplicable en condiciones de subrasantes débiles y moderadas considerando tal límite en un CBR = 3%. Tal y como se muestra en la Figura 25, los dos tipos de subrasante consideradas para este proyecto llevan al diseño por refuerzo con geotextil para el caso del CBR = 2% y al diseño por estabilización con geotextil con CBR = 4%.

El método de diseño del presente estudio es según la función principal del geotextil en el camino. Sin embargo se revisó el cumplimiento de las especificaciones técnicas estipuladas para Costa Rica en el Manual CR-2010. De acuerdo con ello, en el diseño con refuerzo con geotextil se cumplieron con las especificaciones de estabilización y separación. Por otro lado, en el diseño con estabilización con geotextil se cumplieron con las especificaciones de separación.

El diseño con geotextil por refuerzo y estabilización, debe tener como insumo principal

que el diseño del camino por cualquier método convencional esté concluido, de tal manera que se tengan definidos los espesores y tanto el módulo de poisson como los módulos resilientes de los materiales. De esta manera se puede utilizar el software adecuado y así obtener los esfuerzos a que estará sometido el geotextil. Utilizando el software es posible, igualmente, sensibilizar los espesores para optimizar la capacidad resistente del geotextil ya sea seleccionándolo u optimizando su capacidad si por especificaciones técnicas dadas debe cumplir otras condiciones mínimas.

En el Cuadro 21 se muestran los valores de módulo de poisson recomendados para el cálculo de los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones en las diferentes capas de una carretera (Yang: 2004).

Poisson Ratios for Different Materials

Material	Range	Typical
Hot mix asphalt	0.30-0.40	0.35
Portland cement concrete	0.15-0.20	0.15
Untreated granular materials	0.30-0.40	0.35
Cement-treated granular materials	0.10-0.20	0.15
Cement-treated fine-grained soils	0.15-0.35	0.25
Lime-stabilized materials	0.10-0.25	0.20
Lime-flyash mixtures	0.10-0.15	0.15
Loose sand or silty sand	0.20-0.40	0.30
Dense sand	0.30-0.45	0.35
Fine-grained soils	0.30-0.50	0.40
Saturated soft clays	0.40-0.50	0.45

PAINT

Cuadro 21. Módulos de Poisson recomendados

Es recomendable utilizar la relación de poisson de 0.45 para subrasantes y 0.35 para otros materiales (Yang, 2004). En los diseños se utilizaron tales valores.

Respecto a las presiones, la norma SIECA 2002, en su apartado 2.3, estipula la condición de un eje equivalente y las presiones que generan las llantas bajo la carga estándar de 18 000 lbs (80 kN). En la Figura 31 se muestra la condición de un eje equivalente en donde la presión ejercida bajo las llantas, por esta carga, es de 70 psi (483 kPa) (SIECA, 2006). Para este proyecto, en general, se utilizó una presión de llantas de 100 psi (690 kPa), que es muy común en los vehículos de carga del país.

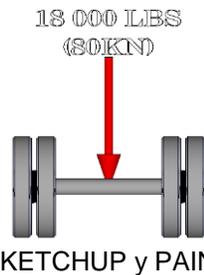


Figura 31. Eje equivalente para diseño AASHTO 1993

En el diseño por refuerzo con geotextil se tomaron en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Tener establecido el diseño convencional con el método AASHTO 1993.
- Utilizar geotextil tejido ya que alcanza su resistencia con menor elongación que el tejido.
- Revisar primeramente el cumplimiento de las especificaciones dadas por el Manual CR-2010 para estabilización.
- Utilizar el software para encontrar los esfuerzos sobre el geotextil variando los espesores de las capas. No se debe olvidar que el CR-2010 estipula utilizar espesores no menores a 30 cm sobre el geotextil. Se debe tener a mano la presión ejercida, el módulo de poisson y los espesores.
- Seleccionar el geotextil adecuado de acuerdo con su resistencia en la prueba de Tira Ancha (ASTM D-4595) tratando que sea el de menor precio posible.
- Proponer los nuevos espesores con el uso del geotextil.

En el diseño por estabilización las pautas fueron:

- Tener establecido el diseño convencional por el método AASHTO 1993.
- Utilizar el geotextil no tejido preferiblemente, dado que es de menor precio relativo. Sin embargo se puede utilizar el tejido.
- Revisar primeramente el geotextil que cumpla las especificaciones del Manual CR-2010 para estabilización.
- Realizar la comprobación de cada una de las variables de las especificaciones utilizando los esfuerzos reales que ocurren y los factores de seguridad global

y parcial (Véase apartado Diseño con Geotextil).

- Seleccionar el geotextil adecuado
- Calcular, mediante la disminución del coeficiente estructural de capa de la subbase (a_3) al 50 % de su valor y junto con ello el MR, los nuevos espesores del paquete estructural. Esto se hace bajo la premisa de contaminación de la subbase basado en el adagio de que "10 kilogramos de piedra colocados sobre 10 kilogramos de barro resultan 20 kilogramos de barro" (Koerner, 2005).
- La diferencia en espesores con respecto al diseño inicial, se considera como el equivalente de trabajos extras por realizar a la estructura de soporte, por el hecho de mantener limpia las capas sin el uso de geotextil.

Presupuestos

Se efectuaron los cálculos del presupuesto para todas las alternativas considerando las distancias a la fuente del material de base y sub-base de 5, 10, 15 y 20 km. Para efectos de tener mayor evidencia sobre las tendencias de tales presupuestos, se estimó también para distancias de acarreo de 25, 50, 75 y 100 km. Estas distancias son aceptables en vista de los resultados obtenidos que tienen las municipalidades, según el cuestionario realizado y la práctica actual en proyectos en donde las concesiones son escasas y la calidad de los materiales son exigentes.

Los precios utilizados para estas operaciones se basaron en la Tabla de Costos Viales, publicadas por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) el 15 de abril del 2009 aumentados en 10% para actualizarlos. Los datos de precios para bases y subbases fueron tomados del tajo Pelón de la Bajura en Bagaces, Guanacaste y los precios del geotextil de la empresa Amanco distribuidor de Mexichem en Costa Rica. Dichos documentos se adjuntan en el Anexo 6. El resultado de todos los presupuestos sirvió para realizar el análisis económico de todas las alternativas, de tal forma que se pudo valorar el aporte del geotextil en relación con las distancias de acarreo.

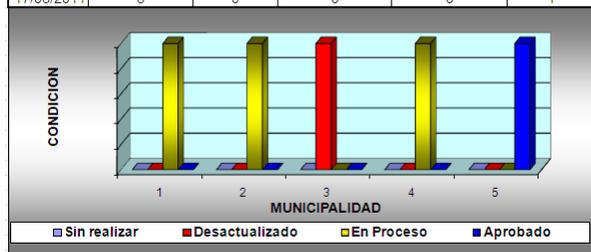
Resultados

El diseño de caminos por las municipalidades

El diseño de los caminos es un rol continuo que los ingenieros a cargo de las Unidades Técnicas Municipales deberían tener para mejorar la calidad de tan alto porcentaje de carreteras. Para conocer, de una manera muy rápida, lo que está pasando con los diseños de los caminos y otros aspectos relativos en el ámbito municipal, se aplicó el cuestionario adjunto en el Apéndice 3 a cinco municipios. Los resultados obtenidos con base en las preguntas se muestran a continuación:

1) Estado del Inventario Vial Municipal

Fecha	Municipalidad	Sin realizar	Desactualizado	En Proceso	Aprobado
23/02/2011	1	0	0	1	0
28/02/2011	2	0	0	1	0
28/02/2011	3	0	1	0	0
03/03/2011	4	0	0	1	0
17/03/2011	5	0	0	0	1

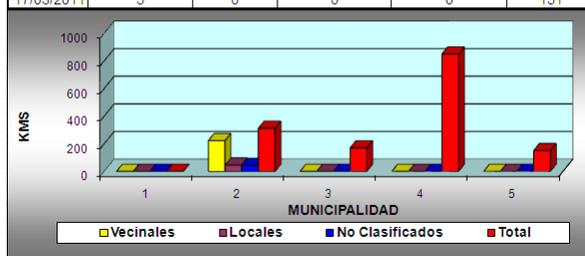


EXCEL y PAINT

Figura 32. Situación del Inventario Vial Municipal

2) Longitudes de los caminos en las municipalidades consultadas

Fecha	Municipalidad	Vecinales	Locales	No Clasificados	Total
23/02/2011	1	0	0	0	0
28/02/2011	2	223	46	43	312
28/02/2011	3	0	0	0	170
03/02/2011	4	0	0	0	850
17/03/2011	5	0	0	0	151

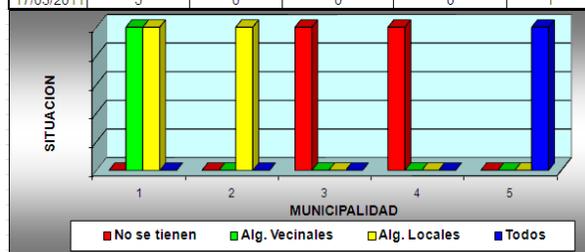


EXCEL y PAINT

Figura 33. Kilómetros del Inventario Vial Municipal

3) El Tránsito Promedio Diario en las municipalidades

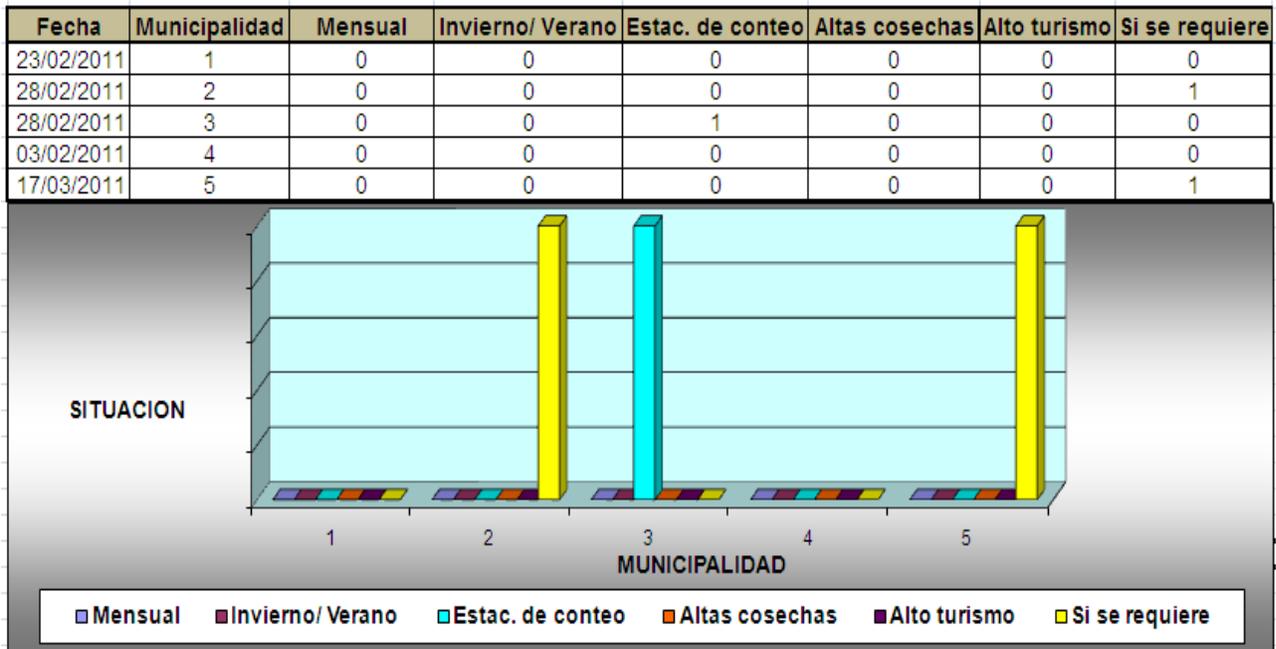
Fecha	Municipalidad	No se tienen	Alg. Vecinales	Alg. Locales	Todos
23/02/2011	1	0	1	1	0
28/02/2011	2	0	0	1	0
28/02/2011	3	1	0	0	0
03/02/2011	4	1	0	0	0
17/03/2011	5	0	0	0	1



EXCEL y PAINT

Figura 3.1.3 Situación del TPD en las municipalidades

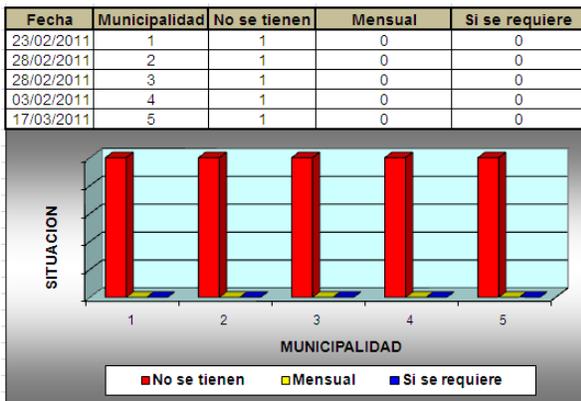
4) Modalidad de Medición en Tránsito Promedio Diario



EXCEL y PAINT

Figura 35. Modalidad de medición del TPD en las municipalidades

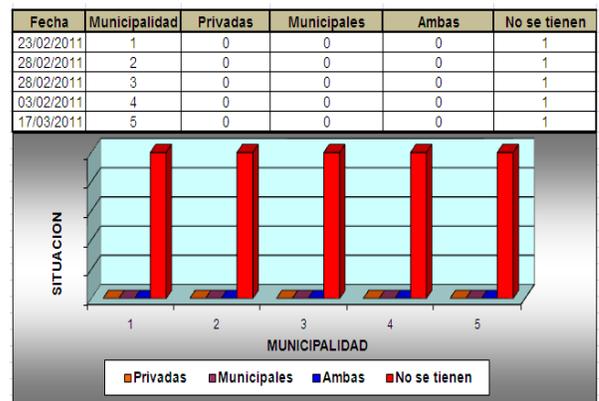
5) Modalidad Periódica para la Medición del Tránsito Promedio Diario



EXCEL y PAINT

Figura 36. Periodicidad de medición del TPD en las municipalidades

6) Fuentes de material de subbase y base concesionadas en el cantón



EXCEL y PAINT

Figura 37. Concesiones de las fuentes de material para bases y subbases en el cantón

7) Longitudes promedios a las fuentes de material de subbase y base en las municipalidades

Fecha	Municipalidad	5 km	10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	75 km
23/02/2011	1	0	1	0	0	0	0	0
28/02/2011	2	0	0	1	0	0	0	0
28/02/2011	3	0	0	0	0	0	0	1
03/02/2011	4	0	0	0	0	1	0	0
17/03/2011	5	0	0	0	0	1	0	0

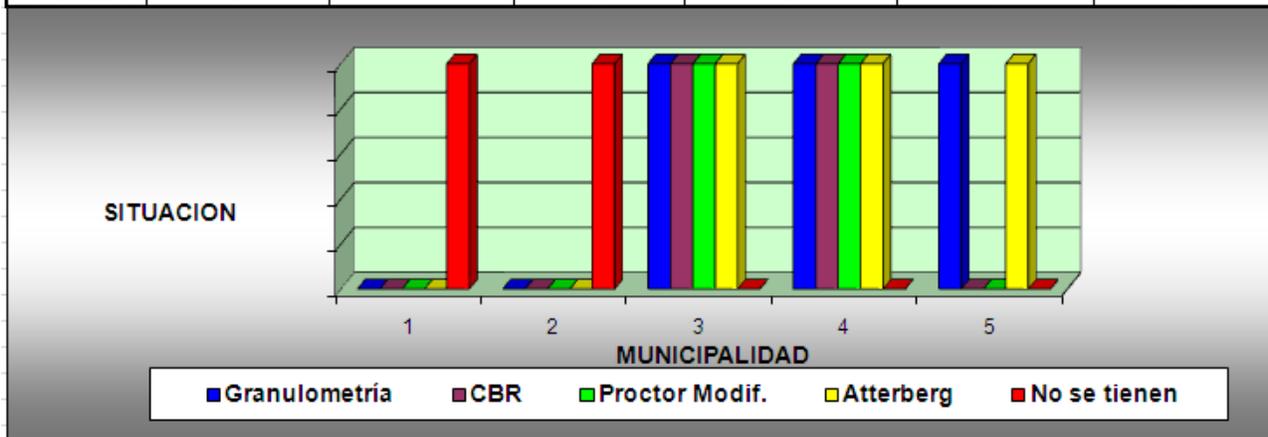


EXCEL y PAINT

Figura 38. Longitudes promedios de acarreo para material de subbase y base en las municipalidades

8) Caracterización físico-mecánica de las fuentes

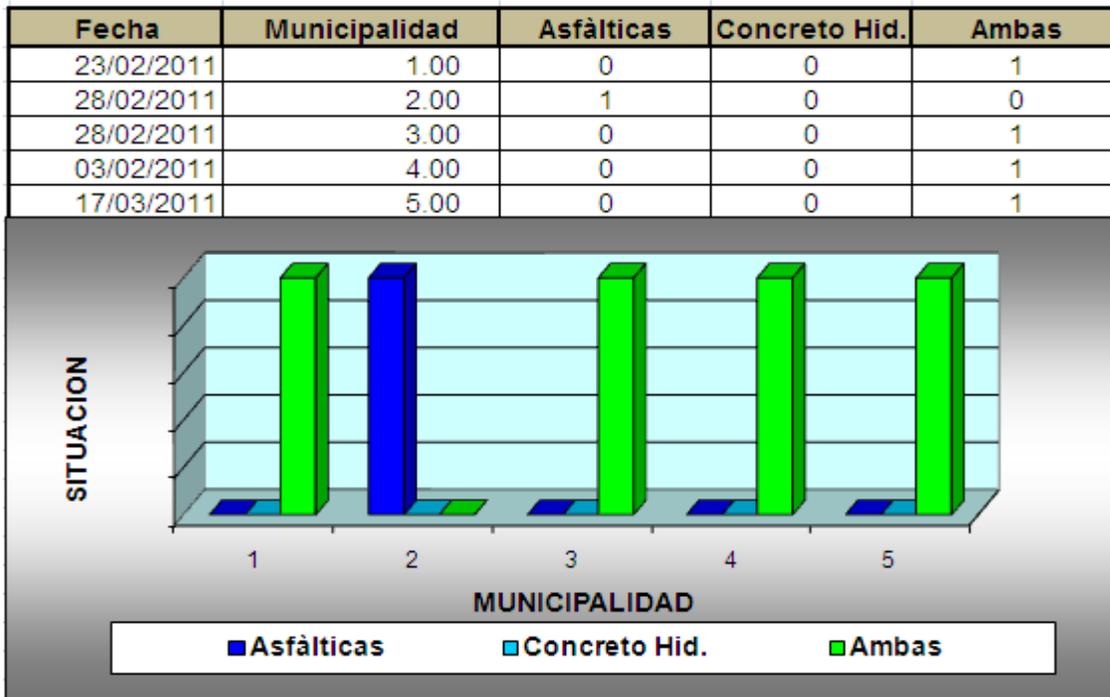
Fecha	Municipalidad	Granulometría	CBR	Proctor Modif.	Atterberg	No se tienen
23/02/2011	1	0	0	0	0	1
28/02/2011	2	0	0	0	0	1
28/02/2011	3	1	1	1	1	0
03/02/2011	4	1	1	1	1	0
17/03/2011	5	1	0	0	1	0



EXCEL y PAINT

Figura 39 Situación de la caracterización de las fuentes en las municipalidades

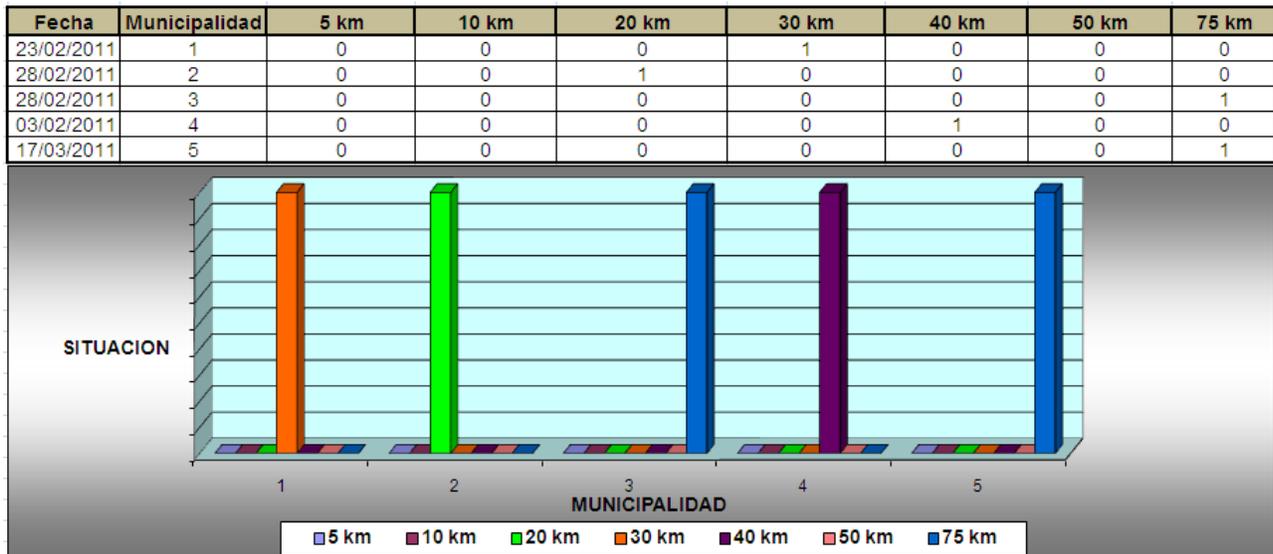
9) Tipos de plantas mezcladoras en los cantones



