



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS
ESTRUCTURALES

INFORME DE ASESORÍA

PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO DE SOBRECAPAS ASFÁLTICAS, EMPLEANDO LA METODOLOGÍA DE DISEÑO AASHTO 1993

REALIZADO POR

ING. ROY BARRANTES
ING. GUSTAVO BADILLA
DENIA SIBAJA

Febrero 2008

Índice

ALCANCE	3
DISEÑO DE SOBRECAPAS	6
RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	6
1-DESCRIPCIÓN DE LA RUTA O SECCIÓN	6
2-VISITA CAMPO.....	7
3-DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO.....	8
4-CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL PAVIMENTO EXISTENTE.....	9
5-TRÁNSITO	10
PROCESO DE DISEÑO	12
1-CÁLCULO DE LOS MÓDULOS DE LAS CAPAS EXISTENTES	12
2-CÁLCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL EXISTENTE (SN_{exist})	14
3-CÁLCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO (SN_{req}).....	18
4-DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS EN RELACIÓN CON ANÁLISIS MECANÍSTICOS: FATIGA Y DEFORMACIÓN PLÁSTICA.....	19
ANEXO I EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO DE SOBRECAPAS	22

Procedimiento general de diseño de sobrecapas asfálticas, empleando la metodología de diseño AASHTO 1993

Alcance

El procedimiento que se presenta a continuación tiene como fin orientar al diseñador en el proceso de diseño estructural de pavimentos. Tiene como fundamento principal la Guía de Diseño AASHTO 1993, y considera también otras ecuaciones que permiten complementar y corroborar los resultados.

Un paquete estructural, que responda ante las solicitudes de cargas de tránsito proyectadas para un periodo de diseño determinado y que tome en cuenta las características de los materiales constituyentes es lo que se espera como resultado del empleo de este procedimiento, sin embargo es muy importante mencionar que, ante todo, el criterio del diseñador tiene un papel imperante en cuanto a las decisiones, que se tengan que tomar a lo largo de todo el procedimiento.

A continuación se presenta el diagrama de flujo para el procedimiento general de diseño de sobrecapas asfálticas, empleando la metodología de diseño de la AASHTO 1993

Diseño de sobrecapas

Para el diseño de sobrecapas de pavimento flexible es necesario cubrir 2 grandes etapas:

- Recopilación de información
- Proceso de diseño.

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

1-DESCRIPCIÓN DE LA RUTA O SECCIÓN

Entre los aspectos más importantes que deben recopilarse de la información básica del tramo del proyecto a evaluar se mencionan:

- No. de Ruta (Nacional, Cantonal)
- Sección de control
- Longitud tramo
- Clasificación (Primaria, Secundaria, Terciaria)

A partir de la información recopilada, se establece: el índice de serviciabilidad inicial y el índice de serviciabilidad final esperado para el proyecto. El índice de serviciabilidad inicial depende del tipo de pavimento y la calidad de la construcción. Típicamente para pavimentos flexibles la metodología AASHTO 93 establece un **índice de serviciabilidad inicial de 4.2**. El valor del índice de serviciabilidad final es el valor mínimo tolerable antes de que sea necesario efectuar cualquier actividad de rehabilitación o reconstrucción. Para autopistas o carreteras importantes, con altos volúmenes de tránsito, se sugiere un valor de *índice de serviciabilidad final de 2.5 o mayor*. En el caso de autopista de bajo tránsito o carreteras con importancia económica relativamente menor, se sugiere un valor de *índice de serviciabilidad final de 2*.

Tabla 1. Valores recomendados de índice de servicio (PSI)

Tipo de pavimento	Índice de servicio inicial	Índice de servicio terminal (final del periodo de diseño)		
		Interestatales o autopistas mayores	Arterias principales y colectores	Calles y arterias menores
Pavimento flexible	4.2	3.0	2.5	2.0

El método de diseño de pavimentos AASHTO es probabilístico, de manera que los parámetros de diseño tienen un nivel de dispersión asociado. Dependiendo de la importancia del proyecto y de la credibilidad de la información se define entonces un nivel de confianza

(R) y la desviación estándar de desempeño (S_0). En función del nivel de confianza se determina un estadístico " Z_R ", que se refiere a la posibilidad estadística de que un valor de diseño sea excedido por los valores de la práctica. Generalmente para proyectos de mayor importancia estratégica se usan mayores niveles de confianza (Ver las tablas 2 y 3). En el caso de la desviación estándar, ésta debe ser representativa de las condiciones locales, la cual dependerá al error posible en las proyecciones de tránsito y al desempeño del pavimento (cambio de los valores de entrada del diseño en el transcurso del tiempo). En el caso de pavimentos flexibles se sugiere un valor de S_0 entre 0.40 a 0.50 (valor típico 0.45.)

Tabla 2. Valores recomendados de nivel de confianza (R)

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendado (R), %	
	Urbano	Rural
Autopistas	85-99.9	80-90.9
Arterias principales	80-99	75-95
Colectores	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Tabla 3. Desviaciones estándar para varios niveles de confianza

Nivel de confianza (%)	Desviación estándar (Z_R)	Nivel de confianza (%)	Desviación estándar (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

El registro en esta etapa es el **expediente de diseño de la ruta**.

2-VISITA CAMPO

Existen diferentes elementos del entorno que pueden incidir de diferentes maneras en el diseño final del pavimento, por esta razón es conveniente evaluarlos. Entre los principales se mencionan los siguientes:

- Drenajes: se debe inspeccionar la calidad y tratar de conocer si la capacidad que poseen es adecuada en condiciones críticas (por ejemplo en invierno, donde predominan las precipitaciones)

- Geometría: realizar las mediciones o descripciones correspondientes al ancho de carril, elevación de rasante, bombeo transversal, pendiente longitudinal, perfil transversal.
- Uso del suelo en la zona: indagar y tratar de determinar las características del uso del suelo en la zona, las principales actividades productivas y el tipo de transporte que se utiliza principalmente.
- Evaluación visual de deterioros o particularidades presentes en el tramo.

Los drenajes y la geometría, pueden permitir evaluar el porcentaje del tiempo durante el cual la estructura del pavimento se encuentra expuesta a condiciones de humedad cercanas a saturación. Adicionalmente, la geometría puede ayudar a determinar condiciones funcionales del proyecto que deben considerarse en el diseño. Finalmente, conocer el uso de suelo, y los principales vehículos de transporte utilizados permite hacer inferencias iniciales sobre el tránsito presente en el tramo.

Es importante destacar que no existe una única metodología para realizar la evaluación visual de un pavimento, así por ejemplo existe la metodología SHRP, la metodología VIZIR, etc. y cada una de estas, enfatiza en uno u otro aspecto conforme a la importancia relativa que la metodología brinda a cada uno de los aspectos que evalúa. Por esta razón, es importante tratar de uniformizar los criterios de evaluación del pavimento y su estructura, con la finalidad de contar con una metodología que intente estandarizar los criterios evaluados y de esta forma poder realizar comparaciones futuras.

3-DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO

La medición de las deflexiones en la superficie del pavimento es uno de los principales medios para evaluar la estructura de un pavimento flexible. Aunque existen otras maneras para reflejar la condición estructural de los pavimentos, la deflexión en la superficie del pavimento es una metodología que permite evaluar el pavimento, ya que la magnitud y forma de la deflexión del pavimento es función del tráfico (tipo y volumen), la estructura del pavimento, y de los efectos de la temperatura y la humedad sobre la estructura del pavimento.

Para la medición de las deflexiones puede emplearse el uso de dispositivos que miden la respuesta ante cargas de impacto, el tipo más común de estos equipos son los conocidos como deflectómetros de impacto (también conocidos como FWD, de las siglas en inglés de *Falling Weight Deflectometer*). En términos generales, la prueba consiste en detener el vehículo y posicionar el plato de carga en la posición deseada, luego los sensores de deflexión se posicionan sobre la superficie del pavimento a una distancia radial del plato de carga, finalmente el peso o carga se deja caer sobre el plato de carga y las deflexiones son medidas y registradas para cada uno de los diferentes sensores.

Para efectos de diseño de estructuras de pavimentos flexibles, la literatura recomienda la medición de las deflexiones con el **deflectómetro de impacto en intervalos de medición entre 25 y 50 metros** según la importancia del proyecto, siendo posible establecer otros intervalos de medición diferentes de acuerdo al criterio del ingeniero, siempre y cuando la información recopilada sea representativa estadísticamente del tramo.

Una vez que se cuenta con los resultados de las deflexiones, es posible **identificar segmentos o tramos homogéneos** en el tramo en estudio. Cada segmento corresponde a tramos diferenciados a partir de su capacidad estructural, cuantificada como la resistencia a la deformación ante la carga. Existen varias metodologías para identificar cada uno de los tramos, las cuales se basan en análisis estadísticos de los resultados, se menciona por ejemplo el uso de: *Segmentación jerárquica de multivariable* y la *Determinación de segmentos por media móvil*. En este último caso puede emplearse programas tales como el **SPEC**, el cual requiere de al menos 40 datos de diferentes secciones. Alternativamente se puede **graficar las deflexiones** del primer sensor mediante programas comerciales como el Microsoft Excel. Posteriormente, a la identificación de los tramos homogéneos se puede establecer puntos de control en los cuales se puede realizar la determinación de las características físicas del pavimento para cada tramo homogéneo mediante excavaciones a "cielo abierto".

4-CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL PAVIMENTO EXISTENTE

Los sondeos o excavaciones a "cielo abierto" deben tener el tamaño suficiente que permita obtener cantidades suficientes de material para obtener resultados de laboratorio representativo de las características de las diferentes capas y de los materiales presentes en la estructura del pavimento. Esto es:

- .Determinación de espesores de las diferentes capas (carpeta asfáltica, base, subbases, subrasante)
- .Presencia y posición de agrietamientos en cada una de las capas (si los hubiera)
- .Contenido de vacíos de aire, asfalto efectivo, viscosidad de asfalto y granulometría de la carpeta asfáltica.
- .Características físicas de los materiales granulares y suelos, por ejemplo: CBR en sitio y en laboratorio, granulometría, índices de Atterberg, equivalente de arena, azul de metileno, contenido de humedad, clasificación.

5-TRÁNSITO

El tránsito es el factor más importante en el diseño de pavimentos. La consideración del tránsito debe incluir dos aspectos muy importantes: el número de repeticiones de carga, y la magnitud y configuración de la carga. Para diseñar el pavimento en una carretera, es necesario predecir el número de repeticiones de cada uno de los diferentes grupos de ejes de carga durante el periodo de diseño.

La información inicial del tránsito puede ser obtenida a partir de datos y registros históricos de estaciones de conteo en el tramo o bien con mediciones de campo, de las cuales es de sumo interés contar con el **Tránsito Promedio Diario (TPD)** y la **Clasificación Vehicular**. Tomando en consideración que no siempre es posible contar con un registro histórico del tránsito que circula por una determinada ruta se sugieren los siguientes procedimientos:

. *Medición de vehículos con contadores automáticos y calibración con conteos manuales:* para ello es necesario contar con resultados de conteos obtenidos por medio de equipo de conteo automático colocados por al menos durante 1 semana. Durante esta misma semana, deben realizarse durante 2 días conteos manuales de al menos 6 horas continuas, con cortes de tiempo cada 15 minutos, de forma que las mediciones de los contadores automáticos puedan "calibrarse" con las mediciones manuales. Considerando la siguiente clasificación vehicular: Vehículos livianos, C2+, C2, C3, C4, Bus C2, T3-S2 y T3-S3.

