



CAPÍTULO I

1.1 Antecedentes.

Por diversas causas es frecuente ver como las carreteras se deterioran en períodos de tiempo inferiores a aquellos para los que fueron diseñados. Las razones de este acortamiento de la vida útil pueden ser variados y de muy diferentes orígenes y por lo tanto tener consecuencias diferentes a la hora de juzgar si un pavimento está en buen o mal estado.

El pavimento, al verse afectado, necesita de una solución rápida y eficiente, la cual se pretende dar con la utilización del recapado a través de refuerzos estructurales. El pavimento sea flexible o rígido; es proyectado y construido para ofrecer viajes confortables, seguros y económicos. Estos factores están determinados por la calidad de su superficie. Cuando el revestimiento no cumple más esta finalidad, se debe intervenir para su rehabilitación.

La utilización de sobrecarpetas o refuerzos surgen como una necesidad de frenar el deterioro del pavimento, disminuir los costos de mantenimiento, disminuir los accidentes provocados por mal estado del pavimento, además de garantizar la comodidad y confort para los conductores. Por ello diferentes investigaciones en varios países que están en busca de soluciones definitivas y concretas realizando pruebas con distintos materiales y diversas técnicas que puedan hacer frente a la problemática que ocasiona esta situación.

Durante las últimas décadas ha sido preciso rehabilitar muchos pavimentos antiguos sean estos rígidos y flexibles en diversos países a través de la utilización de refuerzos o sobre carpetas de distintos materiales como ser de Concreto Asfáltico y Hormigón en pavimentos rígidos y flexibles; tal es el caso de la American Association of States Highways and Transportation Officials (AASHTO); corresponde al método de diseño de espesores de refuerzos más ampliamente usados a nivel mundial; realizando toda una guía sobre el estudio de la utilización de refuerzos en pavimentos analizando



varias metodologías sobre el empleo y diseño de los refuerzos mencionados anteriormente.

1.2 Justificación.

Cuando los pavimentos asfálticos presentan deterioro con fallas tales como ahuellamiento, grietas, piel de cocodrilo y baches dentro de las más comunes, es necesario desarrollar algún tipo de rehabilitación para recuperar el estándar de diseño y a la vez disminuir los riesgos, accidentes que aumentan con las fallas antes mencionadas. La solución más recurrente en muchos países son los recapados con refuerzos estructurales del tipo flexible y/o rígido.

El uso de sobrecarpetas o refuerzos en pavimentos flexibles, sean estos de materiales de cemento asfáltico y/o Hormigón surge como una solución alternativa de rehabilitación, cuando los pavimentos ya han alcanzado su vida útil y estructuralmente necesitan un refuerzo.

Durante las últimas décadas ha sido preciso rehabilitar muchos pavimentos flexibles antiguos en diversos países. A soluciones tradicionales con mezclas bituminosas se han añadido otras con la utilización de refuerzos de concreto asfáltico y hormigón.

Los recubrimientos con refuerzos estructurales en pavimentos flexibles son alternativas de utilización en rehabilitación, al realizar el análisis técnico – económico que es conveniente al momento de optar entre uno de los refuerzos que aventaja en comportamiento estructural como funcional, prolonga la vida útil relacionada con el costo de mantenimiento, lo que la convierte en una buena inversión al momento de realizar la elección de uno de los refuerzos.

Así mismo se requiere profundizar en el comportamiento de estos refuerzo, en otros países se han construido tramos con refuerzos de concreto asfáltico y hormigón sobre pavimentos flexibles con excelentes resultados.



En base a estas experiencias realizadas, comprobaremos que dichos refuerzos, pueden ser una alternativa viable por su economía, facilidad de construcción y sobre todo su durabilidad en la rehabilitación en los caminos con pavimento flexible. De los resultados de esta investigación se espera poder contribuir con algunas sugerencias viables para solucionar la situación indicada.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Realizar el análisis comparativo de alternativas de refuerzo estructural (Sobrecarpetas) en pavimentos flexibles, aplicado a un tramo de la carretera Villamontes – Boyuibe. PROGRESIVA (400+779 – 414+401). de manera que se pueda sustentar técnicamente la mejor alternativa para el tramo en estudio.

1.3.2 Objetivos Específicos.

Los objetivos específicos que se tiene son:

- i. Analizar los aspectos más relevantes del diseño de pavimentos flexibles y sus características.
- ii. Realizar el proceso metodológico para justificar y sustentar la rehabilitación en el pavimento flexible del tramo en estudio.
- iii. Aplicar el proceso metodológico del dimensionamiento de refuerzos al tramo de estudio, de manera que se determine los resultados de ambas alternativas estudiadas.
- iv. Con los resultados obtenidos realizar un análisis comparativo técnico y económico de manera que permita evaluar y determinar la alternativa elegida al tramo en estudio.
- v. Establecer conclusiones y recomendaciones que permitan rescatar los aspectos más importantes del estudio realizado.



1.4 Alcance.

En el presente trabajo se iniciará, planteando los objetivos anteriormente mencionados.

Para lo cual primeramente se debe estudiar los pavimentos flexibles, es decir las características más importantes, parámetros, factores de diseño y el proceso correcto para su dimensionamiento, etc.

Posteriormente se hará mención de los refuerzos estructurales en pavimentos, pero se estudiará a mayor profundidad en pavimentos flexibles, en especial los refuerzos de concreto asfáltico y hormigón que serán tomados en cuenta para el presente trabajo como alternativas de rehabilitación en pavimentos flexibles, para ello se procederá previamente con la evaluación funcional y estructural del tramo en estudio, de manera de justificar y sustentar que se necesita una rehabilitación con cualquiera de las alternativas estudiadas.

Posteriormente se realizara el dimensionamiento de ambos refuerzos, con los resultados obtenidos de ambas alternativas se realizara una comparación técnica – económica, que será aplicado a un tramo de la carretera VILLAMONTES – BOYUIBE. PROG. (400+799 – 414+401).

De manera que permita evaluar y determinar la alternativa elegida al tramo en estudio.

Metodología.

La metodología de trabajo se basará prácticamente en procesos de investigación, tanto de campo como de gabinete.

Se deberá recabar información de tipo documental o efectuando mediciones en el campo, de los principales indicadores que manifiestan las condiciones en que se encuentra el pavimento, para justificar una rehabilitación inmediata del pavimento.



Esta metodología implica una serie de procesos sucesivos para poder hacerlo con exactitud, es decir; primeramente se deberá ver los antecedentes del lugar a evaluar, seguidamente se realizará una inspección del lugar a evaluar, posteriormente deberemos elegir los tramos que se evaluará, ver con qué método iniciaremos la evaluación, la forma de evaluarlos, tomar fotos en el pavimento de las fallas, etc.; una vez obtenida la información necesaria para los dos métodos, recién se llevará la información, se la empezará a procesar de acuerdo a los diferentes métodos.

Finalmente, obtenidos los resultados se realizará un análisis comparativo de resultados de acuerdo a los dos métodos diferentes para poder tomar decisiones llegar a conclusiones y recomendaciones posibles.

La evaluación de un pavimento, además de proporcionar la información de su estado en el momento en que se realice, proporciona información de gran utilidad para construir la experiencia del organismo, que contribuye a la constante mejora en los aspectos de diseño y construcción de pavimentos nuevos o sometidos a procesos de rehabilitación, así como a la eficiencia técnica y económica de estos últimos.



CAPÍTULO II

2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1 Generalidades.

Pavimento. Es la estructura generalmente integrada por la sub-base, base y carpeta de rodadura, construida sobre una terracería debidamente compactada, para poder soportar las cargas de tránsito de acuerdo al diseño, pero al mismo tiempo, deben resistir las abrasiones y los punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos, la caída de objetos y la compresión de los elementos que se apoyan en él.

2.2 Definición de pavimento flexible

El pavimento flexible también conocido como pavimento de asfalto es una estructura formada por varias capas como lo son la sub-rasante, la sub base, la base y la carpeta asfáltica; cada una con una función determinada, las cuales en conjunto tienen los siguientes propósitos:

- a. Resistir y distribuir adecuadamente las cargas producidas por el tránsito. El pavimento flexible debe estar constituido de manera tal que las cargas, producidas por el tránsito, no provoquen deformaciones de ningún tipo en su estructura, siendo de mucha importancia el espesor que el mismo tenga.
- b. Tener la impermeabilidad necesaria. Este pavimento debe ser lo suficientemente impermeable para impedir la infiltración que puede darse por parte del agua, afectando la capacidad soporte del suelo. De esto se concluye que es de mucha importancia la existencia de un drenaje adecuado.
- c. Resistir la acción destructora de los vehículos. El pavimento debe ser resistente respecto al desgaste y desprendimiento de partículas que se obtiene como consecuencia del paso de los vehículos.



- d. Resistir los agentes atmosféricos. Como un efecto continuo de su presencia, los agentes atmosféricos provocan la meteorización y alteración de los materiales que componen el pavimento, reflejándose este problema, en la vida económica y útil del mismo. Por lo tanto deben procurarse materiales de mayor calidad y resistentes a los agentes físicos y químicos.
- e. Poseer una superficie de rodadura adecuada, que permita fluidez y comodidad hacia el tránsito de vehículos. La superficie del pavimento, debe proporcionar un aspecto agradable, seguro y confortable, de manera que el deslizamiento de los vehículos sea óptimo. Esta superficie, que debe ser lisa, también debe ser antideslizante en caso de estar húmeda.
- f. Ser flexible para adaptarse a ciertas fallas de la base o sub-base. La flexibilidad del pavimento es muy importante en caso de presentarse asentamiento en alguna de sus capas; pudiendo así adaptarse a las pequeñas fallas sin necesidad de reparaciones costosas.

2.3 Conformación de la estructura del pavimento flexible.

Los pavimentos flexibles están formados por una carpeta bituminosa apoyada sobre dos capas no rígidas, la base y la sub base, las cuales se encuentran conformadas por materiales que deben llenar las especificaciones requeridas. La calidad de estas capas va disminuyendo con la profundidad. (Se puede apreciar en la figura).

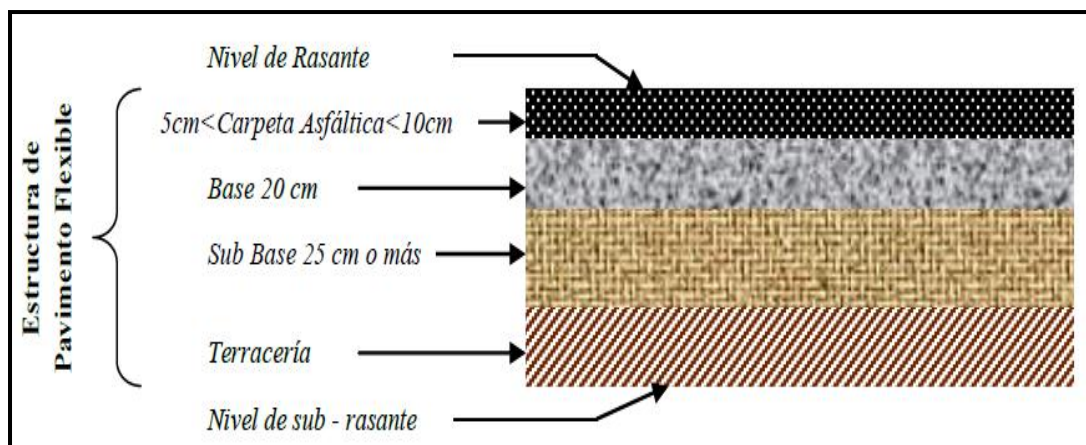


Figura 2-1 Estructura Básica del Pavimento flexible



2.4 Función del pavimento flexible

El pavimento debe ofrecer una superficie buena y resistente, con la rugosidad necesaria para garantizar buena fricción con las llantas del vehículo, además de tener el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos.

Además debe poseer la resistencia y características mecánicas apropiadas para soportar las cargas debidas al tránsito, sin provocar fallas y ni deformaciones permanentes.

Las características de resistencia y deformabilidad son necesarias para la distribución de esfuerzos, de modo que lleguen a la sub rasante a niveles tolerables que no produzcan fallas, asentamientos u otras deformaciones perjudiciales.

La base, en los pavimentos flexibles, estará formada por materiales fricciantes, cuya capacidad de carga es baja, debido a la falta de confinamiento, por lo que se requiere que sobre la base exista una capa de material cohesivo y resistente a la tensión, como lo es la capa asfáltica.

2.4.1 Funciones de las distintas capas de un Pavimento Flexible

2.4.1.1 Sub base

La función de la sub base, en un pavimento flexible, es puramente económica, buscando así obtener un espesor utilizando el material más barato posible. Podría construirse dicho espesor con materiales de alta calidad como en el caso de la base, pero usualmente se hace aquella más delgada y se sustituye en parte por la sub base que es de menor calidad, trayendo como resultado un aumento en el espesor total del pavimento, pues es un hecho que cuando menor es la calidad del material utilizado, mayor será el espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.

Otra función de la sub base es la de servir de transición entre la base y la sub rasante; ya que el material de la base es granular más o menos grueso y el de la sub base es



más fino que le anterior, de esta manera sirve como filtro para evitar que el material de la base se incruste en la sub rasante. La sub base sirve también para absorber las deformaciones que provienen de la sub rasante y que pueden ser perjudiciales para el pavimento en general.

Así también lo son los cambios volumétricos asociados a los cambios de humedad. La sub base sirve también como drenaje para desalojar el agua que se infiltre en el pavimento y para impedir la ascensión capilar hacia la base de agua procedente de la terracería.

De las funciones mencionas anteriormente, la estructural y la económica son las que más se proyectan en la construcción de pavimentos, el resto dependen de las circunstancias y de los materiales con los que se cuente para la sub base. Generalmente las dos cualidades que se buscan en el material de subbase son: la resistencia friccionante y la capacidad de drenaje; teniendo cada una, en su razón de ser, la importancia de su preferencia. La resistencia friccionante contribuirá a la resistencia en conjunto del pavimento, garantizando buen comportamiento en cuanto a deformabilidad se refiere, como resultado de una buena compactación. La capacidad de drenaje, igualmente importante, es necesaria debido a la doble función que realiza tanto con el agua que se infiltra de la superficie, como la que asciende por capilaridad.

Los espesores de subbase, son muy variables y dependen de cada proyecto específico, pero suele considerarse 12 a 15 cm como la dimensión mínima constructiva.

Los materiales consistirán en materiales de tipo granular con las siguientes propiedades mínimas: un valor soporte (CBR) del 30% sobre muestra saturada y compactada al 100% del Proctor Modificado u otra compactación que el diseñador especifique; un índice plástico (IP) no mayor de 9 y un límite líquido (LL) no mayor de 40. Los materiales de subbase deben ser de fácil compactación para alcanzar la



densidad máxima determinada. En el caso de que contengan gravas o rocas, éstas no deben ser mayores de los $2/3$ del espesor de la sub base.

Cuando la compactación de la subbase resulte difícil por falta de finos, pueden seguirse dos alternativas: se le agregan los finos o, si ésta operación resulta cara en valor y/o trabajo, deben buscarse otros bancos de material que reúnan las especificaciones.

Cuando existan alternativas para el uso de varios bancos, dentro de los límites razonables de acarreo y/o calidad, se escogerá el que disponga de menor porcentaje de material que pase el tamiz 200, que tenga mayor CBR y menor índice plástico (IP).

Es muy importante que los bancos de materiales para subbase, llenen las especificaciones requeridas y se encuentren libres de materia vegetal, basura o terrones de arcillas y otras materias perjudiciales. Debe tenerse presente y tomar en cuenta que un gran número de fallas en los pavimentos se debe a subbases que no llenan las especificaciones requeridas, que han sido mal compactadas o que se han contaminado debido a la falta de un adecuado drenaje o por falta de control de la sub rasante.

2.4.1.2 Base

Su función primordial es la de proporcionar un elemento resistente que transmita los esfuerzos producidos por el tránsito, hacia la sub base y sub rasante, en una intensidad adecuada. Esta también reduce el espesor de la carpeta más costosa. Muchas veces la base también debe trabajar como la sub base, respecto a la doble función de drenaje mencionada anteriormente.

Básicamente el material que constituye a la base, en el pavimento flexible, debe ser friccionante y provisto de vacíos.

La primera garantizará la resistencia adecuada y la permanencia de dicha resistencia con la variación de las condiciones que se puedan presentar, como podría ser el



contenido de agua. Es lógico que no basta sólo con emplear material friccionante para garantizar la resistencia deseada, es necesaria también una compactación adecuada, necesaria para adquirir la compacidad y trabazón estructural requerida para una buena base. Los materiales utilizados para la base suelen someterse a procesos exigentes para su aprobación como lo es la trituración, produciendo efectos favorables para la resistencia y deformabilidad de la estructura a construir, ya que se obtienen partículas con formas convenientes para un reacomodo adecuado; además de esto, se deben llenar otras especificaciones por lo que es necesario tamizar dicho material.

