

**PAVIMENTO DE ACCESO A PUERTO
CALDERA: EVALUACION DE LA
APLICABILIDAD DE UNA ESTRUCTURA
DE PAVIMENTO FLEXIBLE O RIGIDO**

Ing. Mario Arce Jiménez

Ing. Pedro Castro Fernández

SETIEMBRE DE 1998



**PAVIMENTO DE ACCESO A PUERTO
CALDERA: EVALUACION DE LA
APLICABILIDAD DE UNA ESTRUCTURA
DE PAVIMENTO FLEXIBLE O RIGIDO**

Ing. Mario Arce Jiménez

Ing. Pedro Castro Fernández

SETIEMBRE DE 1998

INDICE GENERAL

MATERIA	PAGINA
I – INTRODUCCION	1
II- DEFINICION DE CONDICIONES DEL PAVIMENTO	1
2-1. Condiciones de las capas existentes	1
2-2. Condiciones de carga	2
2-3. Condiciones de temperatura en la zona	5
2-4. Evaluación de la capacidad de soporte de la sub-rasante	5
III – EVALUACION DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DISEÑADO	7
3-1. Ecuación de diseño de la AASHTO para pavimentos flexibles	7
3-2. Evaluación de la capacidad estructural del pavimento flexible (número estructural).	8
3-3. Determinación de la vida útil del pavimento por medio del método de diseño de la AASHTO.	9
3-4. Revisión de la resistencia del pavimento flexible al agrietamiento por fatiga	10
3-5. Revisión de la resistencia del pavimento a la formación de roderas por falla estructural de la sub-rasante	11
3-6. Consideraciones sobre la resistencia del pavimento a la formación de roderas funcionales	13
3-7. Desarrollo de un modelo de deterioro para la estructura de pavimento flexible	17
IV – DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO ALTERNATIVO	19
4-1. Ecuación de diseño de la AASHTO para pavimentos rígidos	19
4-2. Evaluación de la capacidad de soporte en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico	20
4-3. Dimensionamiento de la losa de concreto hidráulico	21
4-4. Revisión de la capacidad estructural de la losa por erosión y fatiga	26
4-5. Desarrollo de un modelo de deterioro para la estructura de pavimento rígido	28

INDICE GENERAL

MATERIA	PAGINA
V – COMPARACION DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE VERSUS ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RIGIDO	30
5-1. Beneficios para el usuario	30
5-2. Costos de construcción y mantenimiento	31
VI – CONCLUSIONES	33
VII – REFERENCIAS	34
ANEXO I: Determinación de capacidad de carga (ejes equivalentes) por escenario de análisis	35

PAVIMENTO DE ACCESO A PUERTO CALDERA: EVALUACION DE LA APLICABILIDAD DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE O RIGIDO

I - INTRODUCCION

El propósito de este informe es establecer un criterio técnico sobre la aplicabilidad de una estructura de pavimento con superficie de ruedo asfáltica o de losas de concreto, bajo las condiciones climáticas y de carga particulares, para el acceso de camiones de transporte de carga al puerto de Caldera.

Las características del diseño con superficie de ruedo asfáltica se presentan a continuación:

- Sub-rasante mejorada, material con CBR de 10, espesor de 20 cm.
- Sub-base, material granular, espesor de 15 cm.
- Base estabilizada con cemento, espesor de 25 cm.
- Carpeta asfáltica, espesor de 15 cm.

Actualmente el pavimento se halla construido hasta el nivel de base estabilizada, de manera que antes de colocar la carpeta asfáltica se ha definido analizar las siguientes situaciones particulares:

- Idoneidad de una estructura de pavimento flexible para las condiciones locales de temperatura, cargas elevadas y concentradas (el pavimento se utiliza para estacionar camiones de carga).
- Diseño alternativo de una losa de concreto hidráulico, considerando una base de apoyo integrada por las capas de sub-rasante mejorada, sub-base y base estabilizada con cemento, de conformidad con el estado de la construcción del pavimento a la fecha.
- Establecimiento de criterios de comparación de desempeño a largo plazo, de los dos tipos de estructuras rígida y flexible.

Se considerará un período de análisis de 25 años, de manera que se evaluará el desempeño de los dos tipos de estructura a largo plazo.

II - DEFINICION DE CONDICIONES DEL PAVIMENTO

2-1. Condiciones de las capas existentes.

Las capas existentes son: material de sub-rasante, material de sub-rasante mejorada, material de sub-base y material de base estabilizada.

Con el propósito de evaluar las opciones estructurales, se utilizará el conjunto de propiedades típicas que se indica en la Tabla No. 1. Tales características son comunes para cada material particular, aunque se hace la aclaración que se utilizan a manera de supuesto, de forma que tienden a ubicarse en rangos conservadores.

Tabla No. 1: Características generales de las capas existentes.

Material	Espesor (cm)	Módulo resiliente (psi)	Módulo de Poisson	CBR
Base estabilizada con cemento	25 cm	350 000 – 500 000 psi	0.15	-----
Sub-base	15 cm	14000 psi	0.35	35
Sub-rasante mejorada	20 cm	10000 psi	0.35	12
Sub-rasante	-----	4000 psi	0.40	3

2.2. Condiciones de carga.

Para el primer año de operación se considerará un total de 200 camiones de carga diarios sobre el carril de diseño del pavimento, para un total de 4000 a 5000 toneladas diarias de carga movilizada.

Se establece como hipótesis que la tasa de crecimiento anual de transporte de carga es de un 8 % hasta el año 15 y de un 6 % a partir del año 16. Se considera que en un período de 15 años existirán cambios en nuestra infraestructura portuaria, de manera que se reduzca la tasa de crecimiento. Debe considerarse que el crecimiento del tránsito sobre un pavimento no es ilimitado, sino que existe una capacidad máxima, en el carril de diseño.

Se utiliza un factor camión de 2.3, que es característico para los camiones T3-S2, que representan la mayoría del tránsito sobre el pavimento (en este informe se asume que corresponden al 100 % de la carga). El factor camión de 2.3 significa que cada pasada de un camión tipo T3-S2 representa la aplicación de 2.3 ejes equivalentes simples de 8200 kg (18000 lb), lo cual corresponde aproximadamente al percentil 98 de la distribución correspondiente a este tipo de camión (el 98 % del tiempo los camiones tipo T3-S2 representan una menor carga sobre el pavimento).

La Tabla No. 1 presenta la información de ejes equivalentes simples por año, así como la cantidad de ejes equivalentes acumulados por año. La Figura No. 1 presenta la variación anual de la cantidad de ejes equivalentes acumulados.

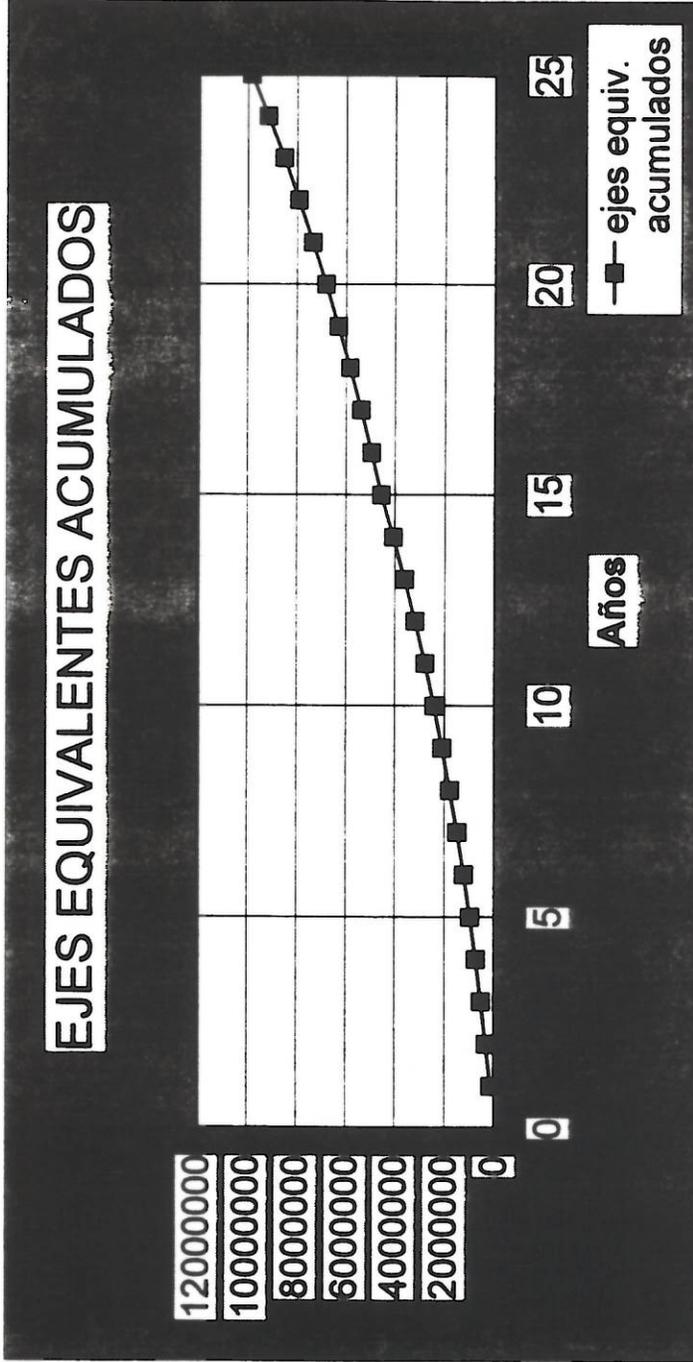
**TABLA No. 1: Pronóstico de cargas
por años**

ANO	CARGA (EEA)	CARGA ACUM (EEA)
1	167900	167900
2	181332	349232
3	195839	545071
4	211506	756576
5	228426	985002
6	246700	1231702
7	266436	1498139
8	287751	1785890
9	310771	2096661
10	335633	2432294
11	362484	2794777
12	391482	3186260
13	422801	3609060
14	456625	4065685
15	493155	4558840
16	402382	4961222
17	426525	5387747
18	452117	5839864
19	479244	6319107
20	507998	6827105
21	538478	7365583
22	570787	7936370
23	605034	8541404
24	641336	9182740
25	679816	9862556
26	720605	10583161
27	763841	11347003
Total	9862556	

Tasa de crecimiento	0.08	0-5 años
	0.08	6-15 años
	0.06	16-25 años
carga diaria (Ton)	4000	
Factor camión	2.3	Para camión T3 - S2
carga por camión (Ton)	20	

Nota: EEA = Ejes equivalentes acumulados simples, con una carga de 18000 lb (8000 kg).

FIGURA No. 1: Ejes equivalentes acumulados por año. (Período de diseño de 25 años).



2-3. Condiciones de temperatura en la zona.

Existen registros de temperatura en las estaciones de San Miguel de Barranca, Tivives y Puntarenas, que permiten caracterizar la zona climática del proyecto.

La Tabla No. 2 presenta la información de temperaturas máximas y mínimas anuales, incluyendo los registros hasta 1996.

Las temperaturas máximas y mínimas del aire fueron obtenidas a partir de la información suministrada por el Instituto Meteorológico Nacional.

La temperatura máxima del pavimento se estima a partir de la siguiente ecuación, establecida por el Instituto del Asfalto, en Especificaciones y pruebas de análisis para ligantes clasificados por grado de desempeño, SP-1.

$$T \text{ máx .pav.} = (T \text{ máx .aire} - 0.00618 * LAT^2 + 0.2289 * LAT + 42.2) * 0.9545 - 17.78$$

Donde:

T máx. pav. : temperatura máxima del pavimento, a una profundidad de 2.0 cm de la superficie (°C).