. *Medición de vehículos con conteos manuales:* para ello es necesario contar con resultados de conteos obtenidos por medio de conteos manuales de al menos 1 semana consecutiva durante 12 horas continuas, con cortes de tiempo cada 15 minutos, en las horas de mayor afluencia vehicular. Considerando la siguiente clasificación vehicular: Vehículos livianos, C2+, C2, C3, C4, Bus C2, T3-S2 y T3-S3.¹

En el diseño de pavimento es necesario convertir todas las pasadas de diferentes vehículos en un número de pasadas de un tipo único (pasadas de ejes equivalentes). En el caso de Costa Rica el factor de equivalencia que se utiliza es respecto al eje simple de 8200 kg. En términos generales, los ejes equivalentes de diseño vienen dados por la siguiente fórmula:

$$ESALs = \left(\sum_i TPD \cdot \%dist_i \cdot TF_i \right) \times 365 \times LDF \times DS \times GF \times Y$$

donde:

ESALs: Ejes equivalentes de diseño

TPD: Tránsito promedio diario en la ruta

¹ Esta clasificación corresponde a la que se presenta en: Diario Oficial de Costa Rica La Gaceta No. 13, miércoles 19 de enero del 2005. O bien, puede referirse a: Badilla Vargas, Ulloa Calderón, Allen Monge, Sibaja Obando. ENCUESTA DE CARGA EN PAVIMENTOS DE COSTA RICA. Informe de investigación. Unidad de Investigación. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR. San José, Costa Rica. 2007

%dist: Porcentaje o cantidad de vehículos del Tránsito Promedio Diario que representa el tipo de vehículo *i*

TF: Factor camión para el tipo de vehículo *i*

LDF: Factor de distribución por uso de carril

DS: Factor de distribución direccional

GF: Factor de crecimiento anual

Y: periodo de diseño

En el caso de los factores camión el Informe de investigación: **Encuesta de carga en pavimentos de Costa Rica**, elaborado por la Unidad de Investigación del LanammeUCR establece los siguientes valores de referencia:

Ruta	Tipo de vehículo	Factor Camión (TF)					
		Pick up	C2+	C2	Bus C2	C3	T3-S2
Ruta 1 - General Cañas (Peaje)		0,011	0,019	0,734	2,022	2,721	2,102
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)		0,011	0,016	0,902	3,680	1,971	3,701
Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)		0,011	0,233	0,723	2,911	2,834	4,153
Ruta 2 - Florencio del Castillo (Peaje)		0,015	0,031	0,827	1,437	3,202	3,021
Ruta 2 -Pérez Zeledón (tránsito)		0,012	0,014	0,446	1,858	3,330	2,080
Ruta 27 - Próspero Fernández (Peaje)		0,011	0,016	1,163	1,957	3,155	2,695
Ruta 32 - Braulio Carrillo (Peaje)		0,011	0,022	0,695	3,692	2,271	4,229
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada)		0,012	0,014	0,521	2,107	3,773	3,861
Promedio		0,012	0,046	0,751	2,458	2,907	3,230
Desviación estándar		0,001	0,076	0,223	0,861	0,585	0,878

Tabla 4: Factores camión para diferentes rutas²

En los pavimentos con más de dos carriles por sentido se requiere calcular una cantidad de carga específico en el carril crítico. El carril crítico normalmente es el correspondiente a tránsito pesado (generalmente el carril extremo derecho). Para ello se consideran los siguientes **factores de distribución por uso de carril**:

Número de carriles por sentido	Porcentaje de ejes equivalentes en carril de diseño (%)
1	100%
2	80 – 100%
3	60 – 80%
4	50 – 75%

El dimensionamiento de la estructura de pavimento puede segmentarse **por sentido** y usar los ejes equivalentes por sentido (en el caso que exista información y que tal separación sea relevante). En el caso en que no haya información del TPD y distribución vehicular por sentido, se considera una **distribución 50% / 50%**.

²Fuente: Badilla Vargas, Ulloa Calderón, Allen Monge, Sibaja Obando. ENCUESTA DE CARGA EN PAVIMENTOS DE COSTA RICA. Informe de investigación. Unidad de Investigación. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR. San José, Costa Rica. 2007

En el caso en que el factor de crecimiento anual (GF) se asume igual para todo el periodo de diseño (Y). Puede utilizarse la expresión del Instituto del Asfalto, la cual corresponde a un factor de crecimiento total y que viene dado por la expresión:

$$\text{Factor de crecimiento total} = GF \times Y = \frac{(1+i)^Y - 1}{i}$$

Alternativamente, puede calcularse la cantidad de ejes equivalentes para cada uno de los años dentro del periodo de diseño, tomando en cuenta que el factor de crecimiento GF viene dado por la ecuación $GF = (1+i)^n$, donde n representa el año dentro el periodo de diseño y que se evalúa desde $n = 0$ hasta $n = Y-1$, donde Y corresponde al periodo de diseño y finalmente se suma todos los ejes.

PROCESO DE DISEÑO

1-CÁLCULO DE LOS MÓDULOS DE LAS CAPAS EXISTENTES

Para poder determinar la capacidad estructural remanente de la estructural actual del pavimento y posteriormente determinar la capacidad estructural requerida por el pavimento con la sobrecapa a colocar, es necesario determinar los módulos resilientes de los materiales que conforman cada una de las capas del pavimento.

Cuando se cuenta con información de deflexiones obtenidas mediante deflectometría de impacto, es posible determinar los módulos de cada una de las capas mediante el procedimiento de **retrocálculo de módulos**. Este procedimiento de análisis involucra la suposición de los valores de módulo resiliente para cada una de las capas de la estructura del pavimento, luego se calcula la deflexión en la superficie a las diferentes distancias radiales del punto de aplicación de la carga empleadas durante el ensayo con el deflectómetro de impacto. Una vez obtenidas las deflexiones calculadas, se comparan con las deflexiones medidas; así, el proceso se repite cambiando el módulo de las capas en cada iteración, hasta que la diferencia entre las deflexiones medidas y las calculadas se encuentren dentro de las tolerancias especificadas, o cuando se haya alcanzado un máximo número de iteraciones.

Cuando se analiza el comportamiento de un pavimento, se calculan las deflexiones en la superficie y otras respuestas a partir de programas de análisis que utilizan el módulo elástico como insumo. En el retrocálculo se selecciona y ajusta el módulo elástico, de acuerdo con la última deflexión de superficie calculada que mejor se ajustó a las deflexiones conocidas de una superficie.

Varios de los programas de cómputo que utilizan algún tipo de procedimiento iterativo de ajuste de deflexiones o alguna técnica de búsqueda en base de datos, se han desarrollado para estimar el módulo elástico del material del pavimento. Algunos de los programas de cómputo para estimar módulos elásticos de un sistema de pavimento son, entre otros, MODULUS, ELSYM 5.0, EVERCALC, EVERSTRESS, etc.

Al tratarse de un proceso iterativo, cabe mencionar que la solución para cada uno de los módulos de la capas no es una solución única, por esta razón la suposición de los valores de módulo resiliente para cada una de las capas debe estar acorde con las propiedades reales de los materiales que conforman el pavimento. Debido a esto los valores de los módulos esperados para cada una de las capas deberían ser consistentes (o relativamente cercanos) con los resultados que se obtienen a partir de los resultados obtenidos de la caracterización física de los materiales involucrados.

A continuación se describen de manera general algunas ecuaciones, correlaciones y procedimientos recomendados por la bibliografía para determinar los módulos de los materiales. Sin embargo, la aplicación de estas u otras metodologías debe estar acompañada de las limitaciones de cada una de ellas, así como del buen conocimiento de las propiedades de los materiales presentes y del buen criterio del ingeniero diseñador. Finalmente, estas ecuaciones demuestran la necesidad de desarrollar modelos para obtener valores de módulos para los materiales nacionales.

Subrasantes y suelos:

$M_R = 1500 \cdot CBR$		Heukelom & Klomp
$M_R = 2555 \cdot CBR^{0.64}$		Guía de Diseño AASHTO 2002

Tabla 4. Rangos típicos de los módulos y módulos de Poisson para diferentes materiales

Material	Módulo de Poisson	Módulo (psi)		
		Bajo	Alto	Típico
Carpeta Asfáltica	0.35 - 0.40	70 000	2 000 000	400 000
BE asfalto	0.40	50 000	500 000	200 000
BE cemento	0.20 - 0.25	200 000	2 000 000	500 000
Base granular	0.40	10 000	150 000	50 000
Subbase granular	0.40	5 000	30 000	15 000
Suelo estabilizado	0.40	10 000	200 000	50 000
Suelo cohesivo	0.45	2 000	25 000	7 000

En el caso de la carpeta asfáltica, se puede utilizar el Modelo de Witczak calibrado para Costa Rica.³

$$\log E^* = 5,535833 + 0,002087 \rho_{200} - 0,000566(\rho_{200})^2 - 0,002590 \rho_4 - 0,078763 V_a$$

$$-1,865947 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{2,399557 + 0,000820 \rho_4 - 0,013420 \rho_{38} + 0,000261(\rho_{38})^2 + 0,005470 \rho_{34}}{1 + e^{(0,052941 - 0,498163 \log(f) - 0,691856 \log(\eta))}}$$

donde:

E^* = módulo dinámico, psi.

η = viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise.

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\text{sen} \delta} \right)^{4,8628}$$

f = frecuencia de carga, Hz.

V_a = Contenido de vacíos de aire, %.

V_{beff} = Contenido de asfalto efectivo, % por volumen.

ρ_{34} = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg).

ρ_{38} = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 9,53 mm (3/8 pulg).

ρ_4 = Porcentaje retenido acumulado en la malla No 4.

ρ_{200} = Porcentaje pasando en la malla No 200.

2-CÁLCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL EXISTENTE (SN_{EXIST})

El número estructural representa en términos generales la calidad estructural de un pavimento flexible (resistencia a la deformación ante la carga). **El número estructural es función del espesor de la capa, coeficiente de drenaje y coeficiente estructural de la capa.** Matemáticamente se describe como se muestra a continuación:

$$SN = \sum_{i=1}^n (a_i \times m_i \times h_i)$$

donde:

n : número de capas en el paquete estructural (sobre la subrasante)

a_i : coeficiente estructural de la capa

m_i : coeficiente de drenaje de la capa

h_i : espesor de la capa

Coeficiente estructural (a)

³ Para más detalles puede referirse a: Elizondo Arrieta, Ulloa Calderón, Badilla Vargas. MÓDULOS DE MEZCLA ASFALTICA. Informe de investigación. Unidad de Investigación. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR. San José, Costa Rica. 2007

El coeficiente estructural de la capa es función de la resistencia y rigidez de una material. Se refiere a la calidad estructural relativa de un espesor unitario del material "i". Para cada una de las capas se puede definir lo siguiente:

En las capas asfálticas el coeficiente estructural es función del módulo de rigidez de la capa asfáltica a 70°F. El **gráfico 1** muestra la estimación del coeficiente estructural de una mezcla asfáltica densa en relación al módulo elástico.