Los espesores de las bases son muy variables de acuerdo con el proyecto de que se trate, pero suele considerarse que 12 o 15 centímetros, es el espesor mínimo que conviene construir.

Los materiales de grava o piedra triturada, provienen de la explotación de minas, de roca o piedras naturales. Los materiales retenidos en el tamiz No. 4, son agregados gruesos; los que pasan el tamiz No. 4, agregados finos; y los que pasan el tamiz No. 200, forman el relleno mineral. El material de relleno deberá estar libre de sustancias deletéreas o talcosas, poseen propiedades ligantes tales que permitan una buena compactación y contribuyan formar una capa de base bien ligada y densa. Los finos, juntamente con el agregado mineral, deberán tener un límite líquido menor de 25, un índice plástico menor de 9, y el porcentaje que pase el tamiz No. 200 deberá ser igual o menor al que pasa el tamiz No. 40. En el caso que sea necesario agregar material de relleno, para ajustarse a los requisitos de graduación o para obtener una cohesión satisfactoria del material, deberá mezclarse uniformemente todo el material de la base.

Materiales a base de arena - arcilla, son mezclas que, debidamente proporcionadas, tienen considerable resistencia a la desintegración, cuando han sido compactadas con la humedad óptima a su máxima densidad. En estas condiciones llegan a tener alto valor soporte arriba del 80% de CBR. Para que mantengan estas características, es necesario imprimir las inmediatamente, después de construidas, aunque



posteriormente se coloque la carpeta de rodadura. Son consideradas muy buenas bases mientras mantengan sus características de máxima densidad y humedad óptima, pero muy deficientes al perder humedad más allá de límites razonables, pues se desintegran rápidamente pierden de manera sensible su valor soporte. Sin son debidamente protegidas, con buenos drenajes, sub drenajes y una carpeta de rodadura, dan resultados excelentes y su construcción es económica.

Lo óptimo a requerir de estos materiales es que si son arenas, sean duras, angulosas y preferiblemente silíceas; si son arcillas, deberán ser de calidad uniforme y estar libres de terrones, materias vegetales y sustancias dañinas.

La fracción que pasa por el tamiz No. 200, será menor del 50% de la fracción que pasa el tamiz No. 40. Además de los requisitos anteriores, la base terminada debe tener un valor soporte arriba del 80%, un límite líquido no mayor de 25 y un índice plástico igual o menor de 9.

En resumen, la base debe proporcionar una superficie de rodadura adecuada, con textura y color conveniente, además de resistir los efectos abrasivos del tránsito. Es muy importante mencionar que esta capa debe impedir, hasta donde sea posible, la infiltración del agua al interior del pavimento.

2.4.1.3 Capa de rodadura

Es la capa que se coloca sobre la base. Su objetivo principal es proteger la estructura de pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores. Evita la desintegración de las capas subyacentes a causa del tránsito de vehículos.

La capa de rodadura también contribuye a aumentar la capacidad soporte del pavimento, absorbiendo cargas, si su espesor es apreciable (mayor de 4 centímetros).

La capa de rodadura en pavimentos flexibles es denominada también carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de



rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir, las principales características que debe cumplir el pétreo son las siguientes:

- a) Un diámetro menor de una pulgada y poseer espesores en grados sucesivos adecuados.
- b) Deberá tener cierta dureza para lo cual se le efectuarán los ensayos de Desgaste los Ángeles, intemperismo acelerado, densidad y durabilidad.
- c) La forma de la partícula deberá ser lo más cúbica posible, no debe usarse material en forma de laja o aguja pues se rompen con facilidad, alterando la granulometría y puede provocar fallas en la carpeta, se efectúan pruebas de equivalente de arena ya que los materiales finos en determinados porcentajes no resultan adecuados.
- d) La superficie de rodamiento debe tener capacidad para resistir el desgaste y los efectos abrasivos de los vehículos en movimiento y poseer suficiente estabilidad para evitar daños por la carga de tránsito.

Cuando la carpeta se construye con espesores mayores o iguales a 2.5 cm., se considera que contribuye al resto de capas a soportar las cargas y distribuir los esfuerzos.

Debido a que ésta es la parte que está mayormente expuesta al intemperismo y a la interacción directa con el tráfico, es la que se ve dañada más severamente y por lo que usualmente necesita con mayor frecuencia un cuidado especial y que generalmente cubren las distintas clases de mantenimiento.

2.5 Diseño de pavimentos flexibles.

2.5.1 Introducción.

El concepto del diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos, es determinar primero el espesor de la estructura basado en el nivel de tránsito como en las



propiedades de los materiales; el período de desempeño de un pavimento está en función de la pérdida de serviciabilidad según método de diseño AASHTO 93.

2.5.2 Factores de diseño

El espesor de diseño de pavimentos flexibles es determinado principalmente con base en los siguientes factores de diseño.

- a. Módulo Resiliente de la subrasante M_R .
- b. Los pesos, frecuencia y tipo de carga por eje de camión que el pavimento tiene que soportar.
- c. Período de diseño.

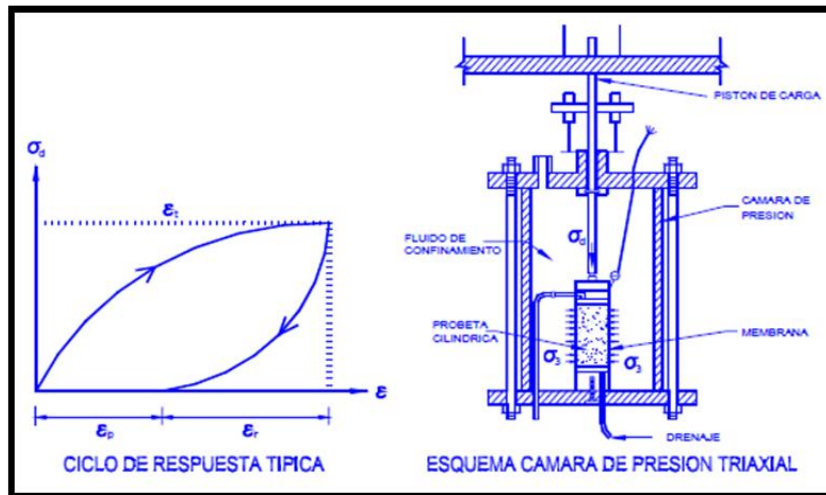
2.5.2.1 Módulo resiliente de la subrasante (M_R)

Cuando un vehículo circula sobre un pavimento sus ruedas transmiten cargas que generan, al interior de la estructura de ese pavimento y el suelo de fundación, un estado de esfuerzos que a su vez induce un estado de deformaciones. Si el material de la capa se supone linealmente elástico, isotrópico y homogéneo, ambos estados se consideran relacionados entre sí a través del Módulo de Elasticidad y la Razón de Poisson propios del material. Sin embargo la respuesta real de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos y suelo de fundación, muestra que bajo pulsos de carga dinámicos como los inducidos por las ruedas de los vehículos, solo parte de la deformación total generada se recupera al cesar la sollicitación aplicada. Esto implica que en estricto rigor este tipo de materiales no presenta un comportamiento elástico. En consideración a este hecho se introduce el concepto de Módulo Resiliente, que se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables [AASHTO, 1993].

El estudio del módulo resiliente se ha desarrollado a partir de ensayos triaxiales dinámicos con carga repetida. Este ensaye consiste básicamente en someter a una



probeta de material a un estado de esfuerzos compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico, estado de esfuerzos que pretende reproducir el estado a que se encuentra sometido el suelo de fundación del camino cuando éste es solicitado por los vehículos. Una respuesta típica al ensayo se muestra en la Figura 2-2. A partir de esta respuesta y sus componentes se puede definir matemáticamente el módulo resiliente del material según la expresión indicada en la Ecuación (2-1).



2-2 Ciclo de carga y descarga típico en un ensayo triaxial con carga repetida.

La fórmula que relaciona al módulo resiliente con la deformación que sufre el pavimento es la que se muestra en la ecuación 2-1:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad \text{Ecuación (2-1)}$$

Donde:

M_R = Módulo Resiliente.

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = Esfuerzo desviador dinámico.

ε_r = Deformación unitaria recuperada.

σ_1 = Esfuerzo axial. Esfuerzo principal mayor.

σ_3 = Presión de confinamiento. Esfuerzo Principal menor.



Además de lo descrito anteriormente se puede determinar el módulo resiliente de la subrasante a través de deflexiones mediante un equipo que pueda brindar esta información.

Hoy en día existen varios equipos que realizan esta tarea como ser la viga Benkelman, deflectómetro de impacto móvil o estático y varios otros.

La guía AASTHO 93 incluye conceptos del retrocálculo de deflexiones obtenidas por el equipo deflectómetro de impacto y con la información de deflexiones se puede determinar, con fines de seguimiento, la capacidad estructural de un modelo estructural de pavimento en cualquier momento de su vida de servicio, y conocer su desempeño, así como establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación. Esto es posible mediante procesos de retrocálculo, con los cuales, se obtienen parámetros conocidos como el Módulo Resiliente de la Subrasante (M_R), el Módulo Equivalente del Pavimento (E_p) además del Número Estructural Efectivo (SN).

2.5.2.1.1 Módulo Resiliente de la Subrasante obtenido por Retrocálculo.

1) Módulo resiliente de la subrasante. El método simplificado para estimar el módulo resiliente de la subrasante a partir de deflexiones medidas en la superficie de pavimentos por capas fue propuesto por Tullidez (1977; 1987), y está basado en los siguientes supuestos, para una estructura elástica multicapas:

- Como la distancia desde la carga se incrementa, la compresión de las capas arriba de la subrasante llega a ser menos significativa de ser medida en la superficie del pavimento.
- Como la distancia desde la carga se incrementa, la aproximación de una carga distribuida por un punto de carga mejora.

La primera observación significa que a una distancia radial suficiente desde la carga aplicada, la deflexión medida en la superficie del pavimento es influenciada mayormente por la deflexión en la parte superior de la subrasante. De esta manera, la



deflexión medida depende enteramente de las propiedades elásticas de la subrasante, sin tomar en cuenta el número, espesor y propiedades elásticas de las capas superiores.

Con estas observaciones se determinó que el módulo resiliente de la subrasante puede ser obtenido por retrocálculo con las deflexiones medidas en el deflectómetro de impacto, para el sensor ubicado a 180 cm del eje de carga, utilizando la siguiente expresión:

$$M_{rr} = \frac{P(1 - \mu^2)}{\pi * r * d_r} \quad \text{Ecuación (2-2)}$$

Donde:

M_{rr} : Módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante (MPa o lb/pulg²)

P: Carga aplicada en el impacto (kN o libras)

μ : Relación de Poisson de la subrasante

d_r : Deflexión registrada a la distancia r medida desde el centro de carga (centímetros o pulgadas)

r: Distancia entre el eje de carga del sistema y el sensor dado (centímetros o pulgadas)

Asumiendo una relación de Poisson de 0.5, el módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante se determina como:

$$M_{rr} = \frac{0.24 * P}{r * d_r} \quad \text{Ecuación (2-3)}$$

Para propósitos prácticos, la deflexión usada en estas ecuaciones debería ser la más cercana posible a la del plato de carga. De todas maneras, la distancia debe también ser suficientemente lejana desde el plato de carga para satisfacer las consideraciones asumidas.



El siguiente análisis fue desarrollado para determinar la mínima distancia radial “r” a la cual las deflexiones pueden ser medidas sin introducir un error en el módulo resiliente determinado por retrocálculo.

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \frac{E_p}{M_R} \right)^2} \quad \text{Ecuación (2-4)}$$

Donde:

a_e : Radio del bulbo de tensión en la interface pavimento-subrasante (pulgadas)

a : Radio del plato de carga (pulgadas)

D : Espesor total del pavimento por encima de la subrasante (pulgadas)

E_p : Módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante (lb/pulg²), definido como:

$$d_o = 1.5pa \left(\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \frac{E_p}{M_R} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right) \quad \text{Ecuación (2-5)}$$

Donde:

Δ_0 : Deflexión máxima medida en el centro de la placa de carga corregida a 20 °C (pulgadas)

q : Presión de la placa de carga (lb/pulg²)

De acuerdo con lo propuesto por AASHTO en la Guía de diseño para estructuras de pavimento (1993), la deflexión empleada para retrocalcular el módulo de la subrasante debe ser medida lo suficientemente lejos, de tal modo que provea un buen estimativo del módulo resiliente de la subrasante, independientemente de los efectos



de cualquiera de las capas por encima de esta; pero también debe estar lo suficientemente cerca, de tal modo que no sea muy pequeña e impida una medición precisa. La mínima distancia debe determinarse siguiendo la siguiente relación:

$$r \geq 0.7 a_e \quad \text{Ecuación (2-6)}$$

Determinar el módulo resiliente de diseño con retrocálculo, a partir de ensayos no destructivos, requiere del factor de ajuste C, para hacerlo consistente con el valor que representa la subrasante.

Un valor de 0.33 es recomendado para el factor de ajuste C; con este, entonces, se ajustan los valores del módulo resiliente obtenidos por retrocálculo a los valores del módulo resiliente real de la subrasante.

La ecuación resultante para determinar el módulo resiliente o de diseño de la subrasante es:

$$M_{rr} = C * \left(\frac{0.24 * P}{r * d_r} \right) \quad \text{ó} \quad M_r = C * M_{rr} \quad \text{Ecuación (2-7)}$$

Donde:

P: Carga aplicada (libras)

Mr: Módulo resiliente de la subrasante (lb/pulg²)

Mrr: Módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante (lb/pulg²)

C: Factor de ajuste (0.33)

2.5.3 Periodo de Diseño

Es el tiempo total para el cual se diseña un pavimento en función de la proyección del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones del entorno se comiencen a alterar desproporcionadamente.



La vida útil del pavimento, es aquel tiempo que transcurre entre la construcción del mismo y el momento en que alcanza el mínimo de serviciabilidad.

El período de diseño puede llegar a ser igual a la vida útil de un pavimento; en los casos en que se consideren reconstrucciones o rehabilitaciones a lo largo del tiempo, el período de diseño comprende varios períodos de vida útil que son: el de pavimento original y el de las rehabilitaciones.

Se recomiendan períodos de diseño en la siguiente forma:

Tabla 2-1
Periodos de diseño

Tipo de Carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Fuente: guía AASTHO 93.

2.5.4 Tráfico y cargas de diseño.

El factor más importante en el diseño de espesores de pavimento es el número y peso de las cargas por eje. Éste es derivado de las estimaciones de TPD y de TPDC en ambas direcciones. En este punto se tendría que recurrir al análisis del tránsito promedio diario anual al final como al inicio del periodo de diseño. Sin embargo este análisis solamente es posible si se tienen datos sobre el volumen y categoría de tránsito clasificado para la vía.

2.5.5 Diseño de pavimentos flexibles

2.5.5.1 Método AASHTO

El procedimiento incluido en la Guía AASHTO, Para el manual de diseño se fundamenta en los siguientes parámetros básicos:



- Demanda del tránsito medida en número de ejes equivalentes para el período de diseño de pavimentos.
- Tipo de subrasante sobre el cual se asienta el pavimento.

Estos parámetros permiten definir la capacidad estructural requerida, en términos del número estructural, del paquete del pavimento.

Finalmente se dan las características de los componentes de la estructura del pavimento, los mismos que corresponden a capas de materiales seleccionados.

Cada una de las capas proporciona una capacidad en base a su aporte estructural que está en función de la calidad del material utilizado.

En el manual la capa superior del pavimento se denomina superficie de rodadura y está referida a capas asfálticas.

La ecuación básica de equilibrio en el diseño para estructuras de pavimentos flexibles es la siguiente:

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

En donde:

- **W₁₈**: Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 t, a lo largo del periodo de proyecto.
- **Z_R**: Fractil de la ley normal asociado al nivel de fiabilidad con el que se desea proyectar el pavimento.
- **S_o**: Desviación estándar que combina por una parte la desviación estándar media de los errores de predicción del tráfico durante el periodo de proyecto, y por otra la desviación estándar de los errores en la predicción del comportamiento del



pavimento (expresado en ejes de 8.2 t) al alcanzar un determinado índice de servicio terminal.

- P_0 : Índice de servicio inicial.
- P_f : Índice de servicio final.
- ΔPSI : Diferencia entre los índices de servicio inicial y final.
- M_R = Módulo de resiliencia de la subrasante (psi).
- SN = Número Estructural (pulg).