T máx. aire: temperatura máxima del aire (°C).

LAT: latitud de la zona del proyecto en grados.

Se considera que la temperatura mínima del pavimento corresponde a la temperatura mínima del aire, con una variación poco significativa. En este caso, la temperatura mínima es una condición no crítica, que puede ser satisfecha por prácticamente cualquier ligante asfáltico, de acuerdo con la normativa vigente.

2-4. Evaluación de la capacidad de soporte de la sub-rasante.

Al existir un material de sub-rasante de préstamo, las condiciones naturales de soporte de la sub-rasante son mejoradas parcialmente.

Considerando una sub-rasante natural con un CBR aproximado de 3, se define un módulo resiliente estimado a partir de la relación:

$$MR \text{ sub-rasante} = 1500 * CBR = 1500 * 3 = 4500 \text{ psi}$$

Tabla No.2: Condiciones climáticas en el pavimento: promedios máximos y mínimos históricos

LATITUD 10

ESTACION SAN MIGUEL DE BARRANCA

MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
MAX. AIRE	33.8	34.6	36.8	36.1	32.9	31	31.1	31	30.1	30.4	30.5	31.8
MAX. PAV.	56.2	55.5	56.5	56.0	53.9	52.1	52.2	52.1	51.2	51.5	51.6	52.9
MIN.	21.7	21.8	22.8	23.2	22.9	22.2	22	21.9	21.8	21.9	21.7	21.4
PG (TEMP)	58	58	58	58	58	58	58	58	52	52	52	58

PROMEDIO	DESV. EST.
32.31	2.03
53.47	1.93
22.11	0.57

ESTACION TIVIVES

MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
MAX. AIRE	30.2	32.4	31.8	32.1	29.5	28.5	28.4	28.5	28.2	27.5	27.4	27.5
MAX. PAV.	52.9	53.4	52.9	53.1	50.7	49.7	49.6	49.7	49.4	48.7	48.7	48.7
MIN.	21.6	22.6	22.7	22.8	21.8	21.4	20.9	21.1	21.1	29	19.5	18.6
PG (TEMP)	58	58	58	58	52	52	52	52	52	52	52	52

PROMEDIO	DESV. EST.
29.33	1.93
50.63	1.84
22.50	3.21

ESTACION PUNTARENAS

MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
MAX. AIRE	33.7	34.5	36.1	34.7	33.1	32.3	32.3	32.2	32.3	31.9	31.6	32.6
MAX. PAV.	56.3	55.4	57.0	55.6	54.1	53.3	53.2	53.2	53.3	52.9	52.7	53.6
MIN.	21.9	22.1	22.8	23.7	24	23.6	23.1	23.1	23	23	23	21.9
PG (TEMP)	58	58	58	58	52	52	52	52	52	52	52	52

PROMEDIO	DESV. EST.
33.0416667	1.48176799
54.171085	1.41434754
22.8916667	0.63846407

Nota: Las desviaciones estándar se refieren a la situación de variación estacional (mes a mes) de las temperaturas extremas mensuales.

Se considera un material de préstamo con un CBR de 12, pero se incluye un factor de seguridad de 1.5 para la definición de su módulo resiliente, para tomar en cuenta la variabilidad de las condiciones del material de sub-rasante en cuanto a su capacidad de apoyo.

$$MR \text{ préstamo} = 1500 * CBR = 1500 * 12/1.5 = 12000 \text{ psi}$$

De esta forma, a partir de la Figura No. 3-3 de la Guía de diseño de estructuras de pavimentos, se define un módulo de reacción a nivel de la superficie del material de préstamo, de aproximadamente 150 pci.

A partir del nomograma de relación entre el módulo resiliente y el módulo de reacción de un material de sub-rasante (Yang Huang, Análisis y diseño de pavimentos), se obtiene un módulo resiliente combinado de 8000 psi, para el conjunto integrado por la sub-rasante natural y el material de préstamo.

Considerando la variabilidad del módulo resiliente a lo largo del año, se considera, para efectos de diseño un valor característico de 7000 psi.

III - EVALUACION DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DISEÑADO

3-1. Ecuación de diseño de la AASHTO para pavimentos flexibles.

Se utiliza la ecuación de diseño de la versión de 1993 de la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes de Estados Unidos (AASHTO).

$$\log(W18) = Z_R * S_0 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \log[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)] / (0.4 + 1094 / (SN + 1))^{5.19} + 2.32 * \log(MR) - 8.07$$

Donde:

W18: cantidad de ejes equivalentes simples de 8200 kg (18000 lb).

ZR: coeficiente de probabilidad.

So: desviación estándar característica. Se utiliza un valor de 0.30, característico para pavimentos flexibles.

SN: número estructural del pavimento.

Δ PSI: reducción del índice de servicio del pavimento durante su vida de servicio. Se utilizará 1.8, para tomar en cuenta una caída en el índice de servicio de 4.3 (considerando que la estructura del pavimento se comporta como semi-rígida, superando el PSI inicial de 4.2, característico de un pavimento flexible nuevo) a 2.5, al final del período de análisis (25 años).

MR: módulo resiliente de la sub-rasante (psi).

3-2. Evaluación de la capacidad estructural del pavimento flexible (número estructural).

Se plantean los coeficientes estructurales para las capas integrantes del pavimento que se indican en la Tabla No. 3, de acuerdo con los rangos típicos definidos por la AASHTO.

TABLA No. 3: Características por capa para el cálculo del número estructural del pavimento flexible.

	CAPA		
PARAMETRO	Sub-base	Base Estabilizada	Carpeta asfáltica
Coefficiente estructural	0.115	0.195	0.40
Espesor (cm)	15	25	15
Coefficiente de drenaje	0.9	0.9	-----

El número estructural se define como:

$$SN = \sum mi * ai * hi$$

Donde:

SN: número estructural.

mi: coeficiente de drenaje para cada una de las capas inferiores a la superficie de ruedo.

ai: coeficiente estructural para cada una de las capas del pavimento.

hi: espesor de cada una de las capas del pavimento (in).

Así, el número estructural para la estructura de pavimento flexible a evaluar es:

$$SN = 0.4 * 15/2.54 + 0.9 * 0.195 * 25/2.54 + 0.9 * 0.115 * 15/2.54 = 4.78$$

3-3. Determinación de la vida útil del pavimento por medio del método de diseño de la AASHTO.

Se utilizó la ecuación de diseño de la AASHTO, a partir de las siguientes magnitudes y rangos:

W18: interrogante a despejar.

ZR: coeficiente de probabilidad, igual a -1.04 para un 85 % de confianza, -1.29 para un 90 % de confianza y -1.65 para un 95 % de confianza. Se considerarán tres diferentes niveles de confianza.

So: 0.30

SN: 4.78

Δ PSI: 1.8

MR: se analizan diferentes cuatro escenarios, para estudiar la sensibilidad del diseño a cambios estacionales y zonas de debilidad localizadas en la sub-rasante. Así, se considerarán 5000 psi, 6000 psi, 7000 psi y 7500 psi.

La Tabla No. 4 presenta el resultado del análisis para cada combinación posible de módulo resiliente de la sub-rasante y para cada nivel de confianza.

TABLA No. 4: Cálculo de vida útil en ejes simples equivalentes para cada escenario de confianza/capacidad de soporte de la sub-rasante.

VIDA UTIL DEL PAVIMENTO (EJES EQUIVALENTES DE 18000 lb)				
	Módulo resiliente de la sub-rasante			
% confianza	5000 psi	6000 psi	7000 psi	7500 psi
85 %	6.22 E6	9.49 E6	13.6 E6	15.9 E6
90 %	5.23 E6	7.99 E6	11.5 E6	13.4 E6
95 %	4.08 E6	6.23 E6	8.9 E6	10.5 E6

A partir del módulo resiliente de 7000 psi (Sección 2-4) y un nivel de confianza del 90 % (punto medio del rango de diseño recomendado por la AASHTO para carreteras importantes a nivel rural), se establece que la vida útil del pavimento corresponde a 11.5 millones de ejes equivalentes. Se satisface, de esta manera, el requisito para los 25 años de diseño de 9.9 millones de ejes equivalentes; aunque la aceptación final del diseño depende de la revisión de su resistencia a la formación de roderas y al agrietamiento por fatiga.

Adicionalmente, aunque esta estructura de pavimento flexible satisface los requerimientos de carpeta previstos en el diseño, su funcionalidad durante este período queda sujeta a la capacidad de la mezcla asfáltica a resistir deformaciones plásticas a altas temperaturas y a las acciones de mantenimiento que requiere la capa asfáltica para contrarrestar el efecto de oxidación, envejecimiento y eventual desprendimiento o pulimiento de partículas.

3-4. Revisión de la resistencia del pavimento flexible al agrietamiento por fatiga.

Se utiliza la siguiente ecuación desarrollada por la AASHTO y que permite estimar el número de ejes equivalentes simples en un pavimento flexible para que se presente un 10 % de agrietamiento en la capa de rueda.

$$\log(N) = 15.947 - 3.291 * \log^*(\epsilon t) - 0.854 * \log(MR - \text{carpeta})$$

Donde:

N: número de ejes simples equivalentes de 8200 kg, para que se produzca un 10 % de agrietamiento en la carpeta asfáltica.

ϵt : deformación unitaria por tracción en la última fibra de la carpeta, ante una carga concentrada de medio eje equivalente (carga de una llanta).

MR-carpeta: módulo resiliente del material de carpeta asfáltica (psi).

Así, se plantean los siguientes escenarios de análisis:

- Módulos resilientes, módulos de Poisson y espesores de las capas de apoyo de la carpeta asfáltica según la Tabla No. 1. Se considerarán dos escenarios de módulo resiliente para la base estabilizada, a saber: 350 000 psi y 500 000 psi.
- Módulo resiliente de la sub-rasante de 5000 psi, 6000 psi, 7000 psi y 7500 psi.
- Módulo resiliente para la carpeta asfáltica de 200 000 psi, 300 000 psi y 400 000 psi, para reflejar los cambios debidos a las diferentes situaciones de temperatura que pueden presentarse a lo largo del año en la estructura de pavimento.

Se utilizó el programa ELSYM-5 para analizar la estructura del pavimento, de acuerdo con una metodología de elemento multi-capa elástica.

El resultado del análisis correspondiente se presenta en la Tabla No. 5 adjunta, presentándose la información referente a deformación unitaria por tracción en la última fibra de la carpeta (ϵ) y cantidad de ejes equivalentes para experimentar un 10 % de agrietamiento.

3-5. Revisión de la resistencia del pavimento a la formación de roderas por falla estructural.

La resistencia del pavimento a la formación de roderas por falla de la sub-rasante debido a esfuerzos de compresión, se evalúa a partir de las ecuaciones:

$$N = 1.077 * 10^{18} * (\epsilon - \nu_s)^{-4.4843}$$

Según la AASHTO.

$$N = 1.365 * 10^{-9} * (\epsilon - \nu_s / 1 * 10^{-6})^{-4.477}$$

Según el Instituto del Asfalto.

Donde:

N: cantidad de ejes equivalentes necesarios para alcanzar una depresión en la huella de 1.90 cm (3/4"), según la ecuación de la AASHTO, y 1.27 cm (1/2"), según la ecuación del Instituto del Asfalto.

ϵ - ν_s : deformación unitaria a la compresión en la superficie de la sub-rasante (E-6 in/in).