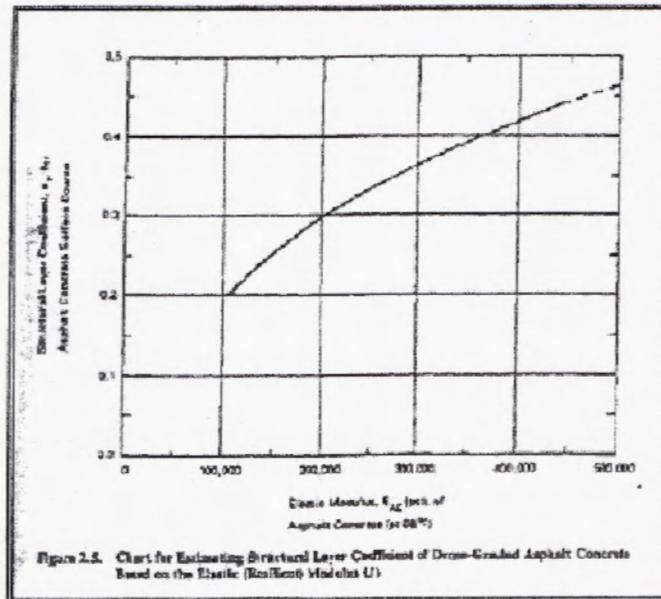
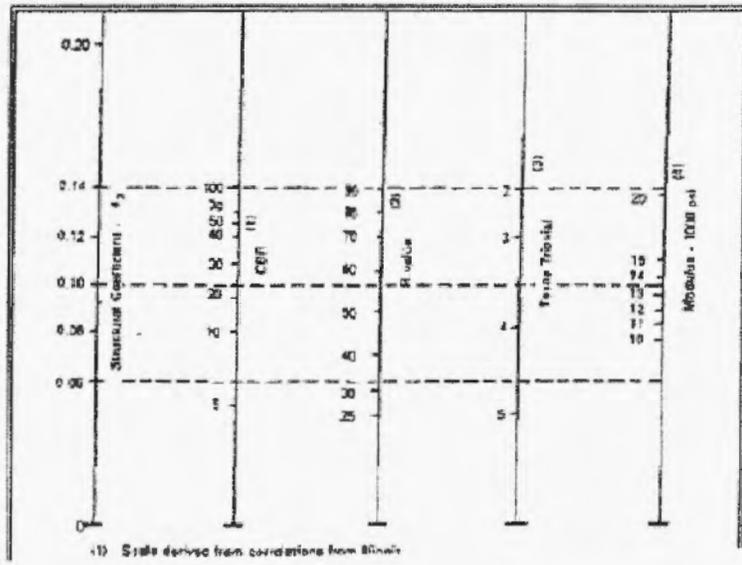
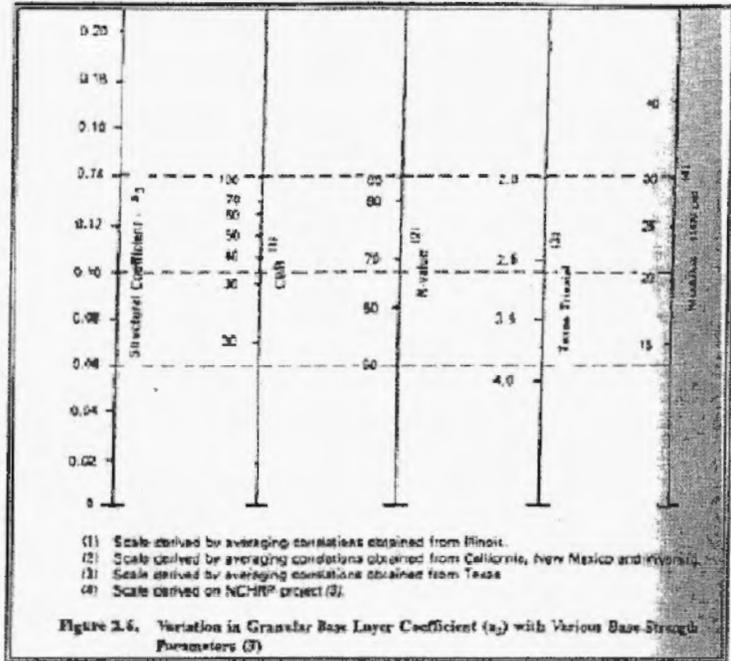
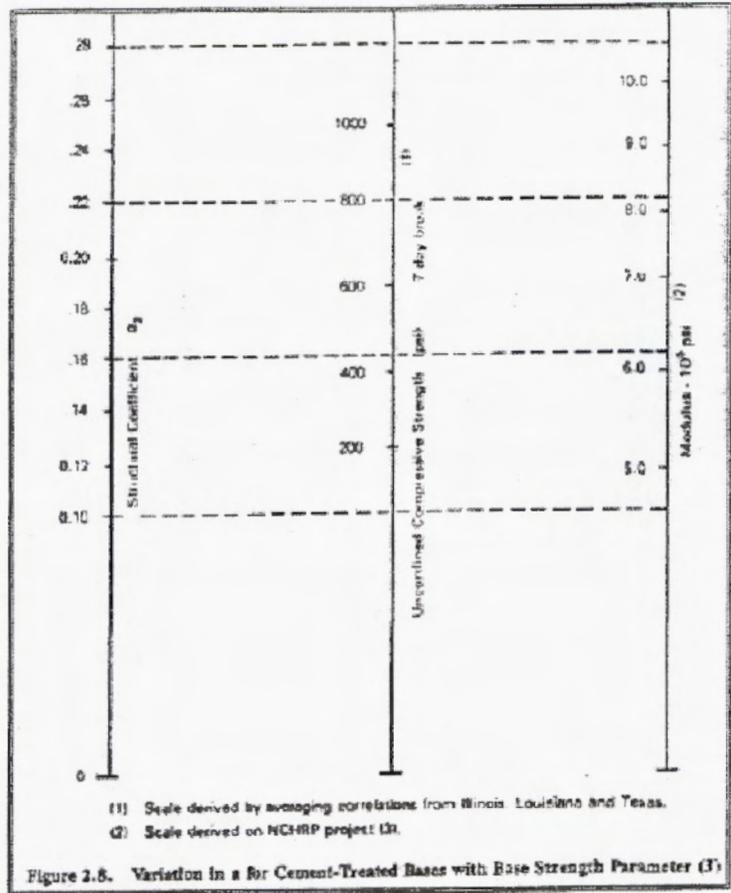


Gráfico 1 Estimación del coeficiente estructural de una mezcla asfáltica densa en relación al módulo elástico

En el caso de las bases y subbases el coeficiente estructural es función del módulo de rigidez o el CBR. Los gráficos siguientes muestran las estimaciones que pueden hacerse para determinar el coeficiente estructural:





Alternativamente se pueden emplear las siguientes fórmulas

$a = 0.249 \cdot \log E - 0.977$	Coficiente estructural para base granulares sin estabilizar
$a = 0.227 \log E - 0.839$	Coficiente estructural para subbase granulares

Coefficiente de drenaje (m)

El coeficiente de drenaje, no es aplicable para capas asfálticas. Depende la cantidad de agua que pueda permanecer en cada capa: porcentaje de tiempo que el pavimento está saturado y calidad del sistema de drenaje.

Categoría	Calidad del drenaje	Periodo en que se evacúa el agua	Porcentaje de tiempo que el pavimento está saturado			
			Menos de 1%	1- 5%	5 - 25%	Mas de 25%
Excelente		2 horas	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno		1 día	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular		1 semana	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Malo		1 mes	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy malo		No drenará	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

3-CÁLCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO (SN_{REQ})

El número estructural requerido es aquel que debe tener el pavimento para soportar las solicitaciones de carga proyectadas dentro del periodo de diseño elegido. Este número estructural se comparará con el número estructural existente (SN_{exist}), el cual corresponde al número estructural que actualmente suministra la estructura del pavimento; con la finalidad de calcular un exceso o una deficiencia en la capacidad estructural. De esta manera se justificará o no la colocación de una sobrecapa y se calculará su espesor con el valor encontrado de la diferencia que existe entre el SN_{req} y el SN_{exist}, o bien el ΔSN. El valor del número estructural (SN) se obtiene de la ecuación empírica de diseño dada por la metodología de la AASHTO 93 que se muestra a continuación:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log_{10}(M_R) - 8.07$$

donde:

Z_R: estadístico en función del nivel de confianza

S₀: desviación estándar de desempeño

W₁₈: Ejes equivalentes en el carril de diseño durante el periodo de diseño seleccionado

M_R: Módulo de rigidez de la subrasante representativo de toda la temporada (considerando variación estacional)

ΔPSI: cambio en el índice de habilidad de servicio. Diferencia entre el índice de servicio inicial (sobrecapa recién colocada) e índice de servicio terminal (final del periodo de diseño)

3-COMPARACIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL EXISTENTE CON EL NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO Y DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE LA SOBRECAPA.

Una vez que se determina el número estructural existente dato por la estructura del pavimento existente (SN_{exist}) y se calcula el número estructural requerido para resistir las solicitaciones de carga (SN_{req}) se procede a calcular:

$$\Delta SN = SN_{req} - SN_{exist}$$

Una vez definido el ΔSN se calcula el espesor de la carpeta que se debe construir, junto con los espesores existentes y se verifica el cumplimiento por fatiga para tener el espesor final de la sobrecapa. Es importante destacar que el espesor de la sobrecapa no debe ser menor a tres veces el tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla. De ser así se debe considerar ese espesor mínimo como el espesor de la sobrecapa para evitar problemas constructivos de compactación.

4-DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS EN RELACIÓN CON ANÁLISIS MECANÍSTICOS: FATIGA Y DEFORMACIÓN PLÁSTICA.

La base de las metodologías de diseño mecanística-empíricas son las relaciones empíricas basadas en regresión lineal. Cabe aclarar que aún se deben desarrollar modelos y ecuaciones de fatiga y deformación plástica para los materiales nacionales, por lo cual se mencionarán modelos desarrollados en otros países.

En términos generales para determinar el cumplimiento en el desempeño de una estructura de un pavimento se debe caracterizar el comportamiento del pavimento bajo las consideraciones de carga a las cuales va estar expuesto, de esta forma a partir de los datos de los espesores finales y módulos de las diferentes capas del pavimento, se realizan análisis elásticos del pavimento para determinar: esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones para cada una de las capas críticas en el análisis. Herramientas informáticas como ELSYM 5.0, EVERSTRESS, pueden facilitar enormemente los cálculos de los esfuerzos y deformaciones presentes en la estructura del pavimento, finalmente pueden emplearse diversas ecuaciones para determinar el número de repeticiones de carga que pueden producir la falla.

Fatiga en capas asfálticas

El número de repeticiones de carga para la falla por fatiga está relacionado con la deformación unitaria por tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica (ϵ_t). Algunas ecuaciones recomendadas por la literatura se muestran a continuación:

Shell	$N_f = 0.0685(\varepsilon_t)^{-5.671}(E_1)^{-2.363}$ (20% área fisurada)
Witczack	$N_f = 0.00432 * 10^{4.84 * \left(\frac{\%asfaltoefectivo}{\%vaciosaire + \%asfaltoefectivo}\right)^{-0.69}} * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3.291} * \left(\frac{1}{E}\right)^{0.854}$
Instituto del asfalto	$N_f = 0.076(\varepsilon_t)^{-3.291}(E_1)^{-0.854}$ (20% área fisurada)
Finn	$\log N_f = 16.086 - 3.291 \log\left(\frac{\varepsilon_{ec}}{10^{-6}}\right) - 0.854 \log\left(\frac{E_{ec}}{1000}\right)$ (45% área fisurada)
PDMAP	$\log_{10} N_f = 15.947 - 3.291 \cdot \log_{10}(\varepsilon_t) - 0.854 \cdot \log_{10}(E)$ (10% de agrietamiento)
PDMAP	$\log_{10} N_f = 16.086 - 3.291 \cdot \log_{10}(\varepsilon_t) - 0.854 \cdot \log_{10}(E)$ (45% de agrietamiento)

Fatiga en bases estabilizadas

Cuando se utiliza el método mecanístico para el análisis y diseño de pavimentos, y se consideran las capas de una estructura semi-rígida adheridas, los criterios de falla por fatiga en la carpeta asfáltica de rodamiento dejan de ser críticos y, en su lugar, los criterios de falla por fatiga en la capa estabilizada son los que dominan el diseño. Los materiales estabilizados con cemento son susceptibles a la falla por fatiga dada una aplicación repetitiva de esfuerzo. **La fatiga en flexo-tracción es de gran interés por la relevancia de dicho tipo de deterioro con la falla funcional y/o estructural del pavimento.** Algunas observaciones concernientes a fatiga de materiales estabilizados con cemento son:

- La vida a la fatiga es más corta bajo esfuerzos de tensión directa que en compresión.
- La fatiga por flexión se ve reducida muy significativamente por niveles de esfuerzo menores al 50% de la resistencia a flexión.

En lo que respecta a la falla por fatiga de los materiales cementados, la teoría establece que, de cumplirse que la relación entre el esfuerzo a la tensión (σ_t) en la fibra inferior de la capa estabilizada y el esfuerzo de ruptura (S_c) por flexotracción del material (σ_t/S_c) tenga un valor entre 0.5 y 0.6, la capa puede soportar infinito número de pasada de la carga que da origen a la tensión en la fibra inferior. Sin embargo, no porque una base estabilizada no cumpla con la relación de esfuerzos (σ_t/S_c) sea igual o menor que 0.5, la base no sirve o no cumple, sino que debe evaluarse la cantidad de ejes equivalentes que pueden producir la fatiga de los materiales cementados.

Diferentes autores han propuestos diversas leyes de fatiga para materiales cementados. Sólo para mencionar algunas, tenemos:

$$\log N_f = 17.61 - 17.61 \left(\frac{\sigma}{S_c} \right), \text{ expresión de probabilidad de falla del 50 \%}$$

$$N_f = \left(\frac{\frac{11266}{E^{0.804}} + 190.7}{\mu \cdot \varepsilon} \right)^{12}, \text{ Guía de diseño de pavimentos Australiana}$$

donde:

N_f : Número de repeticiones de ejes equivalentes estándar (8.2 ton) para la falla en la capa cementada

E: módulo a la flexotracción del material cementado, en MPa, a los 28 días.

ε : deformación tensional en la fibra inferior de la capa cementada

μ : módulo de Poisson (igual a 0.2 para capas cementadas)

El criterio de falla por deformación permanente de la subrasante, parece no ser importante en los pavimentos semi-rígidos.