EXCEL y PAINT

Figura 40. Tipos de plantas mezcladoras en el cantón

10) Longitudes promedios de acarreo a las plantas mezcladoras en los cantones

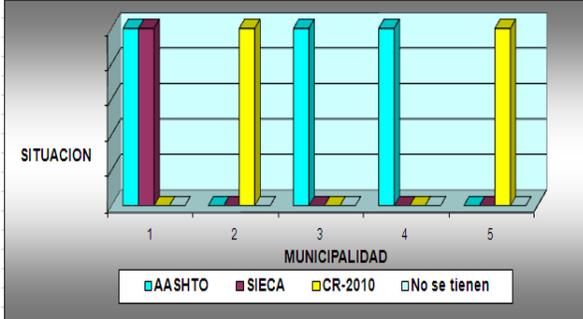


EXCEL y PAINT

Figura 41. Longitudes promedios de acarreo para concretos asfálticos o hidráulicos en las municipalidades

11) Existencias de normas para carreteras en las municipalidades

Fecha	Municipalidad	AASHTO	SIECA	CR-2010	No se tienen
23/02/2011	1	1	1	0	0
28/02/2011	2	0	0	1	0
28/02/2011	3	1	0	0	0
03/02/2011	4	1	0	0	0
17/03/2011	5	0	0	1	0



EXCEL y PAINT

Figura 42. Situación de las normas para carreteras en las municipalidades

13) Situación sobre el diseño propio de carreteras en las municipalidades

Fecha	Municipalidad	Siempre	Algunas veces	Nunca
23/02/2011	1	0	0	1
28/02/2011	2	0	0	1
28/02/2011	3	0	1	0
03/02/2011	4	0	0	1
17/03/2011	5	0	0	1

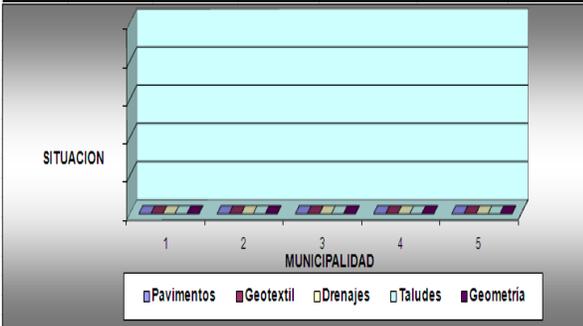


EXCEL y PAINT

Figura 44. Situación del diseño propio de carreteras en las municipalidades

12) Existencias de software para diseño de carreteras en las municipalidades

Fecha	Municipalidad	Pavimentos	Geotextil	Drenajes	Taludes	Geometría
23/02/2011	1	0	0	0	0	0
28/02/2011	2	0	0	0	0	0
28/02/2011	3	0	0	0	0	0
03/02/2011	4	0	0	0	0	0
17/03/2011	5	0	0	0	0	0

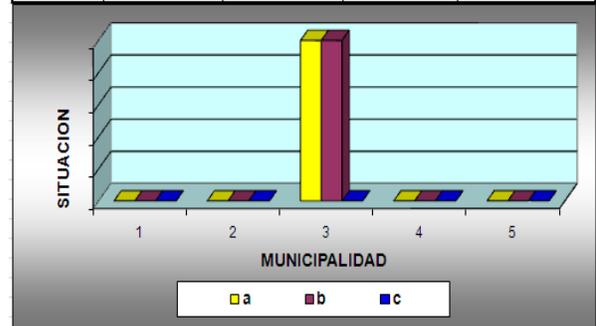


EXCEL y PAINT

Figura 43. Situación de la existencia de software para diseño de carreteras en las municipalidades

14) Caminos diseñados por las municipalidades

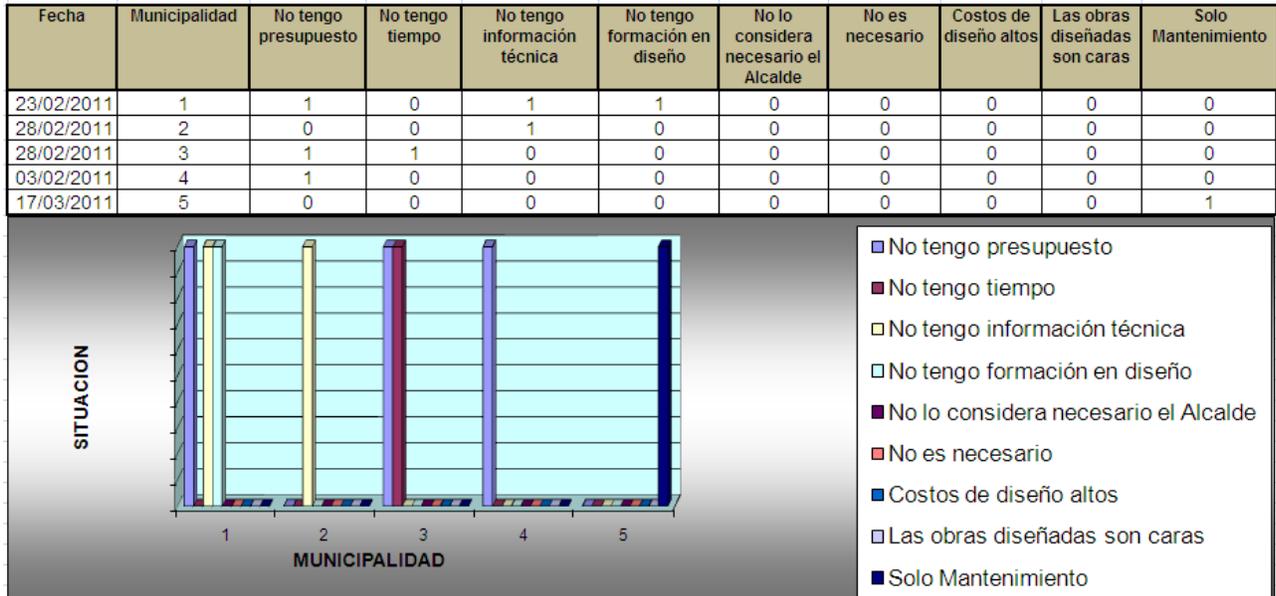
Fecha	Municipalidad	a	b	c
23/02/2011	1	0	0	0
28/02/2011	2	0	0	0
28/02/2011	3	1	1	0
03/02/2011	4	0	0	0
17/03/2011	5	0	0	0



EXCEL y PAINT

Figura 45. Algunos caminos diseñados por las municipalidades

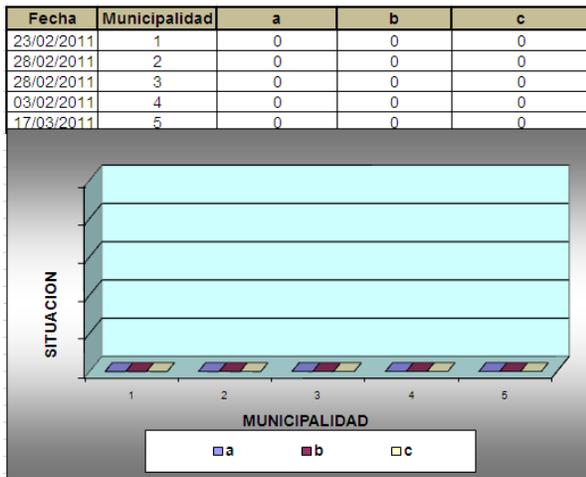
15) Justificaciones para no realizar el diseño de carreteras por las municipalidades



EXCEL y PAINT

Figura 46. Justificaciones para no realizar diseños de carreteras

16) Capacitación extra en materia de diseño de carreteras para los Directores Técnicos



EXCEL y PAINT

Figura 47 Situación de la capacitación sobre diseño de caminos

17) Recomendaciones de los Directores Técnicos Municipales para mejorar la vida útil de la inversión en caminos

Fecha	Municipalidad	Recomendación
23/02/2011	1	Frenar la injerencia política en tomas de decisiones técnicas y permitir que la UTGVM se desarrolle
28/02/2011	2	Implementar un Sistema de Control de Calidad
28/02/2011	3	Mayor inversión en la red cantonal ya que los recursos apenas alcanzan para un mantenimiento escaso.
03/02/2011	4	Tener mayor capacidad económica
17/03/2011	5	Contar con más recursos

EXCEL y PAINT

Cuadro 22. Recomendaciones para mejorar la vida útil de las inversiones en los caminos municipalidades

Tránsito de Diseño para las carreteras

La información obtenida en la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT se muestra en el Anexo N°4. Estos cuadros fueron ampliados para tabular la tasa de crecimiento de los vehículos así como los porcentajes promedios de cada tipo de vehículo en la composición vehicular.

De acuerdo con el Anuario Estadístico del Sector Transporte del período 2008-2009 que publica la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT, en el Anexo 4 también se presentan mediciones del TPDA para algunos sitios de varias carreteras del país. Si se toma por ejemplo, la medición del ítem 8 de tales estadísticas, o sea, en Miramar de Puntarenas, sobre la Ruta N°1, que es una carretera primaria de dos carriles, se pueden realizar cálculos para determinar la tasa de crecimiento anual, tal y como se muestra en el mismo Anexo 4.

Debido a la gran dispersión de las tasas de crecimiento vehicular encontrados para efectos del cálculo de los ejes equivalentes de diseño (EEQ), se consideró una tasa de crecimiento de 5% que se ubica como valor medio del Cuadro 9. Se selecciona un período de diseño de 20 años de acuerdo con el Cuadro 6, que es un promedio representativo para los cuatro tipos de carreteras consideradas en este estudio.

Propiedades Geométricas

Las figuras que se presentan a continuación muestran parte de la realidad nacional en cuanto a las características geométricas que poseen las carreteras; sean estas primarias, secundarias, terciarias o vecinales.



JPEG-PAINT

Figura 48. Carretera primaria: Ruta 1 a la altura de Barranca



JPEG-PAINT

Figura 49. Carretera Primaria: Ruta 1 a la altura de Chomes



JPEG-PAINT

Figura 50. Carretera secundaria: Ruta 142 a la altura de Los Angeles de Tilarán



JPEG-PAINT

Figura 51. Carretera secundaria: Ruta 145 a la altura de Las Juntas de Abangares



JPEG-PAINT

Figura 54. Carretera terciaria: Ruta 925 a la altura de Líbano de Tilarán



JPEG-PAINT

Figura 52. Carretera secundaria: Ruta 164 a la altura de Guayabo de Bagaces



JPEG-PAINT

Figura 55. Carretera vecinal: Ruta C1 a la altura de Montano de Bagaces



JPEG-PAINT

Figura 53. Carretera terciaria: Ruta 926 a la altura de El Silencio de Tilarán



JPEG-PAINT

Figura 56. Carretera vecinal: Ruta C25 a la altura de Limonal de Bagaces



JPEG-PAINT

Figura 57. Carretera vecinal: Ruta C15 a la altura de Aguacaliente de Bagaces

En el Cuadro 23 se presentan las medidas realizadas en tales sitios

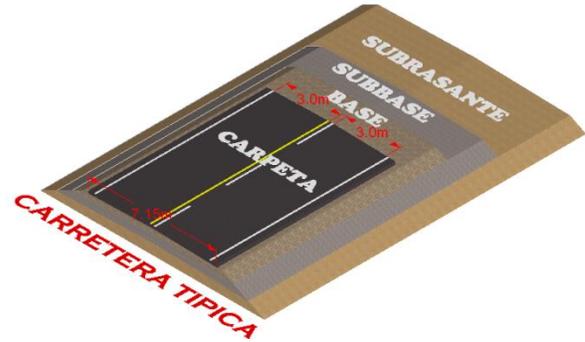
CUADRO 23: Ancho de carril medidos en el sitio		
Figura	Tipo	Carril (m)
48	Primaria	3.0
49	Primaria	3.0
50	Secundaria	2.6
51	Secundaria	2.5
52	Secundaria	2.6
53	Terciaria	5.0 (total)
54	Terciaria	3.0
55	Vecinal	5.5 (total)
56	Vecinal	5.5 (total)
57	Vecinal	5.0 (total)

WORD

Cuadro 23. Anchos de caminos públicos

Dadas las imágenes anteriores, la estructura típica de una carretera de dos carriles con un ancho de carril de 3.0 m es como se muestra en la Figura 58. El ancho total de la carpeta asfáltica es de 7.15 m, considerando el área de alineamiento y los pequeños bordes laterales que son utilizados y que promedian 20 cm.

La Figura 58 se toma como referencia para efectos de realizar los diseños y las estimaciones económicas del presente estudio.



SKETCHUP y PAINT

Figura 58. Estructura típica de una carretera

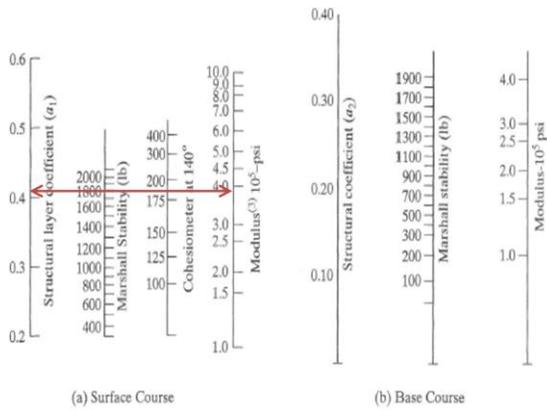
Propiedades de la subrasante

El CBR utilizado para los diseños de los cuatro tipos de caminos en consideración, se analizan con valor de 2% y 4% con el objetivo de permanecer dentro de las categorías en las cuales el geotextil se utiliza como refuerzo y como estabilizador, respectivamente (Véase Figura 25).

Propiedades de la mezcla asfáltica, base y subbase consideradas

Las Figuras 59 y 60 muestran la estimación de los correspondientes módulos resiliente y coeficiente estructural de capa para la carpeta asfáltica. Las Figuras 61 y 62 corresponden a la base y subbase. Las Figuras 63 y 64 brindan la determinación del módulo resiliente para la subrasante con los dos CBR establecidos para este estudio.

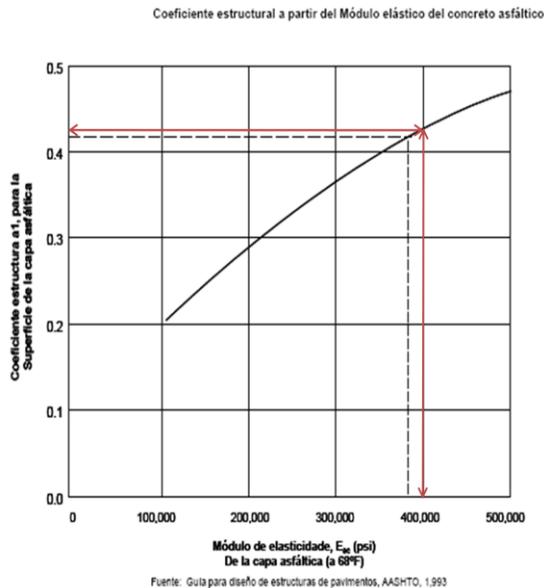
Los valores de trabajo determinados para este proyecto se presentan en el Cuadro 24.



Correlation charts for estimating resilient modulus of HMA (1 lb = 4.45 N, 1 psi = 6.9 kPa). (After Van Til et al. (1972).)

PAINT

Figura 59. Determinación del MR para la carpeta asfáltica

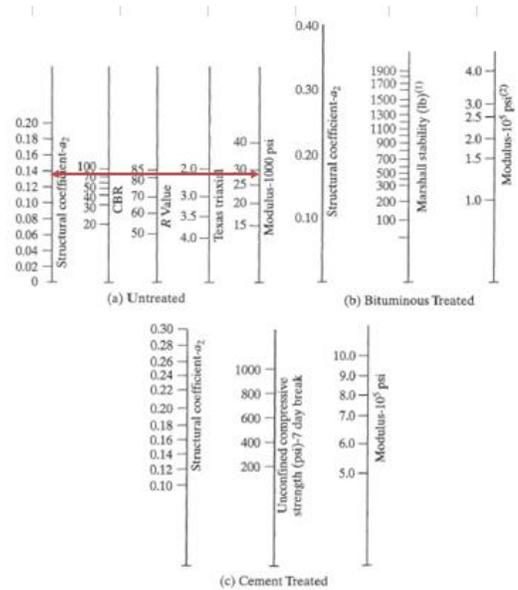


Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1993

PAINT

Figura 60. Determinación del a₁ para la carpeta asfáltica

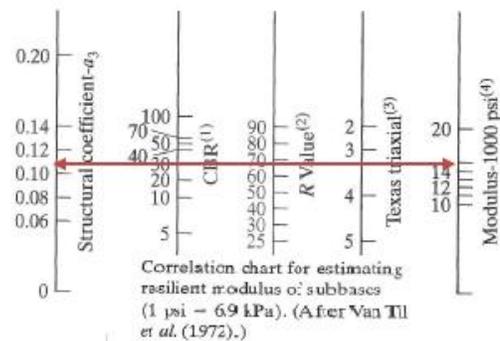
El coeficiente de drenaje m_i utilizado para la base y la subbase se toman igual a 1 y 0.8 respectivamente, según el Cuadro 11 y considerando una carretera con mucha humedad durante el año (mayor al 25% del tiempo), una base en condiciones buenas y una subbase en condiciones aceptables de drenaje.



Correlation charts for estimating resilient modulus of bases (1 lb = 4.45 KN, 1 psi = 6.9 kPa). (After Van Til et al. (1972).)

PAINT

Figura 61. Determinación del a₂ y MR para la base



PAINT

Figura 62. Determinación del a₃ y MR para la subbase

CUADRO 24: VALORES PARA DISEÑO DE CAMINOS

Capa	CBR	a _i	m _i	MR (psi)
Carpeta		0.43	-	400 000
Base	80%	0.135	1	28 000
Subbase	30%	0.11	0.8	14 800
Subrasante	4%	-	-	5 000
	2%	-	-	3 000

WORD

Cuadro 24. Valores finales para diseño AASHTO 1993

Diseño Convencional AASHTO 1993

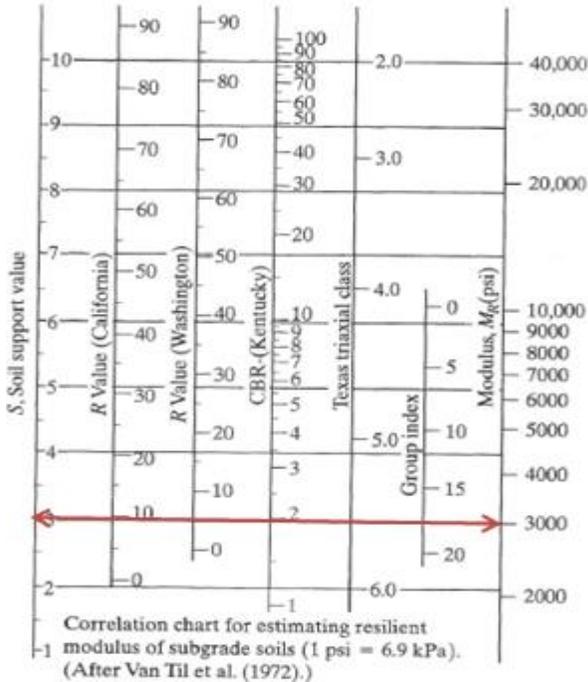
Determinados los ejes equivalentes de diseño (EEQ) y las características de los materiales para las diferentes capas que conforman el paquete estructural, se procedió a realizar los diseños para lo cual se utilizaron los datos del Cuadro 24.

Diseño utilizando subrasante con CBR = 2%

Carretera Primaria

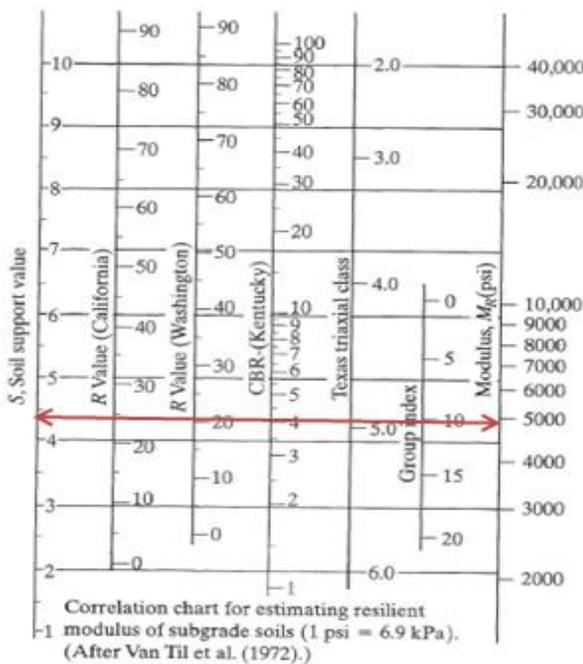
Según el diseño convencional para complementar los datos del Cuadro 24 se utilizan los datos del Cuadro 25.