Así, se plantean los siguientes escenarios de análisis:

- Módulos resilientes, módulos de Poisson y espesores de las capas de apoyo de la carpeta asfáltica según la Tabla No. 1. Se considerarán dos escenarios de módulo resiliente para la base estabilizada, a saber: 350 000 psi y 500 000 psi.
- Módulo resiliente de la sub-rasante de 5000 psi, 6000 psi, 7000 psi y 7500 psi.
- Módulo resiliente para la carpeta asfáltica de 200 000 psi, 300 000 psi y 400 000 psi, para reflejar los cambios debidos a las diferentes situaciones de temperatura que pueden presentarse a lo largo del año en la estructura de pavimento.

TABLA No. 5: Análisis de vida útil por agrietamiento

por fatiga en un 10 % del área del pavimento.

(Ejes equivalentes a la falla)

MR HMAC	MR sub-ras	MR base estabilizada con cemento	def. unit. trans. HMAC	N fatiga AASHTO
psi	psi	psi	E-6	EEQ
200000	5000	350000	3.6	1.42E+12
200000	6000	350000	4.43	7.15E+11
200000	7000	350000	5.11	4.47E+11
200000	7500	350000	5.4	3.73E+11
300000	5000	350000	16.7	6.42E+09
300000	6000	350000	17.3	5.72E+09
300000	7000	350000	17.7	5.30E+09
300000	7500	350000	17.9	5.11E+09
400000	5000	350000	24	1.52E+09
400000	6000	350000	24.4	1.44E+09
400000	7000	350000	24.7	1.39E+09
400000	7500	350000	24.8	1.37E+09
200000	5000	500000	-9.46	No aplica
200000	6000	500000	-8.64	No aplica
200000	7000	500000	-7.98	No aplica
200000	7500	500000	-7.69	No aplica
300000	5000	500000	2.04	6.49E+12
300000	6000	500000	2.64	2.78E+12
300000	7000	500000	3.11	1.62E+12
300000	7500	500000	3.32	1.31E+12
400000	5000	500000	9.11	3.69E+10
400000	6000	500000	9.57	3.14E+10
400000	7000	500000	9.93	2.78E+10
400000	7500	500000	10.1	2.63E+10

Nota: no aplica el criterio cuando, según el modelo multi-capas elástica todo el material de la carpeta asfáltica queda sujeto a compresión

Se utilizó el programa ELSYM-5 para analizar la estructura del pavimento, de acuerdo con una metodología de elemento multi-capa elástica.

La Tabla No. 6 presenta el análisis correspondiente a la cantidad de ejes equivalentes necesarios para llegar a la falla estructural por formación de roderas, así como la magnitud de la deformación unitaria por compresión en la fibra superior de la sub-rasante (ϵ -vs).

3-6. Consideraciones sobre la resistencia del pavimento a la formación de roderas funcionales.

Las investigaciones de desempeño a largo plazo desarrolladas por el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP), han determinado que, si bien es cierto hay una alta correlación entre las propiedades del agregado y la deformación superficial de una carpeta asfáltica, las condiciones del ligante también son de consideración.

Es así como se ha desarrollado una metodología para evaluar el desempeño físico-mecánico de un ligante asfáltico, con base en su comportamiento a las altas temperaturas (condición climática relacionada con la deformación plástica, en conjunto con la carga sobre el pavimento). De esta manera, el procedimiento consiste en determinar el módulo dinámico al cortante del ligante asfáltico, estableciéndose la temperatura a partir de la cual el ligante asfáltico es más susceptible a la deformación (módulo dinámico al cortante inferior a 1000 kPa).

En general, un ligante asfáltico tipo AC-20 no modificado (sin adición de aditivos) suele clasificar como un PG 64 (donde a partir de una temperatura de 64°C en el pavimento, el ligante asfáltico determina una susceptibilidad a la deformación plástica en la mezcla asfáltica).

De esta forma, un ligante asfáltico debe satisfacer las condiciones climáticas de la zona donde se ubicará el pavimento. El grado de desempeño debe ser tal que exista una alta confianza estadística en el desempeño del ligante. Es decir, deben determinarse las condiciones extremas de temperatura y contrastarse contra el grado de desempeño del ligante. El grado de desempeño superior (por ejemplo PG 64), debe satisfacer las exigencias de la zona climática.

A partir de la información sobre las condiciones climáticas del proyecto, presentadas en la Tabla No. 2, es posible determinar la necesidad del grado de desempeño superior.

Para determinar la máxima temperatura en el pavimento, a una profundidad de 2.0 cm hacia abajo de la superficie, se utiliza la ecuación presentada en la Sección 2-3.

TABLA No. 6: Análisis de vida útil por formación de roderas

de 0.75 in de profundidad sobre las huellas

(Ejes equivalentes a la falla)

MR HMAC	MR sub-ras	MR base estabilizada con cemento	defl unit. vertical SG.	N rodera AASHTO	N rod. AI
psi	psi	psi	E-6	EEQ	
200000	5000	350000	203	4.84E+07	4.64E+07
200000	6000	350000	184	7.52E+07	7.20E+07
200000	7000	350000	168	1.13E+08	1.08E+08
200000	7500	350000	161	1.37E+08	1.31E+08
300000	5000	350000	185	7.34E+07	7.03E+07
300000	6000	350000	167	1.16E+08	1.11E+08
300000	7000	350000	153	1.72E+08	1.65E+08
300000	7500	350000	147	2.06E+08	1.97E+08
400000	5000	350000	175	9.41E+07	9.02E+07
400000	6000	350000	158	1.49E+08	1.42E+08
400000	7000	350000	144	2.26E+08	2.16E+08
400000	7500	350000	138	2.73E+08	2.61E+08
200000	5000	500000	184	7.52E+07	7.20E+07
200000	6000	500000	166	1.19E+08	1.14E+08
200000	7000	500000	151	1.82E+08	1.75E+08
200000	7500	500000	145	2.19E+08	2.09E+08
300000	5000	500000	168	1.13E+08	1.08E+08
300000	6000	500000	151	1.82E+08	1.75E+08
300000	7000	500000	137	2.82E+08	2.70E+08
300000	7500	500000	132	3.33E+08	3.19E+08
400000	5000	500000	157	1.53E+08	1.47E+08
400000	6000	500000	141	2.48E+08	2.37E+08
400000	7000	500000	128	3.83E+08	3.66E+08
400000	7500	500000	123	4.58E+08	4.37E+08

El procedimiento estándar de la metodología SHRP consiste en clasificar los ligantes en rangos de 6°C, de manera que un asfalto que tenga un límite de temperatura máxima por debajo de 64°C se clasifica como un PG 58, mientras que para que clasifique como un PG 64 se requiere que el asfalto tenga un límite de temperatura máxima por encima de 64°C, pero por debajo de 70°C.

Con respecto al requerimiento de grado de desempeño para una condición climática en particular, el procedimiento establece que el redondeo sea hacia arriba. Así, si la temperatura máxima en el pavimento, a un nivel de confianza dado (usualmente 98 %), es superior a 52°C, se requiere seleccionar un ligante asfáltico con un grado de desempeño PG 58.

El nivel de confianza se define como el porcentaje de datos históricos de temperatura máxima por debajo de la temperatura máxima de diseño. Así, un nivel de confianza del 98 % determina que el 98 % de los datos históricos de temperatura máxima se encuentra por debajo del PG requerido.

Existen consideraciones adicionales, que hacen referencia a las condiciones particulares de cada proyecto, en particular las condiciones de magnitud y velocidad de carga.

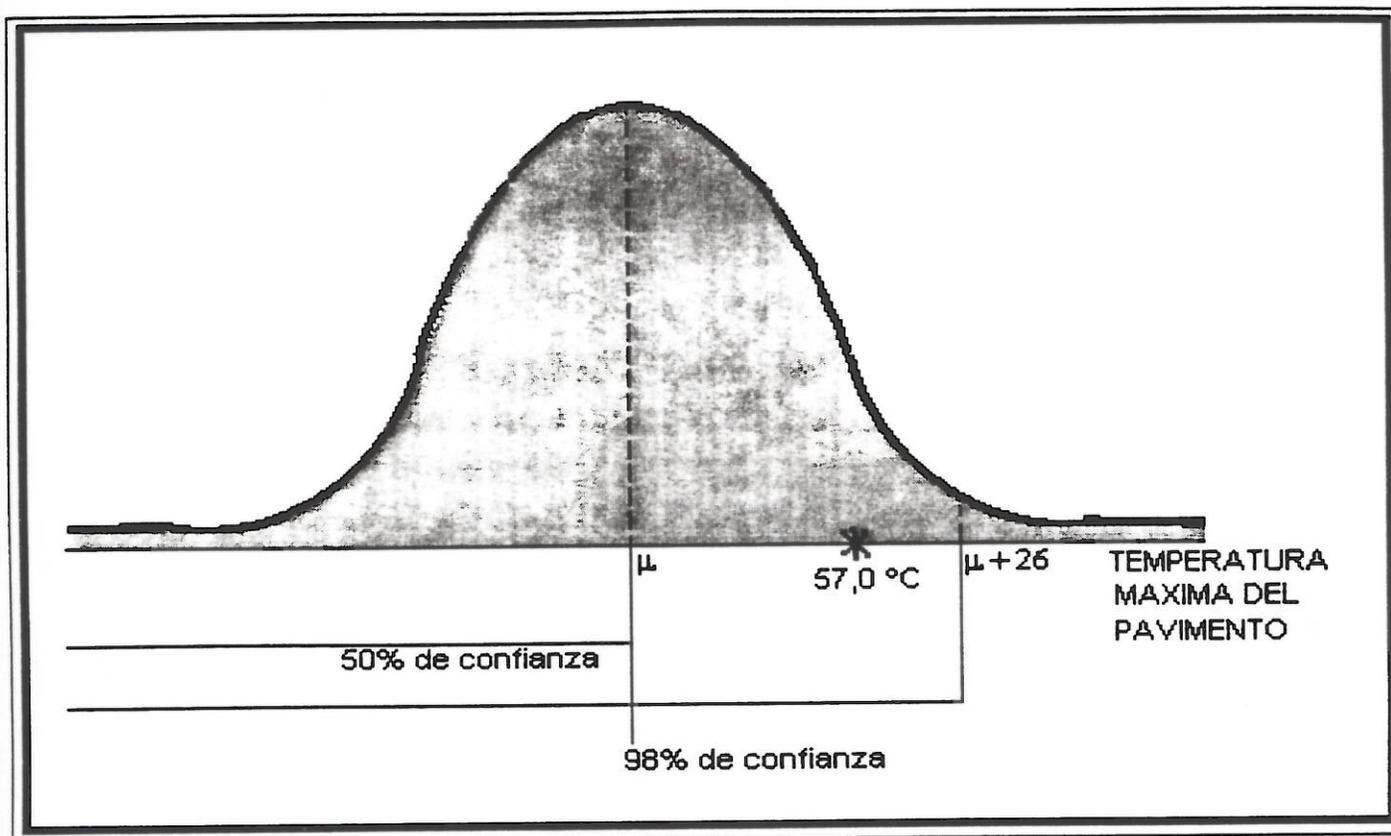
- Para cargas lentas, como en el caso de pendientes fuertes, el ligante asfáltico debe ser seleccionado un grado de desempeño superior al requerido por las condiciones climáticas. Por ejemplo un PG 64 en vez de un PG 58.
- Para cargas estacionarias, el ligante asfáltico debe ser seleccionado dos grados de desempeño superior al requerido por las condiciones climáticas. Por ejemplo un PG 70 en vez de un PG 58.
- Para magnitudes de carga superiores a 10 millones de ejes equivalentes, es altamente recomendable la selección de un grado de desempeño superior al requerido por las condiciones climáticas.