Deformación plástica

El número de repeticiones de carga requerido para determinar una depresión de 1.3 cm (1/2 pulgada) se relaciona con la deformación unitaria a la compresión en la fibra superior de la subrasante (deformación plástica estructural):

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9} (\varepsilon_y)^{-4.477}$$

ε_y : deformación unitaria a la compresión en la fibra superior de la subrasante.

Fuente: Instituto del Asfalto

Finalmente se comparan el número de repeticiones admisibles por fatiga o por deformación plástica obtenidas en cualquiera de las ecuaciones anteriores y se comparan con el número de repeticiones de carga esperados en el proyecto. En el caso que el número de repeticiones de carga esperados es menor a las repeticiones admisibles el diseño cumple (Nota: Verificar factibilidad constructiva, por ejemplo: Nivel máximo de rasante posible en campo. Si no es posible debe modificarse el diseño). Caso contrario deben cambiarse los espesores de las capas y verificar nuevamente el cumplimiento del desempeño a fatiga y deformación permanente hasta cumplir con los requisitos.

ANEXO I

**EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO
GENERAL DE DISEÑO DE SOBRECAPAS**

**RUTA 34. TRAMO ESTERILLOS – LOMAS
PARRITA**

Paso 1: Determinación de los requerimientos de la vía

- El período de diseño se considera de 8 años
- El tránsito se toma de la información recolectada de la estación permanente 744 de conteos del MOPT
- Los datos de la estructura existente se recopilan a través de muestreos de campo.

Paso 2: Información del tráfico

Cálculo del tránsito

En el cálculo del tránsito para la sección de estudio se realizó una investigación para recopilar la información de las estaciones de conteo disponibles y que fueran representativas del tramo Esterillos – Lomas.

La estación de conteo más cercana al tramo de estudio corresponde a la estación 744, ubicada en localidad de Lomas a 200 del final de la ruta 239. Esta información proviene de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT.

Los datos de esta estación son los siguientes:

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTES ASESORIA DE PLANIFICACION UNIDAD LOGISTICA										
TRANSITO PROMEDIO DIARIO Y % DE VEHICULOS										
ESTACION N°: 744		RUTA: 34								
TRAMO: JACO - PARRITA										
UBICACION: LOMA, 200 M. ANTES DEL FINAL DE LA RUTA N° 239.										
SECCION: 60082										
AÑO	T.P.D.	LIVIANOS		PESADOS					TOTAL	
		PASAJ.	C. LIV.	BUSES	2 EJES	3 EJES	4 EJES	5 EJES	LIV.	PES.
1987	420	24.03	36.04	6.71	21.91	4.59	0	6.71	60.07	39.92
1988	460	30.86	36.07	5.75	17.83	3.57	0	5.92	66.93	33.07
1989	435	37.70	36.10	4.79	11.82	2.56	0.32	6.71	73.80	26.20
1990	580	38.40	35.20	5.40	14.80	3.40	0.21	2.59	73.60	26.40
1991	635	39.58	37.40	2.78	14.12	3.01	0.23	3.24	76.98	23.38
1992										
1993	755	40.10	35.10	4.02	13.50	2.40	0	4.88	75.20	24.80
1994	845								0.00	0.00
1995	900	38.92	39.71	3.19	12.12	0.80	0	5.26	78.63	21.37
2000	1555	55.81	27.69	2.56	9.15	0.77		4.02	83.50	16.50
2005	4531	68.36	18.20	1.56	7.88	1.56		2.44	86.56	13.44

Tabla 1 Datos de estación de conteo para la sección de estudio.

Como se puede ver la información sobre el tránsito registrada por el Departamento de Planificación Sectorial del MOPT no es completa, sin embargo permite realizar una estimación de los porcentajes de distribución vehicular.

Siendo el aumento de tránsito entre el año 2000 y el 2005 de casi un 300%, se decide tomar en cuenta para el cálculo del porcentaje de crecimiento anual en esta sección, únicamente la contribución de los vehículos pesados, que son los que brindan la solicitud de cargas más significativa a nivel estructural.

Este porcentaje de aumento corresponde a un 7.4% y se considerará que este será el porcentaje de crecimiento anual que afectará a los vehículos tipo C2, C2+, C3, T3-S2, pick ups y buses.

Nota: Los espesores resultados de este diseño no consideran el posible aumento en el tránsito producto de la apertura de la Interamericana Sur o el tránsito previsto para las secciones Quepos – Savegre – Barú.

Tomando en consideración los elementos mencionados, se decide realizar el cálculo del tránsito para un periodo de diseño de 8 años, elegido como el periodo mínimo de diseño para un proyecto de este tipo. Se toma como año base del diseño el año 2009 y es a partir de ese año que se proyecta el tránsito de la sección.

TPD 2005	4531	
Porcentaje de crecimiento	7.4	
TPD 2009	6028.53	TPD2005*(1+i)^n

Año	TPD ¹	C2 ²	C3	Pick-up y C2+	Bus C2, Bus C2+, ejes dobles	T3 S2	Esals diseño ³	Esal Diario
	Porcentaje de distribución	7.88	1.56	18.2	1.56	2.44		
	Porcentajes	0.08	0.02	0.18	0.02	0.02		
1	2009	6029	392.86	185.36	18.65	174.92	567.94	1,339.74
2	2010	6475	421.94	199.08	20.03	187.87	609.97	1,438.88
3	2011	6954	453.16	213.81	21.51	201.77	655.10	1,545.36
4	2012	7468	486.69	229.63	23.11	216.70	703.58	1,659.72
5	2013	8021	522.71	246.63	24.82	232.74	755.65	1,782.53
6	2014	8615	561.39	264.88	26.65	249.96	811.56	1,914.44
7	2015	9252	602.93	284.48	28.63	268.46	871.62	2,056.11
8	2016	9937	647.55	305.53	30.74	288.32	936.12	2,208.26
							5,089,943.38	
							2,544,971.69	

Factor camión	C2	C3	Pick-up y C2+	Bus C2, Bus C2+, ejes dobles	T3 S2
	0.827	1.971	0.017	1.86	3.861
	Cartago	Bernardo Soto	Promedio aprox	Pérez Zeledón	San Carlos

Tabla 2 Cálculo de ejes equivalentes de diseño.

$$\textcircled{1} \quad TPD_{\text{año-correspondiente}} = TPD_{\text{año-anterior}} * (1 + i)^n$$

En este caso como se hace año a año, se basa en el TPD del año anterior entonces $n=1$ e $i=7.4\%$.

$$\textcircled{2} \text{ Valor} = \frac{\text{TPD}_{\text{año-correspondiente}} * \% \text{ de distribución de ese tipo de vehículo} * \text{Factor camión}}{\text{Suma de las casillas} * 365}$$

3 Suma de las casillas * 365

En el cálculo anterior de los Ejes Equivalentes de diseño, se utilizaron los factores camión obtenidos del estudio de encuesta de carga realizado por la Unidad de Investigación del LanammeUCR, del cual se tomaron aquellos factores camión que correspondían a distribuciones vehiculares similares a las encontradas en el tramo Esterillo – Lomas, y considerando el uso del suelo entre otros elementos.

Paso 3: Investigación del pavimento

Para el diseño de sobrecapas de pavimento flexible es necesario hacer una recopilación de información.

1-DESCRIPCIÓN DE LA RUTA O SECCIÓN

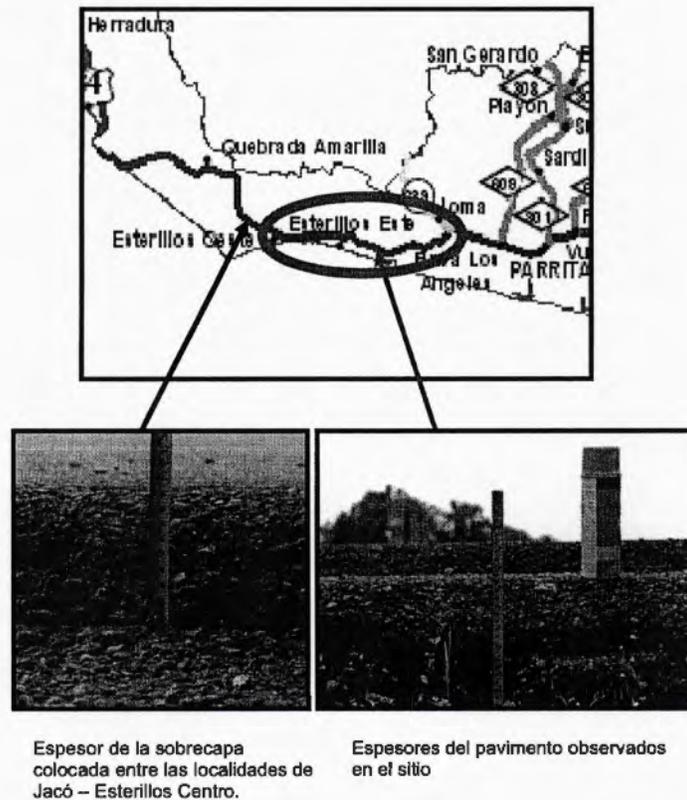


Ilustración 1 Ubicación del tramo Esterillos Lomas

- **Ubicación**

Costanera Sur, entre Jacó y Parrita. El tramo de 10.3 km sobre la ruta 34, consiste en una sección de ancho aproximado de 10m, ubicada entre las localidades de Esterillos y Lomas. (Ilustración 1). La sección de estudio inicia en la entrada a Esterillos Centro (0+000) donde se puede observar el final de la capa de ruedo que estaba siendo colocada para esta ruta en el tramo Jacó – Lomas. Esta capa tiene un espesor aproximado de 9 cm. Posteriormente, ya en la sección Esterillos – Lomas el paquete estructural que se pudo observar correspondía con una base rígida "estabilizada o mejorada" con cemento hidráulico con un espesor aproximado de 14cm, recubierta por una "carpetilla delgada" con espesores entre 2.5 y 4cm.

- **No. de Ruta**

34

- **Ruta**

Nacional

- **Sección de control**

60082

- **Longitud tramo**

10.3 km

- **Clasificación de la ruta**

Primaria

2-VISITA CAMPO

- **Drenajes:**

En la fecha en la que se realizó la visita se pudo observar que algunas alcantarillas estaban a punto de alcanzar su capacidad máxima, lo cual evidencia inadecuadas condiciones de drenajes en la sección. En presencia de lluvias la vía se inundará, favoreciendo el deterioro de la capa de ruedo.



Ilustración 2 Drenaje Pobre

- **Uso del suelo en la zona:**

Las principales actividades que se desarrollan en la zona están relacionadas con el turismo. Sin embargo esta ruta, es parte de la costanera y aunque la ruta aún no es utilizada plenamente por los transportistas de carga pesada, posiblemente se dé un incremento cuando la carretera sea completada. Se observa transporte pesado con aumento en épocas de mayor producción agrícola y un elevado incremento en la construcción de complejos habitacionales y afluencia masiva de vehículos livianos y buses por aumento en la actividad turística.

- **Investigación visual general**

En cuanto a deterioros, se observó un patrón generalizado de desprendimientos (peladuras) de severidad alta, producto de envejecimiento de asfalto luego de sufrir 8 años de servicio, lo cual se suma al poco espesor de la capa de ruedo, lo que ha acelerado el proceso de oxidación. La capa de rodamiento presenta una macrotextura rugosa producto de la pérdida de finos y del poco espesor de la carpeta en relación con el tamaño máximo nominal de la mezcla observada (12.5 mm).

El desprendimiento observado no es total, aún se mantiene gran cantidad de la sobrecapa, sin embargo corresponde a un área, medida en tramos de 100m cada uno, superior al 30% de la superficie de toda la sección, calificándolo como un deterioro de severidad alta según el "Catálogo de Deterioros para Pavimentos Flexibles" del Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica y califica como este tipo de deterioro ("raveling") por tratarse de una carpetilla delgada de mezcla densa convencional.