Los cálculos en la fórmula AASHTO y los trazos en el nomograma de la Figura 11 para encontrar los valores de Número Estructural SN_1 , SN_2 y SN_3 se muestran en el Cuadro 26 y Figura 65.



PAINT

Figura 63. Determinación del MR para la subrasante con CBR = 2%



PAINT

Figura 64. Determinación del MR para la subrasante con CBR = 4%

CUADRO 25: DATOS PARA DISEÑO VIA PRIMARIA		
PERIODO DISEÑO (Años)	20	Tabla 1.2.1
CRECIMIENTO ESAL ANUAL	5%	Ver apartado 3.2.6
FACTOR DE CRECIMIENTO	33.06	Tabla 1.2.6
FACTOR DIRECCION DEL TRANSITO	0.50	Dos carriles
TPD _a EJES 18000 LBS (80kN)	4,000.00	Tope mínimo Decreto N° 13041 T
W18, ESAL, TRANSITO DE DISEÑO	13,544,545.24	EEQ
NIVEL DE CONFIANZA (R)	0.90	Tabla 1.2.8
DESVIACION NORMAL (Z_R)	1.282	Tabla 1.2.8
DESVIACION ESTANDAR (S_o)	0.45	SIECA 2002
ΔPSI	1.70	Po=4.2 y un Pt=2.5

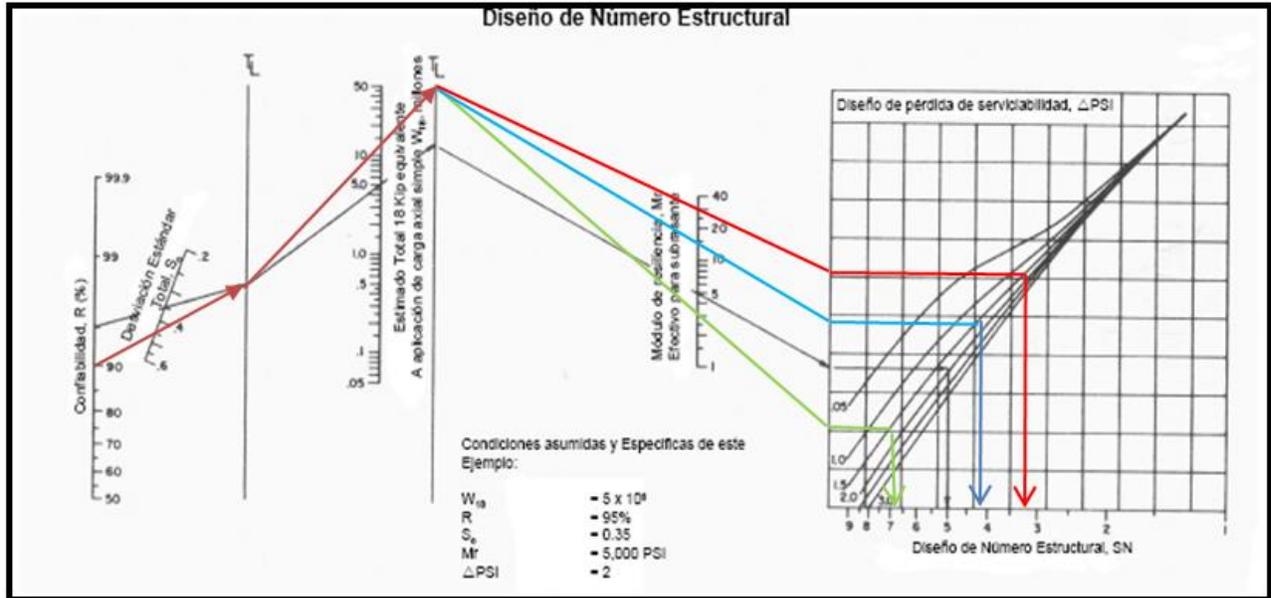
EXCEL y PAINT

Cuadro 25. Datos complementarios de diseño para vía primaria

CUADRO 26: FORMULA AASHTO EQUILBRADA PRIMARIA										
PARTE	EEQ	% confianza	ZR	So	SN	PSI inic.	PSI final	MR	Log EEQ	Balance
BASE	13,544,545.24	0.90	-1.282	0.45	3.23	4.2	2.5	28000	7.1318	7.1318
SUBBASE	13,544,545.24	0.90	-1.282	0.45	4.10	4.2	2.5	14800	7.1318	7.1318
SUBRASANTE	13,544,545.24	0.90	-1.282	0.45	6.87	4.2	2.5	3000	7.1318	7.1318
NUMERO ESTRUCTURAL TOTAL					14.19					

EXCEL Y PAINT

Cuadro 26. SN para las capas según la fórmula AASHTO vía primaria CBR = 2%



PAINT

Figura 3.6.1 SN para las capas según el nomograma AASHTO dado por SIECA vía primaria CBR=2%

CUADRO 27: ESPESORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL PRIMARIA				
	MR (psi)	a_n	m_n	SN_n
CARPETA ASFALTICA	400000	0.43	x	3.23
BASE	28000	0.135	1	4.10
SUBBASE	14800	0.11	0.8	6.87
SUBRASANTE	3000	x	x	
ESPESORES				
$SN1 = a1D1$	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
$D1 = SN1/a1$	7.50	19.06	20	8.00
$SN2 = a1D1 + a2m2D2$				
$D2 = (SN2 - a1^*D1)/(a2^*m2)$	4.87	12.37	12.5	5.00
$SN3 = a1D1 + a2m2D2 + a3m3D3$				
$D3 = (SN3 - a1D1 - a2m2D2)/(a3m3)$	31.28	79.45	80	32.00

$$SN3 = a1^*D1 + a2^*m2^*D2 + a3^*m3^*D3$$

6.93	>	6.87	OK!
------	---	------	-----

EXCEL y PAINT

Cuadro 27. Espesores directos resultantes del diseño con los SN obtenidos vía primaria CBR=2%

CUADRO 28: ESPESORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL ADOPTADO PRIMARIA				
	MR (psi)	a _n	m _n	SN _n
CARPETA ASFALTICA	400000	0.43	x	3.23
BASE	28000	0.135	1	4.10
SUBBASE	14800	0.11	0.8	6.87
SUBRASANTE	3000	x	x	
ESPESORES				
SN1 = a1D1	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
D1=SN1/a1			10	4.00
SN2 = a1D1+a2m2D2				
D2 = (SN2 - a1*D1)/(a2*m2)	17.61	44.73	45	18.00
SN3 = a1D1+a2m2D2+a3m3D3				
D3 = (SN3 - a1D1 - a2m2D2)/(a3m3)	30.88	78.44	80	32.00

$$SN3 = a1*D1 + a2*m2*D2 + a3*m3*D3$$

6.97	>	6.87	OK!
------	---	------	-----

EXCEL y PAINT

Cuadro 28. Espesores recomendados finales resultantes de la optimización constructiva, vía primaria CBR=2%

Con los datos de SN obtenidos se calculan los espesores de la carretera dados en el Cuadro 27. Estos espesores se sensibilizaron para tener un espesor más práctico desde el punto de vista constructivo y normal en la práctica contractual. Para ello se mantuvo el espesor mínimo de carpeta asfáltica recomendado por la normativa SIECA para este tipo de carreteras (Véase Cuadro 20). O sea, para un EEQ superior a 7 000 000 se recomienda un mínimo de 10 cm. En este sentido se escogió tal mínimo y la base se sensibilizó a 45 cm para no incrementar mucho el espesor de la subbase.

Los espesores finales manteniendo un número estructural (SN) igual o mayor al actuante sobre la subrasante y mostrado en el Cuadro 27, se muestran en el Cuadro 28.

Carretera secundaria

El procedimiento anterior sobre la carretera primaria, se aplica a la opción de carretera secundaria, obteniéndose los resultados presentados en las Figura 66 y en los Cuadros 29, 30, 31 y 32.

CUADRO 29: DATOS PARA DISEÑO VIA SECUNDARIA		
PERIODO DISEÑO (Años)	20	Tabla 1.2.1
CRECIMIENTO ESAL ANUAL	5%	Ver apartado 3.2.6
FACTOR DE CRECIMIENTO	33.06	Tabla 1.2.6
FACTOR DIRECCION DEL TRANSITO	0.50	Dos carriles
TPD _a EJES 18000 LBS (80kN)	2,100.00	Valor medio Decreto N° 13041 T
W18 ESAL TRANSITO DE DISEÑO	4,991,316.58	EEQ
NIVEL DE CONFIANZA (R)	0.90	Tabla 1.2.8
DESVIACION NORMAL (Z _R)	1.282	Tabla 1.2.8
DESVIACION ESTANDAR (S _o)	0.45	SIECA 2002
ΔPSI	1.70	Po=4.2 y un Pt=2.5

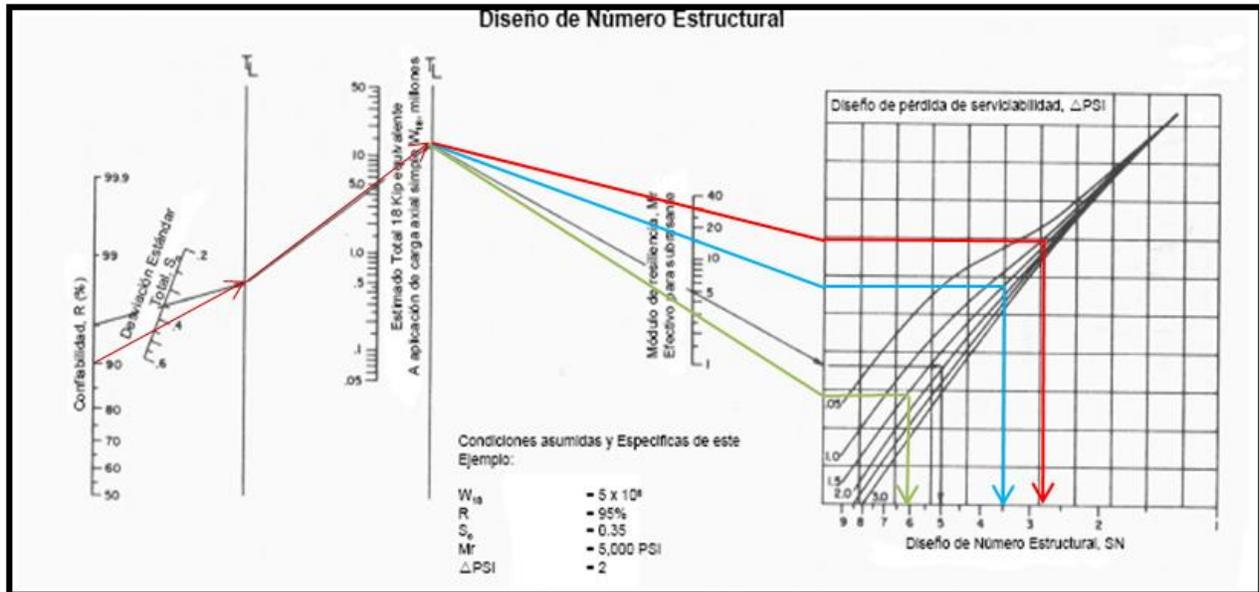
EXCEL y PAINT

Cuadro 29. Datos complementarios de diseño para vía secundaria

CUADRO 30: FORMULA AASHTO EQUILIBRADA SECUNDARIA										
PARTE	EEQ	% confianza	ZR	So	SN	PSI inic.	PSI final	MR	Log EEQ	Balance
BASE	4,991,316.58	0.90	-1.282	0.45	2.73	4.2	2.5	28000	6.6982	6.6982
SUBBASE	4,991,316.58	0.90	-1.282	0.45	3.49	4.2	2.5	14800	6.6982	6.6982
SUBRASANTE	4,991,316.58	0.90	-1.282	0.45	6.04	4.2	2.5	3000	6.6982	6.6982
NUMERO ESTRUCTURAL TOTAL					12.26					

EXCEL y PAINT

Cuadro 30. SN para las capas según la fórmula AASHTO, vía secundaria CBR=2%



EXCEL y PAINT

Figura 3.6.2 SN para las capas según el nomograma AASHTO dado por SIECA, vía secundaria CBR=2%

CUADRO 31: ESPESORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL SECUNDARIA				
	MR (psi)	a_n	m_n	SN_n
CARPETA ASFALTICA	400000	0.43	x	2.73
BASE	28000	0.135	1	3.49
SUBBASE	14800	0.11	0.8	6.04
SUBRASANTE	3000	x	x	
ESPESORES				
$SN_1 = a_1D_1$	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
$D_1 = SN_1/a_1$	6.36	16.15	17.5	7.00
$SN_2 = a_1D_1 + a_2m_2D_2$				
$D_2 = (SN_2 - a_1D_1)/(a_2m_2)$	3.57	9.06	10	4.00
$SN_3 = a_1D_1 + a_2m_2D_2 + a_3m_3D_3$				
$D_3 = (SN_3 - a_1D_1 - a_2m_2D_2)/(a_3m_3)$	28.25	71.75	75	30.00

$SN_3 = a_1D_1 + a_2m_2D_2 + a_3m_3D_3$	6.19	>	6.04	OK!
---	------	---	------	-----

EXCEL Y PAINT

Cuadro 31. Espesores directos resultantes del diseño con los SN obtenidos, vía secundaria CBR=2%

CUADRO 32: ESPEORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL ADOPTADO SECUNDARIA				
	MR (psi)	a_n	m_n	SN_n
CARPETA ASFALTICA	400000	0.43	x	2.73
BASE	28000	0.135	1	3.49
SUBBASE	14800	0.11	0.8	6.04
SUBRASANTE	3000	x	x	
ESPEORES				
$SN1 = a1D1$	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
$D1 = SN1/a1$			10	4.00
$SN2 = a1D1 + a2m2D2$				
$D2 = (SN2 - a1^*D1)/(a2^*m2)$	13.12	33.33	30	12.00
$SN3 = a1D1 + a2m2D2 + a3m3D3$				
$D3 = (SN3 - a1D1 - a2m2D2)/(a3m3)$	30.63	77.81	80	32.00

$$SN3 = a1^*D1 + a2^*m2^*D2 + a3^*m3^*D3$$

6.16	>	6.04	OK!
------	---	------	-----

EXCEL y PAINT

Cuadro 32. Espesores recomendados finales resultantes de la optimización constructiva, vía secundaria CBR=2%

Carretera Terciaria

El procedimiento también se aplica a la opción de carretera terciaria, obteniéndose los resultados presentados en las Figura 3.6.3 y en las Tablas 3.6.9, 3.6.10, 3.6.11 y 3.6.12.

CUADRO 33: DATOS PARA DISEÑO VIA TERCARIA		
PERIODO DISEÑO (Años)	20.00	Tabla 1.2.1
CRECIMIENTO ESAL ANUAL	0.05	Ver apartado 3.2.6
FACTOR DE CRECIMIENTO	33.06	Tabla 1.2.6
FACTOR DIRECCION DEL TRANSITO	0.50	Dos carriles
TPDa EJES 18000 LBS (80kN)	199.00	Tope mínimo Decreto N° 13041 T
W18, ESAL, TRANSITO DE DISEÑO	180,374.29	EEQ
NIVEL DE CONFIANZA (R)	0.80	Tabla 1.2.8
DESVIACION NORMAL (Z_a)	0.84	Tabla 1.2.8
DESVIACION ESTANDAR (S_o)	0.45	SIECA 2002
Δ PSI	1.70	Po=4.2 y un Pt=2.5

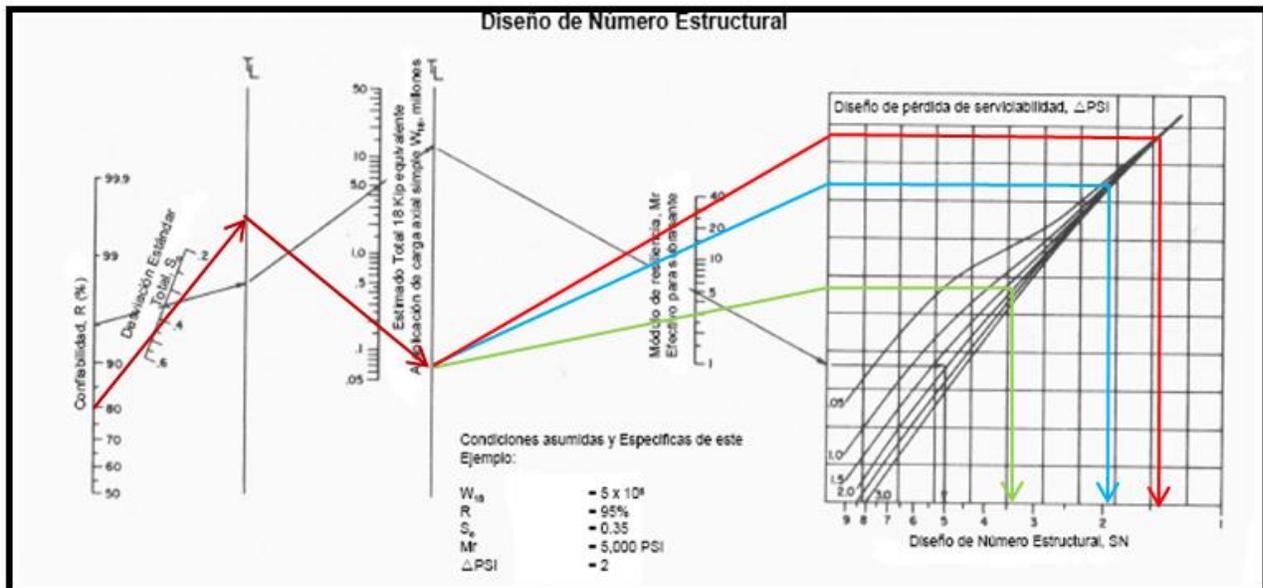
EXCEL y PAINT

Cuadro 33. Datos complementarios de diseño para vía terciaria

CUADRO 34: FORMULA AASHTO EQUILBRADA TERCIARIA										
PARTE	EEQ	% confianza	ZR	So	SN	PSI inic.	PSI final	MR	Log EEQ	Balance
BASE	180,374.29	0.80	-0.841	0.45	1.43	4.2	2.5	28000	5.2562	5.2562
SUBBASE	180,374.29	0.80	-0.841	0.45	1.86	4.2	2.5	14800	5.2562	5.2562
SUBRASANTE	180,374.29	0.80	-0.841	0.45	3.45	4.2	2.5	3000	5.2562	5.2562
NUMERO ESTRUCTURAL TOTAL					6.73					

EXCEL y PAINT

Cuadro 34. SN para las capas según la fórmula AASHTO, vía terciaria CBR=2%



PAINT

Figura 3.6.3 SN para las capas según el nomograma AASHTO dado por SIECA, vía terciaria CBR=2%

CUADRO 35: ESPESORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL TERCIARIA				
	MR (psi)	a_n	m_n	SN_n
CARPETA ASFALTICA	400000	0.43	x	1.43
BASE	28000	0.135	1	1.86
SUBBASE	14800	0.11	0.8	3.45
SUBRASANTE	3000	x	x	
ESPESORES				
$SN1 = a1D1$	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
$D1 = SN1/a1$	3.32	8.43	10	4.00
$SN2 = a1D1 + a2m2D2$				
$D2 = (SN2 - a1D1)/(a2m2)$	1.02	2.60	5	2.00
$SN3 = a1D1 + a2m2D2 + a3m3D3$				
$D3 = (SN3 - a1D1 - a2m2D2)/(a3m3)$	16.58	42.12	45	18.00

$$SN3 = a1 \cdot D1 + a2 \cdot m2 \cdot D2 + a3 \cdot m3 \cdot D3$$

3.57	>	3.45	OK!
------	---	------	-----

EXCEL Y PAINT

Cuadro 35. Espesores directos resultantes del diseño con los SN obtenidos, vía terciaria CBR=2%

CUADRO 36: ESPEORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL ADOPTADO TERCIARIA				
	MR (psi)	a_n	m_n	SN_n
CARPETA ASFALTICA	400000	0.43	x	1.43
BASE	28000	0.135	1	1.86
SUBBASE	14800	0.11	0.8	3.45
SUBRASANTE	3000	x	x	
ESPEORES				
$SN1 = a1D1$	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
$D1 = SN1/a1$			5	2.00
$SN2 = a1D1 + a2m2D2$				
$D2 = (SN2 - a1*D1)/(a2*m2)$	7.39	18.78	20	8.00
$SN3 = a1D1 + a2m2D2 + a3m3D3$				
$D3 = (SN3 - a1D1 - a2m2D2)/(a3m3)$	17.15	43.56	45	18.00

$$SN3 = a1*D1 + a2*m2*D2 + a3*m3*D3$$

3.52	>	3.45	OK!
------	---	------	-----

EXCEL y PAINT

Cuadro 36. Espesores recomendados finales resultantes de la optimización constructiva, vía terciaria CBR=2%

Carretera Vecinal

El procedimiento también se aplica a la opción de carretera vecinal, obteniéndose los resultados presentados en las Figura 68 y en los Cuadros 37, 38, 39 y 40.