2.5.5.2 W18 (ejes simples equivalentes de 8.2 t) a lo largo del periodo de proyecto.

El W18 es el número o la cantidad de ejes simples equivalentes de 8.2 t, que circulan por el tramo en estudio a lo largo del período de proyecto. Es obvio que no circularán sólo ejes de 8.2 t, entonces el método AASHTO requiere la transformación a ejes simples equivalentes al valor indicado anteriormente de los ejes de diferentes pesos que circularán sobre el pavimento a lo largo del periodo de proyecto. Para ello la AASHTO en su Guía ha incluido una serie de tablas con factores de conversión, las cuales dependen de varios parámetros: clase de pavimento (flexible o rígido), tipo de eje (simple, tándem, tridem), índice de servicio final y, en el caso de pavimentos rígidos, espesor del pavimento. Para estos últimos se han preparado nueve tablas, combinando cada uno de los tres tipos de ejes con tres valores del índice de servicio final: 2,0; 2,5 y 3,0.

A continuación se muestran las tablas de factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles.



Tabla 2-2
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, Pt = 2,0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.03	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
40	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113.	108.	97.	86.	81.	82.

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993, tablas D-1 a D-18
Kip = 1,000 kgs. = 10 kN

Tabla 2-2
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, Pt = 2,0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
10	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006



12	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
14	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
16	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
18	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
20	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105
22	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
24	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
26	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
28	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
30	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
32	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
58	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
60	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
62	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
64	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
66	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
68	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
70	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
72	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
74	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
76	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
78	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
80	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
82	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
84	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
86	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
88	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
90	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3



Tabla 2-3
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, Pt = 2,0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.05	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2



84	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
86	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
88	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
90	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

Tabla 2-4
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, Pt = 2,5

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
6	0.011	0.017	0.017	0.013	0.010	0.009
8	0.032	0.047	0.051	0.041	0.034	0.031
10	0.078	0.102	0.118	0.102	0.088	0.080
12	0.168	0.198	0.229	0.213	0.189	0.176
14	0.328	0.358	0.399	0.388	0.360	0.342
16	0.591	0.613	0.646	0.645	0.623	0.606
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
24	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	10.3	9.5	7.9	6.8	7.0	7.8
32	13.9	12.8	10.5	8.8	8.9	10.0
34	18.4	16.9	13.7	11.3	11.2	12.5
36	24.0	22.0	17.7	14.4	13.9	15.5
38	30.9	28.3	22.6	18.1	17.2	19.0
40	39.3	35.9	28.5	22.5	21.1	23.0
42	49.3	45.0	35.6	27.8	25.6	27.7
44	61.3	55.9	44.0	34.0	31.0	33.1
46	75.5	68.8	54.0	41.4	37.2	39.3
48	92.2	83.9	65.7	50.1	44.5	46.5
50	112.	102	79.	60.	53.	55.



Tabla 2-5
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, Pt = 2,5

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
6	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
8	0.004	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003
10	0.008	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006
12	0.015	0.024	0.023	0.018	0.014	0.013
14	0.026	0.041	0.042	0.033	0.027	0.024
16	0.044	0.065	0.070	0.057	0.047	0.043
18	0.070	0.097	0.109	0.092	0.077	0.070
20	0.107	0.141	0.162	0.141	0.121	0.110
22	0.160	0.198	0.229	0.207	0.180	0.166
24	0.231	0.273	0.315	0.292	0.260	0.242
26	0.327	0.370	0.420	0.401	0.364	0.342
28	0.451	0.493	0.548	0.534	0.495	0.470
30	0.611	0.648	0.703	0.695	0.658	0.633
32	0.813	0.843	0.889	0.887	0.857	0.834
34	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49
50	6.12	5.76	5.03	4.64	4.86	5.28
52	7.33	6.87	5.93	5.38	5.63	6.17
54	8.72	8.14	6.95	6.22	6.47	7.15
56	10.3	9.6	8.1	7.2	7.4	8.2
58	12.1	11.3	9.4	8.2	8.4	9.4
60	14.2	13.1	10.9	9.4	9.6	10.7
62	16.5	15.3	12.6	10.7	10.8	12.1
64	19.1	17.6	14.5	12.2	12.2	13.7
66	22.1	20.3	16.6	13.8	13.7	15.4
68	26.3	23.3	18.9	15.6	15.4	17.2
70	29.0	26.6	21.5	17.6	17.2	19.2
72	33.0	30.3	24.4	19.8	19.2	21.3
74	37.5	34.4	27.6	22.2	21.3	23.6
76	42.5	38.9	31.1	24.8	23.7	26.1
78	48.0	43.9	35.0	27.8	26.2	28.8
80	54.0	49.4	39.2	30.9	29.0	31.7



82	60.6	55.4	43.9	34.4	32.0	34.8
84	67.8	61.9	49.0	38.2	35.3	38.1
86	75.7	69.1	54.5	42.3	38.8	41.7
88	84.3	76.9	60.6	46.8	42.6	45.6
90	93.7	85.4	67.1	51.7	46.8	49.7

Tabla 2-6
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, Pt = 2,5

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0006	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
8	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
10	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
12	0.005	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003
14	0.008	0.012	0.010	0.008	0.006	0.006
16	0.012	0.019	0.018	0.013	0.011	0.010
18	0.018	0.029	0.028	0.021	0.017	0.016
20	0.027	0.042	0.042	0.032	0.027	0.024
22	0.038	0.058	0.060	0.048	0.040	0.036
24	0.053	0.078	0.084	0.068	0.057	0.051
26	0.072	0.103	0.114	0.095	0.080	0.072
28	0.098	0.133	0.151	0.128	0.109	0.099
30	0.129	0.169	0.195	0.170	0.145	0.133
32	0.169	0.213	0.247	0.220	0.191	0.175
34	0.219	0.266	0.308	0.281	0.246	0.228
36	0.279	0.329	0.379	0.352	0.313	0.292
38	0.352	0.403	0.461	0.436	0.393	0.368
40	0.439	0.491	0.554	0.533	0.487	0.459
42	0.543	0.594	0.661	0.644	0.597	0.567
44	0.666	0.714	0.781	0.769	0.723	0.692
46	0.811	0.854	0.918	0.911	0.868	0.838
48	0.979	1.015	1.072	1.069	1.033	1.005
50	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
52	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
58	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
60	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
62	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
64	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
66	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81



68	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
70	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.84
72	6.12	5.79	5.13	4.80	5.03	5.41
74	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.04
76	7.84	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
78	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
80	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
82	11.1	10.4	8.8	7.9	8.2	9.0
84	12.4	11.6	9.8	8.6	8.9	9.9
86	13.8	12.9	10.8	9.5	9.8	10.9
88	15.4	14.3	11.9	10.4	10.6	11.9

Tabla 2-7

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, Pt = 3,0

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0008	0.0009	0.0006	0.0003	0.0002	0.0002
4	0.004	0.008	0.006	0.004	0.002	0.002
6	0.014	0.030	0.028	0.018	0.012	0.010
8	0.035	0.070	0.080	0.055	0.040	0.034
10	0.082	0.132	0.168	0.132	0.101	0.086
12	0.173	0.231	0.296	0.260	0.212	0.187
14	0.332	0.388	0.468	0.447	0.391	0.358
16	0.594	0.633	0.695	0.693	0.651	0.622
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.60	1.53	1.41	1.38	1.44	1.51
22	2.47	2.29	1.96	1.83	1.97	2.16
24	3.67	3.33	2.69	2.39	2.60	2.96
26	5.29	4.72	3.65	3.08	3.33	3.91
28	7.43	6.56	4.88	3.93	4.17	5.00
30	10.2	8.9	6.5	5.0	5.1	6.3
32	13.8	12.0	8.4	6.2	6.3	7.7
34	18.2	15.7	10.9	7.8	7.6	9.3
36	23.8	20.4	14.0	9.7	9.1	11.0
38	30.6	26.2	17.7	11.9	11.0	13.0
40	38.8	33.2	22.2	14.6	13.1	15.3
42	48.8	41.6	27.6	17.8	15.5	17.8
44	60.6	51.6	34.0	21.6	18.4	20.6
46	74.7	63.4	41.5	26.1	21.6	23.8
48	91.2	77.3	50.3	31.3	25.4	27.4
50	110.	94.	61.	37.	30.	32.

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993, tablas D-1 a D-18



2.5.5.3 Parámetro ZR

Si se supone que para un determinado conjunto de variables definiendo un pavimento (espesores de las capas, características de los materiales que las componen, condiciones de drenaje.) el tráfico que puede soportar el mismo a lo largo de un determinado periodo de proyecto sigue una ley de distribución normal, con una media M_t y una desviación típica S_0 , mediante la tabla de dicha distribución se puede obtener el valor ZR asociado a un nivel de fiabilidad R, de forma que haya una probabilidad igual a $1-R/100$ de que el tráfico realmente soportado sea inferior al valor $ZR \cdot S_0$.

Tabla 2-8 Desviación estándar normal

CONFIABILIDAD R (%)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL ZR
50	- 0.000
60	- 0.253
70	- 0.524
75	- 0.674
80	- 0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento



2.5.5.4 Desviación estándar S_o

Tal y como se ha indicado en el párrafo anterior, representa la desviación estándar conjunta que engloba por una parte la desviación estándar de la ley de predicción del tráfico en el periodo de proyecto, y por otra la desviación estándar de la ley de predicción del comportamiento del pavimento, es decir, del número de ejes que puede soportar el pavimento hasta que su índice de servicio descienda por debajo de un determinado valor pt.

La Guía de la AASHTO recomienda adoptar para S_o valores comprendidos dentro de los siguientes intervalos:

- pavimentos rígidos: 0.30 - 0.40
 - 0.35 = construcción nueva
 - 0.40 = sobrecapas
- pavimentos flexibles: 0.40 - 0.50
 - 0.45 = construcción nueva
 - 0.50 = sobrecapas

Por otra parte en la guía se sugiere los niveles de fiabilidad indicados en la Tabla 2-9, de acuerdo con el tipo de carretera de que se trate.

TABLA 2-9
Niveles de fiabilidad a adoptar en función del tipo de carretera

TIPO DE CARRETERA	NIVEL DE FIABILIDAD	
	URBANA	INTERURBANA
Autopistas y carreteras importantes	85 – 99,9	80 – 99,9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 – 80	50 – 80

Fuente: Guía AASTHO 93



2.5.5.5 Índice de servicio final pt y variación ΔPSI en el índice de servicio.

La selección del índice de servicio final pt debe basarse en el índice más bajo que pueda ser tolerado antes de que sea necesario efectuar una rehabilitación, un refuerzo o una reconstrucción.

Se sugiere para el mismo un valor de 2.5 o incluso superior para las carreteras de mayor tráfico y de 2.0 para tráficos menos importantes. En cuanto al índice de servicio inicial P_o , que a su vez interviene para determinar la variación $\Delta PSI = P_o - P_t$, éste depende de la calidad de la construcción. En los pavimentos del ensayo AASHTO, P_o alcanzó un valor medio de 4,5 en las soluciones rígidas, y de 4,2 en las flexibles.

2.5.5.6 Coeficiente Drenaje

Un buen drenaje mantiene la capacidad soporte de la subrasante (mantiene el módulo de resiliencia cuando la humedad es estable) lo que hace un camino de mejor calidad, así como permite en determinado momento el uso de capas de soporte de menor espesor.

En la tabla 2-10 se dan los tiempos de drenaje que recomienda AASHTO. Dichas recomendaciones se basan en el tiempo que es necesario para que la capa de base elimine la humedad cuando ésta tiene un grado de saturación del 50 %; pero es de hacer notar que un grado de saturación del 85 % reduce en buena medida el tiempo real necesario para seleccionar la calidad de un drenaje.

Tabla 2-10 Tiempos de drenaje para capas granulares

Calidad del Drenaje	50% saturación	85% saturación
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	de 10 a 15 horas
Muy pobre	El agua no drena	mayor de 15 horas

Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993



Coefficientes de drenaje para pavimentos flexibles (mx).

La calidad del drenaje es expresado en la fórmula del número estructural, por medio del coeficiente de drenaje (mx), que toma en cuenta las capas no ligadas.

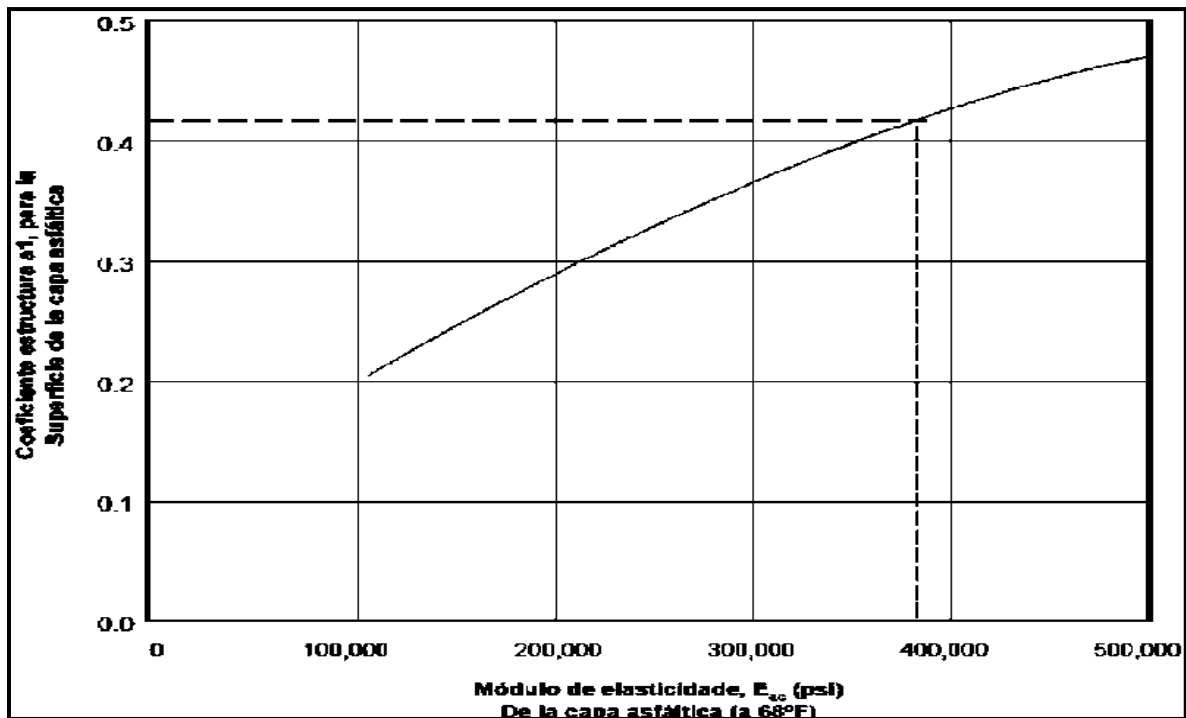
Tabla 2-11 Coeficientes de drenaje para pavimentos Flexibles (mx)

Calidad del drenaje	P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

2.5.5.7 Coeficientes estructurales de capa.

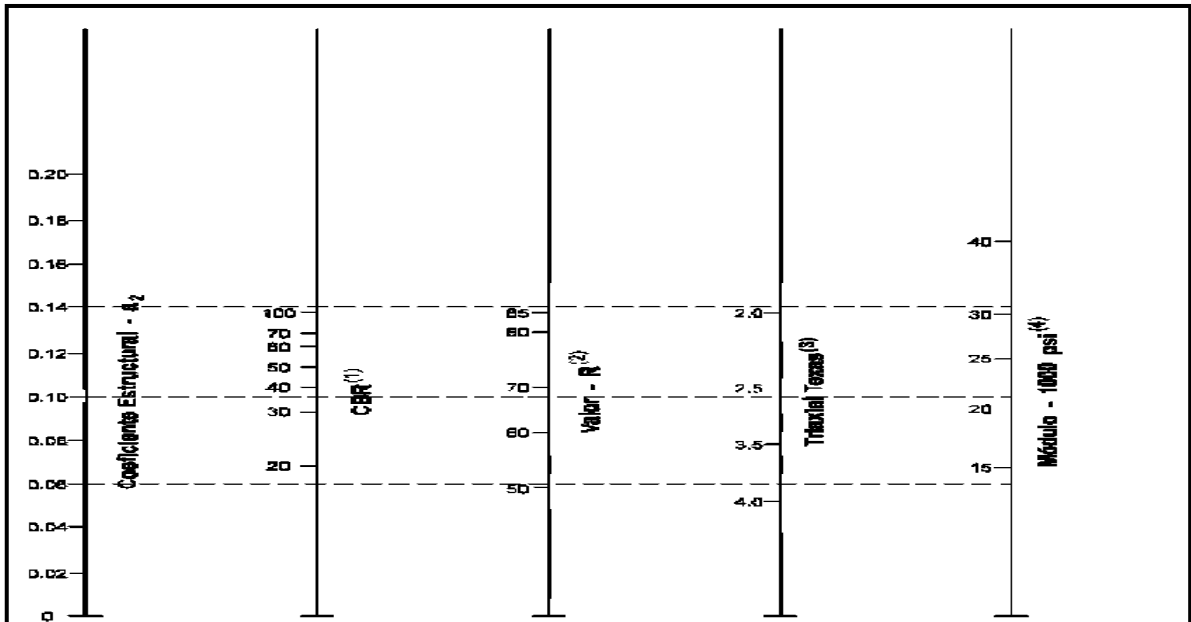
Fig.2-3: Ábaco para la determinación del coeficiente de Capa para el concreto asfáltico (a1)



Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

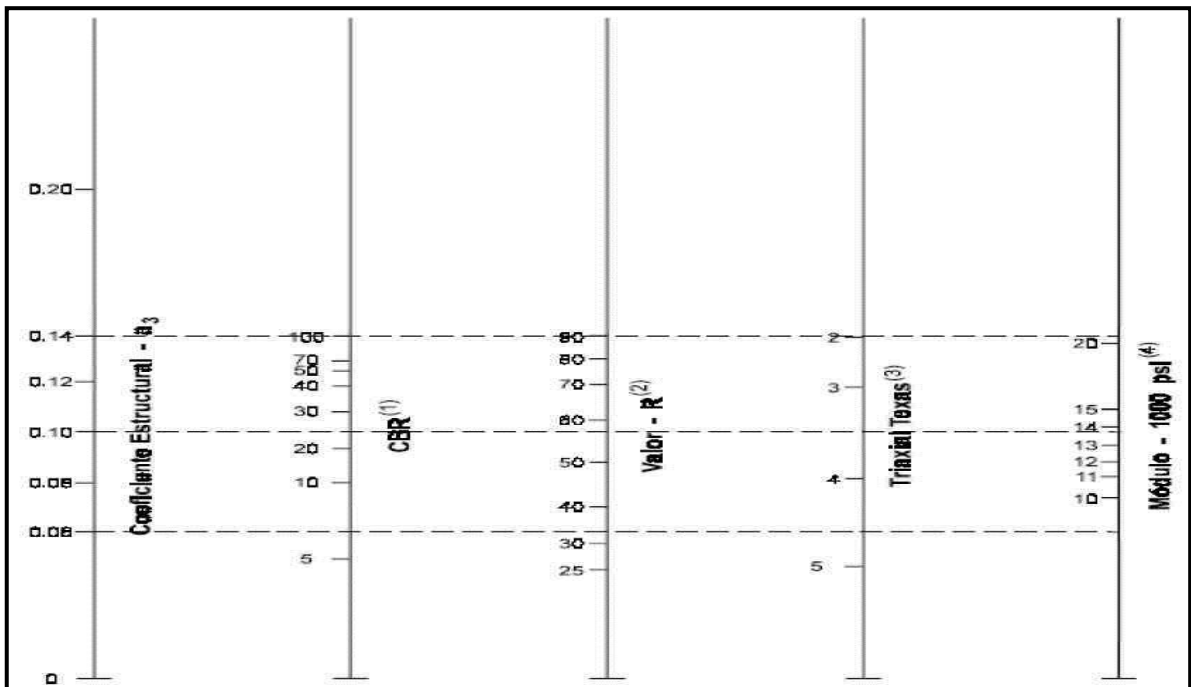


Fig.2-4: Ábaco para la determinación del coeficiente Estructural para base granular (a2)



Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

Fig.2-5: Ábaco para determinación del coeficiente Estructural para subbase granular



Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993



2.5.5.8 Determinación del Número estructural del pavimento.

En la figura 2-6 se presenta el ábaco por medio del cual se obtiene el número estructural o mediante la fórmula mostrada anteriormente de diseño de pavimentos flexibles. Las variables para determinar el número estructural de diseño requerido son las siguientes:

- La cantidad estimada de ejes equivalentes (ESALs) por carril, para el período de diseño.
- La confiabilidad (R) como se indica en la tabla 2-9.
- El conjunto total de las desviaciones estándar (S_o) se recomienda utilizar los valores comprendidos dentro de los intervalos siguientes:

Para pavimentos flexibles 0.40 – 0.50

En construcción nueva 0.35 – 0.40

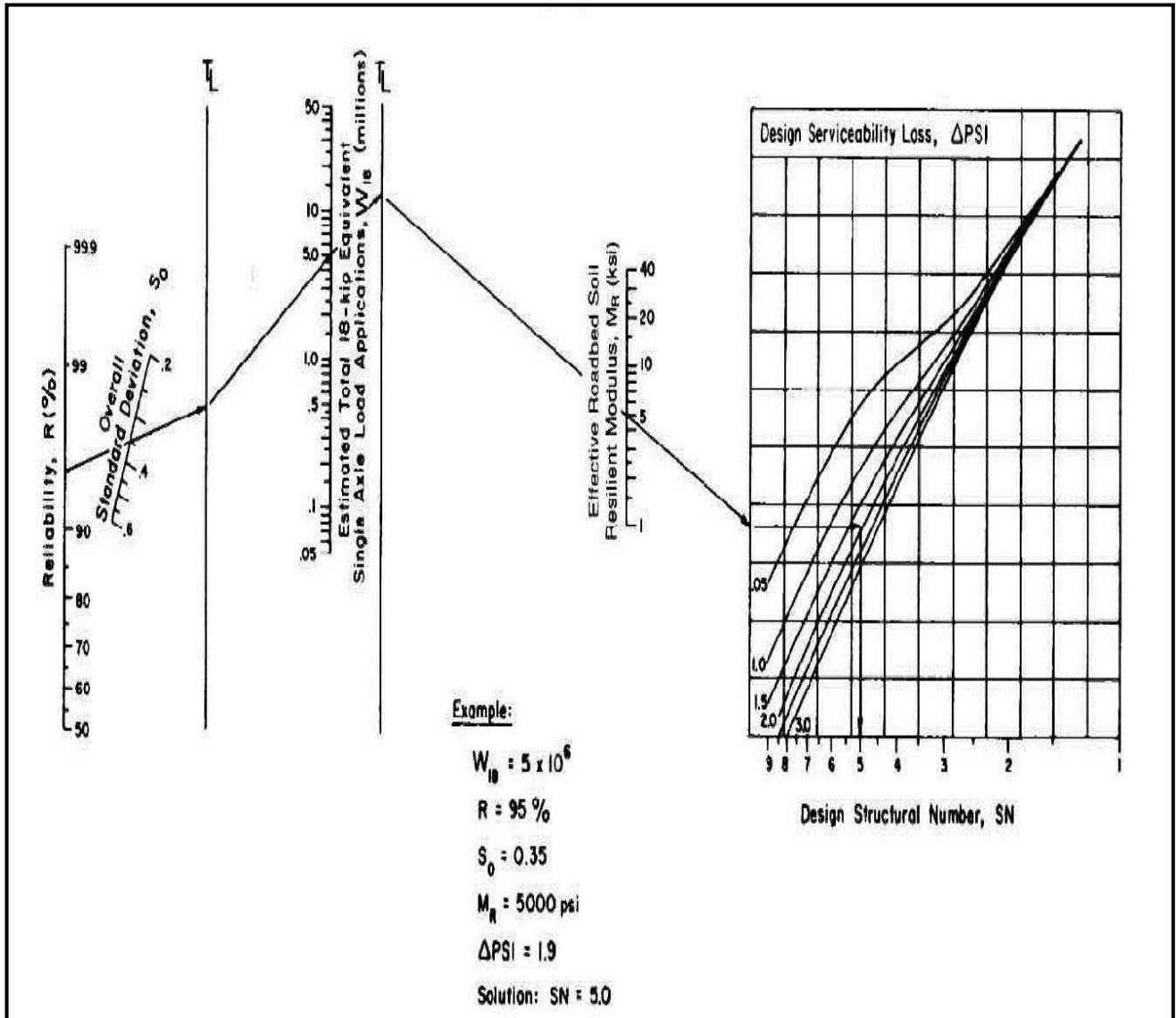
En sobre-capas 0.50

- El módulo de resiliencia efectivo (que tome en cuenta las variaciones a lo largo del año) de la subrasante (M_R).
- La pérdida de serviciabilidad $\Delta PSI = P_o - P_t$

A continuación se da un ejemplo, en la cual se aplican determinadas condiciones específicas para el diseño de un pavimento; cuando se tienen o asumen estos valores, el número estructural obtenido, es aquel que es necesario para las condiciones específicas que conforman un paquete estructural.



Figura 2-6 Abaco para determinar el número estructural SN.



Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993.

La fórmula general que relaciona el número estructural (SN) con los espesores de capa es la siguiente:



$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3 \quad \text{Ecuación (2-7)}$$

En Donde:

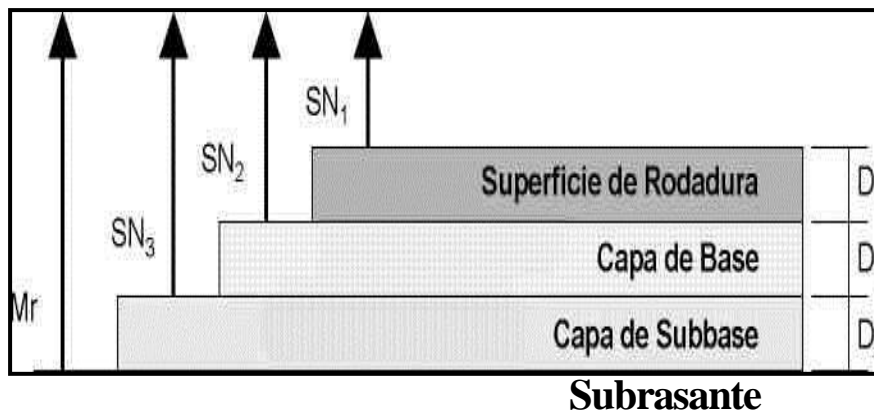
- a_1, a_2, a_3 son los coeficientes estructurales o de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.
- m_2, m_3 son los coeficientes de drenaje para base y subbase
- D_1, D_2, D_3 son los espesores de capa en pulgadas para la superficie de rodadura, base y subbase

Esta fórmula tiene muchas soluciones, en función de las diferentes combinaciones de espesores; no obstante, existen normativas que tienden a dar espesores de capas que deben ser construidas y protegidas de deformaciones permanentes, por efecto de las capas superiores de mayor resistencia.

2.5.6 Espesores mínimos en función del número estructural

El objeto de este concepto, está basado en que las capas granulares no tratadas, deben de estar perfectamente protegidas de presiones verticales excesivas, que lleguen a producir deformaciones permanentes. El proceso se indica en la figura 2-7.

Figura 2-7 Espesores de las capas que conforman un pavimento flexible en función del Número estructural SN.





Para evitar las deformaciones excesivas, los materiales son seleccionados para cada capa así: Superficie de rodadura, base granular y subbase con buen CBR, límites, etc. Para cada uno de los materiales se deben conocer los módulos de resiliencia.

Utilizando el ábaco de la figura 2-6, se pueden encontrar los números estructurales requeridos para proteger cada capa no tratada, reemplazando el módulo de resiliencia de la capa superior por el módulo de resiliencia de la capa que esta inmediatamente abajo; así, para determinar el espesor D_1 de la capa asfáltica se supone un M_R igual al de la base y así se obtiene el SN_1 , que debe ser absorbido por dicha capa. El espesor de D_1 debe ser:

$$D > SN_1 / a_1 \text{ (valor mínimo requerido para la capa asfáltica)} \quad \text{Ecuación (2-8)}$$

$$D_1^* \geq SN_1 / a_1 \text{ (valor real que debe ser usado)}$$

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^* \geq SN_1$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

a, D, m, y SN están definidos en el texto y son los valores mínimos requeridos.

El asterisco “*” en D o SN indica y representa el valor actualmente usado, que debe ser igual o mayor al valor requerido.

Se adopta un espesor D_1^* ligeramente mayor y el número estructural absorbido por esta capa es:

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^* \quad \text{Ecuación (2-9)}$$

Para determinar el espesor mínimo de la base, se entra al ábaco con el M_R de la subbase y entonces se obtiene el SN_2 , a ser absorbido por el concreto asfáltico y la base. Así:

$$D_2^* \geq SN_2 - SN_1^* / a_2 \times m_2 \quad \text{Ecuación (2-10)}$$



Se adopta un espesor ligeramente mayor, D_2^* , y el número estructural absorbido será:

$$SN_2^* = a_2 \times m_2 \times D_2^* \quad \text{(Ecuación (2-11))}$$

Por último para la subbase, se entra con el M_R correspondiente a la subrasante y se obtiene $SN_3 = SN$ para todo el paquete estructural calculado o sea la capa asfáltica, base y subbase. En este caso el espesor es:

$$D_3^* \geq SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*) / (a_3 \times m_3) \quad \text{(Ecuación (2-12))}$$

Se adopta un espesor ligeramente mayor D_3^* y se obtiene el número estructural absorbido por la subbase.

$$SN_3^* = a_3 \times m_3 \times D_3^* \quad \text{(Ecuación (2-13))}$$

Como verificación tenemos:

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* \geq SN \quad \text{(Ecuación (2-14))}$$

Con el resultado que se obtiene en la fórmula (2-14) de que el número estructural total debe ser como mínimo igual o mayor a la suma de los números estructurales de cada capa, el criterio es que cada capa del paquete estructural queda protegida de los esfuerzos a los cuales va a ser sometida.

Este procedimiento no es aplicable para determinar espesores de capas que estén sobre otras que tengan un módulo de resiliencia mayor de 280 Mpa (40,000 PSI); en estos casos, el espesor de la capa colocada sobre otra que tenga estas características, deberá ser definida por el costo-eficiencia de la misma o utilizar espesores mínimos desde el punto de vista constructivo; esto quiere decir, que como la capa de abajo tiene un módulo de resiliencia alto, la capa que se coloque encima de ella deberá tener como mínimo un módulo de resiliencia igual o mayor, y se decidirá si es necesario colocarla o se utiliza el mínimo especificado.



2.6 TIPOS DE DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los daños que presenta una estructura de pavimento flexible pueden ser clasificados en cuatro categorías:

- ❖ Fisuras.
- ❖ Deformaciones.
- ❖ Pérdida de capas estructurales.
- ❖ Daños superficiales.
- ❖ Otros daños.

Dentro de cada categoría existen diferentes deterioros que se originan por diversos factores, A continuación se presenta la definición de cada uno de estos deterioros, sus severidades (clasificadas en Baja, Media, Alta), la forma de medir el daño y las unidades de medida, sus posibles causas y la evolución probable, todo ello acompañado de un registro fotográfico que permite al lector tener una idea mas clara de los daños que se pueden encontrar durante una inspección visual típica. La abreviatura con la cual se registrara cada tipo de daño en el formato de campo aparece entre paréntesis.

Cabe señalar que para este trabajo se mencionara las fallas más relevantes que ocasionan el deterioro estructural y no así todos los tipos de fallas incluyendo del tipo funcional, debido a que en el presente trabajo se pretende realizar la rehabilitación con refuerzos estructurales en pavimentos flexibles en cuyo caso presenten deficiencia estructural.