De esta forma, a partir del grado de desempeño requerido por las condiciones climáticas de Puerto Caldera (PG 58, en Tabla No. 2), se determina que debe incrementarse el grado de desempeño en dos grados por efecto de las cargas estacionarias (pavimento utilizado como parqueo). De esta forma se requeriría un PG 70.

Adicionalmente, se recomienda el incremento de un grado de desempeño extra por causa de las siguientes consideraciones:

- La magnitud de las cargas de diseño está en el límite recomendable para la evaluación de un incremento adicional en el grado de desempeño (10 millones de ejes equivalentes).

Figura No.2: Distribución de frecuencias para los valores de temperatura máxima en el pavimento de acuerdo con la metodología SHRP.



Nota: 57.0°C representa el promedio para la temperatura máxima anual en el caso extremo (estación Puntarenas, mayo).

- La información recopilada consiste en temperaturas máximas anuales promediadas. El método estándar de la SHRP consiste en identificar y promediar las siete temperaturas máximas del año, de manera que posteriormente se obtiene un promedio y una desviación estándar, que permiten aplicar el concepto de normalidad para definir el requisito de temperatura para el nivel de confianza elegido. En este caso se han utilizado las temperaturas máximas anuales de forma individual, de manera que el promedio de tales datos es superior al promedio de los promedios anuales para las siete máximas temperaturas; así el nivel de confianza al utilizar las temperaturas máximas del pavimento indicadas en la Tabla No. 2 es superior al 50 % (pues se supera la media). Se desconoce, sin embargo, la desviación estándar multi-anual, de manera que no se ha podido verificar el cumplimiento del nivel de confianza acostumbrado en proyectos importantes (98 %). Se puede concluir, así, que el nivel de confianza del grado de desempeño, para la temperatura máxima, es mayor al 50 %, pero muy probablemente inferior al 98 % (Figura No. 2). Un incremento adicional (un PG superior) da mayor confianza en la selección.
- La ecuación de determinación de la temperatura máxima del pavimento está desarrollada para latitudes más alejadas del Ecuador, por lo que puede determinar temperaturas inferiores que las que realmente experimenta el pavimento.

Con base en las consideraciones anteriores, se recomienda la utilización de un grado de desempeño PG 76, el cual se obtiene únicamente a partir de ligantes modificados con polímeros o elastómeros.

3-7. Desarrollo de un modelo de deterioro para la estructura de pavimento flexible.

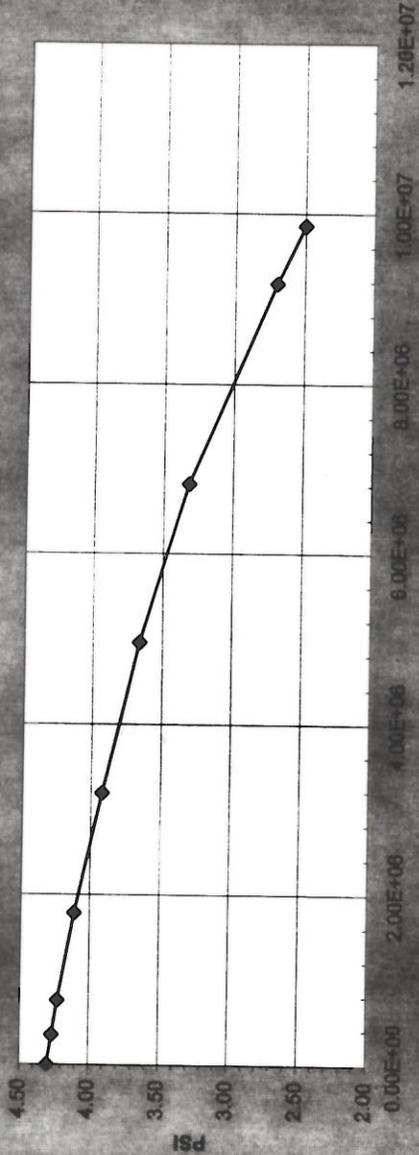
A partir de la ecuación de diseño de la AASHTO, para un 90 % de confianza, y suponiendo un decremento paulatino en la capacidad estructural del pavimento, con el paso de las cargas de tránsito, se ha definido un modelo de deterioro para el pavimento flexible.

El modelo de deterioro se basa en la estimación del índice de servicio (PSI), año a año; desde la entrada en funcionamiento del pavimento, hasta el final del período de análisis (25 años).

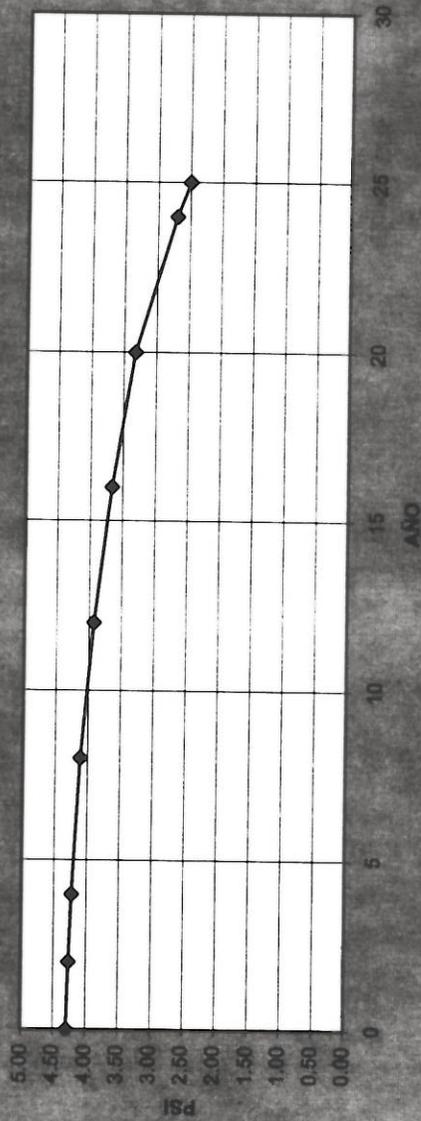
La Figura No. 3 presenta la curva de PSI contra ejes equivalentes acumulados y contra año, para el pavimento flexible analizado.

Debe notarse que el pavimento se ha diseñado para 11.5 millones de ejes equivalentes, sin embargo, durante los 25 años de análisis se ha considerado un deterioro adicional por condiciones de deterioro de la mezcla asfáltica, cuyo ligante es sujeto a la oxidación, deterioro de la base estabilizada y por falla localizada de la sub-rasante. Así, al final de los 9.9 millones de ejes equivalentes de análisis (25 años), se logra un nivel de servicio prácticamente igual al terminal (2.5).

Indice de servicio (Psi) versus ejes equivalentes acumulados



INDICE DE SERVICIO (PSI) VERSUS AÑO



ANO	E.EQ.	PSI
0	0.0E+00	4.30
2	3.5E+05	4.27
4	7.6E+05	4.23
8	1.8E+06	4.11
12	3.2E+06	3.92
16	5.0E+06	3.66
20	6.8E+06	3.32
24	9.2E+06	2.70
25	9.9E+06	2.50

MR sub-rasantes = 7000 psi
% de confianza = 90%

A partir del modelo de deterioro es posible establecer las siguientes expectativas:

- Con un adecuado nivel de mantenimiento y un sistema eficiente de drenajes, contando con que la capacidad de soporte de la sub-rasante no sea inferior a la utilizada en el diseño (módulo resiliente de 7000 psi), la estructura del pavimento está en capacidad de llegar al final del período de análisis sin la necesidad de un refuerzo estructural, pero como se señaló anteriormente, siempre que se aplique una adecuada estrategia de conservación.
- Es necesario, dada la sensibilidad del comportamiento del pavimento flexible a las condiciones climáticas extremas y nivel elevado de carga, que se realicen operaciones de bacheo relacionadas con fallas localizadas de sub-rasante, derrames de combustibles y aceites, y deformabilidad de la mezcla asfáltica con elevadas temperaturas (caso de que no se utilice el ligante idóneo para las condiciones climáticas y de carga).
- Es necesario, dada la eventual oxidación del ligante asfáltico en la capa de rodamiento, que se tomen medidas para prevenir el envejecimiento acelerado. Así, deberá considerarse la aplicación de capas selladoras, escarificación y reciclaje de la porción superior de la capa asfáltica (5 a 10 mm), etc.
- Si no se cumplen las condiciones anteriores, es posible que el nivel terminal de deterioro (PSI) se presente en forma prematura y el proyecto llegue a la falla estructural antes de que haya pasado la carga de diseño (9.9 millones de ejes equivalentes).

IV - DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO ALTERNATIVO

4-1. Ecuación de diseño de la AASHTO para pavimentos rígidos.

Se utiliza la ecuación de diseño de la versión de 1993 de la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes de Estados Unidos (AASHTO).

$$\log(W18) = Z_r \times S_o + 7.35 \times \log(D + 1) - 0.06 + \log[\delta psi \div (4.5 - 1.5)] \div \left[1 + 1.624 E7 \div (D + 1)^{8.46} \right] + (4.22 - 0.32 \times pt) \times \log \left[\left(S' c \times C_d \times \left\{ D^{0.75} - 1.132 \right\} \right) \div \left(215.63 \times J \times \left\{ D^{0.75} - 18.42 \div (Ec / k)^{0.25} \right\} \right) \right]$$

Donde:

W18: ejes simples equivalentes de 8200 kg (18000 lb) de diseño.

Z_r: coeficiente para nivel de confianza requerido, según distribución normal.

So: desviación estándar global para el proceso constructivo. Se utilizará un valor típico de 0.29.

D: espesor del pavimento (in).

δ psi: diferencia entre el índice de servicio inicial (PSI) y el índice de servicio terminal. Se utilizará 2.0, considerando que el pavimento inicialmente tiene un PSI de 4.5, llegando a un valor de 2.5, al final del período de diseño.

pt: índice de servicio terminal. Correspondiente a 2.5.

S'c: módulo de ruptura del concreto (psi), a los 28 días. Se utilizará un valor de 640 psi, que es característico.

Cd: coeficiente de drenaje. Correspondiente a 0.9.

J: coeficiente de transferencia de carga en juntas. Correspondiente a 3.5.

Ec: módulo de elasticidad del concreto. Correspondiente a 5000000 psi.

k: módulo de reacción de la estructura de soporte de la losa.

4-2. Evaluación de la capacidad de soporte en la base de apoyo de la losa de concreto hidráulico (k).

A partir del valor para el módulo resiliente combinado de la sub-rasante de préstamo y la sub-rasante natural de 7000 psi, determinado en la Sección 2-4, y los valores de módulo resiliente considerados para las diferentes capas de apoyo de la losa de concreto hidráulico (Tabla No. 1), se obtiene la magnitud del módulo de reacción en la base de apoyo de la losa.

A partir de la Figura No. 3-3 de la Guía de diseño de estructuras de pavimento de la AASHTO, se establece que, una sub-rasante de 7000 psi, en conjunto con un material de sub-base con un módulo resiliente de 14000 psi y un espesor de 15 cm, determinan un módulo de reacción de aproximadamente 275 pci.

A partir de las curvas de transformación de módulo de reacción en CBR, se determina que el CBR equivalente a un material de sub-rasante con un módulo de reacción de 275 pci corresponde a 25. Teniendo en cuenta que este valor de soporte corresponde a una superficie de apoyo de la base de muy buena calidad, corresponde a los valores máximos previstos por la AASHTO para dicho nivel de emplazamiento, por tanto, se asigna en este caso un valor de módulo de 20000 psi.

A partir de un módulo resiliente para la sub-rasante equivalente de 20000 psi y un material de base estabilizada de 25 cm, con un módulo resiliente de 500 000 psi, se logra un módulo de reacción de 1500 pci.