CUADRO 37: DATOS PARA DISEÑO VIA VECINAL		
PERIODO DISEÑO (Años)	20	Tabla 1.2.1
CRECIMIENTO ESAL ANUAL	5%	Ver apartado 3.2.6
FACTOR DE CRECIMIENTO	33.06	Tabla 1.2.6
FACTOR DIRECCION DEL TRANSITO	0.50	Dos carriles
TPDa EJES 18000 LBS (80kN)	49.00	Tope máximo Decreto N° 13041 T
W18, ESAL, TRANSITO DE DISEÑO	44,413.77	EEQ
NIVEL DE CONFIANZA (R)	0.80	Tabla 1.2.8
DESVIACION NORMAL (Z_r)	0.841	Tabla 1.2.8
DESVIACION ESTANDAR (S_o)	0.45	SIECA 2002
ΔPSI	1.70	Po=4.2 y un Pt=2.5

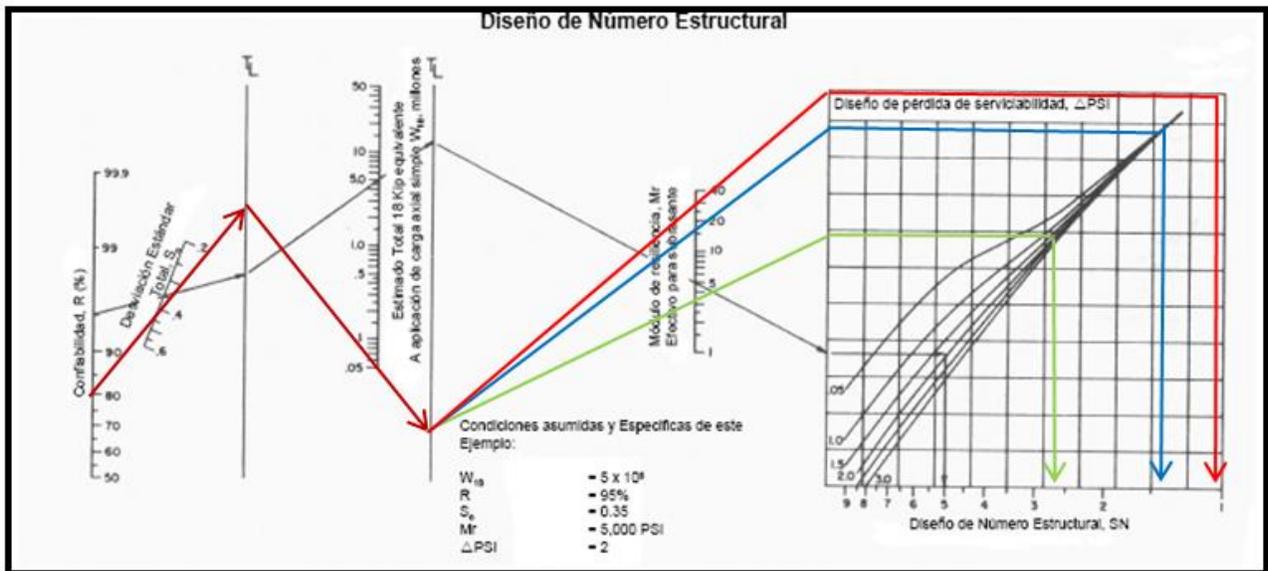
EXCEL y PAINT

Cuadro 37. Datos complementarios de diseño para vía vecinal

CUADRO 38: FORMULA AASHTO EQUILIBRADA VECINAL										
PARTE	EEQ	% confianza	ZR	So	SN	PSI inic.	PSI final	MR	Log EEQ	Balance
BASE	44,413.77	0.80	-0.841	0.45	1.08	4.2	2.5	28000	4.6475	4.6475
SUBBASE	44,413.77	0.80	-0.841	0.45	1.45	4.2	2.5	14800	4.6475	4.6475
SUBRASANTE	44,413.77	0.80	-0.841	0.45	2.74	4.2	2.5	3000	4.6475	4.6475
NUMERO ESTRUCTURAL TOTAL					5.27					

EXCEL y PAINT

Cuadro 38. SN para las capas según la fórmula AASHTO, vía vecinal CBR=2%



PAINT

Figura 68. SN para las capas según el nomograma AASHTO dado por SIECA, vía vecinal CBR=2%

CUADRO 39: ESPESORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL VECINAL				
	MR (psi)	a_n	m_n	SN_n
CARPETA ASFALTICA	400000	0.42	x	1.08
BASE	28000	0.135	1	1.45
SUBBASE	14800	0.11	0.8	2.74
SUBRASANTE	3000	x	x	
ESPESORES				
$SN1 = a1D1$	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
$D1 = SN1/a1$	2.58	6.56	7.5	3.00
$SN2 = a1D1 + a2m2D2$				
$D2 = (SN2 - a1^*D1)/(a2^*m2)$	1.39	3.54	5	2.00
$SN3 = a1D1 + a2m2D2 + a3m3D3$				
$D3 = (SN3 - a1D1 - a2m2D2)/(a3m3)$	13.70	34.79	35	14.00

$$SN3 = a1^*D1 + a2^*m2^*D2 + a3^*m3^*D3$$

2.76	>	2.74	OK!
------	---	------	-----

EXCEL y PAINT

Cuadro 39. Espesores directos resultantes del diseño con los SN obtenidos, vía vecinal CBR=2%

CUADRO 40: ESPESORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL ADOPTADO VECINAL				
	MR (psi)	a_n	m_n	SN_n
CARPETA ASFALTICA	400000	0.42	x	1.08
BASE	28000	0.135	1	1.45
SUBBASE	14800	0.11	0.8	2.74
SUBRASANTE	3000	x	x	
ESPESORES				
$SN1 = a1D1$	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
$D1 = SN1/a1$			5	2.00
$SN2 = a1D1 + a2m2D2$				
$D2 = (SN2 - a1*D1)/(a2*m2)$	4.50	11.44	20	8.00
$SN3 = a1D1 + a2m2D2 + a3m3D3$				
$D3 = (SN3 - a1D1 - a2m2D2)/(a3m3)$	9.26	23.53	30	12.00

$$SN3 = a1*D1 + a2*m2*D2 + a3*m3*D3$$

2.98	>	2.74	OK!
------	---	------	-----

EXCEL y PAINT

Cuadro 40. Espesores recomendados finales resultantes de la optimización constructiva, vía vecinal CBR=2%

Los espesores finales para los cuatro tipos de carreteras considerados en este proyecto se presentan en el Cuadro 41.

CUADRO N°41: ESPESORES DISEÑO CONVENCIONAL (cm)				
CBR = 2%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	45	30	20	20
Subbase	80	80	45	30

EXCEL y PAINT

Cuadro 41. Espesores finales resultantes de la optimización constructiva, CBR=2%

CUADRO 42: ESPESORES DISEÑO CONVENCIONAL (cm)				
CBR = 4%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	45	35	15	7.5
Subbase	50	45	35	30

EXCEL y PAINT

Cuadro 42. Espesores finales resultantes de la optimización constructiva, CBR=4%

Diseño utilizando subrasante con CBR = 4%

Aplicando el mismo procedimiento al utilizado con una subrasante de CBR = 2%, el Cuadro 42 presenta el resumen de los espesores encontrados para los cuatro tipos de carreteras utilizando una subrasante con CBR = 4%.

Diseño con Geotextil

Para efectos del diseño con geotextil se toma como referencia la carretera primaria.

Partiendo de que el diseño convencional está realizado, se procede primeramente con la condición de subrasante con CBR=2% con geotextil como refuerzo y posteriormente con la subrasante CBR=4% con geotextil para estabilización.

Diseño utilizando subrasante con CBR = 2%

Carretera primaria

Dado que se tiene el diseño convencional realizado y mostrado en el Cuadro 41 se procede ahora a revisar el cumplimiento con las especificaciones del Manual CR-2010 y presentadas en el Anexo 2.

La tablilla utilizada para efectos de datos del fabricante es la de Pavco actualizada a febrero del 2010. Esta tabla se presenta en el Anexo 5.

El Cuadro 43 muestra las especificaciones del CR-2010 para estabilización y el cumplimiento del geotextil TR4000 considerado en este caso. Este es el geotextil escogido y que cumple con lo solicitado.

Al revisar la capacidad por el método de la Tira Ancha ASTM D-4595 se obtiene que el geotextil posee capacidad para 75 kN/m. Este dato es el que se necesita comparar con los esfuerzos encontrados mediante el software de análisis de esfuerzo. Para el presente estudio se utilizó el software CEDEM, cuyos datos de entrada se muestran en el Cuadro 44.

En las Figuras 69, 70 y 71 se presentan los resultados del programa, encontrándose que sobre la subrasante a 1.35 m de profundidad se tiene un esfuerzo normal aplicado de 0.0050 MPa (0.0050MN/m²). Si este valor se multiplica por un metro de ancho en el geotextil se obtiene 5.0 kN/m.

Aplicando la metodología por función expuesta en el apartado Diseño con Geotextil, se tiene que:

$$Tadm = Tult/FSp$$

$$FSp = FR_{ID} * FR_{DQB}$$

FSp = Factor de seguridad parcial

FR_{ID} = Factor por instalación

FR_{DQB} = Factor por degradación química

Del Cuadro 15 se toman los factores 1.25 y 1.2 para FR_{ID} y FR_{DQB} respectivamente y se obtiene un Tadm del geotextil de $75/(1.25*1.2) = 50.0$ kN/m, que es un valor extremadamente alto comparado con la resistencia requerida (5.0 kN/m). Esto permite que se puedan disminuir los espesores del paquete estructural en forma iterativa, hasta encontrar los mínimos necesarios en los que los esfuerzos sobre el geotextil sean aceptables.

En este caso particular y, después de varios intentos, se obtiene que eliminando la subbase en su totalidad y manteniendo un espesor mínimo de 30 cm en la base para cumplir con la normativa del CR-2010, el esfuerzo en el geotextil es de 30.2 kN/m, como se muestra en la Figura 73.

Dado entonces el Tadm de 50.0 kN/m y la resistencia requerida de 30.2 kN/m se obtiene un factor de seguridad global (FSg) de 1.66. Este valor es mayor que el 1.3 recomendado, pero el espesor no se puede bajar más por razones de carácter constructivo.

El resultado final es un paquete estructural compuesto por una carpeta asfáltica de 10 cm, una base de 30 cm y el geotextil TR4000 sobre la subrasante.

Carretera secundaria, terciaria y vecinal

El procedimiento aplicado para las vías primarias se utiliza también en estas carreteras, obteniéndose los resultados finales del Cuadro 45.

CUADRO 43: REVISION POR ESTABILIZACION CON GEOTEXTIL TR4000 PRIMARIA					
		CR.2010 ESTAB.	FABRICANTE	UNID	CUMPLIMIENTO
RESISTENCIA AL AGARRE (METODO GRAB)	D4632	1400	2570	N	OK
RESISTENCIA JUNTAS COSIDAS	D4632	1260	2313	N	OK
RESISTENCIA A RASGADURAS (TRAPEZOIDAL)	D4533	500	810	N	OK
RESISTENCIA A AGUJEROS (PUNZONAMIENTO)	D4833	500	1240	N	OK
RESISTENCIA A RUPTURA (MULLEN BURST)	D3786	3500	7590	Kpa	OK
PERMISIVIDAD	D4491	0.05	0.6	S ⁻¹	OK
ABERTURA APARENTE	D4751	< 0.43	0.425	mm	OK
ESTABILIDAD ULTRAVIOLETA	D4355	> 50%	>70%		OK

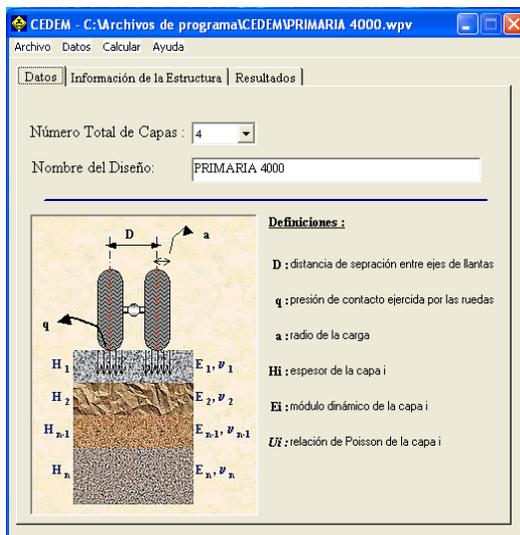
EXCEL y PAINT

Cuadro 43. Cumplimiento de especificaciones CR-2010, Primaria, CBR = 2%

CUADRO 44: DATOS PARA EL SOFTWARE CEDEM PRIMARIA			
NOMBRE PROYECTO: PRIMARIA 4000	CAPAS = 4		
	MR (Mpa)	u (poisson)	H (m)
CARPETA	2758	0.35	0.1
BASE	193	0.35	0.45
SUBBASE	102	0.35	0.8
SUBRASANTE	21	0.45	
RADIO DE CARGA (m)			0.115
PRESION DE CONTACTO (Mpa)			0.69
DISTANCIA ENTRE LLANTAS (m)			0.345

EXCEL y PAINT

Cuadro 44. Datos de entrada para el programa CEDEM



PAINT

Figura 69. Carátula del programa CEDEM

CEDEM - C:\Archivos de programa\CEDEM\PROYECTO UNO\PRIMAR...

Archivo Datos Calcular Ayuda

Datos Información de la Estructura Resultados

Número de Capas : 4

Radio de la Carga (a) : 0.115 [m]

Presión de Contacto (q) : 0.69 [MPa]

Distancia entre Ejes de Llantas (D) : 0.345 [m]

Capa N°	E [MPa]	μ []	H [m]	Ligada / No ligada
1	2758	0.35	0.1	L
2	193	0.35	0.45	L
3	102	0.35	0.8	L
4	21	0.45		
5				
6				

Calcular...
Insertar capa...
Eliminar capa...

PAINT

Figura 70. Datos de entrada en el programa CEDEM

CEDEM - C:\Archivos de programa\CEDEM\PROYECTO UNO\PRIMAR...

Archivo Datos Calcular Ayuda

Datos Información de la Estructura Resultados

Número de Capas : 3

Radio de la Carga (a) : 0.115 [m]

Presión de Contacto (q) : 0.69 [MPa]

Distancia entre Ejes de Llantas (D) : 0.345 [m]

Capa N°	E [MPa]	μ []	H [m]	Ligada / No ligada
1	2758	0.35	0.1	L
2	193	0.35	0.3	L
3	21	0.45		
4				
5				
6				

Calcular...
Insertar capa...
Eliminar capa...

PAINT

Figura 72. Datos de entrada en el programa CEDEM

CEDEM - C:\Archivos de programa\CEDEM\PROYECTO UNO\PRIMAR...

Archivo Datos Calcular Ayuda

Datos Información de la Estructura Resultados

Capa N°	Z [m]	Epsilon T	Sigma T [MPa]	Epsilon Z	Sigma Z [MPa]
1	0.00	379.0E-6	1.8457	-201.0E-6	0.6903
	0.10	-354.0E-6	-1.2542	380.0E-6	0.2305
2	0.10	-354.0E-6	0.0280	1060.0E-6	0.2305
	0.55	-191.0E-6	-0.0323	318.0E-6	0.0404
3	0.55	-191.0E-6	-0.0068	434.0E-6	0.0404
	1.35	-110.0E-6	-0.0145	148.0E-6	0.0050
4	1.35	-110.0E-6	-0.0001	241.0E-6	0.0050
5					
6					

Deflexión : 92.32 [mm/100]

Radio de Curvatura : 119.74 [m]

PAINT

Figura 71. Resultados del programa CEDEM

CEDEM - C:\Archivos de programa\CEDEM\PROYECTO UNO\PRIMAR...

Archivo Datos Calcular Ayuda

Datos Información de la Estructura Resultados

Capa N°	Z [m]	Epsilon T	Sigma T [MPa]	Epsilon Z	Sigma Z [MPa]
1	0.00	467.0E-6	2.1924	-293.0E-6	0.6903
	0.10	-401.0E-6	-1.4480	413.0E-6	0.2141
2	0.10	-401.0E-6	0.0084	1060.0E-6	0.2141
	0.40	-627.0E-6	-0.1601	703.0E-6	0.0302
3	0.40	-627.0E-6	0.0023	1300.0E-6	0.0302
4					
5					
6					

Deflexión : 155.33 [mm/100]

Radio de Curvatura : 101.43 [m]

PAINT

Figura 73. Resultados del programa CEDEM

CUADRO N°45: ESPEORES DISEÑO CON GEOTEXTIL (cm)				
CBR = 2%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	30	30	10	10
Subbase	0	0	30	30
Geotextil	TR4000	TR4000	TR4000	TR4000
FSg > 1.3	1.66	1.66	1.38	1.38

EXCEL y PAINT

Cuadro 45. Espesores finales resultantes con el uso de geotextil, CBR=2%

Diseño utilizando subrasante con CBR = 4%

La condición de CBR de 4% indica que el diseño con geotextil debe realizarse para estabilización de la subrasante. Para tal efecto el Manual CR-2010 especifica los requisitos mínimos que se deben cumplir y que se encuentran en el Anexo 2.

Carretera primaria

Dado que se tiene el diseño previamente hecho de manera convencional con el método AASHTO 1993, se calculan nuevamente los espesores minimizando el coeficiente estructural de capa a_3 en un 50% y corrigiendo el módulo resiliente de la subbase, asumiendo que se contamina durante el periodo de diseño en ese orden, corrigiendo también el coeficiente de humedad m_3 y estableciéndolo en 0.6. El sobreespesor encontrado es la cantidad extra de material que debe ser colocado para cumplir con las condiciones de diseño original con material sano.

En el Cuadro 42 se presentan los espesores obtenidos convencionalmente. En el Cuadro 28 se observan las variables de diseño para tales espesores y en el Cuadro 49 se observan las variables de diseño para la subbase corregida y los espesores requeridos sin el uso del geotextil. También se presenta el Cuadro 48 con las variables de la fórmula AASHTO para el cálculo de los números estructurales SN.

En el Cuadro 50 se presenta el cumplimiento del geotextil de acuerdo con las especificaciones del Manual CR-2010. De acuerdo con las normas AASHTO, y en el caso de geotextil por estabilización, siempre se debe utilizar el de clase 1 o clase III-A del Manual CR-2010.

En el Apéndice 1 se presenta el diseño funcional del geotextil tejido NT4000 cuyos resultados de cumplimiento se presentan en la columna REQUERIDO del Cuadro 50.

Carreteras secundarias, terciarias y vecinales

El procedimiento anteriormente aplicado a la carretera primaria es utilizado para los otros tipos de carreteras. Se obtiene así, como resultados generales, los mismos datos que para la carretera primaria dados en el Cuadro 50, ya que es la misma especificación utilizada.

Los espesores correspondientes para cada tipo de vía, no usándose geotextil se incrementaron y el resultado final se presenta en los Cuadros 46 y 47.