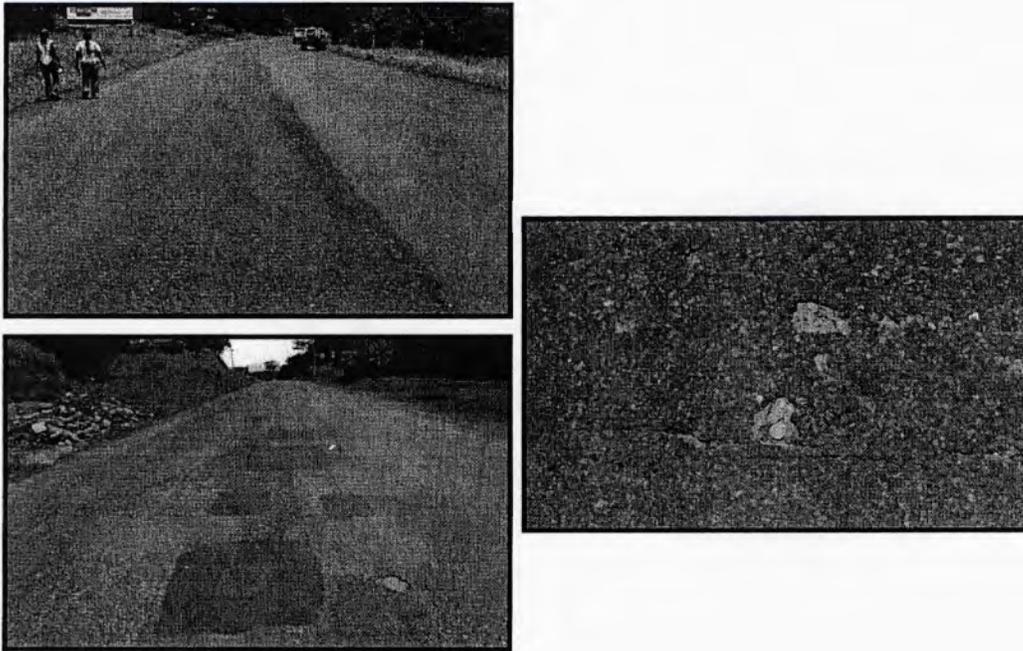


Ilustración 3 Desprendimientos característicos de la sección observada, ruta 34, Esterillos – Lomas

Posibles causas de este tipo de deterioro

- * Envejecimiento del ligante asfáltico.
- * Insuficiente penetración (< 0.5 cm) del riego de imprimación en la base estabilizada.
- * Dosificación insuficiente de ligante (asfalto) en la base estabilizada.
- * Ligante (asfalto) inadecuado o de mala calidad.
- * Espesor insuficiente de la capa de rodadura (carpeta).
- * Compactación insuficiente o deficiente.

Adicionalmente, se observó un patrón de agrietamiento transversal sobre la carpeta delgada, que es característico de las bases o capas estabilizadas con cemento hidráulico que presentan agrietamiento por contracción. Este agrietamiento que se ha reflejado sobre la carpeta delgada existente, indudablemente se va a reflejar sobre cualquier otra sobrecapa que quiera colocarse a menos que se tomen medidas de mitigación de reflejo de grietas.

El patrón observado presenta un agrietamiento transversal continuo a lo largo de toda la sección, con presencia de grietas en espaciamientos que varían de 4 – 10 m convirtiendo este deterioro en un deterioro de severidad alta (> 25 grietas en tramos medidos de 100m) según el “Catálogo de Deterioros para Pavimentos Flexibles” del Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica, adicionalmente, el agrietamiento observado presenta anchos promedio superiores a los 60mm, calificando este tipo de agrietamiento de severidad alta según el catálogo de deterioros de la “Federal Highway Administration”.

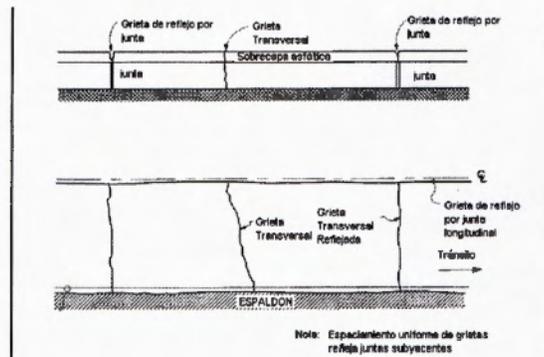


Ilustración 4 Diagrama de agrietamientos reflejados en la capa superior



Ilustración 5 Patrón de agrietamiento presente a lo largo de toda la sección



Ilustración 6 Ancho de grietas de severidad alta

• **Muestras de cielos abiertos**

Se realizaron cuatro muestreos a cielo abierto de los cuales se obtuvo la información de espesores y descripción cualitativa de los materiales que se muestra en la

Tabla 3. Los espesores o promedios ponderados de los mismos, serán utilizados más adelante para el Retrocálculo de Módulos.

Estacionamiento	Nombre de la capa	Espesores	Descripción
0+000	CA	3	Muy delgada se deforma, se quiebra fácilmente
	BE	14	Base Estabilizada muy compacta
	Base	55	Base granular, arenoso, medianamente compacta, gris oscuro muy húmedo
	Subbrasante		Material de gran tamaño, color café claro muy compacto
2+250	CA	3	Carpeta muy delgada
	BE	14	Base estabilizada muy compacta
	Base	55	Base granular arenosa
	Subbrasante		Arcilloso material con piedras color café claro
4+250	CA	3	
	BE	14	
	Base	88	Material de río
	Subbase	-	
	Subbrasante	27	Material arcilloso, con piedras
7+750	CA	1.5	
	BE	16.5	
	Base	34	Gris oscuro, material de río, tamaño máximo 6.5 cm
	Subbase	20.5	Material de río, tam max 11.5
	Subbrasante	48.5	Muy compacta, material arcilloso plástica, color terracota
10+100	CA	3	
	BE	14	
	Subbase	62	Desde muy compacta hasta suelto, gris oscura.
	Subbrasante	28	Subrasante húmeda, café claro material arcilloso con segmentos gris claro

Tabla 3 Espesores obtenidos en los cielos abiertos y descripción cualitativa de los materiales hallados

En el **Gráfico 1** se puede observar el perfil de los materiales presentes en las diferentes excavaciones

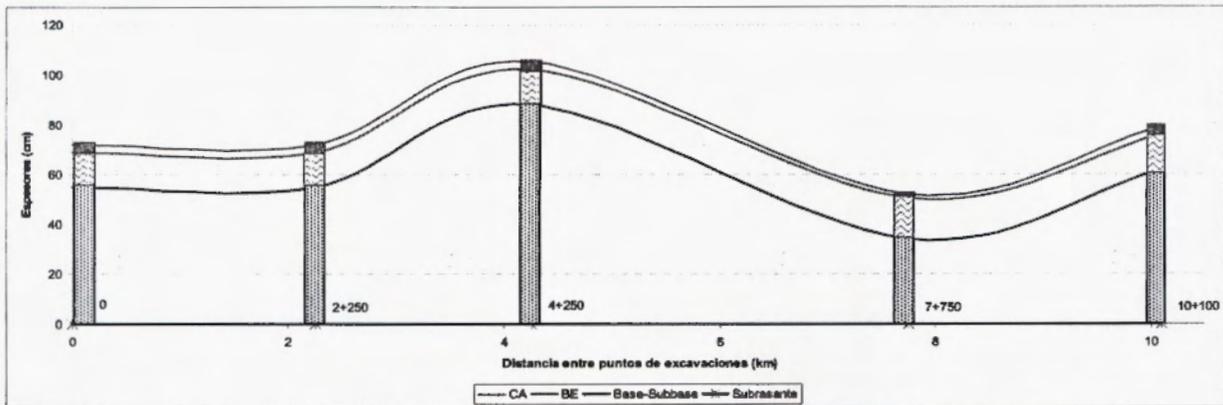


Gráfico 1 Perfil de los espesores hallados en las excavaciones a cielo abierto.

Además de estos sitios se extrajeron muestras para realizar ensayos que se detallan en la **Tabla 4**.

Número de muestra	Excavación ⁴	Estacionamiento	Descripción inicial
0964-07 a	Excavación 1 saco	2+250	Base granular
0964-07 b	Excavación 1 saco		Subrasante
0965-07 a	Excavación 1 bolsa		Base granular
0965-07 b	Excavación 1 bolsa		Subrasante
0966-07 a	Excavación 3 saco	7+750	Subbase
0966-07 b	Excavación 3 saco		Subrasante
0967-07 a	Excavación 3 bolsa		Material de Base Granular
0967-07 b	Excavación 3 bolsa		Material de Subbase
0967-07 c	Excavación 3 bolsa		Material de Subrasante
0990-07	Excavación 4 saco	10+100	Agregado grueso
0991-07 a	Excavación 4 bolsa		Material de Base arenoso
0991-07 b	Excavación 4 bolsa		Material de Subrasante

Tabla 4 Muestras extraídas en excavaciones a cielo abierto

A las muestras 0965-07 a, 0965-07 b, 0967-07 a, 0967-07 b, 0967-07 c, 0991-07 a y 0991-07 b se les realizaron pruebas para determinar el Índice de Plasticidad y así definir la

⁴ Se realizó una excavación en el estacionamiento 0+000 y 4+250, sin embargo de este punto solo se anotaron los espesores y no se extrajo material para pruebas de laboratorio.

correspondiente clasificación según la Carta de Plasticidad. Los resultados de estas pruebas se presentan en la **Tabla 5**.

Número de muestra	LL	LP	IP	%w	Est.	Descripción Inicial	Clasificación según Carta Plasticidad
0965-07 a	NP	NP	NP	8.81	2+250	Base granular	Material no plástico
0965-07 b	57	25	32	31.52		Subrasante	Según la carta de plasticidad clasifica como CH: Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas
0967-07 a	NP	NP	NP	10.72	7+750	Material de Base Granular	Material no plástico
0967-07 b	NP	NP	NP	5.12		Material de Subbase	Material no plástico
0967-07 c	73	33	40	32.97		Material de Subrasante	Según la carta de plasticidad clasifica como MH: Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o con diatomeas, limos elásticos.
0991-07 a	NP	NP	NP	9.36	10+100	Material de Base arenoso	Material no plástico
0991-07 b	49	23	26	29.05		Material de Subrasante	Según la carta de plasticidad clasifica como CL: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras

Tabla 5 Resultados de las pruebas de laboratorio de suelos

Por otro lado a las muestras 0964-07 a, 0964-07 b, 0966-07 a, 0966-07 b y 0990-07 se les realizó un análisis granulométrico para comparar el material presente en las excavaciones con las especificaciones granulométricas para distintos materiales presentes en el CR 2002. A continuación se presentan los gráficos que presentan los resultados para cada muestra.

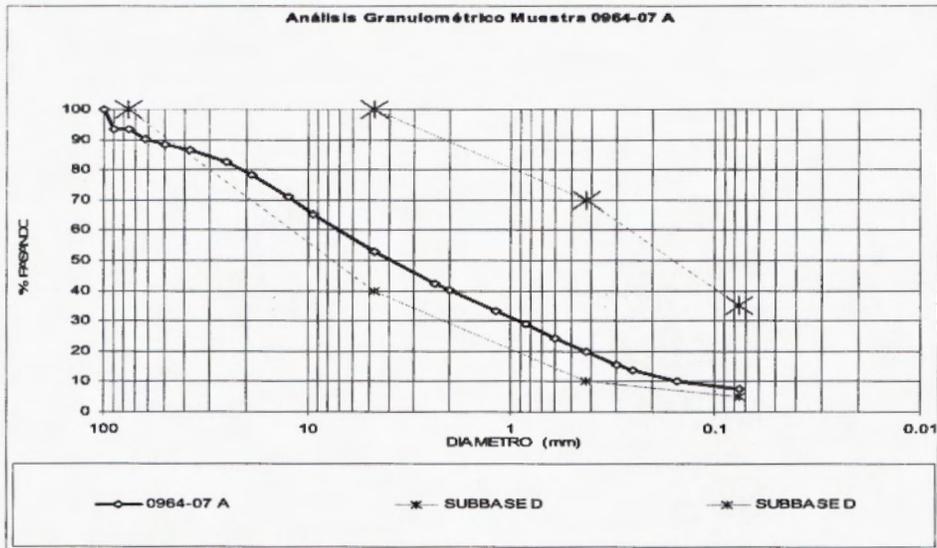


Gráfico 2 Análisis granulométrico muestra 0964-07 A.