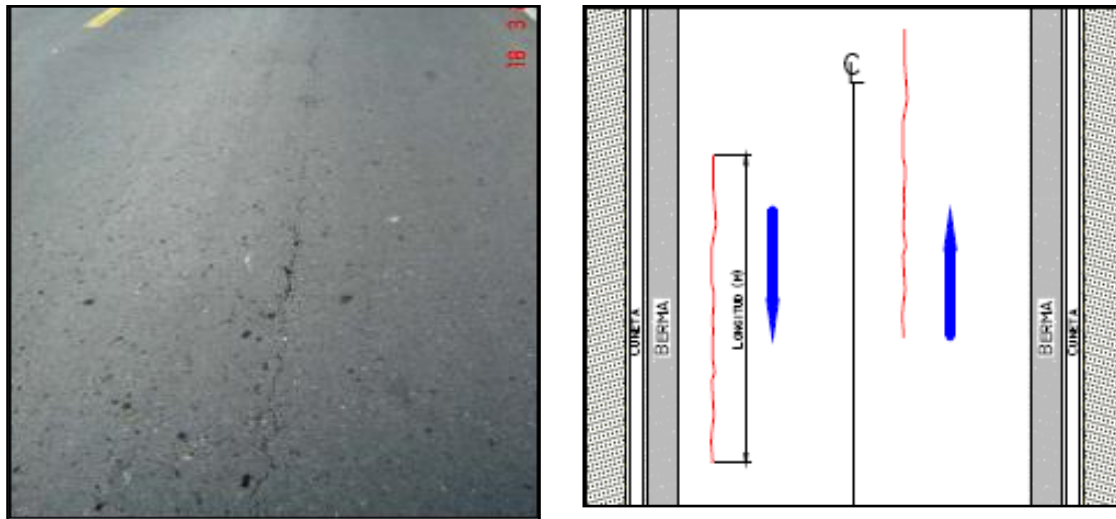
Para ello se nombrara las siguientes fallas que se consideran que provocan la deficiencia estructural las cuales son:



2.6.1. Fisuras

2.6.1.1. Fisuras longitudinales y transversales (FL, FT)

FISURA LONGITUDINALES



FISURA TRANSVERSALES

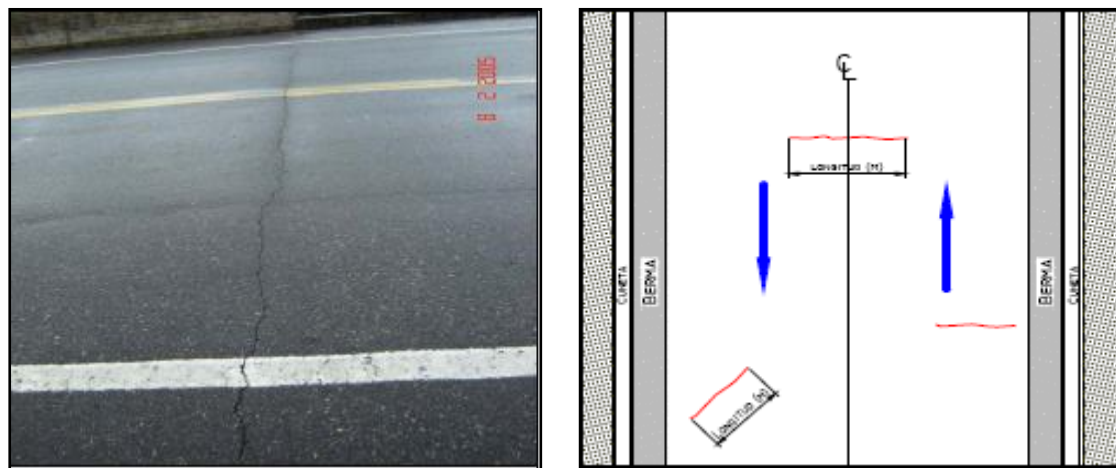


Fig. 2-8

Corresponden a discontinuidades en la carpeta asfáltica, en la misma dirección del tránsito o transversales a él. Son indicio de la existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura, los cuales han superado la resistencia del material afectado. La localización de las fisuras dentro del carril puede ser un buen indicativo de la causa que las generó, ya que aquellas que se encuentran en zonas sujetas a carga



pueden estar relacionadas con problemas de fatiga de toda la estructura o de alguna de sus partes.

Causas:

Las causas más comunes a ambos tipos de fisuras, son:

- Rigidización de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de filler, o al envejecimiento del asfalto, ocurre ante bajas temperaturas o gradientes térmicos altos (generalmente superiores a 30°).
- Reflexión de grietas de las capas inferiores, generadas en materiales estabilizados o por grietas o juntas existentes en placas de concreto hidráulico subyacentes.

Otra causa para la conformación de fisuras **longitudinales** es:

- Fatiga de la estructura, usualmente se presenta en las huellas de tránsito.

Otra causa para la conformación de fisuras **transversales** es:

- Pueden corresponder a zonas de contacto entre corte y terraplén por la diferencia de rigidez de los materiales de la sub-raza.
- Riego de liga insuficiente o ausencia total.
- Espesor insuficiente de la capa de rodadura.

Severidades:

- **Baja:** Abertura de la fisura menor que 1 mm., cerrada o con sello en buen estado.



- **Media:** Abertura de la fisura entre 1 mm. y 3 mm., puede existir algunas fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos y pueden presentar desportillamientos leves, existe una alta probabilidad de infiltración de agua a través de ellas.
- **Alta:** Abertura de la fisura mayor que 3 mm., puede presentar desportillamientos considerables y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos, puede causar movimientos bruscos a los vehículos.

Unidad de medición:

- Se miden en metros(m). Es posible determinar el área de afectación por este deterioro en metros cuadrados(m²) multiplicando la longitud total de fisuras por un ancho de referencia establecido en 0.60 m, esto para los fines del análisis del área total afectada.
- Cuando en una misma fisura existan diferentes severidades, de ser posible se reportara la longitud correspondiente a cada severidad, de lo contrario se reportara la longitud total de la fisura con el mayor nivel de severidad presente.
- Cuando existan varias fisuras muy cercanas, se reportara el área total afectada en metros cuadrados (m²), de ser posible por severidad, de lo contrario, asignando a toda el área la mayor severidad encontrada.
- Las fisuras diagonales se clasifican dentro de la categoría de fisuras transversales.



Evolución probable:

- Piel de cocodrilo, desintegración, descascamientos, asentamientos longitudinales o transversales (por el ingreso de agua), fisuras en bloque.

2.6.2. PIEL DE COCODRILO (PC)

PIEL DE COCODRILO (PC)

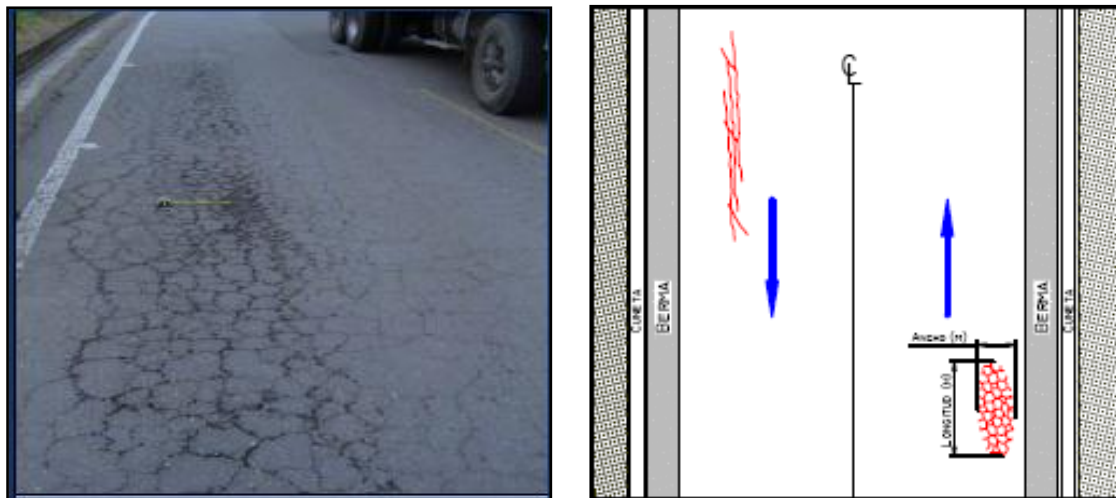


Fig. 2-9

Corresponde a una serie de fisuras interconectadas con patrones irregulares, generalmente localizadas en zonas sujetas a repeticiones de carga. La fisuración tiende a iniciarse en el fondo de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de las cargas. Las fisuras se propagan a la superficie inicialmente como una o más fisuras longitudinales paralelas. Ante la repetición de cargas de tránsito, las fisuras se propagan formando piezas angulares que se desarrollan un modelo parecido a la piel de un cocodrilo.

Tales piezas tienen por lo general un diámetro promedio menor que 30 cm.

La piel de cocodrilo ocurre generalmente en áreas que están sometidas a cargas de tránsito, sin embargo, es usual encontrar este daño en otras zonas donde se han generado deformaciones en el pavimento que no están relacionadas con la falla



estructural (por tránsito o por deficiencia de espesor de las capas) sino con otros mecanismos como por ejemplo problemas de drenaje que afectan los materiales granulares, falta de compactación de las capas, reparaciones mal ejecutadas y subrazantes expansivas, entre otras. Este tipo de daño no es común en capas de material asfáltico colocadas sobre capas de concreto rígido.

Causas:

Las causas más frecuentes es la falla por fatiga de la estructura o de la carpeta asfáltica principalmente debido a:

- Espesor de estructura insuficiente.
- Deformaciones de la subrazante.
- Rigidización de la mezcla asfáltica en zonas de carga (por oxidación del asfalto o envejecimiento).
- Problemas de drenaje que afectan los materiales granulares.
- Compactación deficiente de las capas granulares o asfálticas.
- Deficiencias en la elaboración de la mezcla asfáltica: exceso de mortero en la mezcla, uso de asfalto de alta penetración (hace deformable la mezcla), deficiencia de asfalto en la mezcla (reduce el módulo).
- Reparaciones mal ejecutadas, deficiencias de compactación, juntas mal elaboradas e implementación de reparaciones que no corrigen el daño.

Todos estos factores pueden reducir la capacidad estructural o inducir esfuerzos adicionales en cada una de las capas del pavimento, haciendo que ante el paso del tránsito se generen deformaciones que no son admisibles para el pavimento que se pueden manifestar mediante fisuración.



Severidades:

- **Baja:** Serie de fisuras longitudinales paralelas (pueden llegar a tener aberturas de 3 mm), principalmente en la huella, que no presentan desportillamiento, con pocas o ninguna conexión entre ellas y no existe evidencia de bombeo.
- **Media:** Las fisuras han formado un patrón de polígonos pequeños y angulosos, que pueden tener un ligero desgaste en los bordes y aberturas entre 1 mm y 3 mm, sin evidencia de bombeo.
- **Alta:** Las fisuras han evolucionado (abertura mayor que 3 mm), se presenta desgaste o desportillamiento en los bordes y los bloques se encuentran sueltos o se mueven ante el tránsito, incluso llegando a presentar descascaramientos y bombeo.

Unidad de medición:

- Se reporta el área afectada en metros cuadrados (m²). Cuando en un área se combinen varias severidades y no sea fácil diferenciar las áreas correspondientes a cada una, se reporta el área completa asignándole la mayor severidad que se presente.

Evolución probable:

- Deformaciones, descascaramientos, baches.



2.6.3. DEFORMACIONES

2.6.3.1. ONDULACIÓN (OND)

ONDULACIÓN (OND)

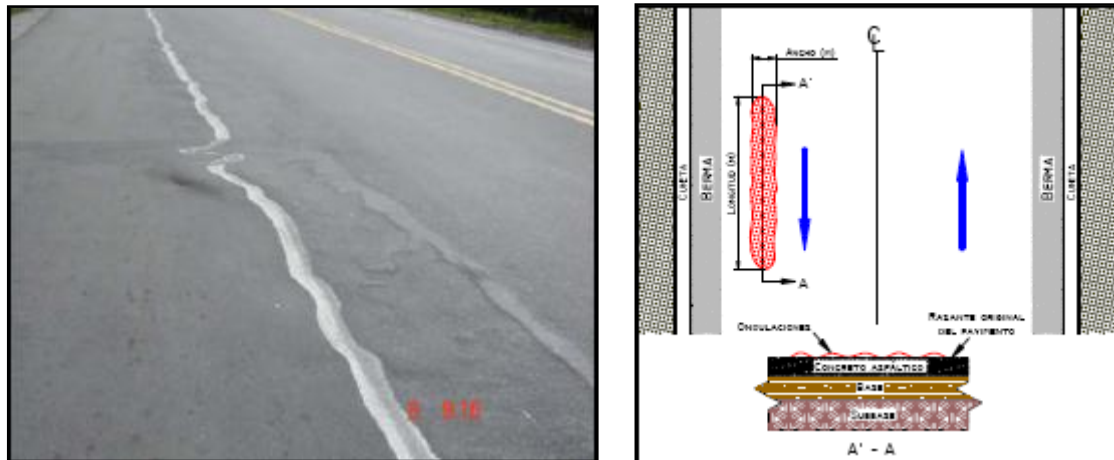


Fig. 2-10

También conocida como corrugación o rizado, es un daño caracterizado por la presencia de ondas en la superficie del pavimento, generalmente perpendiculares a la dirección del tránsito, con longitudes entre crestas usualmente menores que 1.0 m.

Causas:

La ondulación es una deformación plástica de la capa asfáltica, debido generalmente a una pérdida de estabilidad de la mezcla en climas calidos por mala dosificación del asfalto, uso de ligantes blandos o agregados redondeados. Muchos de los casos suelen presentarse en las zonas de frenado o aceleración de los vehículos.

Otra causa suele estar asociada a un exceso de humedad en la sub-razante, en cuyo caso el daño afecta toda la estructura del pavimento. Además también puede ocurrir debido a la contaminación de la mezcla asfáltica con finos o materia orgánica.

Bajo este contexto, las causas más probables son:

- ❖ Pérdida de estabilidad de la mezcla asfáltica.



- ❖ Exceso de compactación de la carpeta asfáltica.
- ❖ Exceso o mala calidad del asfalto.
- ❖ Insuficiencia de triturados (caras fracturadas).
- ❖ Falta de curado de las mezclas en la vía.
- ❖ Acción del tránsito en zonas de frenado y estacionamiento.
- ❖ Deslizamiento de la capa de rodadura sobre la capa inferior por exceso de riego de liga.

Severidades:

- **Baja:** Profundidad máxima menor que 10 mm. causa poca vibración al vehículo, la cual no genera incomodidad al conductor.
- **Media:** Profundidad máxima entre 10 mm y 20 mm. causa una mayor vibración al vehículo generando incomodidad al conductor.
- **Alta:** Profundidad máxima mayor que 20 mm, causa una vibración excesiva que puede generar un alto grado de incomodidad, haciendo necesario reducir la velocidad por seguridad.

Unidad de medición:

La ondulación se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada.

Evolución probable:

Exudación, ahuellamiento.



2.6.3.2 HUNDIMIENTO (HUN)

HUNDIMIENTO (HUN)

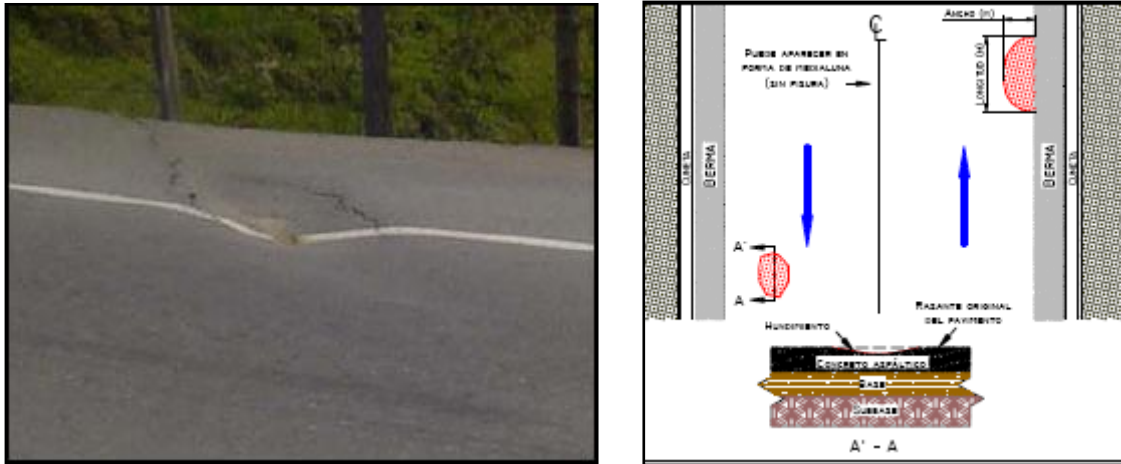


Fig. 2-11

Los hundimientos corresponden a depresiones localizadas en el pavimento con respecto al nivel de la razante.

Este tipo de daño puede generar problemas de seguridad a los vehículos, especialmente cuando contienen agua pues se pueden producir hidroplaneo. Los hundimientos pueden estar orientados de forma longitudinal o transversal al eje de la vía, o pueden tener forma de media luna, en cualquier caso, el reporte del daño debe incluir en las aclaraciones la orientación o la forma del hundimiento, si es fácilmente identificable en campo.

Causas:

Existen diversas causas que producen hundimientos las cuales están asociadas con problemas que en general afectan toda la estructura del pavimento:

- Asentamientos de la sub-razante.
- Deficiencia de compactación de las capas inferiores del pavimento, del terraplén o en las zonas de acceso a obras de arte o puentes.



- Deficiencias de drenaje que afectan a los materiales granulares.
- Diferencia de rigidez de los materiales de la sub-razante en los sectores de transición entre corte y terraplén.
- Deficiencias de compactación de rellenos en zanjas que atraviesan la calzada.
- Inestabilidad de la banca.
- Circulación de tránsito muy pesado.