CUADRO N° 46: ESPEORES DISEÑO CONVENCIONAL ESTABILIZADO CON GEOTEXTIL (cm)				
CBR = 4%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	45	35	15	7.5
Subbase	50	45	35	30
Geotextil	NT4000	NT4000	NT4000	NT4000

EXCEL y PAINT

Cuadro 46. Espesores con subrasante CBR=4% y geotextil de estabilización

CUADRO N°47: ESPEORES DEL DISEÑO NO ESTABILIZADO CON GEOTEXTIL (cm)				
CBR = 4%				
CAPA	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
Carpeta Asfáltica	10	10	5	5
Base	45	40	35	25
Subbase	132.5	97.5	70	55

EXCEL y PAINT

Cuadro 47. Espesores resultantes de la contaminación de la subbase por no uso de geotextil, CBR=4%

CUADRO 48: FORMULA AASHTO EQUILIBRADA										
PARTE	Eq.	% confianza	ZR	So	SN	PSI inic.	PSI final	MR	Log Eq	Balance
BASE	13,544,545.24	0.90	- 1.282	0.45	3.23	4.2	2.5	28000	7.1318	7.1318
SUBBASE	13,544,545.24	0.90	- 1.282	0.45	5.29	4.2	2.5	7000	7.1318	7.1318
SUBRASANTE	13,544,545.24	0.90	- 1.282	0.45	5.89	4.2	2.5	5000	7.1318	7.1318
NUMERO ESTRUCTURAL TOTAL					14.41					

EXCEL y PAINT

Cuadro 48. Valores de equilibrio con MR de subbase modificada en carretera primaria CBR=4%

CUADRO 49: ESPESORES ENCONTRADOS DISEÑO CONVENCIONAL ADOPTADO CON SUBBASE CONTAMINADA PRIMARIA				
PRIMARIA	MR (psi)	a _s	m _s	SN _s
CARPETA ASFALTICA	400000	0.43	x	3.23
BASE	28000	0.135	1	5.29
SUBBASE	7000	0.055	0.6	5.89
SUBRASANTE	5000	x	x	
ESPESORES				
SN1 = a1D1	Dn (pulg)	Dn (cm)	Dn (cm)	Dn (pulg)
D1=SN1/a1			10	4.00
SN2 = a1D1+a2m2D2				
D2 = (SN2 - a1*D1)/(a2*m2)	26.48	67.26	45	18.00
SN3 = a1D1+a2m2D2+a3m3D3				
D3 = (SN3 - a1D1 - a2m2D2)/(a3m3)	52.67	133.79	132.5	53.00

$$SN3 = a1*D1 + a2*m2*D2 + a3*m3*D3$$

5.90	>	5.89	OK!
------	---	------	-----

EXCEL y PAINT

Cuadro 49. Espesores finales sin el uso de geotextil de estabilización en carretera primaria CBR=4%

CUADRO 50: ESPECIFICACIONES CR-2010 PARA ESTABILIZACION CON GEOTEXTIL TEJIDO Y NO TEJIDO							
PRIMARIA, SECUNDARIA, TERCIAIA Y VECINAL: RESUMEN ESTABILIZACION (3<CBR=4<8)				TR4000	NT4000		
PROPIEDAD	NORMA	CR.2010 ESTAB.	REQUERIDO	FABRICANTE	FABRICANTE	UNID	CUMPLIMIENTO
RESISTENCIA AL AGARRE (METODO GRAB)	D4632	1400 / 900	680.63	2,570.00	1,070.00	II	OK
RESISTENCIA JUNTAS COSIDAS	90%D4632 GRAB	1260 / 810	612.57	2,313.00	963.00	II	OK
RESISTENCIA A RASGADURAS (TRAPEZOIDAL)	D4533	500 / 350	350.00	810.00	400.00	II	OK
RESISTENCIA A AGUJEROS (PUNZONAMIENTO)	D4833	500 / 350	452.10	1,240.00	590.00	II	OK
RESISTENCIA A RUPTURA (MULLEN BURST)	D3786	3500 / 1700	1,411.92	7,590.00	2,829.00	Kpa	OK
PERMISIVIDAD	D4491	> 0.05	> 0.05	0.6	1.4	S ⁻¹	OK
PERMEABILIDAD	D4491		0.0000001	0.078	0.34	cm/s	OK
ABERTURA APARENTE	D4751	< 0.43	< 0.43	0.425	0.125	mm	OK
ESTABILIDAD ULTRAVIOLETA	D4355	> 50%	> 50%		> 70%		OK
				\$2.93/m2	\$1.88/m2		

EXCEL y PAINT

Cuadro 50. Cumplimiento con especificaciones CR-2010 y diseño funcional para las cuatro carreteras

Presupuestos

Presupuesto de carreteras con subrasante CBR = 2%

Una muestra de la forma en que se realizaron los presupuestos se presenta en el Apéndice 2.

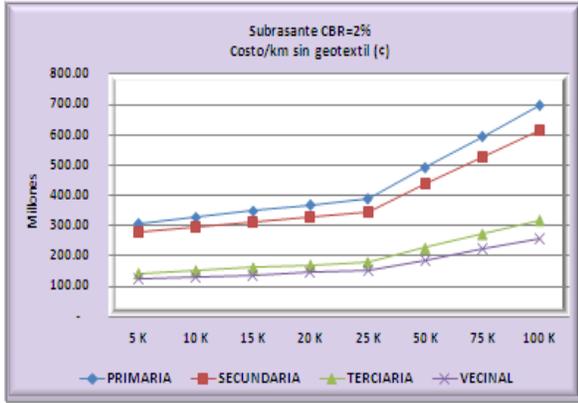
Las distancias de acarreo consideradas fueron 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 y 100 km.

Seguidamente en el Cuadro 51 se presenta el resumen de todos los presupuestos con CBR = 2% y de la Figura 74 a la 81 se muestran las tendencias de los resultados encontrados.

CUADRO 51: RESUMEN DE PRESUPUESTOS				
SUBRASANTE CBR = 2%				
SIN GEOTEXTIL				
ACARREO	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
5 K	307,348,504.90	277,375,017.05	144,571,700.88	124,601,047.92
10 K	327,885,304.90	295,085,817.05	153,776,600.88	131,600,947.92
15 K	348,422,104.90	312,796,617.05	162,981,500.88	138,600,847.92
20 K	368,958,904.90	330,507,417.05	172,186,400.88	145,600,747.92
25 K	389,495,704.90	348,218,217.05	181,391,300.88	152,600,647.92
50 K	492,179,704.90	436,772,217.05	227,415,800.88	187,600,147.92
75 K	594,863,704.90	525,326,217.05	273,440,300.88	222,599,647.92
100 K	697,547,704.90	613,880,217.05	319,464,800.88	257,599,147.92
CON GEOTEXTIL				
ACARREO	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
5 K	190,834,170.65	190,834,170.65	135,912,147.92	135,743,383.44
10 K	195,956,970.65	195,956,970.65	141,520,047.92	141,351,283.44
15 K	201,079,770.65	201,079,770.65	147,127,947.92	146,959,183.44
20 K	206,202,570.65	206,202,570.65	152,735,847.92	152,567,083.44
25 K	211,325,370.65	211,325,370.65	158,343,747.92	158,174,983.44
50 K	236,939,370.65	236,939,370.65	186,383,247.92	186,214,483.44
75 K	262,553,370.65	262,553,370.65	214,422,747.92	214,253,983.44
100 K	288,167,370.65	288,167,370.65	242,462,247.92	242,293,483.44
DIFERENCIA				
ACARREO	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
5 K	116,514,334.26	86,540,846.41	8,659,552.95	- 11,142,335.53
10 K	131,928,334.26	99,128,846.41	12,256,552.95	- 9,750,335.53
15 K	147,342,334.26	111,716,846.41	15,853,552.95	- 8,358,335.53
20 K	162,756,334.26	124,304,846.41	19,450,552.95	- 6,966,335.53
25 K	178,170,334.26	136,892,846.41	23,047,552.95	- 5,574,335.53
50 K	255,240,334.26	199,832,846.41	41,032,552.95	1,385,664.47
75 K	332,310,334.26	262,772,846.41	59,017,552.95	8,345,664.47
100 K	409,380,334.26	325,712,846.41	77,002,552.95	15,305,664.47
DIFERENCIA PORCENTUAL				
ACARREO	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
5 K	37.91	31.20	5.99	- 8.94
10 K	40.24	33.59	7.97	- 7.41
15 K	42.29	35.72	9.73	- 6.03
20 K	44.11	37.61	11.30	- 4.78
25 K	45.74	39.31	12.71	- 3.65
50 K	51.86	45.75	18.04	0.74
75 K	55.86	50.02	21.58	3.75
100 K	58.69	53.06	24.10	5.94

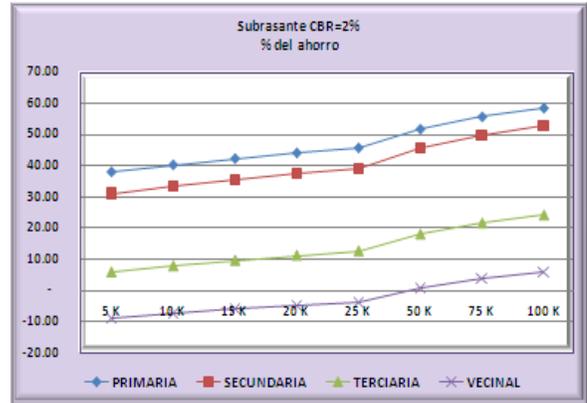
EXCEL y PAINT

Cuadro 51. Resumen general de los presupuestos y ahorros en diseño con geotextil como refuerzo



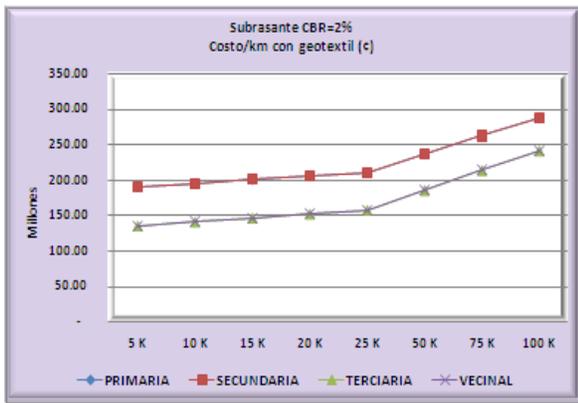
EXCEL y PAINT

Figura 74. Tendencias de costos por km sin geotextil de refuerzo



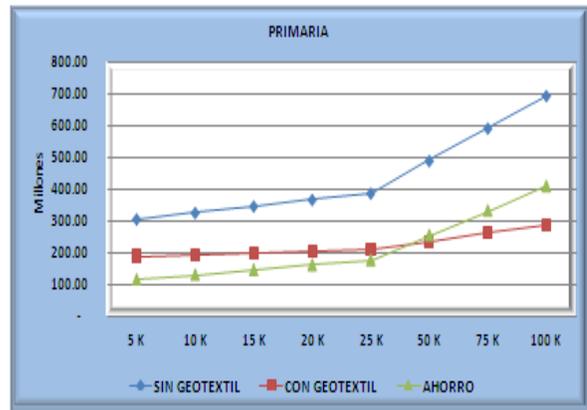
EXCEL y PAINT

Figura 77. Tendencia del ahorro porcentual por km con geotextil como refuerzo



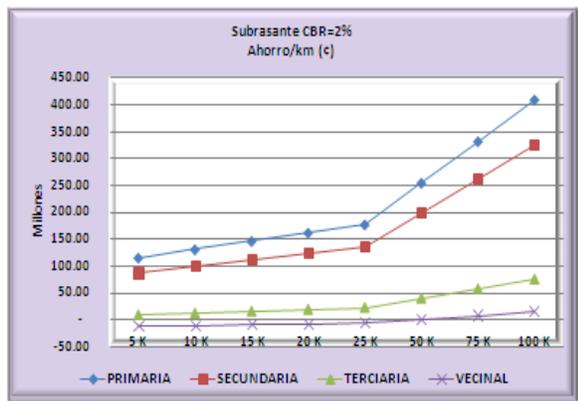
EXCEL y PAINT

Figura 75. Tendencia de costos por km con geotextil como refuerzo



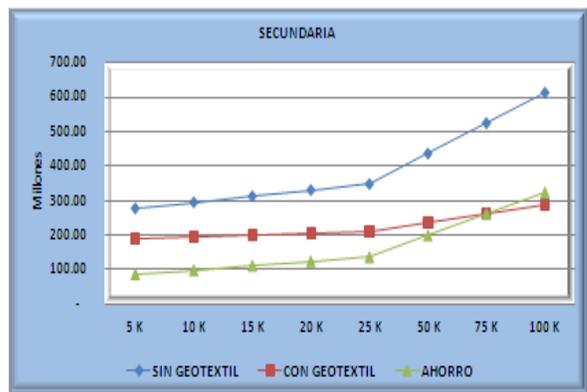
EXCEL y PAINT

Figura 78. Costo por km de carretera primaria con y sin geotextil y el ahorro obtenido



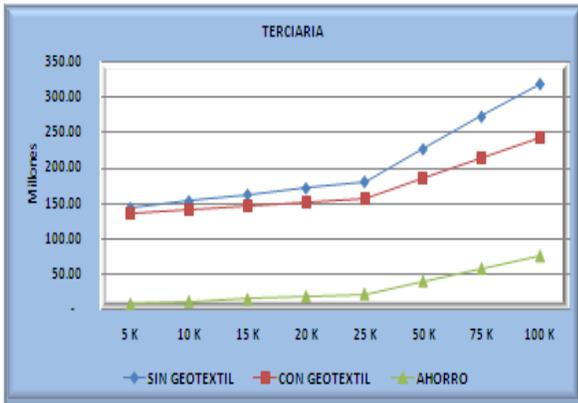
EXCEL y PAINT

Figura 76. Tendencia del ahorro por km con geotextil como refuerzo



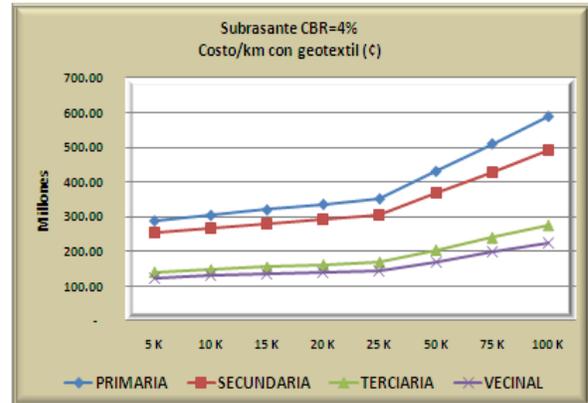
EXCEL y PAINT

Figura 79. Costo por km de carretera secundaria con y sin geotextil y el ahorro obtenido



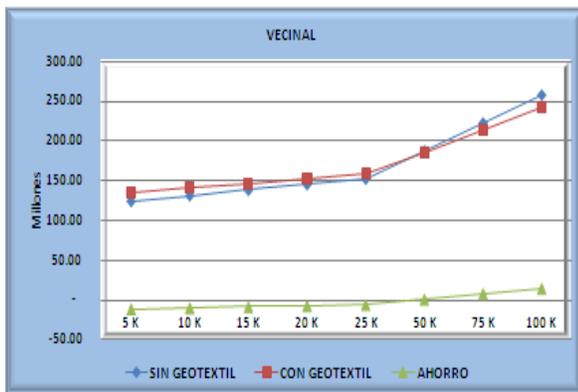
EXCEL y PAINT

Figura 80. Costo por km de carretera terciaria con y sin geotextil y el ahorro obtenido



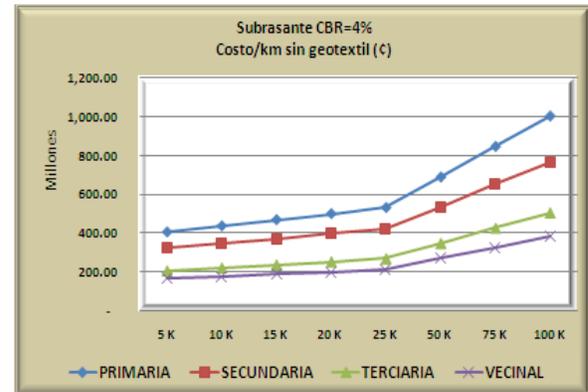
EXCEL y PAINT

Figura 82. Tendencia de costos por km con geotextil como estabilizador



EXCEL y PAINT

Figura 81. Costo por km de carretera vecinal con y sin geotextil y el ahorro obtenido



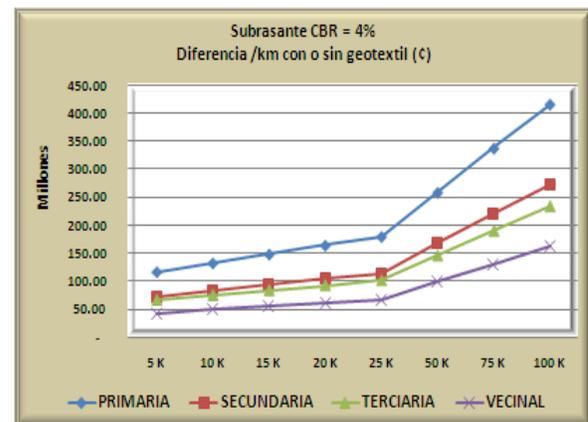
EXCEL y PAINT

Figura 83. Tendencia de costos por km sin geotextil estabilizador

Presupuestos de carreteras con subrasante CBR = 4%

Respecto a los presupuestos obtenidos con el uso de la subrasante con CBR = 4% se presentan los resultados en el Cuadro 52.

De la Figura 82 a la 89 se muestran las tendencias encontradas para los cuatro tipos de carreteras.



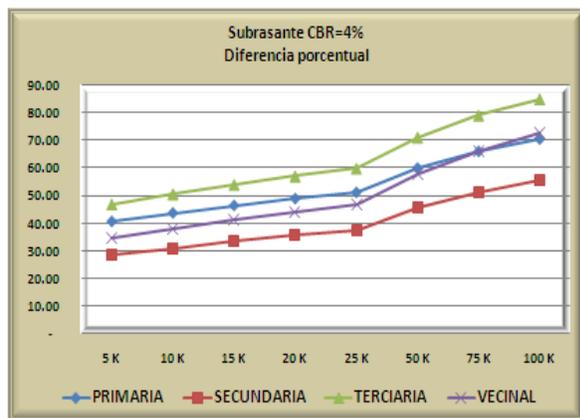
EXCEL y PAINT

Figura 84. Tendencia de la diferencia por km con o sin el geotextil como estabilizador

CUADRO 52: RESUMEN DE PRESUPUESTOS				
SUBRASANTE CBR = 4%				
CON GEOTEXTIL DE ESTABILIZACION				
ACARREO	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
5 K	288,773,858.96	254,363,563.46	141,078,060.47	123,430,287.35
10 K	304,537,658.96	267,443,413.46	148,076,460.47	128,700,687.35
15 K	320,415,458.96	279,323,263.46	155,074,860.47	133,971,087.35
20 K	336,233,258.96	292,403,113.46	162,073,260.47	139,241,487.35
25 K	352,051,058.96	304,888,363.46	169,071,660.47	144,511,887.35
50 K	431,140,058.96	367,288,213.46	204,063,660.47	170,863,887.35
75 K	510,229,058.96	423,687,463.46	239,055,660.47	197,215,887.35
100 K	589,318,058.96	492,086,713.46	274,047,660.47	223,567,887.35
SIN GEOTEXTIL				
ACARREO	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
5 K	405,564,301.46	327,217,324.45	207,055,607.35	166,015,832.09
10 K	437,119,201.46	350,218,624.45	222,841,007.35	177,569,732.09
15 K	468,673,501.46	373,219,324.45	238,626,407.35	189,123,632.09
20 K	500,227,801.46	396,221,224.45	254,411,807.35	200,677,532.09
25 K	531,782,101.46	419,222,524.45	270,197,207.35	212,231,432.09
50 K	689,553,601.46	534,229,024.45	349,124,207.35	270,000,932.09
75 K	847,325,101.46	649,235,524.45	428,051,207.35	327,770,432.09
100 K	1,005,096,601.46	764,242,024.45	506,978,207.35	385,539,932.09
DIFERENCIA				
ACARREO	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
5 K	116,785,042.51	72,247,761.00	65,977,547.47	42,585,544.74
10 K	132,521,542.51	82,769,211.00	74,764,547.47	48,869,044.74
15 K	148,258,042.51	93,290,661.00	83,551,547.47	55,152,544.74
20 K	163,994,542.51	103,812,111.00	92,338,547.47	61,436,044.74
25 K	179,731,042.51	114,333,561.00	101,125,547.47	67,719,544.74
50 K	258,413,542.51	166,340,811.00	145,060,547.47	99,137,044.74
75 K	337,096,042.51	219,548,061.00	188,995,547.47	130,554,544.74
100 K	415,778,542.51	272,155,311.00	232,930,547.47	161,972,044.74
DIFERENCIA PORCENTUAL				
ACARREO	PRIMARIA	SECUNDARIA	TERCIARIA	VECINAL
5 K	40.44	28.34	46.77	34.50
10 K	43.51	30.95	50.49	37.97
15 K	46.27	33.33	53.88	41.17
20 K	48.77	35.50	56.97	44.12
25 K	51.05	37.50	59.81	46.86
50 K	59.34	45.45	71.09	58.02
75 K	66.07	51.09	79.06	66.20
100 K	70.55	55.31	85.00	72.45

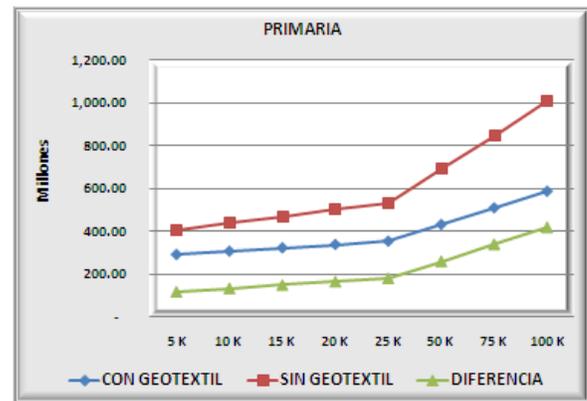
EXCEL y PAINT

Cuadro 52. Resumen general de los presupuestos y diferencias en diseño con geotextil como estabilizador