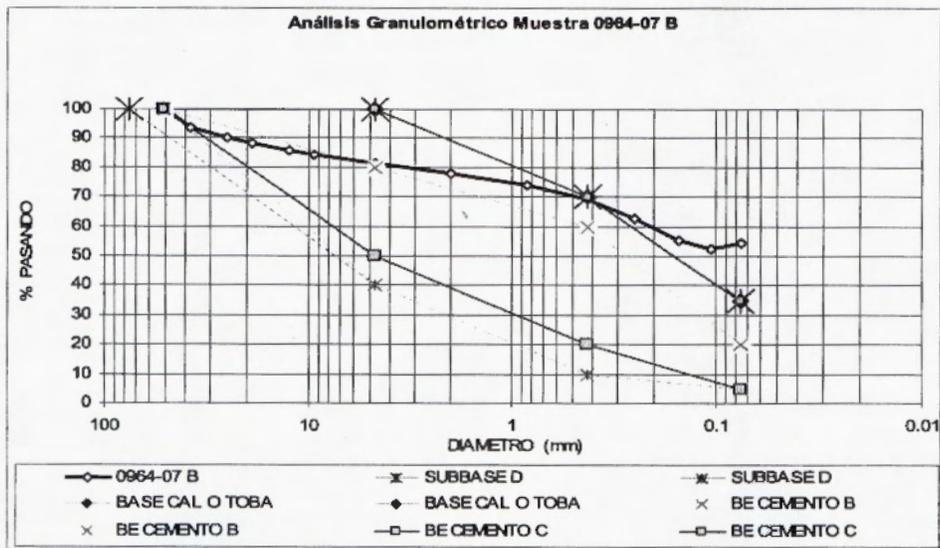


Gráfico 3 Análisis granulométrico muestra 0964-07 B.

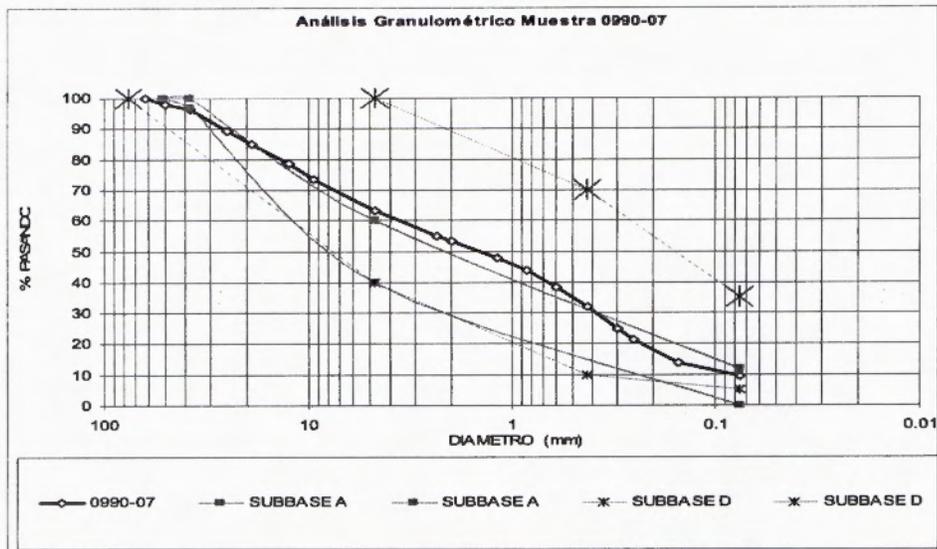


Gráfico 6 Análisis granulométrico muestra 0990-07.

En resumen y con base en lo que se puede observar en los gráficos anteriores es posible clasificar los materiales presentes en las excavaciones según las especificaciones granulométricas presentes en el CR 2002 como se muestra en la **Tabla 6**

Número de muestra	Est.	Descripción inicial	Clasificación según CR 2002 ún CR 2002 (especificaciones granulométricas)
0964-07 a	2+250	Base granular	Clasifica según granulometría como Subbase D
0964-07 b		Subrasante	Tiene propiedades granulométricas similares una BE o Subbase D
0966-07 a	7+750	Subbase	Tiene propiedades granulométricas similares una Subbase A y/o D
0966-07 b		Subrasante	No tiene propiedades granulométricas similares a alguna especificación.
0990-07	9+250	Agregado grueso	Tiene propiedades granulométricas similares una Subbase A y/o D

Tabla 6 Clasificación de materiales según análisis granulométrico comparado con especificaciones del CR 2002.

• Ensayos de Deflectometría

Se realizaron ensayos de deflectometría a cada 50 metros los resultados se muestran en el **Gráfico 7** donde también se pueden observar los tramos homogéneos que resultan del análisis realizado mediante el programa SPEC a los datos iniciales del D1 o deflexión central.

Según es posible observar en el **Gráfico 7**, a pesar de que existen subtramos, en términos generales, el tramo en su totalidad es bastante homogéneo, salvo en lugares específicos como los delimitados por los estacionamientos 2+000 y 3+000 y entre el 7+000 y 8+000, donde probablemente existan problemas puntuales tales como agrietamientos excesivos por fallas asociadas a un drenaje pobre entre otros.

Las deflexiones utilizadas para realizar el retrocálculo de módulos, tienen como base las aquí mostradas y se detallan más adelante en la sección correspondiente.

En el **Gráfico 10** se puede observar el esquema que resume la medición instrumental realizada mediante el deflectómetro de impacto y el perfilómetro láser, así como la propuesta para realizar la evaluación visual del tramo.

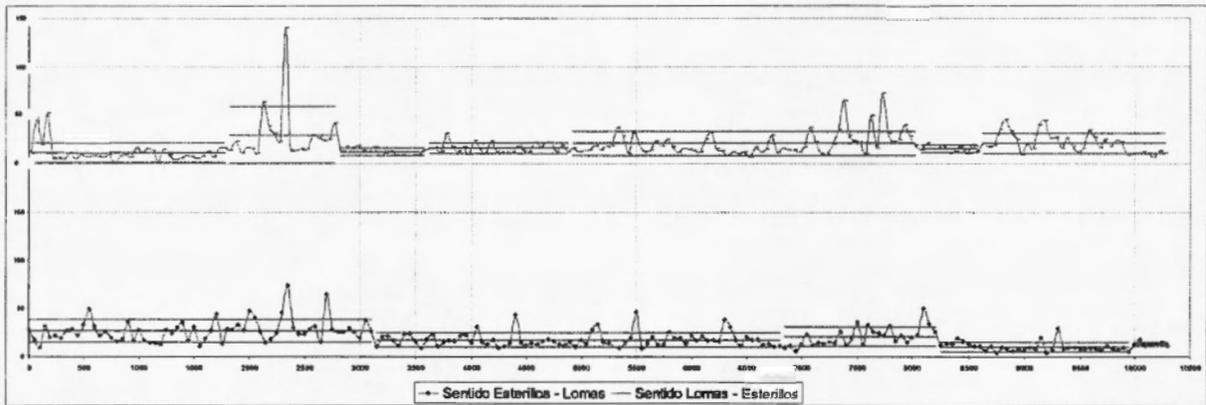


Gráfico 7 Valores de D1 (deflexión central) y análisis de tramos homogéneos.

• **Ensayo de Regularidad Superficial**

En cuanto al ensayo de regularidad superficial realizado se tienen los datos de medición del IRI a cada 100 metros.

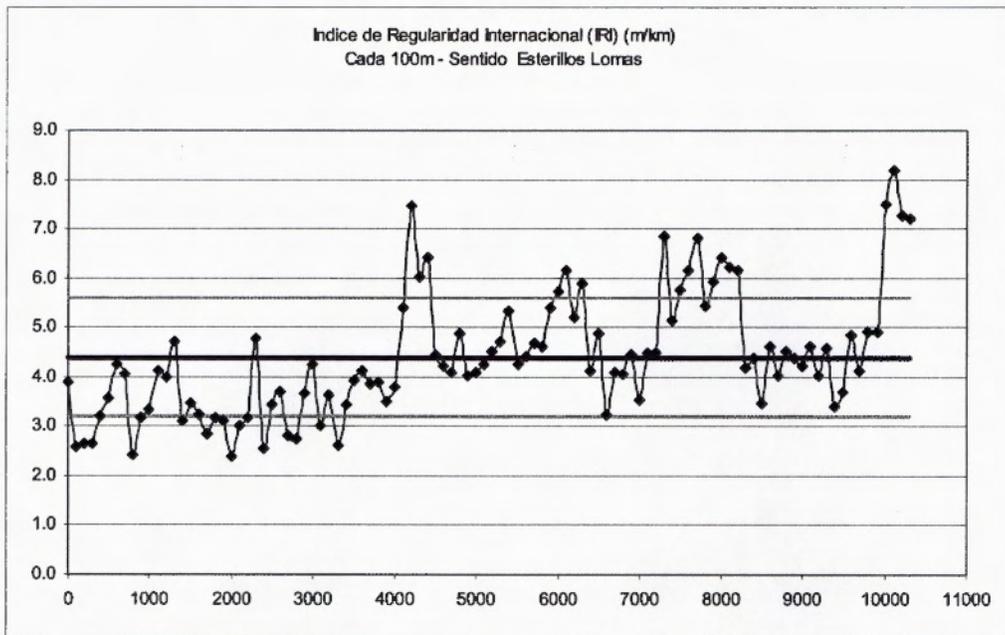


Gráfico 8 Valores de IRI cada 100 metros Sentido Esterillos – Lomas.

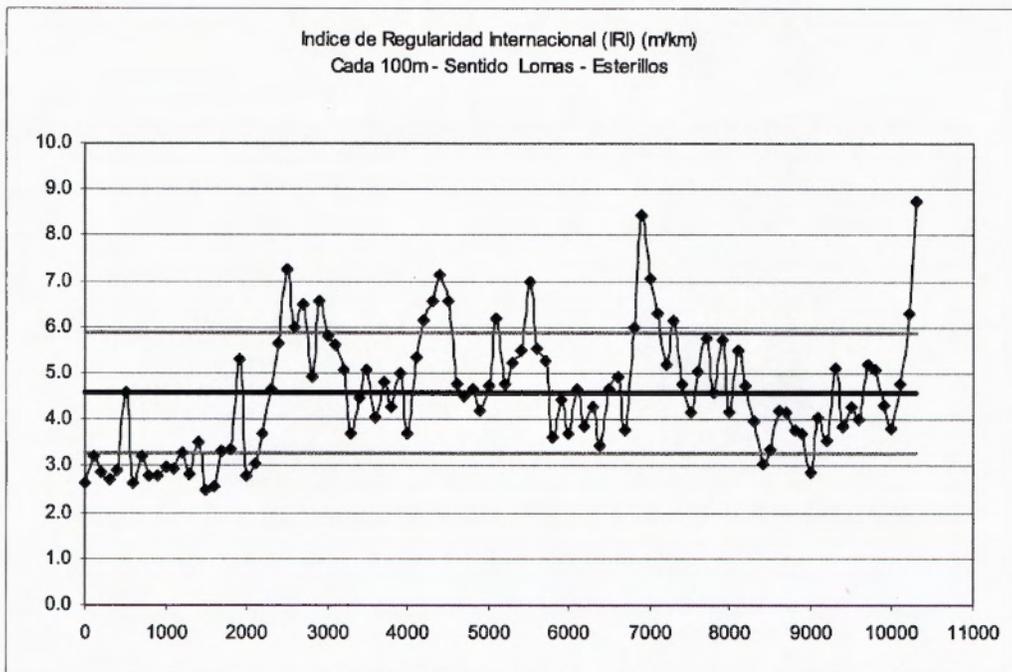
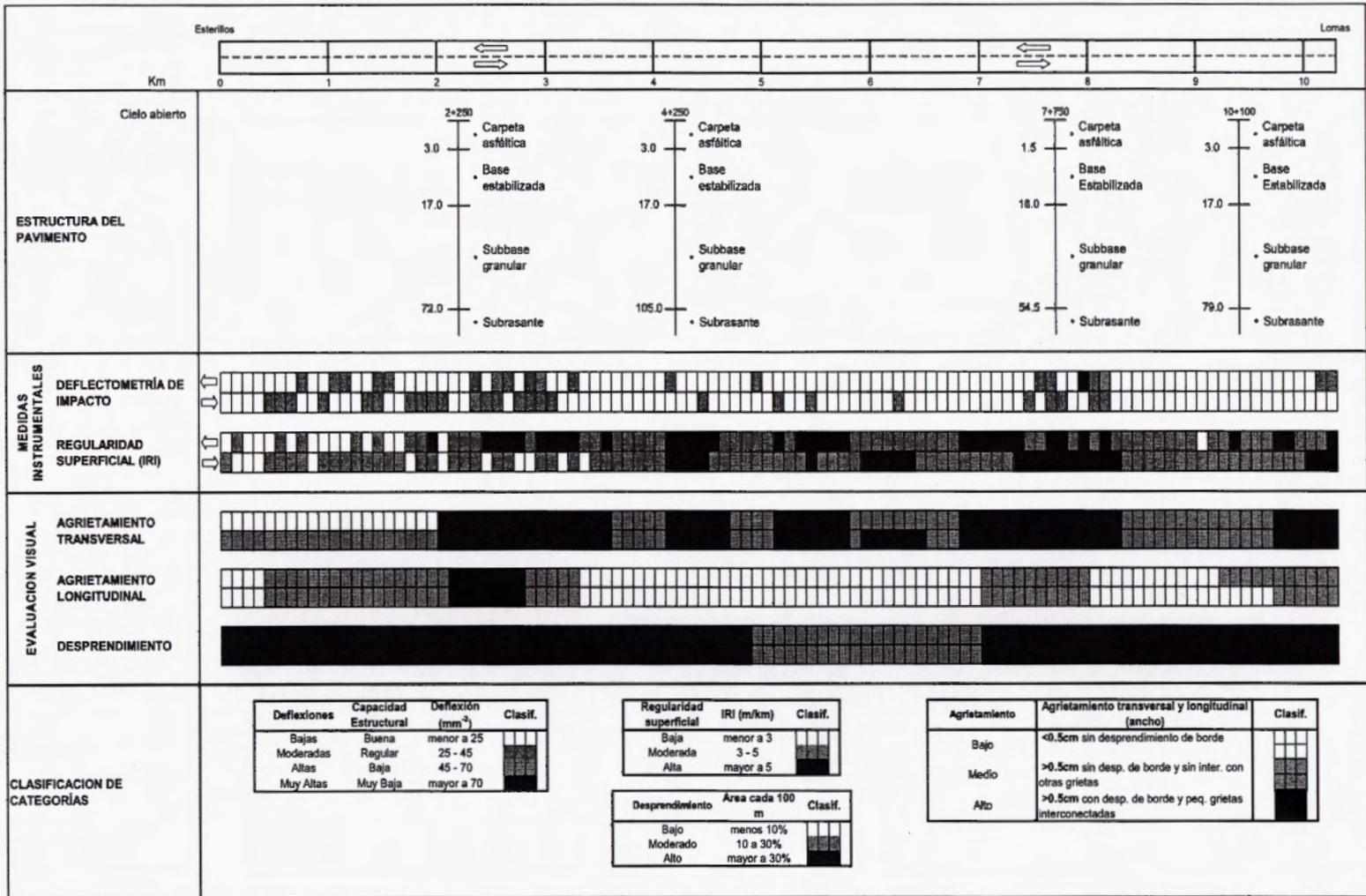