Considerando un factor de pérdida de soporte para la losa de 0.5 (LS), considerando que el módulo de reacción en la base de apoyo de la base estabilizada puede estar sobre-estimado al utilizar un módulo resiliente de la base estabilizada de 500000 psi (alrededor del máximo para bases estabilizadas), se determina que el módulo de reacción en la base de apoyo de la losa es 1200 pci.

4-3. Dimensionamiento de la losa de concreto hidráulico.

4-3-1. Espesor de losa.

Se utilizó la ecuación de la AASHTO para determinar la capacidad de carga, en ejes equivalentes simples de 8200 kg (18000 lb), a partir de la consideración de un espesor de losa de 20 cm, 22.5 cm y 25 cm.

Se utilizaron las siguientes interrogantes y rangos:

W18: interrogante a despejar para cada condición de espesor de losa, capacidad de soporte de la sub-rasante y porcentaje de confianza.

Zr: igual a -1.04 para un 85 % de confianza, -1.29 para un 90 % de confianza y -1.65 para un 95 % de confianza.

So: 0.29

D: se utilizarán espesores de losa de 20 cm (8 in), 22.5 cm (9 in) y 25 cm (10 in).

Δ PSI: 2.0

Pt: 2.5

S'c: 640 psi

Cd: 0.9

J: 3.5

Ec: 5000000 psi

k: 800 pci, 900 pci, 1200 pci, 1300 pci

La Tabla No. 7 presenta el resultado del análisis para cada combinación posible de espesor de losa de concreto hidráulico, módulo de reacción de la base de apoyo de la losa y nivel de confianza.

TABLA No. 7: Cálculo de vida útil en ejes simples equivalentes para cada escenario de confianza/espesor de losa/módulo de reacción de la base de apoyo de la losa.

Espesor de losa de concreto hidráulico de 20 cm (8 in)				
	Módulo de reacción en la base de apoyo de la losa			
% confianza	800 pci	900 pci	1200 pci	1300 pci
85 %	3.48 E6	3.77 E6	4.67 E6	4.98 E6
90 %	2.94 E6	3.19 E6	3.95 E6	4.22 E6
95 %	2.32 E6	2.51 E6	3.11 E6	3.31 E6

Espesor de losa de concreto hidráulico de 22.5 cm (9 in)				
	Módulo de reacción en la base de apoyo de la losa			
% confianza	800 pci	900 pci	1200 pci	1300 pci
85 %	6.47 E6	6.93 E6	8.31 E6	8.78 E6
90 %	5.47 E6	5.86 E6	7.04 E6	7.43 E6
95 %	4.31 E6	4.61 E6	5.53 E6	5.85 E6

Espesor de losa de concreto hidráulico de 25 cm (10 in)				
	Módulo de reacción en la base de apoyo de la losa			
% confianza	800 pci	900 pci	1200 pci	1300 pci
85 %	11.7 E6	12.4 E6	14.6 E6	15.3 E6
90 %	9.90 E6	10.5 E6	12.3 E6	12.9 E6
95 %	7.78 E6	8.27 E6	9.70 E6	10.2 E6

Dada la condición de carga de diseño (9.90 millones de ejes equivalentes), con un nivel de confianza del 90 % (punto medio del rango de diseño recomendado por la AASHTO para carreteras importantes a nivel rural), se establece que la vida útil del pavimento corresponde a 12.3 millones de ejes equivalentes, aunque la aceptación final del diseño depende de la revisión de la capacidad del pavimento a la resistencia del agrietamiento por fatiga y a la falla por erosión en la base de apoyo de la losa.

4-3-2. Longitud de losa.

La longitud máxima de losa se calcula de acuerdo con el criterio de esfuerzo máximo, causado por el diferencial térmico superficie - fondo de la losa de concreto hidráulico.

De acuerdo con Yang H. Huang, en Pavement Analysis and Design, el esfuerzo por diferencia térmica máxima en una losa de concreto ocurre en el borde de la losa y está determinado por la relación:

$$\sigma_t = C * E * \alpha_t * \delta t / 2$$

Donde:

σ_t : esfuerzo máximo provocado por el diferencial térmico en el borde la losa (psi).

C: factor de corrección, que depende de la relación L/l, donde "L" es la longitud de losa (in) y "l" es el radio de rigidez relativa (in).

α_t : coeficiente térmico del concreto hidráulico, igual a 5 E-6 in/in/ F

δt : diferencial térmico entre la superficie y el fondo de la losa de concreto (F).

El radio de rigidez relativa (l) depende de las propiedades elásticas y geométricas de la losa. Se determina a partir de la relación:

$$l = [E * h^3 / \{12 * (1 - \nu^2) * k\}]^{0.25}$$

Donde:

E: módulo de elasticidad del concreto (5 E6 psi).

h: espesor de la losa de concreto hidráulico (10 in).

ν : módulo de Poisson del concreto hidráulico (0.15).

k: módulo de reacción de la sub-rasante (1200 pci).

El esfuerzo máximo inducido por el diferencial térmico no debe ser superior al valor del módulo de ruptura ajustado por un factor de seguridad, recomendándose un rango de 2 a 3, dado que existen varias fuentes de incertidumbre: el control de condiciones que se da en el laboratorio al momento de determinar el módulo de ruptura, que no se da en la práctica, el agrietamiento en la base de apoyo y la variabilidad en las condiciones de soporte de la losa.

Así, considerando un espesor de losa de 25 cm (aproximadamente 10 in) y un diferencial térmico de 17°C (30°F), es posible determinar el factor de corrección correspondiente:

$$640 / 2 = C * 5E6 * 5E-6 * 30/2$$

$$\rightarrow C = 0.85$$

La razón "L/l" correspondiente a un factor de corrección C=0.85, es igual a 5.75 (Yang Huang).

$$l = [5 E6 * (10)^3 / \{ 12 * (1-0.15^2) * 1200 \}]^{0.25}$$

$$l = 24.4 \text{ in}$$

$$L/l = 5.75 \rightarrow L = 5.75 * 24.4 = 136.6 \text{ in} = 3.56 \text{ m}$$

Así, se recomienda la utilización de una longitud de losa de 3.75 m, dada la consideración de un factor de seguridad elevado (2 a 3).

4-3-3. Diseño de dobelas.

El diseño de dobelas se realiza por la comparación del nivel de esfuerzo entre la dobla y el concreto hidráulico y el máximo nivel de esfuerzo permisible. Así, el máximo nivel de esfuerzo que se podría soportar por el sistema de dobelas es:

$$f_b = (4-d)/3 * f'_c$$

Donde:

f_b : máximo nivel de esfuerzo entre la dobla y el concreto hidráulico (psi).

d : diámetro de la dobla (in).

f'_c : resistencia del concreto a la compresión simple a los 28 días (psi).

Así, para un diámetro de dobla de 2.54 cm (1 in) y un concreto de resistencia a la compresión simple a los 28 días de 3000 psi, se obtiene:

$$f_b = (4-1)/3 * 3000 \text{ psi} = 3000 \text{ psi}$$

El nivel de esfuerzo que se genera efectivamente entre la dobla y la losa, considerando la aplicación de un eje equivalente (9000 lb por llanta), se determina a partir de:

$$\sigma_y = K * Pt * (2 + \beta * z) / (4 * \beta^3 * Ed * Id)$$

$$Id = 1 / 64 * \pi * d^4$$

$$\beta = \sqrt[4]{K * d / (4 * Ed * Id)}$$

Donde:

σ_b : nivel de esfuerzo generado por el contacto dobla - losa (psi)

K: módulo de soporte de la dobla. Usualmente dentro de un rango de 300000 psi a 1500000 psi. En este caso se utilizará el punto medio del rango (900000 psi).

Ed: módulo de Young de la dobla (29 E6 psi).

Id: momento de inercia de la dobla. Para una dobla de un diámetro de 2.54 cm (1 in), se tendrá un momento de inercia $Id = \pi / 64 \text{ in}^4$.

β : rigidez relativa de la dobla embebida en el concreto. Para las condiciones de análisis de este caso corresponderá a $\beta = 0.630 \text{ in}$.

z: ancho de la junta transversal. En este caso se considerará 0.6 cm (1/4 in).

Pt: carga máxima soportada por una dobla, dada la aplicación de un eje equivalente (18000 lb).

Considerando una transferencia de carga en la dobla de 50/50 y la aplicación de 9000 lb por llanta del eje, se obtiene que:

- A partir de una separación de doblas de 30 cm (12 in) y un diámetro de doblas de 2.54 cm (1 in), se obtiene un radio de rigidez relativa $l=24.4 \text{ in}$ (Sección 4-3-2).
- A partir de que la longitud de desarrollo para la losa, dada la aplicación de una carga en su borde es de 1.8 veces el radio de rigidez relativa (43.9 in en este caso).

- A partir de que la aplicación de un eje de 18000 lb, con una dimensión de 72 in (entre puntos de carga), determina que el efecto de una llanta es poco relevante para el conjunto de dobelas bajo la otra llanta del eje.
- Si se cuenta con una separación de dobelas de 12 in, comenzando con la primera dobelas a 6 in del borde, se obtiene que una carga de 4500 lb (50 % de las 9000 lb por llanta), determina una carga máxima de 1907 lb, en la dobelas inmediatamente por debajo de la carga. En este caso funcionan las dobelas a una distancia de 0 in, 12 in, 24 in y 36 in por debajo de la carga, tomando en cuenta una distribución lineal de la carga sobre la longitud de desarrollo (43.9 in).

Así, $P_t = 1907$ lb para el caso considerado.

A partir de la ecuación para el nivel de esfuerzo generado por el contacto losa - concreto, se obtiene que $\sigma_b = 2560$ psi.

En este caso $\sigma_b < f_b$ (3000 psi), es decir el nivel de esfuerzo generado en el contacto dobelas - concreto es menor que el nivel máximo permisible. Se concluye que la siguiente configuración de dobelas es satisfactoria.

Sin embargo, con el propósito de reducir el mantenimiento de las juntas durante la operación del pavimento, se recomienda utilizar un diámetro de dobelas de 3.18 cm (1.25").

- Diámetro de dobelas de 3.18 cm (1.25 in).
- Separación de dobelas de 30 cm (12 in aproximadamente).
- Colocación de la primera dobelas a no más de 15 cm (6 in) del borde del pavimento.

4-3-4. Resumen de las condiciones del pavimento rígido diseñado.

- Espesor de losa de 25 cm (aproximadamente 10 in).
- Separación de juntas transversales de 3.75 m.
- Acero de refuerzo transversal (dobelas) de 3.18 cm (1.25 in) de diámetro.
- Separación de dobelas de no más de 30 cm (12 in).
- Colocación de la primera dobelas a no más de 15 cm (6 in) del borde del pavimento.
- Módulo de ruptura del concreto a los 28 días, utilizando el método de prueba de carga en 1/3 y 2/3 de luz, de 45 kg/cm² (640 psi).
- Sello de juntas con silicón.

4-4. Revisión de la capacidad estructural de la losa por erosión y fatiga.

La Tabla No. 8 adjunta presenta el análisis de la losa de concreto hidráulico diseñada, por capacidad de resistencia al agrietamiento por fatiga y a la erosión en la base de apoyo de la losa. Se sigue la metodología de la Asociación de Cemento Portland de Estados Unidos (PCA), según se menciona en Yang Huang, *op. cit.*

ESPESOR LOSA	10	in
MODULO REACCION	1200	pci
MODULO RUPTURA	640	psi
TOTAL VEHICULOS	4.288	E6
LSF	1.2	

TIPO DE JUNTAS	Con dovelas.
TIPO DE ESPALDON	concreto asfáltico.
PERIODO DE DISENO	9.9 millones ejes equival.