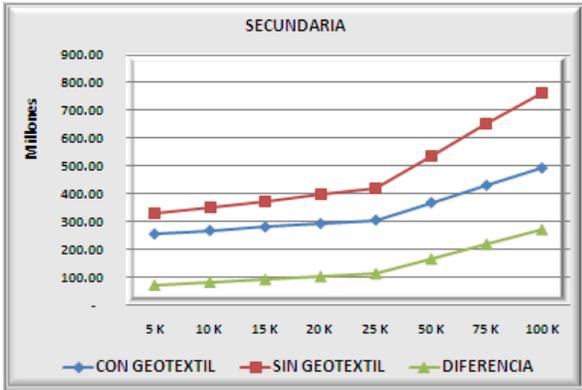
EXCEL y PAINT

Figura 85. Tendencia de la diferencia porcentual por km con o sin el uso de geotextil como estabilizador



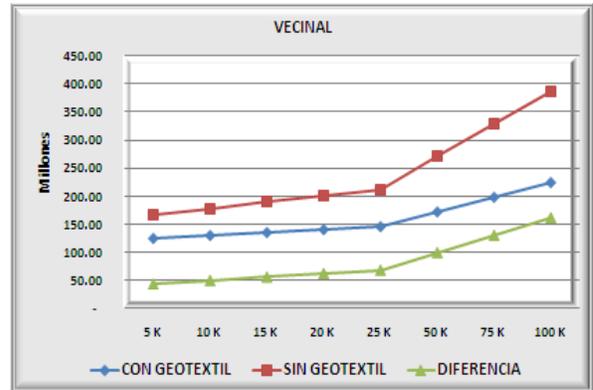
EXCEL y PAINT

Figura 86. Costo por km de carretera primaria con y sin geotextil estabilizador y la diferencia obtenida



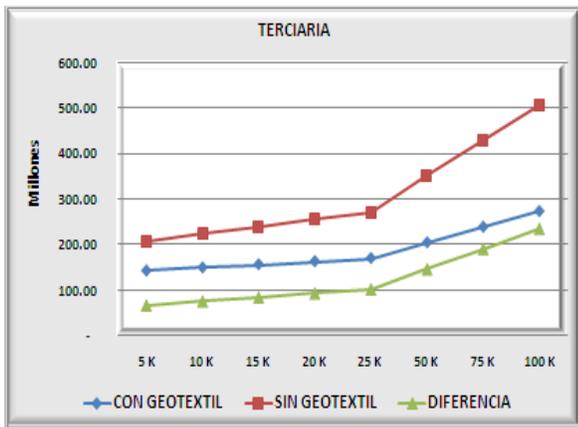
EXCEL y PAINT

Figura 87. Costo por km de carretera secundaria con y sin geotextil estabilizador y la diferencia obtenida



EXCEL y PAINT

Figura 89. Costo por km de carretera vecinal con y sin geotextil estabilizador y la diferencia obtenida



EXCEL y PAINT

Figura 88. Costo por km de carretera terciaria con y sin geotextil estabilizador y la diferencia obtenida

Análisis de los resultados

Análisis Técnico

Situación del Diseño de Caminos por las Municipalidades

Los datos encontrados con el cuestionario entregado a los Directores Técnicos de las respectivas Unidades Técnicas de Gestión Vial Municipal, arrojan resultados que indican el gran trabajo que en materia de ingeniería de caminos falta por realizar. Este estudio fue relativamente somero ya que apenas el 6% de los municipios fue consultado, pero permite cuantitativamente, tener una mejor percepción del desempeño municipal en materia de caminos.

Según los resultados del cuestionario, se encontró que:

- a) Los inventarios viales no se hallan actualizados en ninguna de las municipalidades. Por lo tanto, tampoco poseen lo estimado en kilómetros de caminos clasificados, de acuerdo con la los tipos establecidos en la Ley de Caminos y que generarían, a la postre, las estimaciones reales presupuestarias que cada municipalidad debe requerir anualmente, tanto en mantenimiento como en reconstrucción o construcción de caminos nuevos. Las Figuras 32 y 33 son representativas de lo especificado.
- b) Respecto al TPDA algunas municipalidades mencionan que tienen cierta información al respecto. En este sentido, cabe mencionar que cuando se realizan los inventarios de caminos uno de los datos de complemento es tener un TPDA de cada camino. Sin embargo, y

aunque alguna municipalidad menciona tenerlo, estos TPDA son realizados durante el recorrido del inventario y no constituyen una información confiable para efectos de realizar diseños de caminos, dado que se incluyen motocicletas, automotores parqueados en las vecindades que no necesariamente transitan todos los días, etc. Con los datos obtenidos y presentados en las Figuras 34, 35 y 36, se determina que las municipalidades no poseen TPDA para efectos de diseños de caminos.

- c) Los CBR no son datos que las municipalidades posean de acuerdo con la Figura 39.
- d) Las fuentes de materiales para base y subbase que utilizan las municipalidades quedan bastante lejos para efectos del acarreo, puesto que dentro del mismo cantón no se tienen las concesiones según lo muestran las Figuras 3.1.6 y 3.1.7. Para el trámite de concesiones las municipalidades tienen ciertos privilegios a la hora de realizar los trámites, según el Decreto 20983. Sin embargo, normalmente los sitios para explotación están en predios privados que muchas veces dificulta el acceso y aprovechamiento. Por otro lado, el obligatorio Estudio de Impacto Ambiental debe licitarse debido a su alto costo. Además, de acuerdo con la Figura 39, aunque algunas municipalidades afirman que poseen datos de la caracterización físico-mecánica de los materiales, tal afirmación se dirige a los materiales que compran en las fuentes privadas. Las fuentes de tipo privado normalmente brindan esta información, dado que las ventas públicas que realizan deben

- cumplir con las exigencias que los carteles solicitan.
- e) Cuando se consulta sobre las existencias de plantas mezcladoras de concreto hidráulico o asfáltico, se llega a conocer que dichas plantas no necesariamente se encuentran en el cantón. Además, a nivel nacional, existen pocas plantas debido a su alto costo de instalación y operación. No obstante, la mayoría de las municipalidades tienen a disposición tales plantas, según se indica en la Figura 40. Sin embargo, y de acuerdo con la Figura 41 el acarreo de tales materiales para capas de rodamiento se vuelve muy caro por sus distancias que llegan hasta los 75 kilómetros.
 - f) El asunto del diseño de carreteras municipales va ligado a todo lo anterior y de la Figura 42 a la 43 se ilustran muy bien la forma en que se trata este asunto en las Unidades Técnicas Municipales. En éstas, desde el punto de vista administrativo, el compromiso hacia los diseños de caminos no existe; y aunque los Directores Técnicos mencionan tener algunas normativas en tal sentido, no se posee software de diseños disponibles que permita la agilización del diseño, el cual prácticamente no se realiza, tal y como se determina claramente en la Figura 44.
 - g) En la Figura 46 se pueden observar las justificaciones que llevan a las municipalidades a no desarrollar un compromiso con el diseño de caminos. Una respuesta muy común fue “no hay presupuesto”. No obstante, tal afirmación llama la atención debido a que, del presupuesto que anualmente las municipalidades reciben para los caminos, no todo va directamente a la colocación de material en las rutas. Gran cantidad de tales partidas se quedan en la gestión administrativa que, aparte de sostener la oficina, deben inyectar altas sumas en mantenimiento y operación de maquinaria y equipo menor propio.
 - h) La Figura 47 confirma la falta de formación técnica respecto al diseño de caminos, por parte de los Directores Técnicos Municipales. Esto es preocupante porque muchas veces estos

puestos los desempeñan ingenieros cuya experiencia no ha sido como ingeniero de caminos, lo que significa una limitante. De importancia es, sin lugar a dudas, el rol que puedan desempeñar instituciones tales como el MOPT, LANAMME y las universidades públicas respecto de la asesoría que puedan brindarle a estos ingenieros.

- i) Finalmente, el Cuadro 22 muestra las recomendaciones que los Directores Técnicos Municipales hacen respecto a cómo alargar la vida útil de los caminos con las inversiones que se les aplican. Aunque las tres últimas municipalidades de tal cuadro fueron congruentes en su apreciación, los dos temas planteados por las primeras son de extrema valía. Como se puede observar el tema del presupuesto para atender la totalidad de los caminos sigue siendo un asunto relevante. El tema de la calidad en la ejecución de los trabajos que garantice mayor durabilidad de la inversión y el manejo de la injerencia política hacia el aprovechamiento del recurso técnico que maximice la inversión de los caminos, son asuntos que no deben pasar desapercibidos en la administración de los recursos públicos dedicados a los caminos.

Diseño Convencional con el Método AASHTO 1993

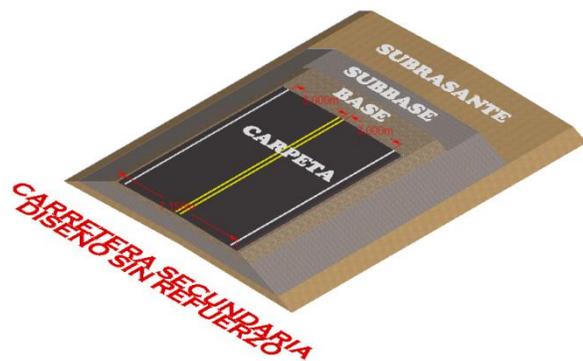
El resultado de los ejes equivalentes de diseño (EEQ) para cada tipo de carretera se presenta en el Anexo 4.

Las características geométricas que representan las cuatro carreteras se establecen en las Figuras 12 y 13.

Los espesores para cada tipo de carretera que se obtuvieron con la aplicación de ésta metodología, tanto para subrasante con CBR=2% como con CBR=4%, se muestran en los Cuadros 41 y 42 respectivamente. Se nota la poca diferencia que existe en los resultados de los espesores de la subbase y base entre las carreteras. Estos espesores, aunque parezcan no importantes, pueden representar millones de

colones de diferencia en la ejecución de un proyecto de apenas unos kilómetros. La razón de esta relativa poca diferencia en los espesores se debe a que la capacidad de soporte de las subrasantes utilizadas, está muy cercana entre sí. Sin embargo, toma importancia el hecho de que la metodología AASHTO 1993, aún para valores tan cercanos de CBR en la subrasante, ofrece resultados que pueden volverse relevantes ante distancias de acarreo significativos.

Las Figuras 90 y 91 muestran el resultado de los espesores obtenidos para una



SKETCHUP y PAINT

Figura 90. Perspectiva del resultado del diseño convencional de una carretera secundaria para subrasante con CBR=2%



SKETCHUP y PAINT

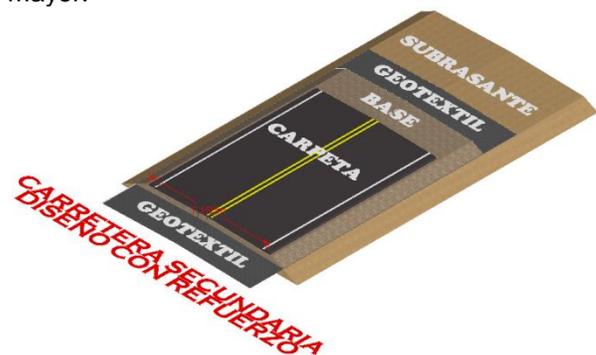
Figura 91. Espesores resultantes del diseño convencional de una carretera secundaria para subrasante con CBR=2%

vía secundaria con subrasante CBR=2%. Se puede observar el gran espesor necesario para todas las capas producto de la debilidad de la subrasante.

Diseño con Geotextil

Subrasante con CBR=2%

Aplicando el método de diseño por refuerzo con geotextil para la condición CBR=2%, se muestra en la Figura 92 la perspectiva de la misma ruta secundaria con el refuerzo. Asimismo se indican en la Figura 93 los espesores resultantes para cada capa. Normalmente los espesores de base permanecen menores porque el precio suele ser mayor.



SKETCHUP y PAINT

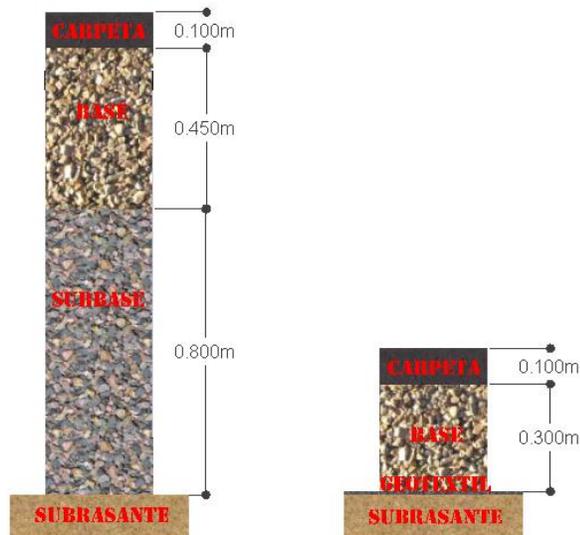
Figura 92. Perspectiva del resultado del diseño con geotextil de refuerzo de una carretera secundaria para subrasante con CBR=2%



SKETCHUP y PAINT

Figura 93. Espesores resultantes del diseño con geotextil de refuerzo de una carretera secundaria para subrasante con CBR=2%

Las Figuras de la 94 a la 96 muestran esquemáticamente las diferencias en los diseños por refuerzo con geotextil de los otros tipos de carreteras respecto a los espesores con el diseño convencional AASHTO 1993.



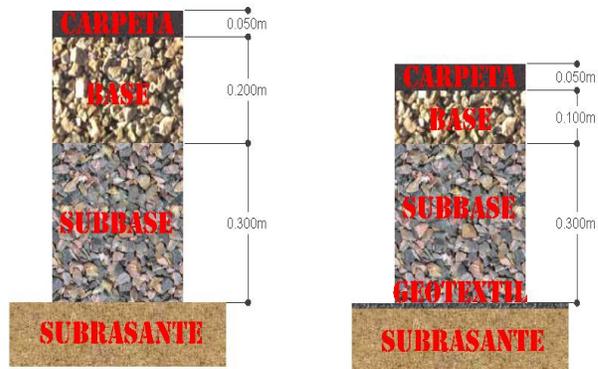
SKETCHUP y PAINT

Figura 94. Diferencias en espesores resultantes en carretera primaria para subrasante con CBR=2%



SKETCHUP y PAINT

Figura 95. Diferencias en espesores resultantes en carretera terciaria para subrasante con CBR=2%



SKETCHUP y PAINT

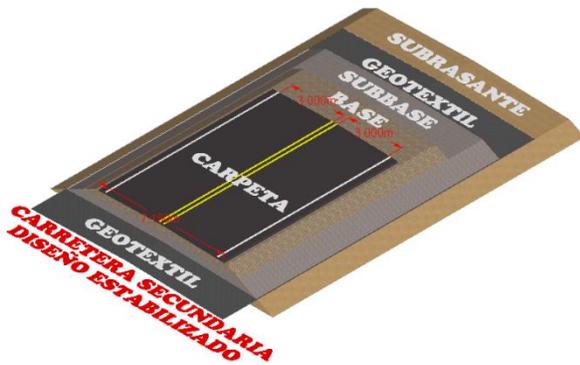
Figura 96. Diferencias en espesores resultantes en carretera vecinal para subrasante con CBR=2%

Como se puede observar en las figuras comparativas de espesores dadas, las diferencias de espesores son representativas. En el caso de las carreteras primarias se terminó eliminando la capa subbase producto de la alta resistencia que ofrece el geotextil de refuerzo. El geotextil seleccionado, cumpliendo primeramente con las especificaciones del Manual CR-2010 para efectos de estabilización de la subrasante, resultó con alta capacidad para la prueba de la Tira Ancha de 75 kN/m. En el Cuadro 45 se puede observar un factor de seguridad global (FSg) de 1.66 que pudo haberse optimizado hasta un valor de 1.3, bajando aún más el espesor de la base. Sin embargo, tal espesor no puede ser menor a los 30 cm de acuerdo con lo especificado para el uso de capas sobre geotextiles en el Manual CR-2010. Para las carreteras terciarias y vecinales se observó que la subbase no se pudo eliminar por completo y se colocó un espesor mínimo de base de 10 cm según la normativa del Cuadro 20, sobre la subbase mínima de 30 cm para efectos constructivos. Igualmente el Factor de Seguridad Global (FSg) se pudo optimizar hasta 1.38.

Es notorio el gran ahorro en los espesores cuando se utiliza un geotextil especificado para estabilización y se optimiza como refuerzo. En el caso de las vías terciarias y vecinales pudo buscarse un geotextil de mayor capacidad a la Tira Ancha y eliminar por completo la capa base. En este caso se decidió mantener el geotextil constante en las cuatro carreteras para efectos de visualizar su influencia en términos generales.

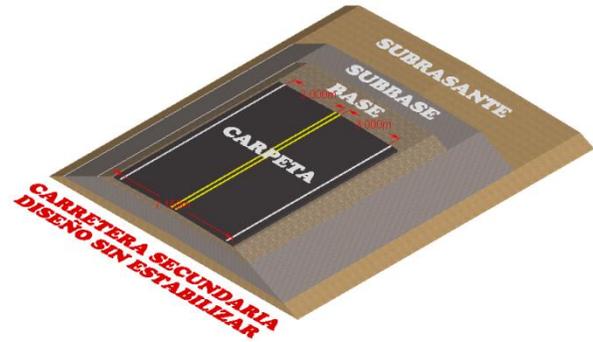
Subrasante con CBR=4%

Aplicando el método de diseño por estabilización con geotextil para la condición CBR=4%, se muestra en las Figuras 97 y 98 la perspectiva de la misma ruta secundaria con el geotextil ubicado sobre la subrasante y sin el geotextil, respectivamente. En la Figura 99 presenta, a la izquierda, los espesores resultantes para cada capa usando el método convencional y el geotextil de estabilización y ,a la derecha de la figura, los espesores encontrados sin la colocación del geotextil. Este sobreespesor es producto de la disminución en la capacidad de soporte de la subbase por la contaminación con finos, es decir, en su coeficiente estructural de capa a_3 , su disminución en la capacidad de drenaje m_3 y su módulo resiliente MR.



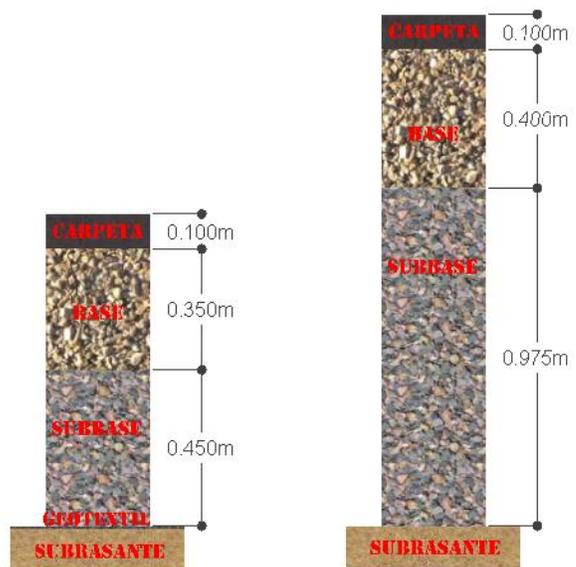
SKETCHUP y PAINT

Figura 97. Perspectiva del resultado del diseño convencional de una carretera secundaria para subrasante con CBR=4% con geotextil estabilizador



SKETCHUP y PAINT

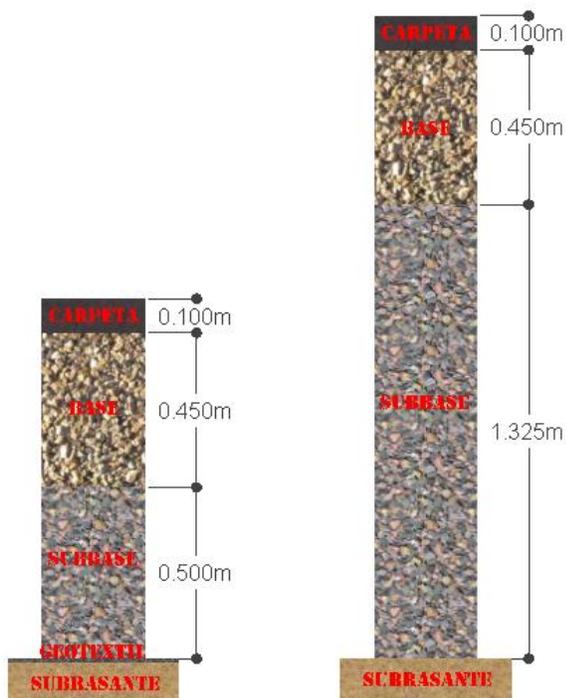
Figura 98. Perspectiva del resultado del diseño convencional de una carretera secundaria para subrasante con CBR=4% sin geotextil estabilizador



SKETCHUP y PAINT

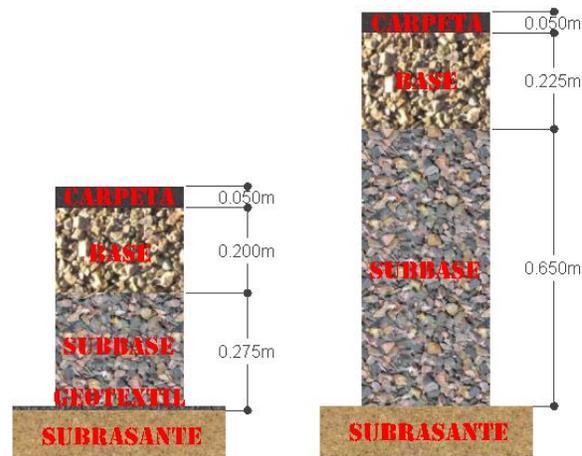
Figura 99. Diferencias en espesores resultantes en carretera secundaria para subrasante con CBR=4% y geotextil como elemento estabilizador

Para las demás carreteras, los espesores encontrados con y sin el geotextil estabilizador se ilustran de la Figura 100 a la 102.