Severidades:

- **Baja:** Profundidad menor que 20 mm, causa poca vibración al vehículo, sin generar incomodidad al conductor.
- **Media:** Profundidad entre 20 mm y 40 mm, causa mayor vibración al vehículo generando incomodidad al conductor.
- **Alta:** Profundidad mayor que 40 mm, causa vibración excesiva que puede generar un alto grado de incomodidad, haciendo necesario reducir la velocidad por seguridad.

Unidad de medición:

Se cuantifica el área afectada en metros cuadrados (m²).

Evolución probable:

Fisuración, desprendimientos, movimientos en masa.



2.6.3.3 AHUELLAMIENTO (AHU)

AHUELLAMIENTO (AHU)

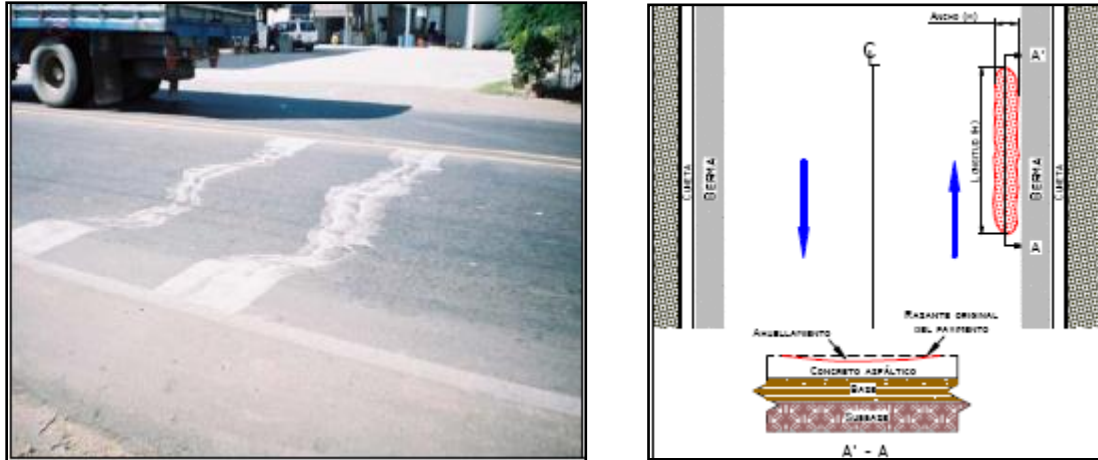


Fig. 2-12

El ahuellamiento es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos. Con frecuencia se encuentra acompañado de una elevación de las áreas adyacentes a la zona deprimida y de fisuración.

Un ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento u posibilitar el hidropilano por almacenamiento de agua.

Causas:

- El ahuellamiento ocurre principalmente debido a una deformación permanente de alguna de las capas del pavimento o de la sub-razante, generada por deformación plástica del concreto asfáltico o por deformación de la sub-razante debido a la fatiga de la estructura ante la repetición de cargas.
- La deformación plástica de la mezcla asfáltica tiende a aumentar en climas calidos, y también puede darse por una compactación inadecuada de las capas durante la construcción, por el uso de asfaltos blandos o de agregados redondeados.



- Además, la falla estructural del pavimento puede manifestarse con daños de este tipo debido a una deficiencia de diseño, la cual se manifiesta cuando la vía está sometida a cargas de tránsito muy altas.

Severidades:

- **Baja:** Profundidad menor que 10 mm.
- **Media:** Profundidad entre 10 mm y 25 mm.
- **Alta:** Profundidad mayor que 25 mm.

Unidad de medición:

Se mide en metros cuadrado (m²) de área afectada, asignando la severidad de acuerdo con la zona de mayor profundidad.

Evolución probable:

Piel de cocodrilo, desprendimientos.



2.6.4. PÉRDIDA DE LAS CAPAS DE LA ESTRUCTURA

2.6.4.1. DESCASCARAMIENTO (DC)

DESCASCARAMIENTO (DC)

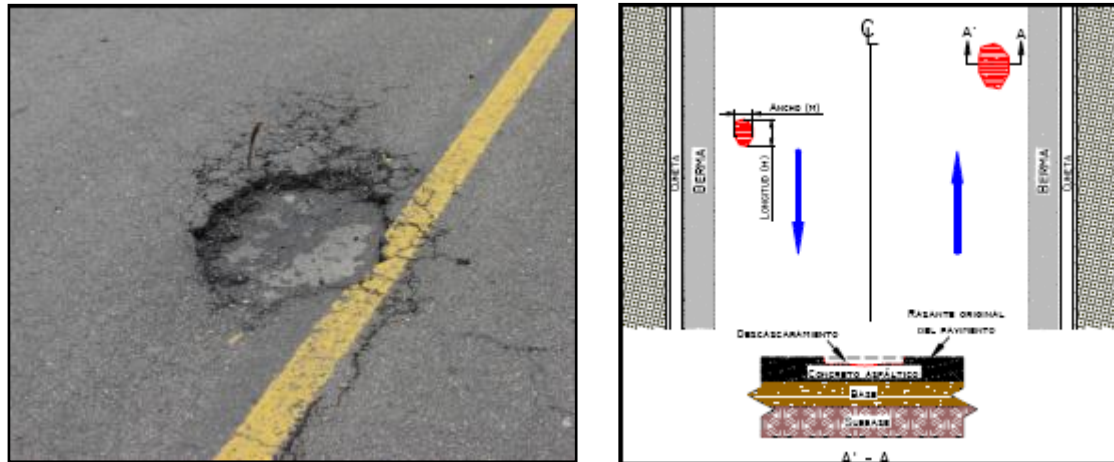


Fig. 2-13

Este deterioro corresponde al desprendimiento de parte de la capa asfáltica superficial, sin llegar a afectar las capas asfálticas subyacentes.

Causas:

- Limpieza insuficiente previa a tratamientos superficiales.
- Espesor insuficiente de la capa de rodadura asfáltica.
- Riego de liga deficiente.
- Mezcla asfáltica muy permeable.

Severidades:

- **Baja:** Profundidad menor que 10 mm.
- **Media:** Profundidad entre 10 mm y 25 mm.
- **Alta:** Profundidad mayor que 25 mm.



Este deterioro ocurre siempre como evolución de otros daños, especialmente de piel de cocodrilo.

- También es consecuencia de algunos defectos constructivos (por ejemplo, carencia de penetración de la imprimación en bases granulares) o de una deficiencia de espesores de capas estructurales.
- Puede producirse también en zonas donde el pavimento o la sub-razante son débiles.

Severidades:

Se puede clasificar por profundidad así:

- **Baja:** Profundidad de afectación menor o igual que 25 mm, corresponde de tratamientos superficiales o capas delgadas.
- **Media:** Profundidad de afectación entre 25 mm y 50 mm, deja expuesta a la base.
- **Alta:** Profundidad de afectación mayor que 50 mm, que llega a afectar la base granular.

Unidad de medición:

Se miden en metros cuadrados (m²) de área afectada, registrando la mayor severidad existente.

Evolución probable:

Destrucción de la estructura.



2.6.4.3 PARCHE (PCH)

PARCHE (PCH)

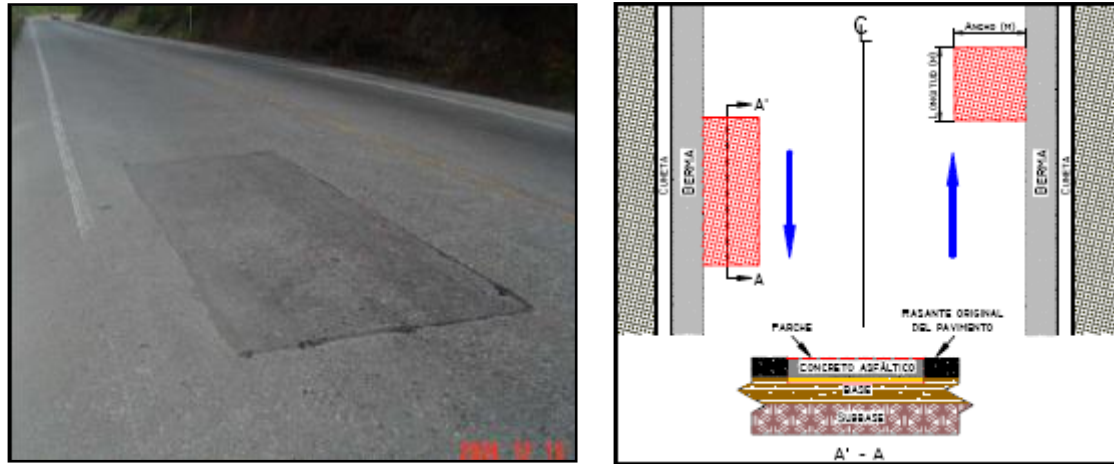


Fig. 2-15

Los parches corresponden a áreas donde el pavimento original fue removido y reemplazado por un material similar o diferente, ya sea para reparar la estructura (a nivel de concreto asfáltico o hasta los granulares) o para permitir la instalación o reparación de alguna red de servicios (acueductos, gas, etc.).

A pesar de que dicha área puede no presentar daños en el momento de la inspección, es necesario reportar su extensión porque indica la existencia de un deterioro anterior. Aunque para el registro de los daños en el formato de campo estas intervenciones se reportan como parches, debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- Cuando la intervención realizada comprendió el reemplazo del espesor parcial o total de concreto asfáltico, esta se conoce como parcheo.
- Cuando la intervención realizada comprendió el reemplazo parcial o total de granulares, esta se conoce como bacheo.



Causas:

Las causas del deterioro propio del parche pueden establecerse teniendo en cuenta el tipo de daño que presente. Sin embargo, pueden estar asociados principalmente a :

- Procesos constructivos deficientes.
- Progresión del daño inicial por el cual debió realizarse el parcheo (cuando la intervención fue inadecuada para solucionar el problema).
- Deficiencias en las juntas.
- Propagación de daños existentes en las áreas aledañas al parche.

Severidades:

- **Baja:** El parche está en muy buena condición y se desempeña satisfactoriamente.
- **Media:** El parche presenta daños de severidad baja o media y deficiencias en los bordes.
- **Alta:** El parche está gravemente deteriorado, presentan daños de severidad alta y requiere ser reparado pronto.

Unidad de medición:

Se mide en metros cuadrados (m²). Para el reporte del daño es necesario anotar el área del parche y cuando este sea muy grande y no presente afectación en toda su longitud, se reporta además el área afectada en la parte del formato correspondiente al área de reparación; también debe anotarse en las aclaraciones el tipo de daños presentes en el parche y en las zonas aledañas a él, si estas últimas están afectadas.



Evolución probable:

De acuerdo con la naturaleza del daño. Sin embargo, puede existir una aceleración del deterioro general del pavimento.



CAPÍTULO III

TIPOS DE REFUERZOS EN PAVIMENTOS

3.1 Generalidades

Los refuerzos sirven para corregir fallas funcionales o estructurales de pavimentos existentes. Es necesario aclarar bien cuando se trata de falla funcional o de falla estructural, dado que de esto depende el tipo de refuerzo a proyectar.

Las fallas funcionales son aquéllas que afectan al usuario, como ser una fricción superficial pobre, una mala textura, hidroplaneo en ahuellamientos, hundimientos, asentamientos, etc.

Las fallas estructurales son aquéllas que afectan la capacidad de pavimento para soportar las cargas. Ejemplos de fallas de este tipo son: espesor inadecuado, fisuraciones, distorsiones y desintegraciones. Muchas de estas fallas no son provocadas por la acción del tránsito sino por otras causas como ser: malas técnicas de construcción, fisuración por baja temperatura, etc. No obstante esto, la acción del tránsito acelera el proceso de deterioro.

Los distintos tipos de refuerzos a estudiar son:

Tabla 3-1 Tipos de refuerzos a estudiar

Refuerzo	Pavimento existente
Concreto asfáltico	Concreto asfáltico
Concreto asfáltico	Hormigón roto, fisurado o triturado previamente
Concreto asfáltico	H°S°, H°A° c/juntas, H°A° continuo
Concreto asfáltico	C°A° s/H°S°, C°A° s/H°A° c/juntas, C°A° s/H°A° continuo
Hormigón simple adherido	H°S°, H°A° c/juntas, H°A° continuo
Hormigón simple no adherido	H°S°, H°A° c/juntas, H°A° continuo
Hormigón simple	Concreto asfáltico

Fuente: Guía AASHTO 93.



3.2 Tipos de refuerzo

3.2.1 Refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de concreto asfáltico.

3.2.1.1 Introducción

Previo a la colocación del refuerzo deben hacerse estas tareas:

- 1) Reparación de áreas deterioradas y mejoramiento del drenaje.
- 2) Corrección del ahuellamiento superficial por fresado de la capa superficial o colocación de una capa de nivelación.
- 3) Ensanche, si está previsto.
- 4) Aplicación del riego de liga.
- 5) Colocación del refuerzo de concreto asfáltico (incluyendo tratamiento de control de fisuras si fuera necesario).

3.2.1.2 Factibilidad

Este tipo de refuerzos es muy comúnmente usado, excepto cuando el pavimento existente esté tan deteriorado que justifique su remoción total. Los casos en que no es factible colocar el refuerzo de concreto asfáltico son:

- 1) La cantidad de fallas tipo piel de cocodrilo es muy grande.
- 2) Un ahuellamiento superficial excesivo que indique que los materiales del paquete tienen poca estabilidad.
- 3) La base estabilizada existente muestra signos de gran deterioro y repararla sería muy costoso.
- 4) La base granular debería ser removida y reemplazada debido a infiltración y a contaminación de material proveniente de una capa inferior (mala calidad).



5) El descascaramiento y peladuras de la carpeta indican que ésta debe ser reemplazada.

3.2.1.3 Reparaciones previas

Si de acuerdo al análisis hecho, es factible colocar un refuerzo, deben hacerse previamente estas reparaciones que consistirán, de acuerdo al tipo de falla, en:

1) Falla tipo piel de cocodrilo. Las áreas de fallas tipo piel de cocodrilo de gran severidad deben ser reparadas. Las áreas localizadas de fallas moderadas de piel de cocodrilo deben ser reparadas a menos que se implemente algún tipo de control de reflexión de fisuras. La reparación debe incluir la remoción de todo material débil que se encuentre por debajo.

2) Fisuras lineales. Las fisuras lineales de alta severidad deben ser parchadas. Las fisuras con aberturas mayores de 0,25 pulg (6,3 mm) deben ser rellenadas con una mezcla arena-asfalto. También debe preverse algún dispositivo de control de reflexión de fisuras para juntas transversales que sufran apertura y cierre.

3) Ahuellamiento. Los ahuellamiento deben eliminarse mediante fresado o colocación de una capa niveladora. Cuando el ahuellamiento sea muy severo, habrá que hacer una investigación para determinar si se debe a fallas de capas inferiores, en cuyo caso habrá que remover toda la estructura fallada.

4) Irregularidades superficiales. Depresiones, serruchos, etc. requieren una investigación y tratamiento especial y, en determinados casos, remoción.

3.2.1.4 Control de reflexión de fisuras

La reflexión de fisuras en el refuerzo se debe a la concentración de deformaciones debidas a movimientos en el pavimento subyacente por flexión o por corte inducidos por cargas o por contracción horizontal debida a cambios térmicos.



Entre los métodos para control de fisuras, además de parches y rellenos previos, se tienen:

1) Membranas sintéticas. Son muy efectivas en el control de reflexión de piel de cocodrilo moderada. También pueden ser útiles para controlar reflexión de fisuras por temperatura, especialmente si están combinadas con relleno de las fisuras. Sin embargo, son poco útiles para retardar reflexión de fisuras debidas a movimientos horizontales o verticales significativos.

2) Capas cortadoras de reflexión. Las mayores de 76 mm (3 pulg) de espesor han sido efectivas para controlar la reflexión de fisuras debidas a grandes movimientos, Estas capas cortadoras de reflexión están formadas por material granular de granulometría abierta y un pequeño porcentaje de cemento asfáltico.

3) Cortado y sellado de juntas en el refuerzo de concreto asfáltico. Este método, en el cual se cortan juntas en correspondencia con fisuras rectilíneas del pavimento existente puede ser efectivo para control de reflexión. Este método es muy efectivo para refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón conjuntas.

4) Un incremento del espesor del refuerzo. Esta solución reduce la reflexión y el corte bajo cargas y también reduce la variación de temperatura en el pavimento existente.

3.2.1.5 Diseño de espesores

La ecuación de diseño para refuerzo es:

$$SN_{of} = a_{of} \cdot D_{of} = SN_f - SN_{ef}$$

Donde:

SN_{of} = Número estructural requerido para el refuerzo

a_{of} = Coeficiente estructural para el refuerzo



D_{of} = Espesor del refuerzo

SN_f = Número estructural requerido para el tránsito futuro

SN_{ef} = Número estructural efectivo del pavimento existente.