CARGA AXIAL (kips)	CARGA AXIAL * LSF (kips)	Repetición	ANALISIS DE FATIGA		ANALISIS DE EROSION	
			Repetición permitida	Fatiga (%)	Repetición permitida	Daño (%)

EJES SIMPLES						
6.5	7.8	98626	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
5.5	6.6	638922	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
4.5	5.4	518856	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
3.5	4.2	2971631	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
2.5	3	55745	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
1.0	1.2	0	mayor a 1E8	0	mayor a 1E8	0.0

Equivalente de esfuerzos	121
Factor de esfuerzos	0.19
Factor de erosión	2.01

EJES TANDEM						
17.5	21	162946	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
16.5	19.8	2306980	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
15.5	18.6	2401318	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
14.5	17.4	1440792	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
13.5	16.2	891918	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
12.5	15	445960	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
11.5	13.8	308740	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
10.5	12.6	180098	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
9.5	11.4	171524	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0
8.5	10.2	111490	mayor a 1E8	0.0	mayor a 1E8	0.0

Equivalente de esfuerzos	101
Factor de esfuerzos	0.16
Factor de erosión	2.03

Debe tomarse la consideración especial de que la PCA establece un máximo módulo de reacción en la base de apoyo de la losa de 700 pci, de manera que no puede utilizarse el valor predeterminado por el método de la AASHTO de 1200 pci.

Para efectos del análisis se ha considerado que la losa de concreto tendrá amarres laterales con el espaldón, considerando que los espaldones son de concreto hidráulico.

Se determina, a partir de los resultados de la Tabla No. 7, que la estructura de pavimento es satisfactoria para las condiciones de resistencia a la fatiga y erosión de la PCA. La capacidad de resistencia elevada se relaciona con el nivel de tránsito, la distribución de cargas por eje para T3-S2 (se usaron valores característicos en Costa Rica), el espesor de losa y sus condiciones de soporte (máximo módulo de reacción para el método).

4-5. Desarrollo de un modelo de deterioro para la estructura de pavimento rígido.

A partir de la ecuación de diseño de la AASHTO, para un 90 % de confianza, y suponiendo un decremento en la capacidad de soporte de la base de apoyo de la losa, por agrietamiento y deterioro de la base estabilizada, se ha definido un modelo de deterioro para el pavimento rígido diseñado.

El modelo de deterioro se basa en la estimación del índice de servicio (PSI), año a año, desde la entrada en funcionamiento del pavimento, hasta el final del período de análisis (25 años).

La Figura No. 4 presenta la curva de PSI contra ejes equivalentes y contra año, para el pavimento rígido analizado.

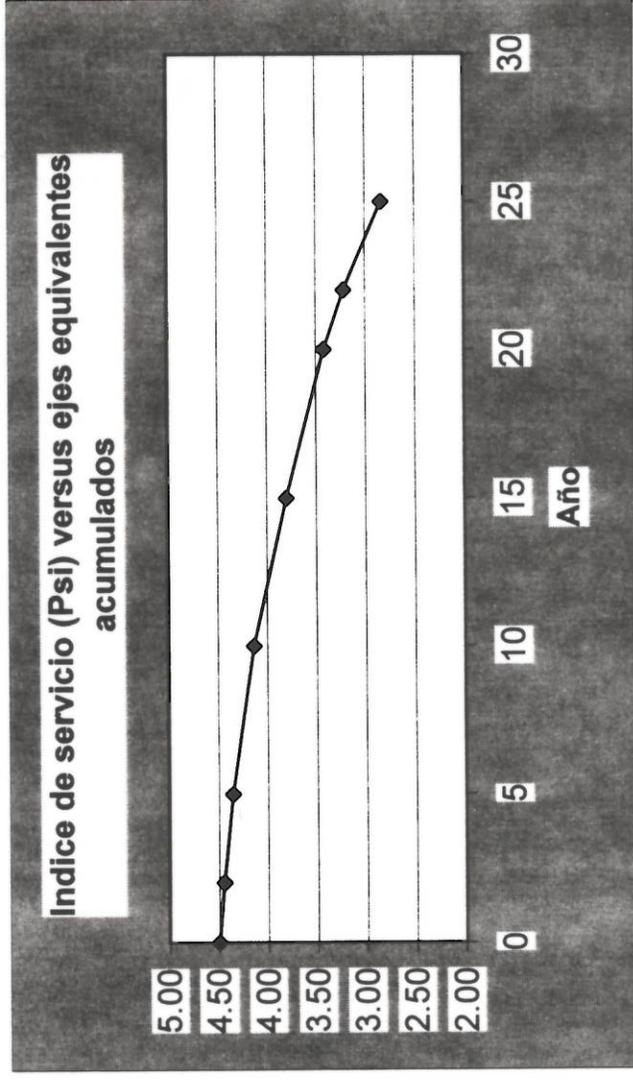
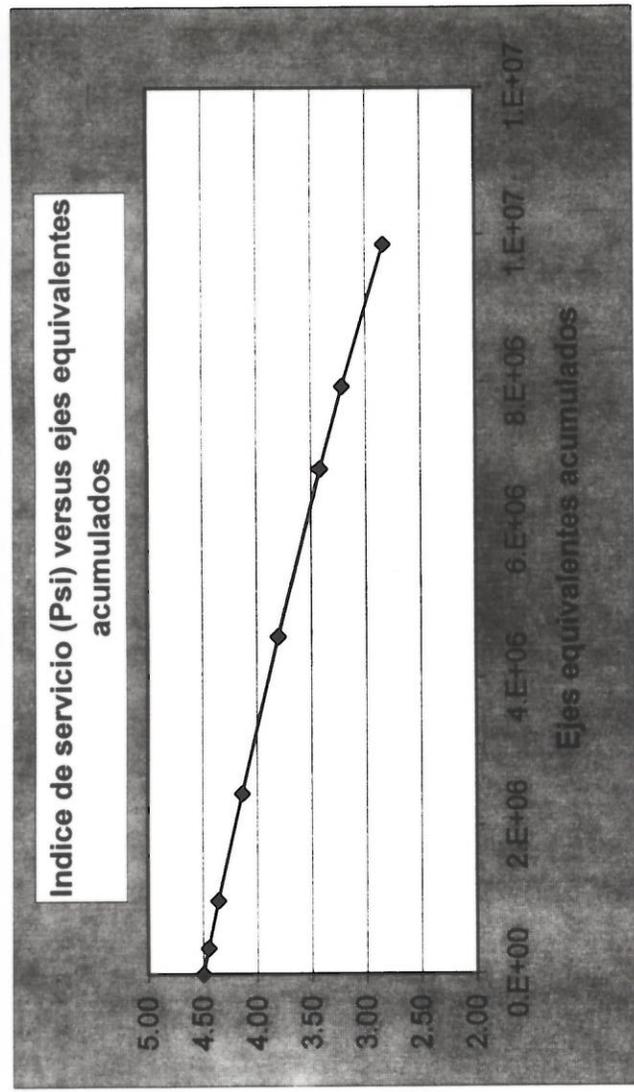
Debe notarse que el pavimento se ha diseñado para 12.3 millones de ejes equivalentes, mientras que la cantidad de ejes equivalentes durante los 25 años de operación se ha estimado en un total de 9.9 millones de ejes equivalentes. Así, al final de los 25 años de operación, se logra un nivel de servicio de 2.84.

Deben tomarse las siguientes consideraciones para lograr el cumplimiento de las expectativas de desempeño, a partir de la curva de deterioro establecida.

- Es fundamental que el sistema de drenaje del pavimento funcione eficientemente y que tenga un mantenimiento periódico.
- La condición del sello en las juntas transversales y longitudinales debe ser óptima durante el funcionamiento de la estructura diseñada.
- Se repararán las losas que presenten fisuramiento y agrietamiento.
- En caso de existir una falla de juntas transversales, por condiciones localizadas de baja capacidad de soporte en la base de apoyo de la losa, deberá llevarse a cabo la reparación correspondiente.

ANO	EEQ ACUM.	PSI
0	0.0.E+00	4.50
2	3.5.E+05	4.45
5	9.9.E+05	4.36
10	2.4.E+06	4.14
15	4.6.E+06	3.80
20	6.8.E+06	3.42
22	7.9.E+06	3.22
25	9.9.E+06	2.84

Losas de 23 cm
 Modulo de reaccion de 1200 pci
 % de confianza = 90%



V - COMPARACION DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE VERSUS ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RIGIDA

5-1. Beneficios para el usuario.

Considerando que conforme mejor sea la condición del pavimento (menor agrietamiento, menor deformación plástica, menor rugosidad a nivel de macro-textura del agregado), los costos de operación del usuario son menores, es posible establecer que conforme más alto sea el índice de servicio PSI (que considera una reducción por porcentaje de grietas, porcentaje de fisuras, rugosidad media y deformación plástica), menores costos de operación habrá para el usuario: menor gasto de combustible, menor gasto de llantas, etc.

A partir de la Tabla No. 9 es posible apreciar que, a partir de los modelos de deterioro para pavimento flexible y pavimento rígido, hay un mayor índice de servicio PSI anual a lo largo del período de análisis (25 años), en la estructura del pavimento rígido.

El hecho de que no sea necesario realizar una rehabilitación mayor en el pavimento flexible (en caso de que se cumplan las condiciones de diseño y haya un adecuado mantenimiento) reduce las diferencias, pero en general, el PSI anual es alrededor de 0.2 a 0.1 mayor para el pavimento rígido.

Tabla No. 9: Comparación de índice de servicio PSI por año de operación, a partir de la modelación de desempeño.

Año de operación	PSI pavimento flexible	PSI pavimento rígido
0	4.30	4.50
2	4.27	4.45
5	4.20	4.36
10	4.00	4.14
15	3.70	3.80
20	3.30	3.42
25	2.50	2.84

Es de suponer que existirán menores costos de operación para el usuario en el caso del pavimento rígido (beneficio), producto de una mejor condición general de la estructura del pavimento.

5-2. Costos de construcción y mantenimiento.

Con base en los modelos de deterioro planteados para las dos alternativas de pavimento, es posible establecer lo siguiente:

- No será necesario el refuerzo estructural del pavimento flexible en caso de que las condiciones de carga y de soporte de la sub-rasante sean similares a las establecidas en el proceso de diseño, se dé un mantenimiento oportuno, con base en la aplicación de políticas de bacheo, reparación de roderas, reciclaje de la parte superior de la carpeta asfáltica y/o aplicación de capas selladoras, además de la utilización de una mezcla asfáltica resistente y durable, para lo cual sería necesario una cuidadosa selección de los materiales a incorporar, incluyendo el asfalto, que, para las condiciones de carga y temperaturas extremas del proyecto, debería ser modificado con un polímero o elastómero.
- No será necesario el refuerzo estructural del pavimento rígido en caso de que las condiciones de carga y de soporte de la losa sean similares a las establecidas en el proceso de diseño y se dé un proceso de mantenimiento preventivo con base en la reparación del sello de las juntas y reparación de losas agrietadas.
- En ambos casos debe considerarse el correcto mantenimiento de los sistemas de drenaje del pavimento y construir los sub-drenajes que sea necesario.

Con respecto a la incertidumbre causada por una eventual variación en las condiciones de apoyo de la estructura de pavimento flexible y de la losa rígida, surgen las siguientes puntualizaciones (a los siguientes aspectos).