Gráfico 9 Valores de IRI cada 100 metros Sentido Lomas - Esterillos.

Del ensayo de regularidad superficial por medio del cual se determina el valor de IRI, representado en los gráficos 8 y 9 se obtienen valores que oscilan entre 3 y 9 (m/km) lo cual, unido con los valores de deflexiones, que en términos generales son bajos, evidencia que el tramo presenta un mayor deterioro en su capacidad funcional que en su capacidad estructural.

Gráfico 10 Esquema resumen de Mediciones Instrumentales y Evaluación Visual



Paso 4: Diseño preliminar de la sobrecapa. Metodología AASHTO 93.

Una vez analizadas las causas de los deterioros encontrados en el tramo Esterillos – Lomas (10.3 km de longitud) se inicia el cálculo de la sobrecapa de mezcla asfáltica que se va a colocar.

En este punto cabe resaltar que la condición actual del paquete estructural existente en el tramo de estudio presenta cierto nivel de deterioro, el cumplimiento de las expectativas de desempeño de cualquier capa adicional que se construya con intención de aumentar la capacidad estructural de la sección, debe estar precedida de intervenciones eficientes y eficaces que eliminen las causas de esos deterioros o al menos minimicen el efecto en la capas nuevas.

Cálculo de las variables de diseño

Índice de serviciabilidad

El análisis preliminar de la sección, por medio de mediciones del Índice de Regularidad Internacional (IRI) determinó que el promedio de valores de regularidad de toda la sección era de IRI= 4.5 m/km en mediciones realizadas cada 100 metros en ambos sentidos, por lo que el valor actual del Índice de Calidad de Servicio (PSI) según la metodología AASHTO-93 (American Association of State Highway and Transportation Officials) en la sección Esterillos – Lomas es equivalente a 2.2 (Informe de evaluación de la red vial nacional, lanamme-2006), es decir cerca del final de su vida útil a nivel funcional.

Considerando que la colocación de una sobrecapa de Mezcla Asfáltica en Caliente va a recuperar tanto la capacidad estructural de la sección como su capacidad funcional (IRI) se asume que el valor de desempeño inicial es de:

Po= 4.2 (usual para pavimentos flexibles)

Y el valor final en vías de alto tránsito al final de periodo de diseño será de:

Pt= 2.5

(No se toman en cuenta los efectos por expansividad de arcillas y el efecto de congelamiento por no presentarse en esta sección)

Por lo tanto:

$$\Delta\text{PSI} = 4.2 - 2.5 = 1.7$$

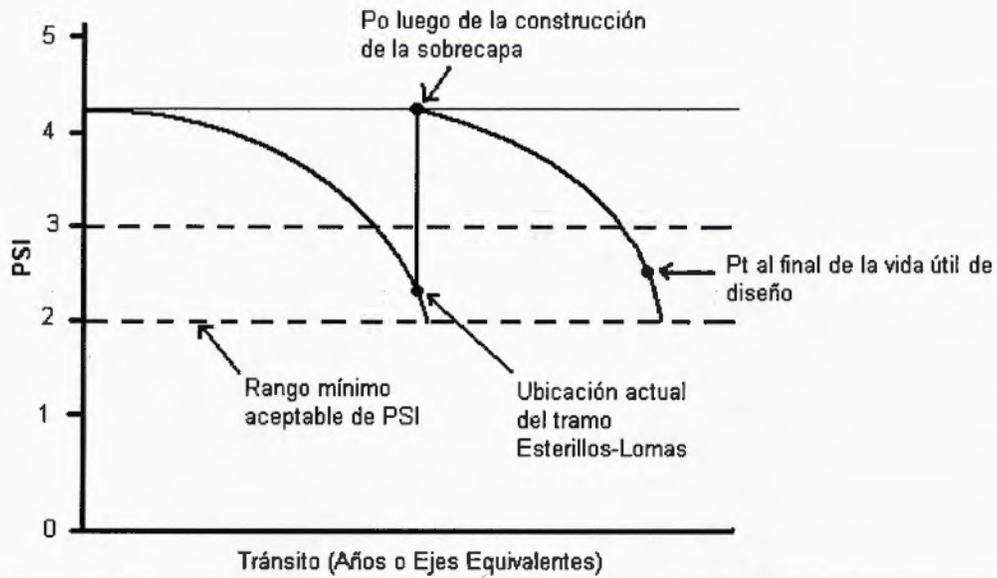
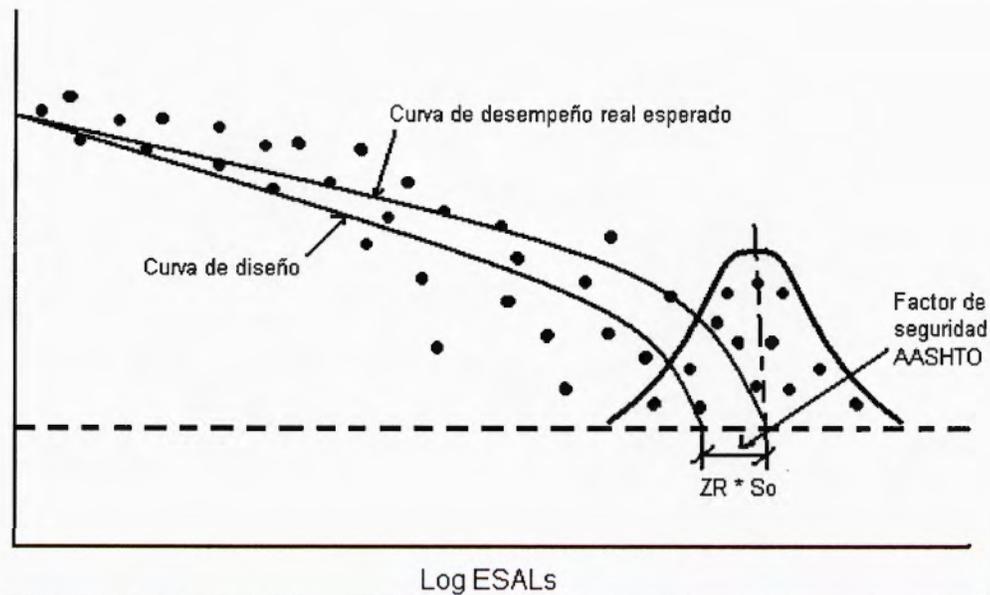


Ilustración 7 Cálculo del Δ PSI para la sección Esterillos - Lomas

Nivel de confianza

En función de las características de la sección definidas en el paso 3 de este documento, se determinó un nivel de confianza de $R=95\%$, y se calcula un valor de $ZR= -1.645$ y $So= 0.5$ (valor alto, considerando el riesgo de que se apliquen prácticas constructivas que aporten mayor incertidumbre al desempeño. Los valores para este parámetro deben rondar entre 0.4 y 0.5 para pavimentos flexibles)



Retrocálculo de Módulos de las Capas Existentes

En este caso el método empleado toma en cuenta la "cuenca" o curva de deflexiones, la cual se usó en un procedimiento conocido como retrocálculo para estimar el módulo elástico de cada capa del pavimento. En este procedimiento se usó el programa de cómputo Everstress del Washington State Department of Transportations, por medio del cual se calcularon deflexiones teóricas bajo la carga aplicada usando un valor asumido de módulo para cada capa. Las deflexiones teóricas se comparan con las deflexiones medidas en la cuenca y luego el módulo supuesto se ajusta en un proceso iterativo hasta que el error entre las deflexiones teóricas y las medidas sea muy bajo (usualmente menor al 10%). Puede aceptarse entonces que los módulos así derivados son similares a los de las capas del pavimento y estos valores pueden utilizarse, junto con los espesores de las capas, en los análisis estructurales.

En este caso se analizaron los datos de deflexiones obtenidos y se decide utilizar las deflexiones obtenidas con el percentil 90, esto porque el percentil 90 representa un nivel de deflexiones de superficie tal que el 90% de las deflexiones medidas en todo el tramo son inferiores, esto garantiza que los valores elegidos son representativos para toda la sección.

Los valores de deflexiones medidos en el tramo son los siguientes:

Unidades US	DEFLEXIONES								
	mills								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
	0	7.87	11.81	17.72	23.62	35.43	47.24	59.06	70.87
Promedio	7.5435	6.3920	5.4826	4.8361	3.7386	2.6449	2.1074	1.6372	1.4103
Desv. Estándar	4.8679	3.8062	2.5646	6.5782	1.9708	0.9883	1.7323	0.9760	1.9266
Mediana	6.2677	5.5590	5.0079	4.1358	3.4882	2.5216	1.9606	1.5669	1.3012
Moda	6.6220	4.1850	3.4606	5.1220	3.4567	2.9488	2.0984	2.0748	1.3898
Percentil 80	10.1716	8.3189	7.1189	5.6378	4.6543	3.1409	2.3701	1.9047	1.5905
Percentil 90	12.7693	10.4893	8.9169	6.7941	5.2795	3.7949	2.8374	2.2555	1.8614
Valor mínimo	2.6755	2.5858	2.9181	-1.7421	1.7678	1.6566	0.3751	0.6612	-0.5163
Valor máximo	12.4114	10.1981	8.0472	11.4143	5.7094	3.6333	3.8397	2.6131	3.3369

Tabla 7 Valores de deflexiones medidos en el tramo.

Por medio del programa Everstress se realiza el retrocálculo de módulos y se obtiene luego de repetidas iteraciones valores de deflexiones con un porcentaje de error de 5.98%. Se eliminaron los valores de las deflexiones medidas en el geófono D4 ya que el Everstress solo trabaja con 8 geófonos y elimina ese valor por defecto.