SKETCHUP y PAINT

Figura 100. Diferencias en espesores resultantes en carretera primaria para subrasante con CBR=4%



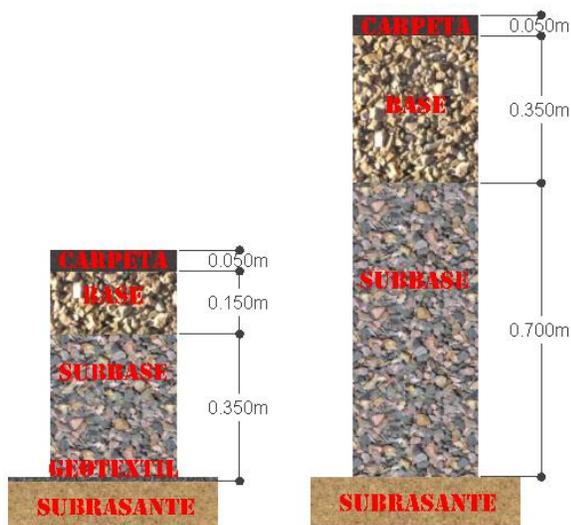
SKETCHUP y PAINT

Figura 102. Diferencias en espesores resultantes en carretera vecinal para subrasante con CBR=4%

Es importante observar lo relevante que se vuelven los espesores requeridos para equiparar el beneficio de la no contaminación de la subbase.

La afirmación que Koerner hace en su libro y que dice **10 kg de piedra sobre 10 kg de barro suman 20 kg de barro**, es el fundamento de estos diseños. Realmente la magnitud de la contaminación dentro del período de diseño de un camino, solamente se puede conocer mediante el control de este aspecto en muestras de sitio a lo largo del tiempo. La experiencia ingenieril juega un papel importante en la determinación del porcentaje en que debe disminuirse la capacidad estructural de la subbase contaminada para el cálculo de los espesores. La contaminación como se muestra en las Figuras 23 y 24 dependerá de la granulometría de la subbase, de la clase de finos (arcillas, limos, etc), de las cargas aplicadas, de la humedad, etc. Los espesores encontrados en estos diseños se calcularon considerando una disminución de capacidad del 50% en la subbase, como lo aplican los departamentos de ingeniería de los fabricantes.

Se debe recalcar que, de acuerdo con la Figura 50, el geotextil utilizado como resultado del diseño para las cuatro carreteras es el No Tejido NT4000 por su precio comparativo con el Tejido TR4000. Estos dos tipos de geotextil son los que cumplen las exigencias de las especificaciones del Manual CR-2010 presentadas en el Anexo 2. En el diseño de un



SKETCHUP y PAINT

Figura 101. Diferencias en espesores resultantes en carretera terciaria para subrasante con CBR=4%

camino por estabilización o separación dado por especificación, es aplicable a caminos públicos por efecto de la legalidad que conlleva. En el caso de caminos privados, el ingeniero puede tomarse el atrevimiento de no seguir especificaciones y realizar el diseño funcional con los resultados de la columna REQUERIDO del Cuadro 50. En el caso de este proyecto se cumple con las especificaciones del Manual CR-2010.

Análisis de Costos

Presupuestos

En términos generales, los montos por kilómetro de cada carretera y que se presentan en los Cuadros 51 y 52 son altos. Esto se atribuye a lo siguiente:

- a) Los niveles de valor de CBR con que se está trabajando para la subrasante son muy bajos. Esto lleva inevitablemente a tener grandes espesores en el diseño convencional sin geotextil.
- b) Los acarrees contemplados en kilómetros para los cálculos son extremadamente largos y elevan considerablemente los montos.
- c) Los precios unitarios utilizados en la maquinaria son los más elevados que se utilizan en el país, pero representan los precios que el CONAVI utiliza en sus contrataciones.

Obviamente, cuando se reciben ofertas para una licitación de carreteras y ante tanta competencia existente en el ámbito nacional, los montos por kilómetros tienden a la baja. Se considera también el hecho de que normalmente las longitudes licitadas van mucho más allá de un kilómetro, permitiendo que los costos indirectos de las empresas bajen.

Los presupuestos anteriores no van en la dirección de ganar una licitación y más bien deben reflejar los verdaderos precios de las carreteras a la luz de la realidad nacional, sobretodo con los puntos b y c mencionados. Por ello, y para efectos comparativos entre el diseño

convencional y con geotextil, tales montos son totalmente válidos.

Presupuestos con CBR=2%

Las tendencias de los presupuestos cuando se utiliza una subrasante con CBR=2% se visualizan en las Figura 74 a la 77.

Se puede observar fácilmente en las Figuras 74 y 75 el comportamiento de las diferencias en los presupuestos cuando se refuerzan las cuatro carreteras. Primeramente se puede observar la diferencia sustancial en los montos con y sin geotextil de refuerzo.

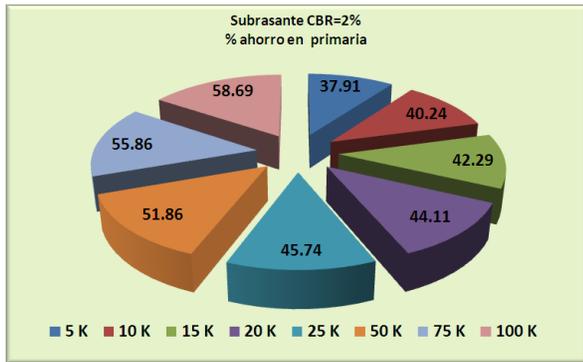
Las curvas de la primaria y secundaria en la Figura 75 son iguales, dado que los espesores del paquete estructural utilizando el geotextil tejido TR4000 quedaron iguales, en virtud de que no se deben colocar espesores menores a 30 cm sobre el geotextil por aspectos constructivos con la maquinaria, tal y como lo solicita el Manual CR-2010. Lo mismo sucede para las carreteras terciarias y vecinales de la misma figura.

En las Figuras 76 y 77 se puede observar la tendencia del ahorro que se tiene cuando se refuerzan las carreteras con geotextil. La primera de ellas muestra el comportamiento del ahorro en montos. Se puede observar que para la carretera vecinal, el geotextil se vuelve más caro a distancias relativamente cortas. Es a partir de los 50 kilómetros que tal elemento comienza a convertirse en una buena alternativa. En tal sentido se puede entender que el geotextil también tiene su precio y puede no ser una alternativa económica para caminos con paquetes estructurales menores o con fuentes de materiales relativamente cerca. La Figura 77 muestra el mismo comportamiento del ahorro entre lo convencional y el uso de geotextil como refuerzo en términos porcentuales. En tal figura, en términos generales, se observa que el comportamiento del ahorro en todas las carreteras tiene la misma tendencia. Sin embargo, es digno de notar que los porcentajes de ahorro para la primaria varían desde 37.91% para 5 km de acarrees y hasta 58.69% para 100 km. Esto es sencillamente relevante cuando se trata de inversiones tan altas como son las carreteras. Las demás carreteras tienen porcentajes menores de ahorro pero igualmente

importantes, no así la vecinal que no muestra ahorros para acarrees menores a los 50 km.

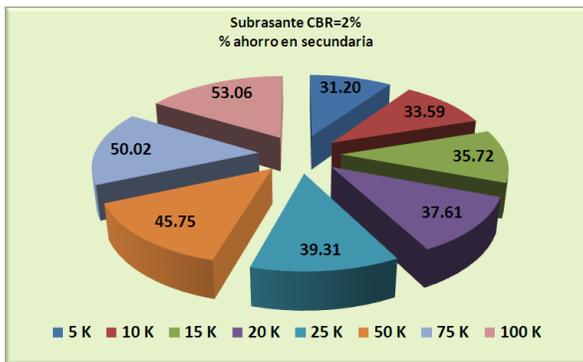
Para cada tipo de carretera, en las Figuras de la 78 a la 81 se muestran las tendencias de los presupuestos con y sin geotextil y el ahorro que se da con el uso del geotextil como refuerzo. En las Figuras 103 a las 106 se presentan estos porcentajes.

NOTA: *Estos gráficos presentados no deben considerarse como una sumatoria del 100%.*



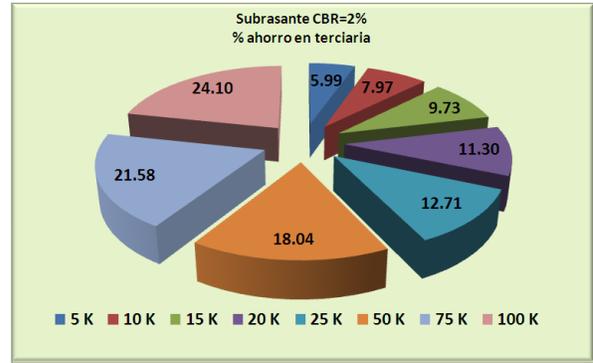
EXCEL y PAINT

Figura 103. *Porcentajes de ahorros en carretera primaria por refuerzo con geotextil y subrasante con CBR=2%*



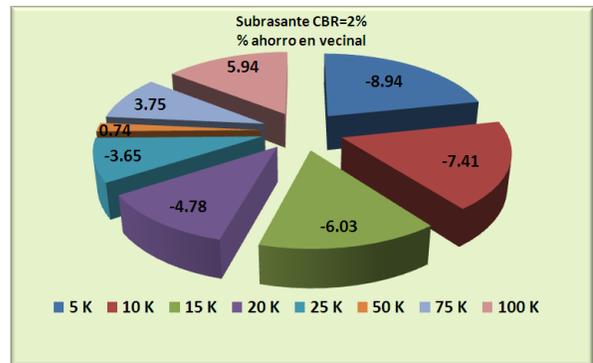
EXCEL y PAINT

Figura 104. *Porcentajes de ahorros en carretera secundaria por refuerzo con geotextil y subrasante con CBR=2%*



EXCEL y PAINT

Figura 105. *Porcentajes de ahorros en carretera terciaria por refuerzo con geotextil y subrasante con CBR=2%*



EXCEL y PAINT

Figura 106. *Porcentajes de ahorros en carretera vecinal por refuerzo con geotextil y subrasante con CBR=2%*

Tanto para la carretera primaria como para la secundaria, la participación del geotextil como refuerzo vuelve el ahorro tan significativo que, respectivamente, para distancias de acarreo de 50 km y 75 km, tal diferencia duplica el valor de la carretera utilizando el geotextil.

En la carretera terciaria el ahorro encontrado tiene el mismo comportamiento que con la primaria. Pero debido a los volúmenes bajos de materiales que requiere el diseño, los ahorros difícilmente llegan a alcanzar el valor de la carretera usando el geotextil de refuerzo, como sucede con el caso de las primarias.

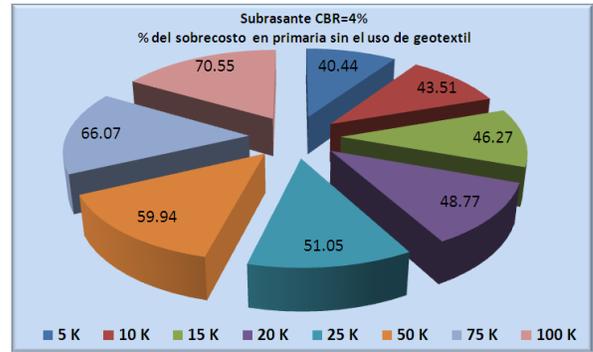
Respecto a la carretera vecinal es evidente, según las Figuras 81 y 106, que el geotextil a cortas distancias de acarreo y con espesores relativamente menores, no es una opción viable desde el punto de vista económico.

Presupuesto con CBR=4%

De la Figura 82 a la 89 se presenta la tendencia de los presupuestos para las cuatro carreteras, cuando se tiene una subrasante con CBR=4%.

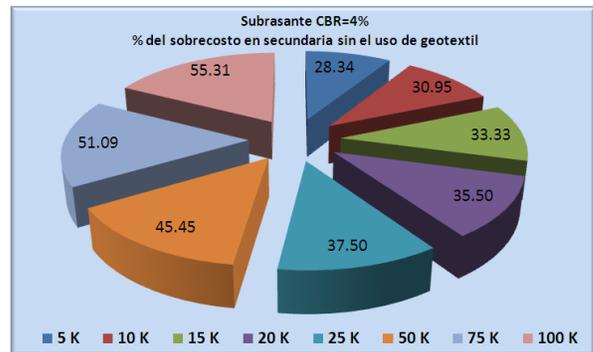
Las tendencias de los presupuestos para las cuatro carreteras con y sin el geotextil de estabilización tienen el mismo comportamiento según las Figuras 82 y 83, dado que el geotextil en este diseño, aunque aporta refuerzo, no es considerado con aporte estructural y, lo que si está claro, es que evita la contaminación de la subbase. En vista de que el diseño convencional es el que se aplica para los espesores con una calidad disminuida de la subbase, los espesores de las capas de subbase y base son los que se ven incrementados, obteniendo, por lo tanto, montos más altos en los presupuesto, aunque en una proporción constante. La Figura 84 muestra, de forma evidente, este comportamiento en los montos.

Cuando se realiza una revisión porcentual del incremento por sobreespesores que evita el geotextil de estabilización, se puede observar la importancia que tienen los costos de las carreteras a medida que estas tengan menores espesores (Véase la Figura 85) En otras palabras y porcentualmente hablando, el geotextil de estabilización ayuda en mayor medida a las carreteras vecinales, y en el mismo orden a las demás. Se puede observar en la Figura 107 que la carretera primaria para acarreo de 5 km requiere un sobrecosto por no uso del geotextil del 40.44% y para 100 km de 70.55%. En el otro extremo, según la Figura 110, para la carretera vecinal se tienen sobrecostos de 34.50% y 72.45% para 5 km y 100 km respectivamente. Es decir, para la primaria existe una variación porcentual para ese rango de acarreo de 30.11% mientras que para la vecinal tal efecto es de 37.95%. Resulta evidente el resultado que tienen los sobrecostos para las dos carreteras comparadas.



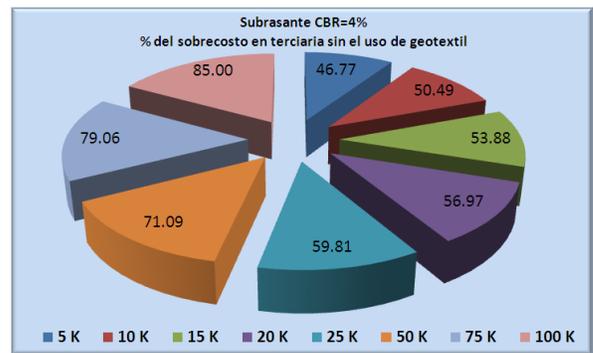
EXCEL y PAINT

Figura 107. Porcentajes del sobrecosto en primaria por no uso del geotextil estabilizador con subrasante CBR=4%



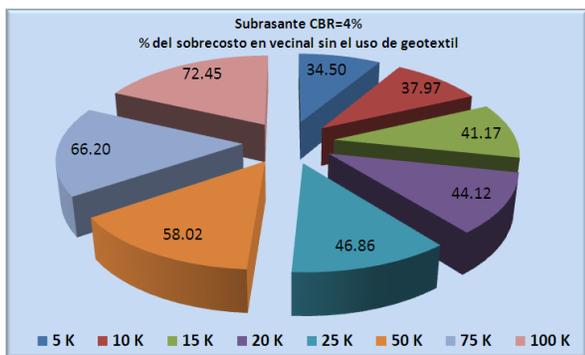
EXCEL y PAINT

Figura 108. Porcentajes del sobrecosto en secundaria por no uso del geotextil estabilizador con subrasante CBR=4%



EXCEL y PAINT

Figura 109. Porcentajes del sobrecosto en terciaria por no uso del geotextil estabilizador con subrasante CBR=4%



EXCEL y PAINT

Figura 110. Porcentajes del sobrecosto en vecinal por no uso del geotextil estabilizador con subrasante CBR=4%

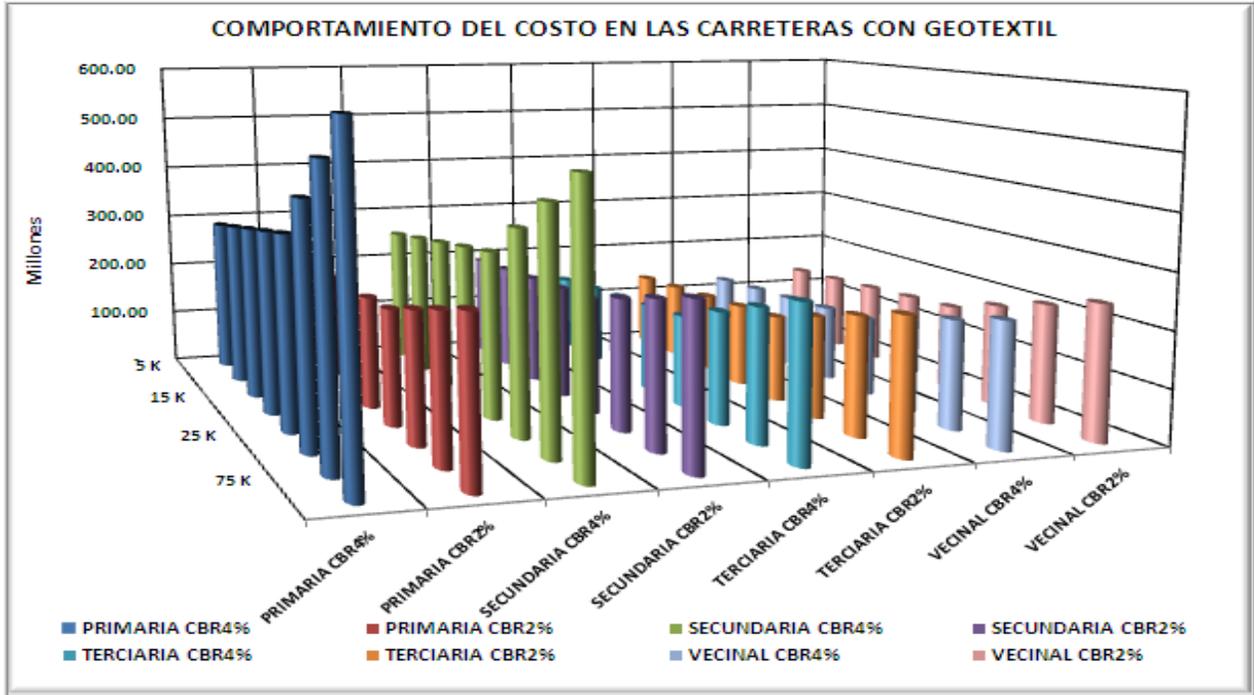
Para todas las carreteras según se observa de las Figuras 86 a 89, el comportamiento del incremento en el presupuesto por sobreespesores por no uso del geotextil se mantiene con la misma tendencia.

En términos generales, y para diseños con subrasantes de CBR=2%, los porcentajes de ahorro con geotextil de refuerzo pueden significar porcentajes de 37.91% para primarias, 31.20% para secundarias, 5.99% para terciarias y no ahorro para vecinales para acarreo de 5 km.

En orden creciente de acarreo tales porcentajes crecen sustancialmente. Por otro lado, para la misma distancia de acarreo y para diseño con geotextil de estabilización con subrasantes con CBR=4%, los porcentajes de ahorro en primarias son de 40.44%, en secundarias de 28.34%, en terciarias de 46.77% y en vecinales de 34.50%. Se debe entender que este ahorro se da por no colocar los sobreespesores manteniendo el paquete estructural sin contaminación por los finos de la subrasante, durante el periodo de diseño para la que fue proyectada la carretera.