- El pavimento flexible es más sensible a cambios en las condiciones de soporte de la sub-rasante mejorada (Tabla No. 10).
- El método de diseño para pavimentos flexibles de la AASHTO no considera un eventual deterioro en las condiciones de las capas integrantes de la estructura: posible agrietamiento de la base estabilizada, deterioro de la calidad de la mezcla asfáltica de carpeta por oxidación del ligante asfáltico, baja capacidad de soporte localizada de la sub-rasante.
- El método de diseño para pavimentos rígidos considera una serie de factores de reducción de la capacidad de soporte en la base de la losa, a partir de un límite máximo de 20000 psi para el módulo resiliente equivalente de la estructura de apoyo de la base estabilizada (sub-rasante, sub-rasante de préstamo y sub-base granular), así como un factor de reducción en la capacidad de soporte de la losa, relacionado con una eventual zocavación en la base de apoyo de la losa.

Tabla No. 10: Comparación de sensibilidad por cambios en las condiciones de soporte (diseño al 90 % de confianza).

PAVIMENTO FLEXIBLE		PAVIMENTO RIGIDO	
Módulo resiliente de la sub-rasante	Capacidad de diseño en ejes equivalentes	Módulo de reacción en la base de apoyo de la losa	Capacidad de diseño en ejes equivalentes
5000 psi	5.23 E6	800 pci	9.90 E6
6000 psi	7.99 E6	900 pci	10.5 E6
7000 psi	11.5 E6	1200 pci	12.3 E6
7500 psi	13.4 E6	1300 pci	12.9 E6

Así, el modelo de deterioro del pavimento flexible es más susceptible a una alteración por el cambio en las condiciones estructurales de las capas integrantes del pavimento, así como a la acción combinada de las cargas de tránsito y condiciones climáticas. Por lo tanto, es de esperar que el pavimento flexible experimente mayores costos de mantenimiento, pudiendo incluso presentarse el caso de que sea requerido un refuerzo estructural hacia el medio o final del período de análisis (si las condiciones de mantenimiento no son las idóneas).

En lo referente al costo de construcción, aplican las siguientes consideraciones:

- En el caso del pavimento flexible, debe considerarse la utilización de una mezcla de alta resistencia y durabilidad, tomando en cuenta la incorporación de un ligante asfáltico modificado con polímeros o elastómeros. El costo es incierto y la magnitud del proyecto puede determinar que no sea rentable la realización de modificaciones en la planta para procesar el asfalto modificado. Debe asegurarse un grado de desempeño PG 76 en el ligante asfáltico.
- En el caso del pavimento rígido, debe aplicarse un procedimiento constructivo estándar, con el cuidado especial de monitorear el módulo de ruptura del concreto hidráulico, así como el cumplimiento de las dimensiones de losa especificadas (espesor y longitud).

En lo referente a valor de salvamento, hay un relativo mayor valor residual en el pavimento rígido que en el flexible, por el hecho de que en el año 25, de cumplirse con las condiciones de diseño, así como con las prácticas de mantenimiento preventivo recomendadas, el PSI del pavimento rígido (2.84) es superior al PSI del pavimento flexible (2.50), proporcionando una mejor base de apoyo para una eventual nueva estructura de pavimento.

Así, no se puede establecer claramente que uno u otro tipo de pavimento presente menores costos globales, si se toma en cuenta la incertidumbre en la definición de los modelos de deterioro, por la eventual variabilidad en las condiciones de carga, condiciones climáticas severas (temperaturas altas y régimen de precipitación severo) y condiciones de apoyo de cada tipo de estructura.

VI - CONCLUSIONES

Se recomienda la aplicación de alguna de las siguientes alternativas estructurales.

En el caso de la estructura de pavimento flexible:

- Construir una capa asfáltica de 15 cm
- Utilizar materiales de alta calidad: agregados de acuerdo con la normativa vigente y un ligante asfáltico modificado con elastómeros y/o polímeros, de manera que su grado de desempeño sea un PG 76. La mezcla asfáltica debe ser evaluada para diferentes condiciones de humedad, temperatura y carga, previo a la construcción.
- Deberán considerarse políticas de mantenimiento preventivo, incluyendo acciones de bacheo, sello de fisuras, reparación de zonas con derrames de aceite y/o combustible, y la aplicación de algun(os) procedimiento(s) de restauración/protección de la condición de la capa asfáltica (aplicación de sellos, reciclaje de la parte superior, etc).

En el caso de la estructura de pavimento rígido:

- Construir una losa de 25 cm de espesor.
- Debe lograrse un módulo de ruptura del concreto de 45 kg/cm²/cm (640 psi) a los 28 días. Utilizando la prueba de aplicación de carga a 1/3 y 2/3 de la luz de la viga de prueba.
- La longitud máxima de las losas no debe exceder 3.75 m.
- Deben colocarse dobelas de refuerzo en las juntas transversales, con un espaciamiento de 30 cm y utilizando varillas No. 8 (2.54 cm de diámetro).
- Debe implementarse un programa de mantenimiento periódico, con sello de juntas, sello de fisuras y reparación de losas que eventualmente presenten agrietamiento.
- Es recomendable la colocación de una capa asfáltica estándar de 5 cm de espesor entre la losa y la base estabilizada, con el propósito de proteger los bordes de las losas en contacto con la base estabilizada. Puede utilizarse un ligante asfáltico estándar, puesto que el material no estará expuesto a las condiciones de carga / temperatura de la superficie del pavimento. Esta recomendación debe considerarse si se piensa que se superarán las expectativas de carga consideradas en el diseño realizado o para prolongar la vida útil del pavimento más allá de 25 años.

Se considera que, en general, hay un menor nivel de incertidumbre en el funcionamiento de la estructura de pavimento rígido, especialmente por la eventual variabilidad en las condiciones estructurales de las capas integrantes del pavimento, así como por las condiciones climáticas y de carga.

Hay un relativo menor costo de operación para los usuarios relacionado con el pavimento rígido, y hay una mayor certeza en las prácticas de mantenimiento preventivo a utilizar. Además, es de esperar un mayor valor de salvamento al final del período de análisis de 25 años.

El pavimento flexible puede presentar menores costos de construcción inicial, aunque esto depende de la factibilidad para utilizar asfalto modificado y para procesarlo en una planta central. Es de esperar, sin embargo, mayores costos de mantenimiento y un menor valor de rescate, junto a costos de operación de los usuarios relativamente más altos.

VII - REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO guide for design of pavement structures, AASHTO, Estados Unidos, 1993.

Asphalt Institute, Performance graded asphalt binder specification and testing, SUPERPAVE Series No. 1 (SP-1), Estados Unidos, 1994.

Huang Yang H., Pavement analysis and design, Prentice Hall, Estados Unidos, 1993.

ANEXO I

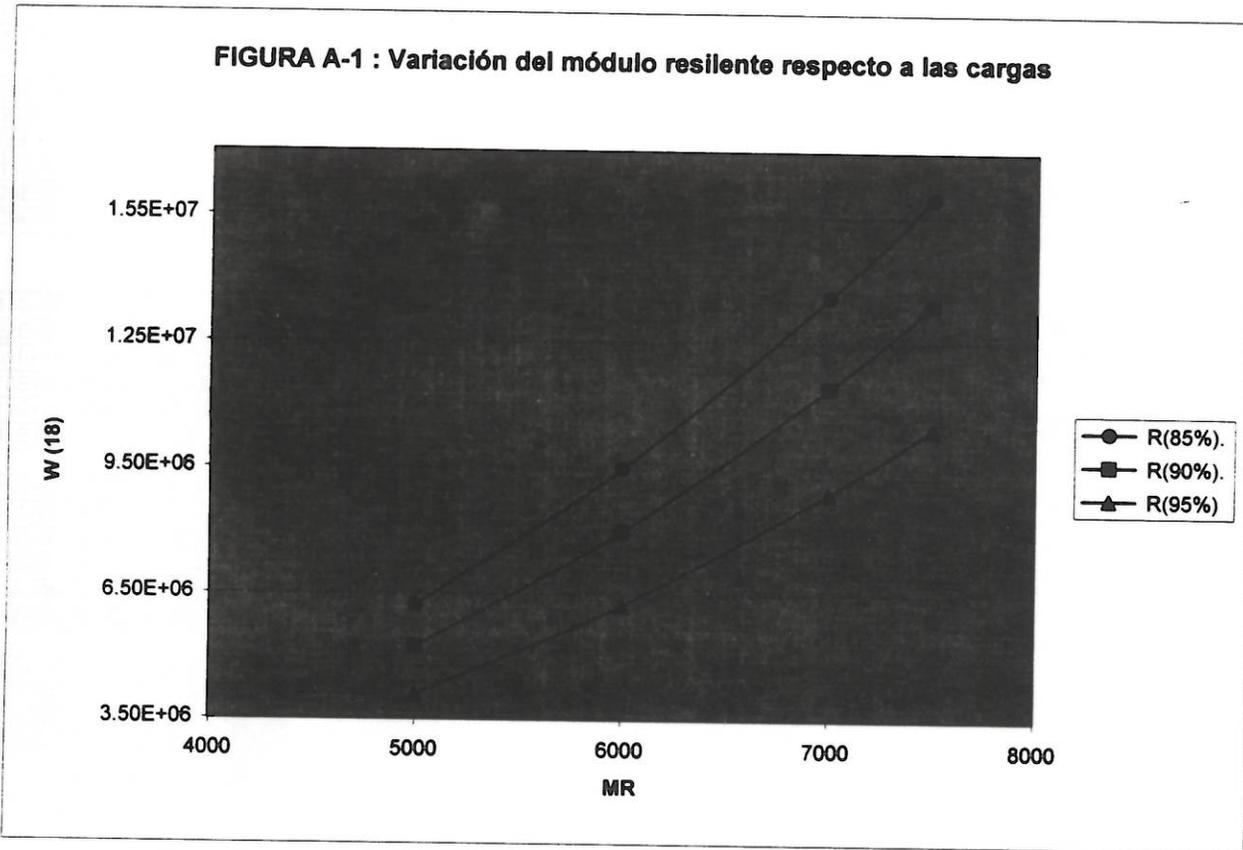
**Determinación de capacidad de carga
(ejes equivalentes) por escenario de
análisis.**

26
 TABLA A-1: ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARA ESTIMAR LOS EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

W_{18}	$\text{LOG}_{10}(W_{18})$	Z_R	S_0	SN	SN+1	Δ PSI	M_R	$\text{LOG}_{10}(W_{18})$
6.22E+06	6.793598411		0.30	4.78	5.78	1.8	5000	6.793598411
9.49E+06	6.977298902		0.30	4.78	5.78	1.8	6000	6.977298902
1.36E+07	7.132615454		0.30	4.78	5.78	1.8	7000	7.132615454
1.59E+07	7.202130132		0.30	4.78	5.78	1.8	7500	7.202130132
5.23E+06	6.718598411	-1.29	0.30	4.78	5.78	1.8	5000	6.718598411
7.99E+06	6.902298902	-1.29	0.30	4.78	5.78	1.8	6000	6.902298902
1.14E+07	7.057615454	-1.29	0.30	4.78	5.78	1.8	7000	7.057615454
1.34E+07	7.127130132	-1.29	0.30	4.78	5.78	1.8	7500	7.127130132
4.08E+06	6.610598411		0.30	4.78	5.78	1.8	5000	6.610598411
6.23E+06	6.794298902		0.30	4.78	5.78	1.8	6000	6.794298902
8.90E+06	6.949615454		0.30	4.78	5.78	1.8	7000	6.949615454
1.05E+07	7.019130132		0.30	4.78	5.78	1.8	7500	7.019130132