<i>x</i> (in)	<i>x</i> cm	Deflexión original	Deflexiones retrocalculadas	
			EL24	EL25
0	0	12.8	13.293	13.01
79	79	10.5	10.06	9.68
118	118	8.9	8.33	7.99
236	236	5.3	5.53	5.17
354	354	3.8	4.18	3.85
472	472	2.8	3.32	3.04
591	591	2.3	2.72	2.47
709	709	1.9	2.27	2.06

Diferencia porcentual	Diferencia porcentual
3.9%	1.6%
4.2%	7.8%
6.4%	10.2%
4.3%	2.5%
10.0%	1.3%
18.6%	8.6%
18.3%	7.4%
19.5%	8.4%
10.60%	5.98%

Tabla 8 Comparación de deflexiones.

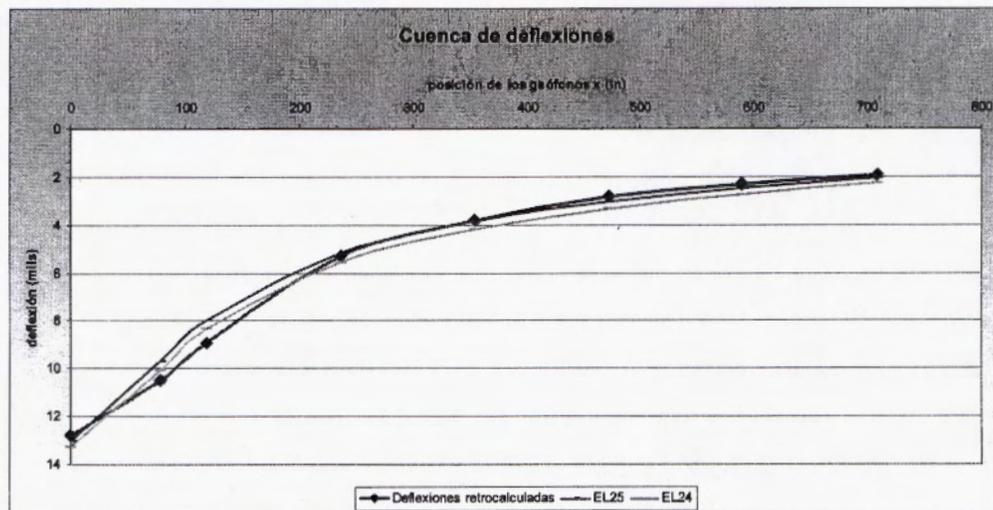


Gráfico 11 Comparación de deflexiones

Al aproximar las deflexiones medidas por el retrocálculo se obtienen los siguientes módulos para el pavimento existente:

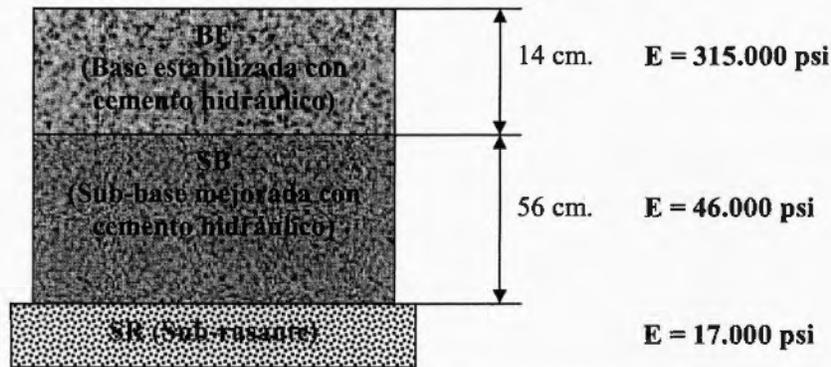


Ilustración 8 Pavimento existente

Considerando como un valor típico de módulo para una base estabilizada de 500.000 psi podemos ver como el valor obtenido corresponde con una pérdida de aproximadamente un 40% de su capacidad lo cual es consistente con la auscultación visual realizada en el tramo, donde la presencia de agrietamiento transversal severo por contracción ha disminuido la capacidad estructural de la base, pero aún manteniéndola en un rango medio bastante aceptable.

En el caso de la Sub-base y la sub-rasante encontramos valores muy altos de módulo que contribuyen a aumentar la capacidad estructural del pavimento.

Cálculo del número estructural existente en el tramo

Con los módulos de las diferentes capas encontrados por medio del retrocálculo se procede a calcular el número estructural del tramo, por medio de las fórmulas de la guía AASHTO – 93.

$$SN = a_1 h_1 + a_2 h_2 m_2 + a_3 h_3 m_3 + \dots$$

Ecuación 1

En este caso:

Base estabilizada

a2 = 0.069 (interpolado gráficos de la guía AASHTO-93)

m2 = 0.9 (Considerando condiciones de drenaje pobre y más de un 25% del año expuesta a la humedad y además, un considerable nivel de agrietamiento transversal por contracción)

Sub - Base

$a_3 = 0.2194$ (interpolado gráficos de la guía AASHTO-93)

$m_3 = 0.6$ (Considerando condiciones de drenaje pobre y más de un 25% del año expuesta a la humedad)

$$SN = 0.069 * 5.5 * 0.9 + 0.2194 * 22 * 0.6$$

$$SN = 3.25 \text{ (Pavimento actual)}$$

Cálculo del número estructural requerido para del periodo de diseño elegido

Se utiliza la fórmula de la AASHTO-93:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Ecuación 2

En la **Ecuación 2** se evalúan los valores de:

$$W_{18} = 2.544.971,69$$

$$Z_R = -1.645$$

$$S_o = 0.5$$

$$\Delta PSI = 1.7$$

$M_R = 8.500$ psi (Es el módulo de la sub-rasante dividido por un factor de 2, producto de la variación estacional de módulos. Factor obtenido en el lanammeUCR.)

$$SN = 4.22 \text{ Número estructural requerido por el pavimento para resistir las sollicitaciones de carga.}$$

$$\Delta SN = 4.22 - 3.25 = 0.97$$

Por lo tanto, despejando para este valor de SN de la fórmula 1, tenemos que el espesor requerido de sobrecapa corresponde a 2.45 in ó 6.24 cm equivale a 7cm para efectos constructivos.

Este espesor de sobrecapa es mayor que el mínimo constructivo recomendado para mezclas asfálticas densas como las usadas en nuestro país, es decir, 3*tamaño máximo nominal del agregado, por lo que no hay restricciones constructivas de espesor y se puede lograr una compactación adecuada calibrada por medio de una franja de control o tramo de prueba.

De esta forma, el paquete estructural propuesto es el siguiente:

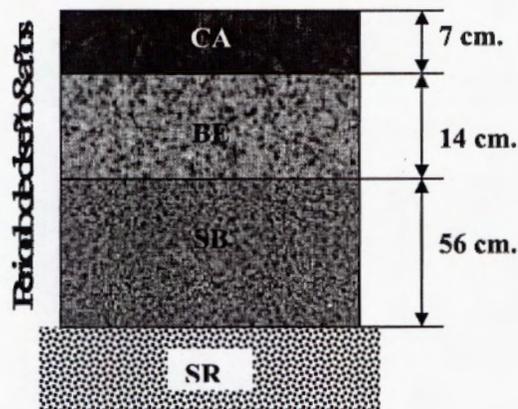


Ilustración 9 Estructura propuesta del pavimento.

Análisis por fatiga de las capas del pavimento propuestas

Se realizó un análisis por fatiga de cada una de las capas del pavimento, con el fin de determinar la resistencia del paquete estructural propuesto a la fatiga de acuerdo con las ecuaciones conocidas para este tipo de análisis. De esta forma se puede predecir, con cierto nivel de certeza, si las capas de la sobrecapa asfáltica y la base estabilizada van a resistir los esfuerzos de tensión en las fibras inferiores y la capa de sub-rasante los esfuerzos de compresión en las fibras superiores (falla por asentamiento).

Sobrecapa asfáltica

El módulo de la sobrecapa asfáltica se calculó por medio del uso de la ecuación del modelo de Witczak (ecuación 3), calculada para las mezclas nacionales (Proyecto de investigación "Módulos de mezcla asfáltica").

$$\log E^* = 5,535833 + 0,002087 \rho_{200} - 0,000566(\rho_{200})^2 - 0,002590 \rho_4 - 0,078763 V_a - 1,865947 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{2,399557 + 0,000820 \rho_4 - 0,013420 \rho_{38} + 0,000261(\rho_{38})^2 + 0,005470 \rho_{34}}{1 + e^{(0,052941 - 0,498163 \log(f) - 0,691856 \log(\eta))}}$$

Ecuación 3

donde:

E^* = módulo dinámico, psi.

η = viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise.

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\text{sen } \delta} \right)^{4,8628}$$

Con los datos anteriores se calcularon las deformaciones a tensión en el eje X en la fibra inferior de la sobrecapa por medio de la siguiente ecuación de Witczak (Guía AASHTO-2002):

$$N_f = 0.00432 * 10^{4.84 * \left(\frac{\% \text{asfaltoefectivo}}{\% \text{vaciosaire} + \% \text{asfaltoefectivo}} - 0.69 \right)} * \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.291} * \left(\frac{1}{E} \right)^{0.854}$$

Ecuación 4

Donde:

ϵ_t = deformación en el sentido x

E = módulo elástico de la sobrecapa asfáltica

En este caso el valor de repeticiones N_f es el siguiente:

$$N_f = 60 \times 10^6$$

Base Estabilizada

Para la base estabilizada se deben considerar tres opciones

1. Análisis de cero daño en la base estabilizada.
2. Análisis de daño en la base estabilizada con el criterio de fatiga de la PCA.
3. Análisis de daño basados en coeficientes de fatiga especificados por el usuario.

En este caso el análisis es por daño de la BE por lo que la ecuación recomendada por PCA depende del coeficiente (σ/Sc), donde:

σ = Esfuerzo a tensión en la fibra inferior de la BE.

Sc = módulo de ruptura del concreto

En nuestro caso: $\sigma = 0.75$ psi (del análisis elástico con everstress)

$$f_c = 40 \text{ kg/cm}^2 \text{ (BE35)} \approx 569 \text{ psi} \Rightarrow Sc = 8 \sqrt{569} \Rightarrow$$

$\sigma/Sc = 0.004$ que es $\ll 0.45$ por lo tanto $N_f \approx \infty$ (No fallará a fatiga)

Adicionalmente se evaluó por medio de la ecuación

$$N_f = \left(\frac{11266}{E^{0.804}} + 190.7 \right)^{12} \mu * \epsilon$$

Ecuación 5

Proveniente de la guía de diseño de pavimentos de Australia, donde

N = número de repeticiones de ejes equivalentes estándar (8.2 ton) para la falla de la capa cementada.

E =módulo de flexotracción del material cementado, en Mpa, a los 28 días.

ϵ = deformación tensional en la fibra inferior de la capa cementada.

μ = razón o módulo de Poisson (igual a 0.2 para capas cementadas)

Con esta fórmula, el valor de repeticiones admisibles para la base estabilizada asciende a:

$$N_f = 4.32 \times 10^{82}$$

Sub-rasante

En este caso se analiza la capacidad a fatiga de la sub-rasante por medio de la **Ecuación 6** del Instituto del Asfalto:

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_y)^{-4.477}$$

Ecuación 6

Donde ϵ_y = deformación vertical en la fibra superior de la sub-rasante

$$\epsilon_y = 124.33 \times 10^{-6}$$

Y se obtiene un valor de

$$N_d = 417 \times 10^6$$

Análisis de resultados por fatiga

Como se puede ver de los resultados obtenidos, el valor crítico de fatiga se dará en la carpeta asfáltica, donde $N_f = 60 \times 10^6$ es muy superior al valor de $W_{18} = 2.5 \times 10^6$ que es el número de ejes equivalentes obtenidos para las condiciones de tránsito estimadas para el periodo de diseño de 8 años en el tramo Esterillos – Lomas, por lo tanto no se espera que la estructura propuesta presente falla por fatiga dentro de este periodo.

Cabe señalar nuevamente que los deterioros encontrados en la superficie de ruedo, reflejados de la base estabilizada deben ser reparados antes de colocar cualquier sobrecapa con aporte estructural como la calculada en este diseño, con el propósito de evitar la pérdida de la capacidad estructural de la nueva sobrecapa y un reflejo de grietas en el corto plazo.

Tomando en consideración todo lo anterior, si se mantiene un porcentaje de crecimiento de 7.4% y una distribución vehicular como la registrada en la estación 744, no se alcanzará el número de ejes equivalentes que lleven a la falla por fatiga al pavimento propuesto dentro del periodo de diseño de 8 años.