3.2.1.6 Fresado superficial del pavimento existente

Si se fresa el pavimento en forma previa al refuerzo, la profundidad de fresado tiene que estar reflejada en el análisis de SN_{ef} . No se debe hacer ningún ajuste si el SN_{ef} se determina por NDT y si la profundidad de fresado no supera el mínimo necesario para remover los ahuellamientos superficiales. Si se fresa una profundidad mayor, se debe reducir SN_{ef} determinado por NDT en una cantidad igual a la profundidad fresada multiplicada por el coeficiente estructural de la capa de concreto asfáltico en el estado en que se encuentre.

3.2.2 Refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón previamente fracturado.

3.2.2.1 Introducción

En esta sección se estudiará el diseño de refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón que han sido previamente fracturados. Las técnicas de fracturado son: rotura y asentamiento, fisurado y asentamiento y triturado y compactación. A continuación se describirá someramente cada una de estas técnicas:

- Rotura y asentamiento. Consiste en romper un pavimento de hormigón armado con juntas en trozos mayores de 1 Pie (30 cm), cuidando de romper también la armadura o por lo menos destruir su adherencia con el hormigón y asentar luego las trozos firmemente en su fundación.

- Fisurado y asentamiento. Consiste en fisurar un pavimento de hormigón simple en trozos de 1 a 3 pies (30 a 90 cm) y asentar luego los trozos firmemente en su fundación.



El asentamiento se hace con varias pasadas de rodillo neumático de 35 a 50 ton. de peso.

- Triturado y compactado. Consiste en fracturar completamente cualquier tipo de losa de hormigón (H°S°, H°A° con juntas u H°A° continuo) en trozos menores de 1 pie (30 cm) y compactar el material resultante con dos o más pasadas de un rodillo vibratorio de 10 ton. de peso.

Las tareas a realizar para ejecutar un refuerzo de concreto asfáltico sobre un pavimento de hormigón fracturado son:

- 1) Remover y reemplazar áreas que puedan evidenciar poco soporte.
- 2) Hacer mejoras en el drenaje, si fuera necesario.
- 3) Proceder al fracturado y asentado o compactado.
- 4) Construir ensanches, si están previstos.
- 5) Aplicar un riego de liga.
- 6) Colocar el refuerzo de concreto asfáltico, incluyendo dispositivos de control de fisuración si fueran necesarios.

3.2.2.2 Factibilidad

Los métodos de rotura y asentamiento, fisurado y asentamiento y triturado y compactado se usan para reducir el tamaño de las trozos de hormigón y así minimizar los movimientos verticales que tendrían lugar en las fisuras y juntas existentes, y de esta manera minimizar la ocurrencia y severidad de reflexión de fisuras.

El triturado puede hacerse en todo tipo de pavimentos de hormigón en cualquier condición y es aconsejable su empleo en pavimentos de hormigón armado. Con la rotura del hormigón en trozos menores de 30 cm, éste se transforma en una base granular de gran resistencia. El módulo resiliente puede variar entre 100000 psi (690



MPa) a varios cientos de miles de psi (miles de MPa), con coeficientes de variación de hasta el 40%.

El fisurado y asentamiento se emplea en pavimentos de hormigón simples. Los tamaños de los trozos resultantes varían entre 1 y 3 pies. El módulo resiliente obtenida a partir de ensayos en el terreno puede variar entre unos pocos cientos de miles de psi (miles de MPa) a pocos millones de psi (pocas decenas de miles de MPa) con coeficientes de variación de hasta el 40%. Para evitar problemas de reflexión de fisuras se recomienda que no más del 5% de los trozos resultantes tengan un módulo mayor de 1×10^6 psi (6900 MPa).

La rotura y asentamiento se usa sólo con pavimentos de hormigón armado con juntas y deben romperse las armaduras, o al menos destruir su adherencia con el hormigón. Si no se logra esto, habrá movimientos diferenciales en las juntas de trabajo y en las fisuras y, en consecuencia, reflexión de fisuras. El módulo del material resultante puede variar entre unos pocos cientos de miles de psi (miles de MPa) a varios millones de psi (varias decenas de miles de MPa), con un coeficiente de variación del 40% o más.

Para romper las armaduras o su adherencia con el hormigón, es necesario el uso de potentes equipos. Esto debe ser verificado en el campo con ensayos de deflexión. Se deben lograr coeficientes de variación lo más bajos posibles, lo que indicará que se ha perdido el efecto de losa por el proceso de rotura. De todas maneras, en pavimentos de hormigón armado con juntas se aconseja el uso de triturado y compactado para asegurar la rotura total de la continuidad de la losa.

Las técnicas de fracturado de pavimentos de hormigón están más justificadas en pavimentos muy deteriorados que en los poco deteriorados, dado que es más fácil lograr un buen fracturado en un pavimento muy roto y por otro lado en este tipo de pavimentos será más costoso reparar fisuras antes de colocar el refuerzo.



3.2.2.3. Reparaciones previas al refuerzo

Las tareas de reparaciones previas en el caso de optar por esta solución no están bien claras. Muchos proyectos previos a 1991 no las tenían en cuenta. Sin embargo es recomendable reparar todo aquello que no brinde un soporte uniforme luego del fracturado.

3.2.2.4 Control de reflexión de fisuras

En general cuando se usan las técnicas de fracturado del pavimento existente de hormigón no será necesario implementar ningún método de control de fisuras. No obstante, es recomendable un fisurado o triturado uniforme en todo el ancho de la losa y asentar bien la losa fisurada o compactar bien el hormigón triturado.

3.2.2.5 Drenaje

El triturado de pavimentos de hormigón puede producir finos que pueden taponar los materiales de filtro en drenes de borde. Esto debe ser tenido en cuenta en el diseño de los sistemas de filtro.

3.2.2.6 Diseño del espesor de refuerzo.

El espesor de refuerzo a colocar es función de la capacidad estructural requerida para el tránsito futuro y la capacidad estructural del pavimento de hormigón fracturado. El espesor se determina con la siguiente ecuación:

$$SN_{of} = a_{of} \cdot D_{of} = SN_f - SN_{ef}$$

Donde:

SN_{of} = Número estructural requerido para el refuerzo

a_{of} = Coeficiente estructural del refuerzo de concreto asfáltico



D_{of} = Espesor requerido de refuerzo

SN_f = Número estructural requerido para soportar el tránsito futuro.

SN_{ef} = Número estructural efectivo del pavimento luego del fracturado.

3.2.3 Refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón.

3.2.3.1. Introducción

La construcción de un refuerzo de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón ($H^{\circ}S^{\circ}$, $H^{\circ}A^{\circ}$ con juntas u $H^{\circ}A^{\circ}$ continuo) implica la realización de estas tareas:

- 1) Reparación de áreas deterioradas y mejoramiento de las condiciones de drenaje (si fuera necesario).
- 2) Ensanche, si fuera necesario.
- 3) Aplicación del riego de liga.
- 4) Colocación del refuerzo de concreto asfáltico, incluyendo un tratamiento de control de reflexión de fisuras, si fuera necesario.

3.2.3.2. Factibilidad

Este tipo de solución es factible de ser realizada, excepto en los casos en que el pavimento existente esté tan deteriorado que sea aconsejable su remoción y reemplazo. Los casos en que el refuerzo de concreto asfáltico sobre hormigón no es factible son:

- 1) El monto de fisuración en losas y descascaramiento en juntas es tan grande que es aconsejable la remoción total del pavimento existente.
- 2) Deterioros serios en las losas de hormigón debidos a problemas de durabilidad.



3) En pasos a bajo nivel cuando las condiciones de gálibo no permiten colocar el refuerzo.

3.2.3.3. Tareas de reparación previas

Los siguientes tipos de fallas en hormigón simple, hormigón armado con juntas y hormigón armado continuo deben ser reparadas previamente. En la tabla 13 se indica el tipo de reparación a realizar según el tipo de falla:

Tabla 3-2 Tipo de reparación a realizar según el tipo de falla

Tipo de falla	Reparación
Fisuras de trabajo	Reparación en todo el espesor o reemplazo de losa
Punzonados	Reparación en todo el espesor
Juntas descascaradas	Reparación total o parcial en el espesor
Reparaciones deterioradas	Reparación en todo el espesor
Bombeo y movimiento diferencial	Drenes de borde
Asentamientos/hinchamientos	Capa de C°A° para nivelar, gateado de losa o reconstrucción localizada

Fuente: Guía AASHTO 93.

Cuando se habla de reparaciones en todo el espesor del hormigón o reemplazo de losas de hormigón simple o armado con juntas, éstas deben ser de hormigón, con pasadores o barras de unión a los efectos de asegurar una buena transferencia de cargas a través de la junta reparada. En algunos casos se han hecho reparaciones en todo el espesor en concreto asfáltico en lugar de hormigón. Esto no ha dado buenos resultados puesto que aparecen manchas en el refuerzo, apertura de juntas y fisuras y rápido deterioro en las inmediaciones del parche de concreto asfáltico.

En el caso de pavimentos de hormigón armado continuo, las reparaciones en todo el espesor del mismo deben ser tales de asegurar una buena continuidad en la armadura mediante la soldadura o empalme con la armadura existente. No deben hacerse reparaciones de concreto asfáltico previo a la colocación del refuerzo.



La instalación de drenes de borde, mantenimiento de drenes existentes o tareas de mejoramiento de las condiciones de drenaje deben ser hechas antes de la colocación del refuerzo.

Las juntas de alivio de tensiones deben ser ubicadas solamente en correspondencia con estructuras fijas y no en intervalos regulares a lo largo del pavimento. La única excepción es cuando una reacción álcali-agregado produce expansión de la losa.

3.2.3.4. Control de reflexión de fisuras

La reflexión de fisuras tiene lugar debido a una concentración de deformaciones en el refuerzo por el movimiento en las inmediaciones de fisuras y juntas en el pavimento existente. Este movimiento puede ser de flexión o de corte inducido por cargas o contracción horizontal debido a cambios de temperatura. Los movimientos inducidos por cargas están influenciados por el espesor del refuerzo y el espesor y rigidez del pavimento existente. Los movimientos inducidos por temperatura están influenciados por variaciones térmicas diarias y estacionales, por el coeficiente de expansión térmica del pavimento existente y por el espaciamiento entre juntas y fisuras.

En el caso de un refuerzo de concreto asfáltico sobre hormigón simple u hormigón armado con juntas, la reflexión de fisuras se desarrolla bastante rápido (en menos de un año). La rapidez del desarrollo depende de los factores ya citados y del nivel de tránsito.

Las medidas para controlar la reflexión de fisuras son:

- 1) Aserrado y sellado de juntas en el refuerzo de concreto asfáltico en correspondencia con las juntas del pavimento de hormigón subyacente. Esta técnica ha sido muy exitosa cuando se aplica a refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón cuando la cuchilla encuentra la junta o la fisura con un margen de 1 pulg (25 mm).



- 2) Incremento del espesor del refuerzo. En este caso la reflexión tardará más tiempo en desarrollarse.
- 3) Colocación de un estabilizado granular bituminoso previo a la colocación del refuerzo.
- 4) Colocación de una membrana sintética previo a la colocación del refuerzo. Esta solución es cuestionable.
- 5) Triturado y compactación del pavimento existente de hormigón.
- 6) Fisurado y asentamiento de pavimento de hormigón simple, o rotura y asentamiento del pavimento de hormigón armado con juntas.

La fisura reflejada en el refuerzo no sólo disminuye la serviciabilidad del mismo, sino que es una vía de entrada de agua a la estructura del pavimento. Esto provocará pérdida de adherencia entre el refuerzo y el pavimento existente, estriado con peladuras y desprendimientos en el pavimento de concreto asfáltico y aumento de fisuras de durabilidad o problemas con áridos reactivos en el hormigón. Es por esta razón que la junta o fisura reflejada debe ser sellada lo más pronto posible y resellarse toda vez que ocurra en la vida útil del pavimento.

3.2.3.5. Diseño de espesores

Si el refuerzo se coloca a los efectos de satisfacer condiciones funcionales de la calzada, bastará colocar un espesor mínimo. Si en cambio, el refuerzo es colocado para mejorar las condiciones estructurales del pavimento, el espesor requerido es una función de la capacidad estructural necesaria para satisfacer las futuras necesidades del tránsito.



La ecuación de diseño del espesor de refuerzo es:

$$D_{of} = A \cdot (D_f - D_{ef})$$

Donde:

D_{of} = Espesor de refuerzo

A = Factor que convierte la deficiencia en espesor del pavimento de hormigón en un espesor de refuerzo de concreto asfáltico.

D_f = Espesor de lasa necesario para soportar el tránsito futuro.

D_{ef} = Espesor efectivo de la lasa existente.

Si se trabaja en pulgadas, A responde a esta ecuación:

$$A = 2.2233 + 0.0099 \cdot (D_f - D_{ef})^2 - 0.1534 \cdot (D_f - D_{ef})$$

Si se trabaja en mm, A responde a esta ecuación:

$$A = 2.2233 + 1.53 \times 10^{-5} \cdot (D_f - D_{ef})^2 - 6.04 \times 10^{-3} \cdot (D_f - D_{ef})$$

$D_f - D_{ef}$ = Deficiencia en espesor del pavimento de hormigón.

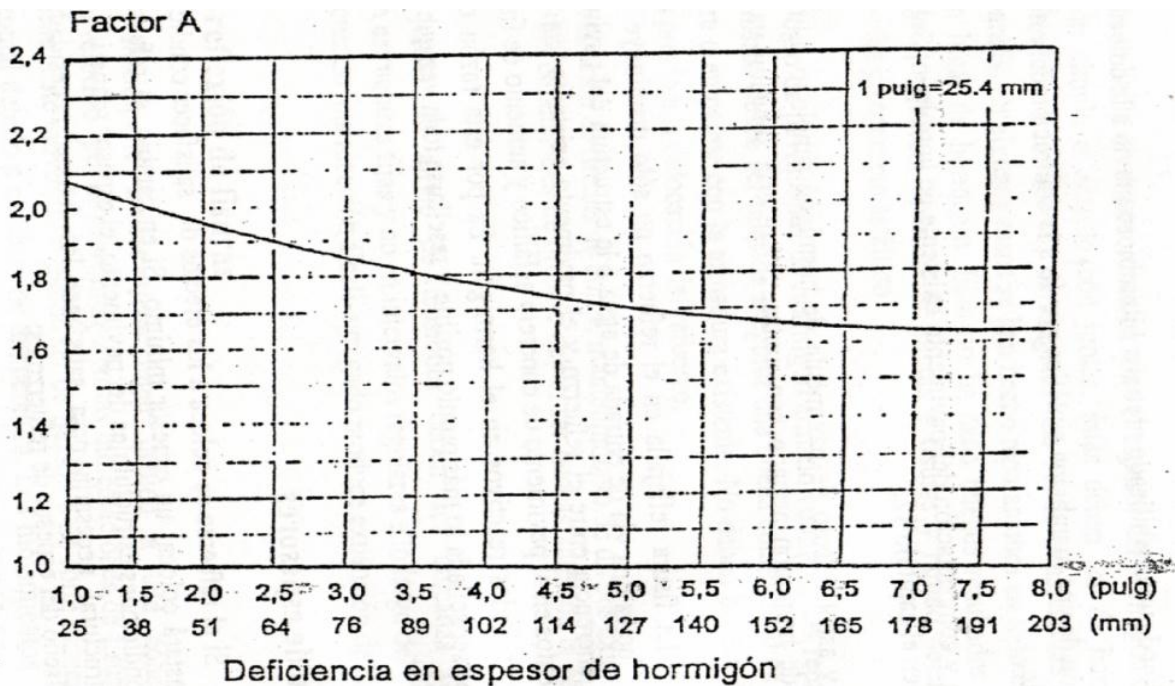


Fig. 3-1 Factor A para convertir deficiencia en espesor de hormigón en espesor de refuerzo de concreto asfáltico

El espesor de los refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón puede variar entre 50 mm (2 pulg) a 250 mm (10 pulg).

3.2.4 Refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón con refuerzo de concreto asfáltico.

3.2.4.1 Introducción

La construcción de un refuerzo de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón simple, hormigón armado con juntas u hormigón armado continuo que previamente tenían un refuerzo de concreto asfáltico implica la realización de estas tareas:

- 1) Reparación de áreas deterioradas y mejoras de las condiciones de drenaje.
- 2) Fresado de una porción de la superficie de concreto asfáltico.



- 3) Ensanche si fuera necesario.
- 4) Aplicación de riego de liga.
- 5) Colocación del refuerzo de concreto asfáltico, incluyendo control de reflexión de fisuras, si fuera necesario.