MR	W_{18} (R 85%)	W_{18} (R 90%)	W_{18} (R 95%)
5000	6.22E+06	5.23E+06	4.08E+06
6000	9.49E+06	7.99E+06	6.23E+06
7000	1.36E+07	1.14E+07	8.90E+06
7500	1.59E+07	1.34E+07	1.05E+07

FIGURA A-1 : Variación del módulo resiliente respecto a las cargas



37
 TABLA A-2: ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL CALCULO DE LOS EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO DEL PAVIMENTO RIGIDO

W ₁₈	LOG ₁₀ (W ₁₈)	Z _R	S _O	D	D+1	Δ PSI	P _t	S _c	C _d	J	E _c	k	Error	LOG ₁₀ (W ₁₈)
3.19E+06	6.504426547		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.504426547
3.48E+06	6.541580984		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.541580984
3.77E+06	6.576226512		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.576226512
4.06E+06	6.608824059		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.608824059
4.67E+06	6.669156736		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.669156736
4.98E+06	6.69735454		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.69735454
6.01E+06	6.778890684		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.778890684
6.47E+06	6.810876775		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.810876775
6.93E+06	6.840601808		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.840601808
7.39E+06	6.868479086		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.868479086
8.31E+06	6.919838725		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.919838725
8.78E+06	6.943735408		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.943735408
1.10E+07	7.039973815		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.039973815
1.17E+07	7.068148358		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.068148358
1.24E+07	7.094265954		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.094265954
1.31E+07	7.118701977		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.118701977
1.46E+07	7.163571748		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.163571748
1.53E+07	7.184381428		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.184381428
2.70E+06	6.431926547	-1.29	0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.431926547
2.94E+06	6.469080984	-1.29	0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.469080984
3.19E+06	6.503726512	-1.29	0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.503726512
3.44E+06	6.536324059	-1.29	0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.536324059
3.95E+06	6.596656736	-1.29	0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.596656736
4.22E+06	6.62485454	-1.29	0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.62485454
5.09E+06	6.706390684	-1.29	0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.706390684
5.47E+06	6.738376775	-1.29	0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.738376775
5.86E+06	6.768101808	-1.29	0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.768101808
6.25E+06	6.795979086	-1.29	0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.795979086
7.04E+06	6.847338725	-1.29	0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.847338725
7.43E+06	6.871235408	-1.29	0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.871235408
9.28E+06	6.967473815	-1.29	0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.967473815
9.90E+06	6.995648358	-1.29	0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.995648358
1.05E+07	7.021765954	-1.29	0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.021765954
1.11E+07	7.046201977	-1.29	0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.046201977
1.23E+07	7.091071748	-1.29	0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.091071748
1.29E+07	7.111881428	-1.29	0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.111881428
2.13E+06	6.327526547		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.327526547
2.32E+06	6.364680984		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.364680984
2.51E+06	6.399326512		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.399326512
2.70E+06	6.431924059		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.431924059
3.11E+06	6.492256736		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.492256736
3.31E+06	6.52045454		0.29		9	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.52045454
4.00E+06	6.601990684		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.601990684
4.31E+06	6.633976775		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.633976775
4.61E+06	6.663701808		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.663701808
4.92E+06	6.691579086		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.691579086
5.53E+06	6.742938725		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.742938725
5.85E+06	6.766835408		0.29		10	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.766835408
7.30E+06	6.863073815		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.863073815
7.78E+06	6.891248358		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.891248358
8.27E+06	6.917365954		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.917365954
8.75E+06	6.941801977		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.941801977
9.70E+06	6.986671748		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	6.986671748
1.02E+07	7.007481428		0.29		11	2	2.5	640	0.9	3.5	5.00E+06		0	7.007481428

TABLA A-3: Variación de k respecto a las cargas para una confianza del 85%

k	W_{18} (8")	W_{18} (9")	W_{18} (10")
700	3.19E+06	6.01E+06	1.10E+07
800	3.48E+06	6.47E+06	1.17E+07
900	3.77E+06	6.93E+06	1.24E+07
1000	4.06E+06	7.39E+06	1.31E+07
1200	4.67E+06	8.31E+06	1.46E+07
1300	4.98E+06	8.78E+06	1.53E+07

FIGURA A-2 : Variación del valor K respecto a las cargas para un nivel de confianza del 85%

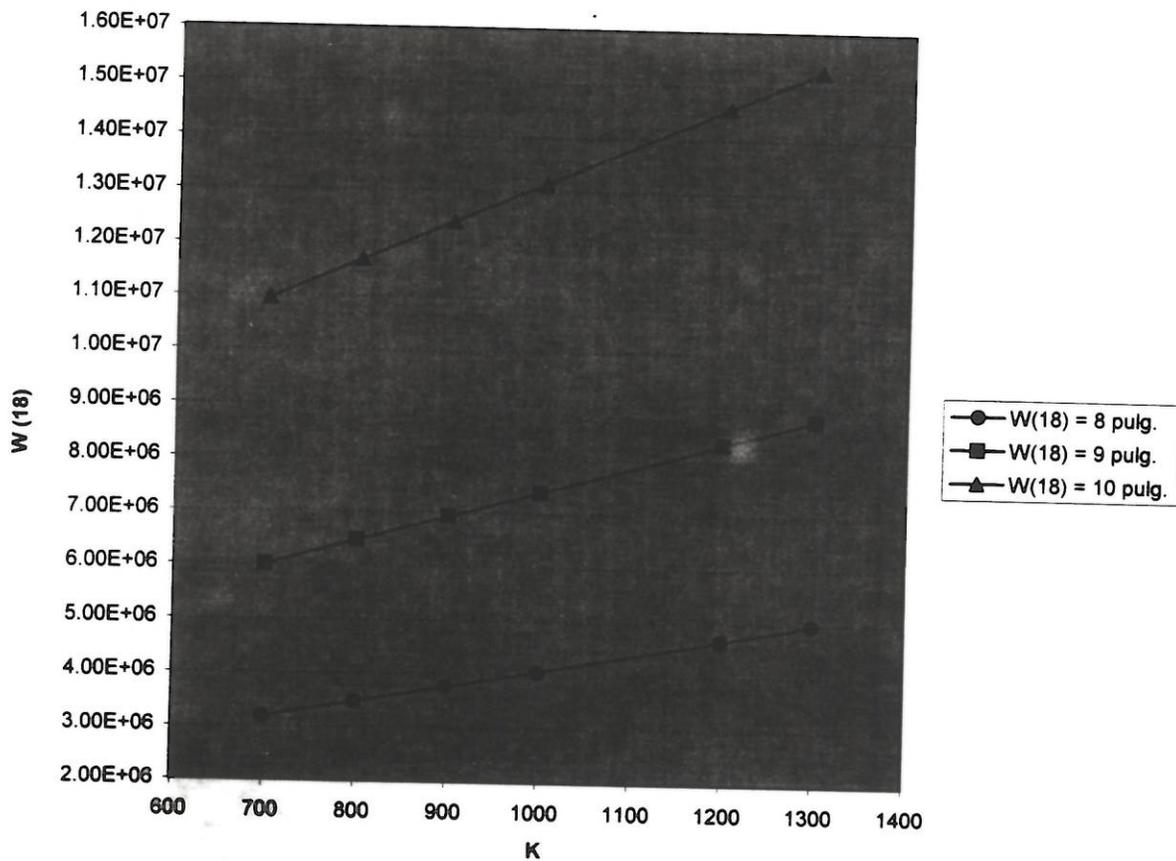


TABLA A- 4: Variación de k respecto a las cargas para una confianza del 90%

k	W_{18} (8")	W_{18} (9")	W_{18} (10")
700	2.70E+06	5.09E+06	9.28E+06
800	2.94E+06	5.47E+06	9.90E+06
900	3.19E+06	5.86E+06	1.05E+07
1000	3.44E+06	6.25E+06	1.11E+07
1200	3.95E+06	7.04E+06	1.23E+07
1300	4.22E+06	7.43E+06	1.29E+07

FIGURA A-3 : Variación del valor K respecto a las cargas para un nivel de confianza del 90%

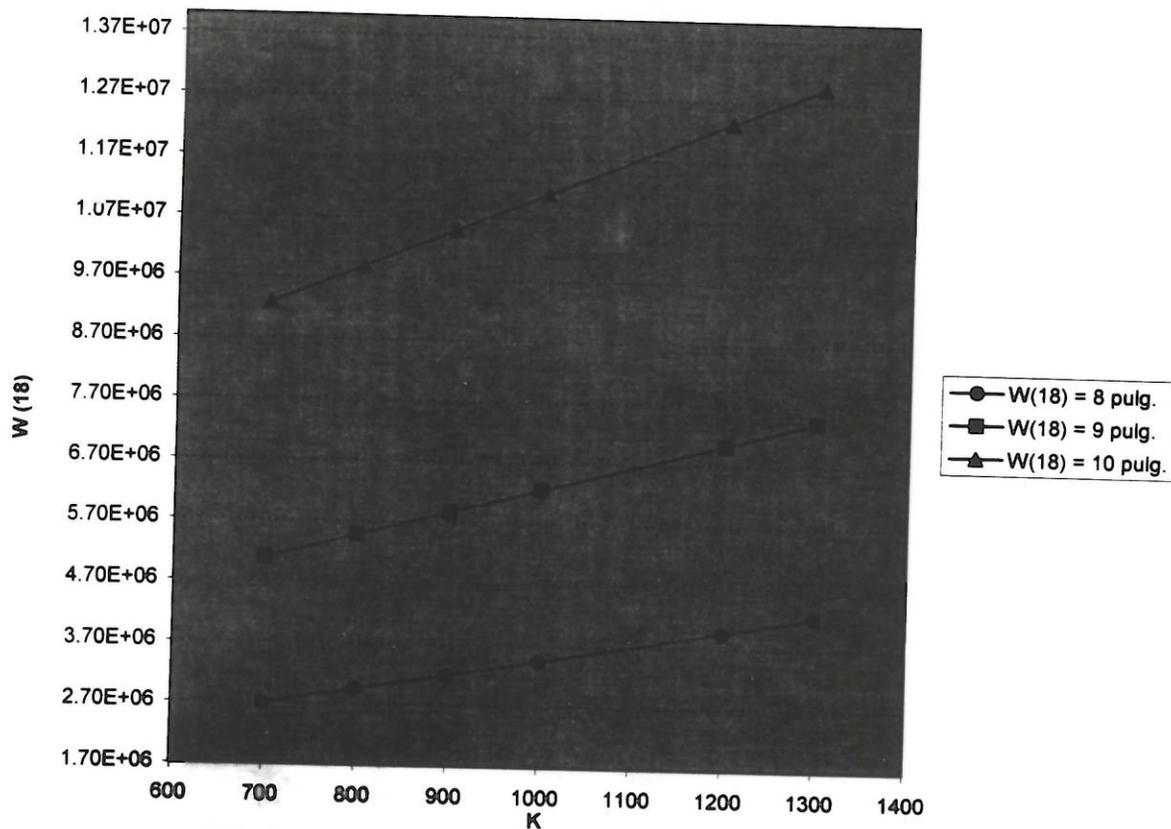


TABLA A-5: Variación de k respecto a las cargas para una confianza del 95%

k	W_{18} (8")	W_{18} (9")	W_{18} (10")
700	2.13E+06	4.00E+06	7.30E+06
800	2.32E+06	4.31E+06	7.78E+06
900	2.51E+06	4.61E+06	8.27E+06
1000	2.70E+06	4.92E+06	8.75E+06
1200	3.11E+06	5.53E+06	9.70E+06
1300	3.31E+06	5.85E+06	1.02E+07

FIGURA A-4 : Variación del valor K respecto a las cargas para un nivel de confianza del 95%