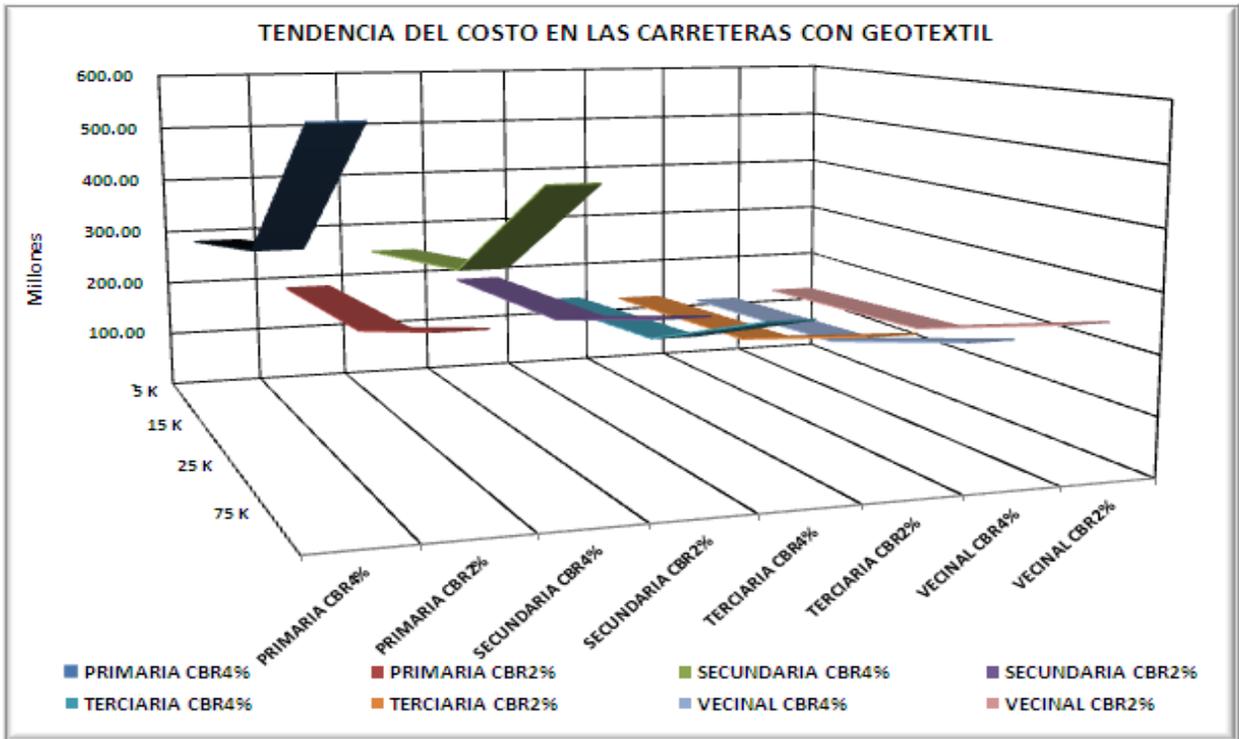
Las Figuras 111 a 116 muestran en términos generales el comportamiento de los presupuestos con y sin geotextil. Los datos que se utilizaron para elaborar cada figura se encuentran en los Cuadros 51 y 52. Para una mejor visión de la tendencia de los presupuestos en la figuras no se muestran los datos de cada uno de ellos.

Es importante, dado lo anterior, la consideración que debería tener un elemento alternativo para los diseños de caminos como el geotextil, cuando se tienen subrasantes de baja y mediana capacidad de soporte.



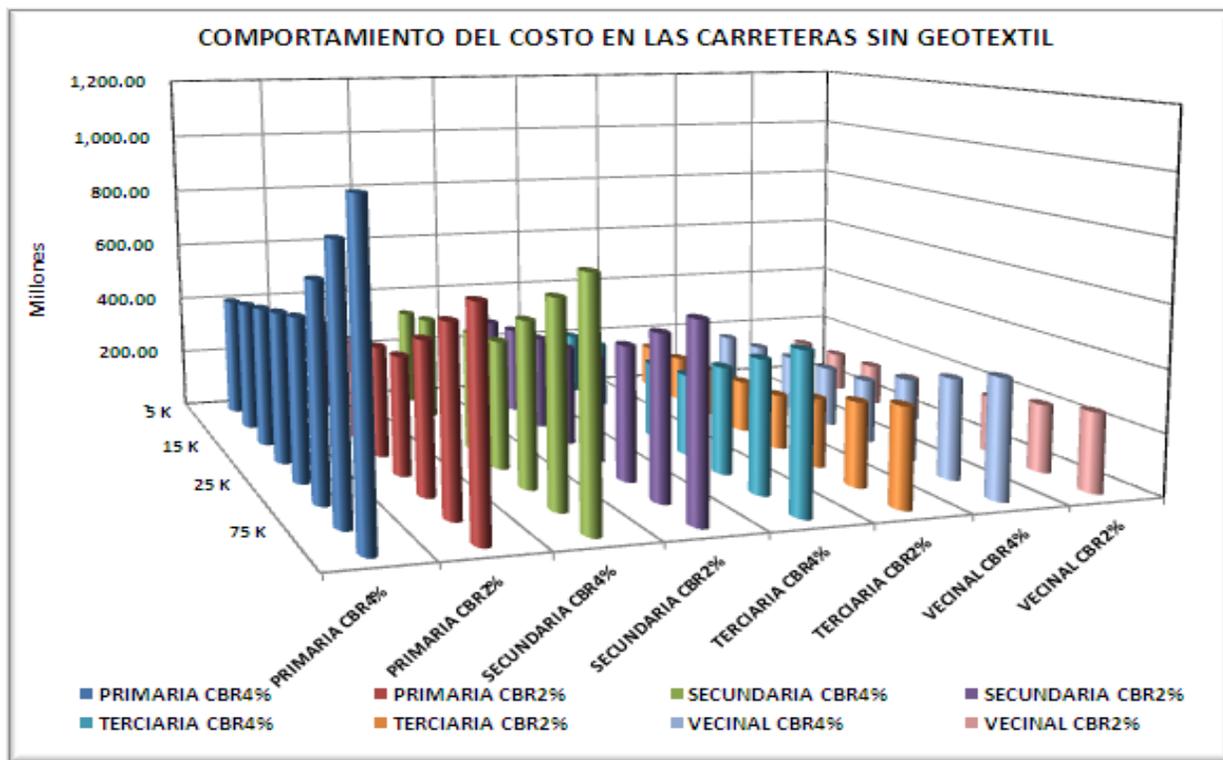
EXCEL y PAINT

Figura 111. Comportamiento general de los presupuestos con CBR=4% y CBR=2% con geotextil



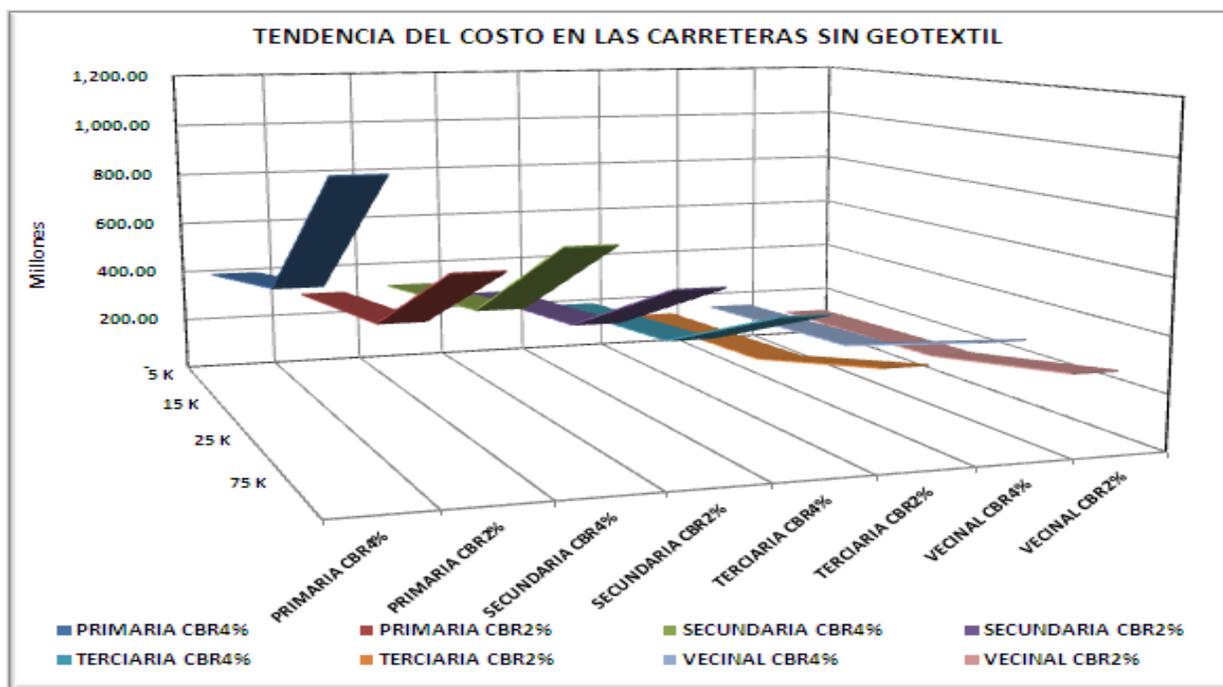
EXCEL y PAINT

Figura 112. Tendencia general de los presupuestos con CBR=4% y CBR=2% con geotextil



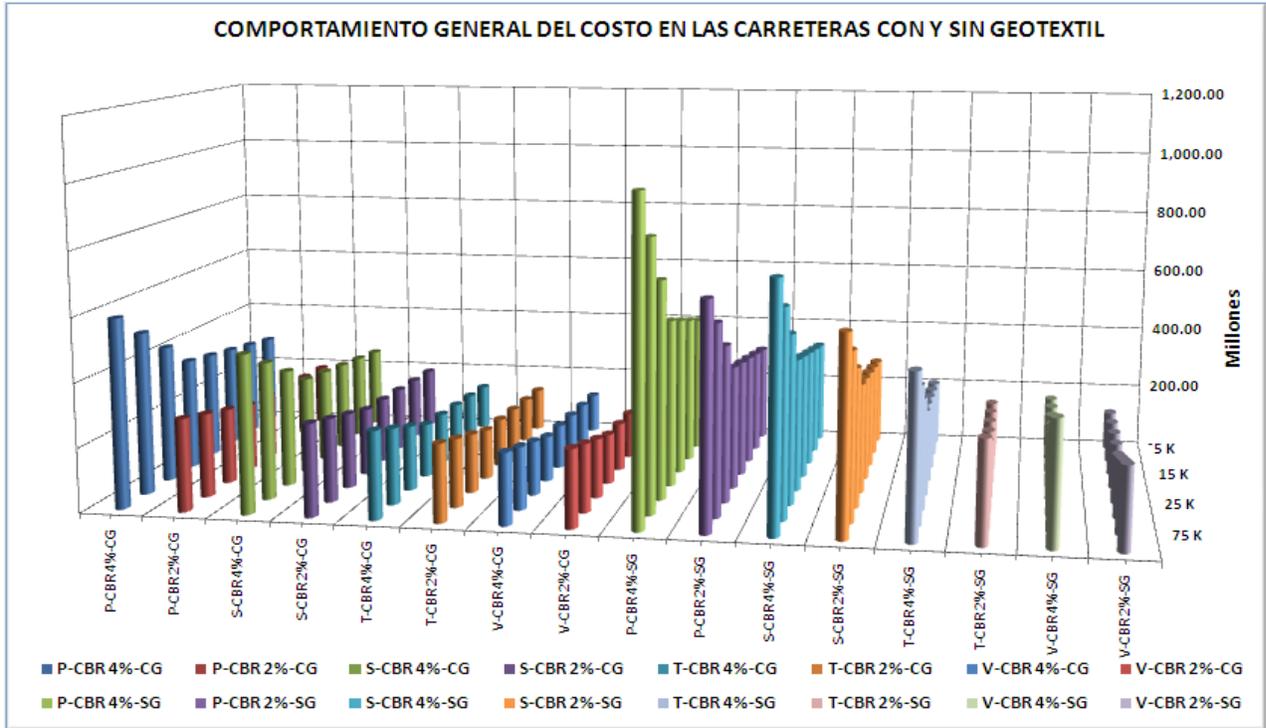
EXCEL y PAINT

Figura 113. Comportamiento general de los presupuestos con CBR=4% y CBR=2% sin geotextil



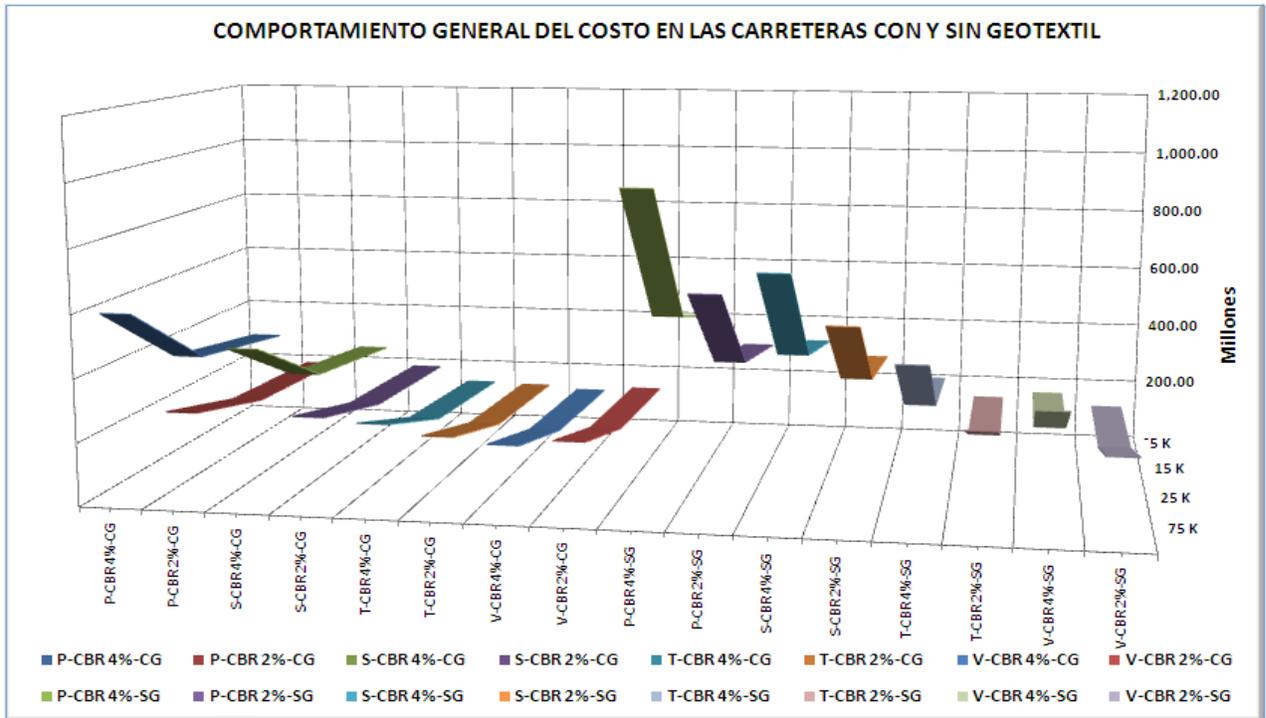
EXCEL y PAINT

Figura 114. Tendencia general de los presupuestos con CBR=4% y CBR=2% sin geotextil



EXCEL y PAINT

Figura 115. Comportamiento general de los presupuestos con CBR=4% y CBR=2% con y sin geotextil



EXCEL y PAINT

Figura 116. Tendencia general de los presupuestos con CBR=4% y CBR=2% con y sin geotextil

Conclusiones

1.- Dado los resultados del cuestionario muchas municipalidades de Costa Rica no tienen un buen fundamento técnico en materia de diseños de caminos.

2.- Los ingenieros Directores Técnicos de las Unidades Técnicas de Gestión Vial Municipal requieren el apoyo inmediato en materia de diseño y gestión de caminos.

3.- El diseño convencional con el método AASHTO 1993 requiere la obtención de datos de diseños que conlleva responsabilidad.

4.- En el diseño convencional con el método AASHTO 1993, las variables insumo de diseño de mayor esfuerzo para su obtención son el Tránsito Promedio Diario Anual y el Módulo Resiliente promedio anual de la subrasante.

5.- Las Normas CR-2010 en su sección 714 y las Normas AASHTO M 288-06 no tipifican requerimientos para el geotextil como elemento de refuerzo. Para tal efecto se utiliza la norma ASTM D-4595 Método de la Tira Ancha.

6.- El diseño de carreteras con geotextil de refuerzo para subrasantes con CBR menores al 3% permite la disminución sustancial de los espesores del paquete estructural.

7.- El diseño de carreteras con geotextil de estabilización para subrasantes con CBR entre 3% y 8% garantiza la no contaminación del paquete estructural, tal como es considerado en el diseño convencional AASHTO 1993, provocando no colocar sobreespesores para disminuir tal efecto.

8.- Dada su capacidad a trabajar a tracción el geotextil aporta mayores ahorros en los caminos, cuando se considera como material de refuerzo y no solamente como estabilizador o separador.

9.- Para carreteras con subrasantes de CBR=2%, y acarreo de 5 km, el ahorro presupuestario con el uso del geotextil de refuerzo es del orden de 38% para primarias, 31% para secundarias, 6% para terciarias y no se tiene ahorro para las vecinales.

10.- Para carreteras con subrasantes de CBR=2% y acarreo de 100 km, el ahorro presupuestario con uso del geotextil de refuerzo se incrementa con la distancia de acarreo, obteniéndose cifras del 59% para primarias, 53% para secundarias, 24% para terciarias y 6% para vecinales.

11.- Para carreteras con subrasantes de CBR=4% y acarreo de 5 km, el ahorro presupuestario con el uso del geotextil de estabilización, que garantiza la no contaminación del paquete estructural, es del orden de 40% para primarias, 28% para secundarias, 47% para terciarias y 35% para las vecinales.

12.- Para carreteras con subrasantes de CBR=4% y acarreo de 100 km el ahorro presupuestario con uso del geotextil de estabilización que garantiza la no contaminación del paquete estructural, se incrementa con la distancia de acarreo, obteniéndose cifras hasta del 71% para primarias, 55% para secundarias, 85% para terciarias y 72% para vecinales.

13.- El uso de geotextil debe ser considerado siempre en el diseño de caminos como material alternativo, con subrasantes que ofrezcan CBR promedios estacionales anuales débiles, dadas las distancias de acarreo actuales que se utilizan en el país.

Recomendaciones

Una vez analizados los resultados de este estudio se proponen las siguientes recomendaciones:

1.- Con la somera investigación que se realizó en relación con la condición existente en las municipalidades en materia de diseño de caminos, se considera oportuno que tanto el Ministerio de Obras Públicas y Transporte como las universidades públicas en forma independiente o mancomunada, brinden la asesoría ingenieril que requieren los Directores de las Unidades Técnicas de Gestión Vial Municipal.

2.- En el diseño de las carreteras públicas de la red vial nacional y municipal debe valorarse siempre la utilización del geotextil como material alternativo, cuando las condiciones de la subrasante así lo amerite, dado que es significativo el ahorro que se puede obtener e igualmente importante la disminución del impacto ambiental que conlleva la explotación de canteras para el suministro de materiales pétreos.

3.- Se vuelve necesario realizar estudios complementarios que dilucidan más éste campo para buscar futuras normativas nacionales que permitan culturizar en las instituciones públicas, empresas privadas y profesionales del ramo, el uso del geotextil más allá de las especificaciones técnicas CR-2010. En el proceso de diseño de caminos, el ingeniero debería justificar las razones para no utilizar el geotextil.

4.- La metodología actual de diseño por estabilización o separación no contempla reducción de espesores porque se considera que el geotextil no llega a trabajar en una condición de tensión. En ese sentido se vuelve relevante investigar el tema para aprovechar al máximo tal característica de este material alternativo.

5.- Este estudio debe darse a conocer entre los diferentes actores públicos y privados del país que tengan relación directa con los diseños de caminos. Las empresas o entidades relacionadas con este campo, deberían tener en su gestión administrativa-operativa, debidamente sistematizado la ingeniería del diseño de caminos complementado con el uso de materiales alternativos como el geotextil.

Apéndice

1. Memoria de cálculo diseño por estabilización.
2. Muestra de presupuestos.
3. Cuestionario

Anexos

1. Geotextile Specification for Highway Applications y Cartilla de relación de CBR con los tipos de suelos AASHTO.
2. Especificaciones Técnicas para el Geotextil de Separación y Estabilización del Manual CR-2010.
3. Decreto N° 13041-T sobre la clasificación de los caminos públicos y Cargas Máximas para vehículos de carga.
4. Tránsito promedio diario anual y estimación de los Ejes Equivalentes de Diseño (EEQ).
5. Tabla Mexichem-Pavco sobre características de los geotextiles.
6. Precios de los materiales.

Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. 1993. **GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES.**
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. GEOTEXTILE SPECIFICATION FOR HIGHWAY APPLICATIONS, M 288-06. United States of America. No M288-11:M288-20.
- Crespo, V. Carlos. 2006. **MECÁNICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES.** México: Editorial Limusa.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte, MOPT. 2010. **MANUAL DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, CAMINOS Y PUENTES, CR-2010.**
- Pavco, S.A. 2006. **MANUAL DE DISEÑO.** Colombia: Editorial Norte Gráfico.
- Reyes, L. Fredy Alberto. 2009. **DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS.** Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rico, R. Alfonso et al. 1999. **LA INGENIERÍA DE SUELOS EN LAS VÍAS TERRESTRES.** México: Editorial Limusa.
- Robert, M. Koerner. 2005. **DESIGNING WITH GEOSYNTHETICS.** United States of America: Editorial Prentice Hall.
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA. 2002. **MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS.**
- Yang, H. Huang. 2004. **PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN.** United States of America: Editorial Prentice Hall.