3.2.4.2 Factibilidad

Este tipo de refuerzo es factible realizarlo, excepto cuando:

- 1) La cantidad de fisuras y descascaramiento de juntas en la losa es tan grande que conviene reemplazarla totalmente.
- 2) Hay serios deterioros en la losa de hormigón por problemas de durabilidad.
- 3) Disminuiría el gálibo bajo puentes.

Cuando se va a colocar un refuerzo de concreto asfáltico sobre un pavimento de hormigón con un refuerzo de concreto asfáltico ya existente se deben estudiar muy bien las causas de las fallas. Si la losa de hormigón está sana, pero el refuerzo de concreto asfáltico está muy ahuellado o con otro tipo de deterioro, el mismo debe ser completamente reparado o fresado. Si, por el contrario, las fallas presentes en la superficie del refuerzo son reflexiones de deterioros del hormigón subyacente, el pavimento debe ser reparado en todo el espesor (hormigón más concreto asfáltico). De otro modo, las fallas se reflejarán rápidamente a través del nuevo refuerzo. Se recomienda la toma de muestras y ensayos de deflexión para investigar las causas de las fallas presentes.



3.2.4.3 Tareas previas al refuerzo

Para las siguientes fallas se recomiendan estas tareas:

Tabla 3-3 Tareas previas al refuerzo

Tipo de falla	Reparación
Ahuellamiento	Fresado
Reflexión de fisuras	Reparación en todo el espesor o reemplazo de losa
Reparaciones deterioradas	Reparación en todo el espesor
Punzonados (punchouts)	Reparación en todo el espesor
Fallas localizadas en el C°A°	Parches en el C°A°
Fallas localizadas en el H°	Reparación en todo el espesor
Bombeo	Drenes de borde
Asentamientos o hinchamientos	Nivelación del concreto asfáltico, gateado
	de losa o reconstrucción localizada

Fuente: Guía AASHTO 93.

En pavimentos de C°A° s/H°S° o C°A° s/H°A° e/juntas, la reflexión de fisuras de media o alta severidad es una evidencia de fisuras de trabajo, de juntas deterioradas o de fallas en las reparaciones de la losa de hormigón. Todas ellas deben ser reparadas en todo su espesor. Puede haber reflexión de juntas de baja severidad en correspondencia con juntas regulares o en juntas reparadas previamente en todo su espesor. Si el deterioro no progresa en forma significativa puede bastar sólo un simple sellado.

Es muy conveniente la toma de muestras en zonas de deterioros importantes a los efectos de analizarlas mejor y ver si la fuente de estas fallas está en el concreto asfáltico o en el hormigón.

Cuando se hace una reparación en todo el espesor se debe asegurar que se respeten los espesores preexistentes, tanto de hormigón como de concreto asfáltico. Las reparaciones en juntas deben hacerse con pasadores o barras de unión para asegurar una buena transferencia de cargas. No es aconsejable reemplazar un pavimento de



concreto asfáltico sobre hormigón por concreto asfáltico en todo el espesor dado que esto produciría manchas muy ásperas en el nuevo refuerzo y apertura de juntas y fisuras y un rápido deterioro por reflexión de fisuras en las cercanías de las fisuras.

En el caso de reemplazar una porción de pavimento de hormigón armado continuo se deben emplear armaduras que irán atadas o soldadas a la armadura existente a los efectos de proveer una buena transferencia de cargas y continuidad de losa.

La instalación de drenes de borde o el mantenimiento de drenes existentes de borde debe hacerse previamente a la colocación del refuerzo.

Las juntas de alivio de tensiones deben ser ubicadas solamente en correspondencia con estructuras fijas o en intervalos regulares a lo largo del pavimento. La única excepción es cuando una reacción álcali-agregado produce expansión de la losa.

3.2.4.4 Control de reflexión de fisuras

La reflexión de fisuras en estos casos tiene lugar sobre fisuras reflejadas en el primer refuerzo de concreto asfáltico. El mecanismo básico de la reflexión de fisuras es la concentración de deformaciones en el refuerzo debido al movimiento de flexión o corte en las proximidades de juntas y fisuras del pavimento existente. El movimiento puede ser también contracción horizontal por cambios de temperatura. Estos movimientos están influenciados por el espesor y la rigidez de las capas de concreto asfáltico, el espesor de la losa de hormigón, el grado de transferencia de cargas en juntas y fisuras y la falta de soporte de la losa de hormigón. Los movimientos inducidos por la diferencia de temperatura están influenciados por variaciones diarias y estacionales de temperatura, los coeficientes de expansión térmica de las capas de pavimento y el espaciamiento entrejuntas y fisuras.

Los tratamientos para evitar la reflexión de fisuras incluyen:

1) Colocación de una lámina sintética que sea capaz de absorber tensiones o una capa de un estabilizado granular bituminoso, previamente a la colocación del refuerzo.



2) Aserrado y sellado de juntas en el refuerzo de concreto asfáltico en correspondencia con las juntas reflejadas. Esta técnica ha sido muy exitosa cuando se aplicó a refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón con juntas cuando la sierra corta la junta o fisura recta dentro de los 25 mm (1 pulg).

3) Incremento del espesor del refuerzo en este caso, la reflexión tarda más en manifestarse.

Las fisuras reflejadas deben ser selladas lo más pronto posible y resellarse toda vez que tengan lugar durante la vida útil del pavimento.

3.2.4.5 Diseño del espesor de refuerzo

Si el refuerzo se coloca a los efectos de satisfacer condiciones funcionales de la calzada, bastará colocar un espesor mínimo. Si, en cambio, el refuerzo es colocado para mejorar las condiciones estructurales del pavimento, el espesor requerido es una función de la capacidad estructural necesaria para satisfacer las futuras necesidades del tránsito. La ecuación de diseño del espesor de refuerzo es:

$$D_{of} = A \cdot (D_f - D_{ef})$$

Donde:

D_{of} = Espesor de refuerzo

D_f = Espesor de lasa necesario para soportar el tránsito futuro.

D_{ef} = Espesor efectivo equivalente de losa de hormigón del pavimento existente de concreto asfáltico y hormigón.

A es función de la deficiencia de espesor del pavimento

Si se trabaja en pulgadas, A responde a esta ecuación:

$$A = 2.2233 + 0.0099 \cdot (D_f - D_{ef})^2 - 0.1534 \cdot (D_f - D_{ef})$$



Si se trabaja en mm, A responde a esta ecuación:

$$A = 2.2233 + 1.53 \times 10^{-5} \cdot (D_f - D_{ef})^2 - 6.04 \times 10^{-3} \cdot (D_f - D_{ef})$$

3.2.5 Refuerzos de hormigón adherido a pavimentos existentes de hormigón.

3.2.5.1 Introducción

Los refuerzos de hormigón adheridos a pavimentos existentes de hormigón en todas sus variantes (H°S°, H°A° c/juntas u H°A° continuo) implican la realización de estas tareas:

- 1) Reparación de áreas deterioradas y mejoramiento de las condiciones de drenaje.
- 2) Construcción de ensanches, si fuera necesario.
- 3) Preparación de la superficie del pavimento existente para asegurar una buena adherencia.
- 4) Colocación del refuerzo de hormigón.
- 5) Aserrado y sellado de juntas

3.2.5.2. Factibilidad

Este tipo de solución es factible excepto en los casos en que el pavimento existente esté tan deteriorado que sea aconsejable su remoción y reemplazo. Los casos en que el refuerzo de hormigón adherido no es factible son:

- 1) El grado de figuración en losas y de descascaramiento en juntas es tan grande que es aconsejable la remoción total del pavimento existente.
- 2) Deterioros serios en las losas de hormigón debido a problemas de durabilidad.



3) En pasos a bajo nivel cuando las condiciones de gálibo no permiten colocar un refuerzo. Es poco probable que ocurra esto, ya que este tipo de refuerzo es de poco espesor.

Si la obra tiene que habilitarse enseguida, se deberá construir el refuerzo con cemento portland de alta resistencia inicial.

3.2.5.3. Tareas de reparación previas

Tabla 3-4 Los tipos de deterioros y las tareas previas correspondientes son:

Tipo de falla	Reparación
Fisuras de trabajo	Reparación en todo el espesor o reemplazo de losa
Punzonados	Reparación en todo el espesor
Juntas descascaradas	Reparación total o parcial en el espesor
Parches deterioradas	Reparación en todo el espesor
Bombeo y movimiento diferencial	Drenes de borde
Asentamiento / hinchamiento	Gateado de losa o reconstrucción localizada

Fuente: Guía AASHTO 93.

Las reparaciones en todo el espesor y reemplazo de losa en los pavimentos de H°S° u H°A° con juntas deben ser de hormigón y deberán preverse pasadores o barras de unión a los efectos de asegurar una buena transferencia de carga a través de las juntas reparadas. Las reparaciones en todo el espesor para pavimentos de hormigón armado continuo deberán hacerse de manera tal de asegurar la continuidad en las armaduras. La armadura de la zona reparada deberá atarse o soldarse a la armadura existente. Todos los parches realizados en concreto asfáltico deberán ser demolidos y remplazados por hormigón.

La instalación de drenes de borde, mantenimiento de drenes existentes tarea de mejoramiento de las condiciones de drenaje deben ser hechas antes de la colocación del refuerzo.

Las juntas de alivio de tensiones deben ser ubicadas solamente en correspondencia con estructuras fijas y no en intervalos regulares a lo largo de la calzada. La única



excepción es cuando se produzca una expansión en la losa por reacción álcali-agregado.

3.2.5.4. Control de reflexión de fisuras

Toda fisura de trabajo en el pavimento de hormigón subyacente se reflejará en el refuerzo de hormigón en menos de un año. La reflexión de fisuras puede ser controlada mediante una reparación en todo el espesor y aserrado y sellado del refuerzo en correspondencia con la fisura del pavimento. Las fisuras cerradas y que no trabajan no necesitan ser reparadas, dado que no producen reflexión.

3.2.5.5. Diseño de espesores

Si el refuerzo se coloca al solo efecto de mejorar las condiciones funcionales de la calzada, bastará colocar un espesor mínimo. Si, en cambio, fuera necesario mejorar las condiciones estructurales del pavimento, el espesor requerido del refuerzo debe responder a esta ecuación:

$$D_{of} = D_f - D_{ef}$$

Donde:

D_{of} = espesor requerido del refuerzo de hormigón

D_f = espesor de losa necesario para soportar el tránsito futuro

D_{ef} = espesor efectivo de la losa existente

En general, los espesores de refuerzo de hormigón varían entre 2 y 6 pulg. (5 a 15 cm.) siendo lo más común adoptar espesores de 3 a 4 pulg. (7,5 a 10 cm.).

3.2.5.6 Juntas

Para el caso de pavimentos existentes de hormigón simple y de hormigón armado con juntas, se deben aserrar juntas longitudinales y transversales a través del espesor del



refuerzo de hormigón en forma completa más 0,5 pulg (1,3 cm), tan pronto como el curado lo permita. En estas juntas no deben colocarse pasadores ni barras de unión. Debe aserrarse también un reservorio apropiado para el material sellante. Este material debe colocarse tan pronto como sea posible.

Para el caso de pavimentos existentes de hormigón armado continuo no es necesario hacer juntas transversales en el refuerzo de hormigón, ya que no son necesarios. Las juntas transversales tampoco son necesarias para las juntas finales o de tope para parches de hormigón armado. En cuanto a las juntas longitudinales vale lo dicho para pavimentos de hormigón simple o armado con juntas.

3.2.5.7 Procedimientos de adherencia y materiales

Es necesario asegurar una buena adherencia con el pavimento existente. Para ello se aconseja:

- 1) La superficie existente debe ser lavada y sometida a un proceso de aumento de rugosidad tal que remueva una fina capa de hormigón, pero que no fisure la superficie. Se recomienda el uso de arena a presión o granalla.
- 2) Recomienda el uso de un agente adherente para lograr una mejor adherencia. Para ello se puede usar un mortero de cemento, una lechada de cemento o una resina epoxy de baja viscosidad. En algunos casos, la ausencia del agente adherente no ha producido una merma en la adherencia.

3.2.6 Refuerzos de hormigón no adherido sobre pavimentos de hormigón.

3.2.6.1. Introducción

Consisten en refuerzos de hormigón simple, hormigón armado con juntas u hormigón armado continuo que se colocan sobre pavimentos existentes de hormigón para mejorar su capacidad estructural y condiciones funcionales. La construcción de este tipo de refuerzos implica la ejecución de estas tareas:



- 1) Reparación sólo en el caso de zonas muy deterioradas y mejoramiento de las condiciones de drenaje, si fuera necesario.
- 2) Ensanche, si fuera necesario.
- 3) Colocación de una capa separadora, que sirve también como capa de nivelación.
- 4) Colocación del refuerzo de hormigón.
- 5) Aserrado y sellado de juntas.

3.2.6.2 Factibilidad

Esta es una alternativa factible para todos los pavimentos de hormigón. Es más efectiva, desde el punto de vista de los costos, cuando el pavimento existente está muy deteriorado ya que hay una menor necesidad de reparaciones previas. Los casos en que esta solución no es factible son:

- 1) Los deterioros en losas y descascaramientos en juntas son poco importantes y entonces aparecen otras alternativas como más económicas.
- 2) El gálibo bajo puentes quedaría reducido por el refuerzo.
- 3) El pavimento existente es susceptible de sufrir grandes hinchamientos y descascaramientos.

Si la obra debiera habilitarse lo más pronto posible, deben emplearse cementos de alta resistencia inicial. En estos casos se han habilitado refuerzos dentro de las 6 y 24 horas después del colado del hormigón.

3.2.6.3. Reparaciones previas al refuerzo

Una de las grandes ventajas del refuerzo de hormigón no adherido es que las operaciones de reparación previas son muy reducidas. Sin embargo, es necesario reparar los siguientes tipos de deterioros:



Tabla 3-5 Reparaciones previas al refuerzo

Tipo de falla	Tipo de refuerzo	Reparación
Fisura de trabajo	H°S°, H°A° c/juntas	No es necesaria
	H°A° continuo	
Punzonado	H°S° H°A° c/juntas	Reparaciones en todo el espesor
	H°A° continuo	
Junta descascarada	H°S°, H°A° c/juntas	No es necesaria
	H°A° continuo	
Bombeo	H°S°, H°A° c/juntas	Drenes de borde (si fuera necesario)
	H°A° continuo	
Asentamiento	H°S°, H°A° c/juntas	Nivelación con concreto asfáltico
	H°A° continuo	

Fuente: Guía AASHTO 93.

En casos de pavimentos existentes muy dañados, se puede proceder a la rotura/asentamiento, fisurado/asentamiento o triturado/compactado, previamente a la colocación de la capa de separación.

3.2.6.4 Control de reflexión de fisuras

Cuando la capa separadora de concreto asfáltico tiene entre 25 y 50 mm no hay problemas de reflexión de fisuras. Sin embargo, sí habría problemas si el pavimento existente tuviera una transferencia de cargas muy pobre y deflexiones diferenciales en correspondencia con juntas.

3.2.6.5 Diseño de espesores

El espesor del refuerzo de hormigón no adherido es una función de la capacidad estructural requerida para satisfacer las condiciones de tránsito futuro y se lo determina con esta ecuación:

$$D_{of} = (D_f^2 - D_{ef}^2)^{0.5}$$

Donde:

D_{of} = espesor requerido del refuerzo de hormigón



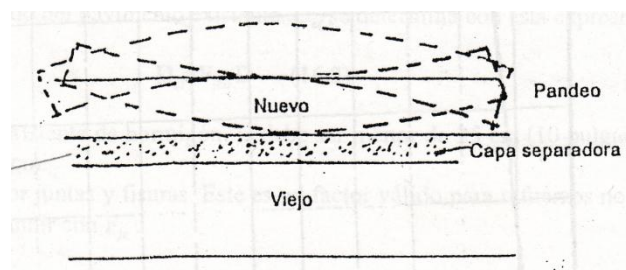
D_f = espesor de losa necesario para soportar el tránsito futuro

D_{ef} = espesor efectivo de la losa existente

Los valores de D_{of} varían entre 5 y 12 pulg. (12,5 a 30 cm.) O más. Los valores más corrientes de D_{of} están entre 7 y 10 pulg. (18 a 25 cm.).

3.2.6.6. Juntas

Las juntas transversales y longitudinales deben ser ejecutadas de la misma manera que para un pavimento nuevo, excepto en lo concerniente al espaciamiento de juntas para refuerzos no adheridos de hormigón simple. Debido a la alta rigidez del soporte debajo de la losa de refuerzo, se aconseja limitar el espaciamiento entre juntas para controlar las tensiones de pandeo por gradiente térmico (Ver fig.)



3-2 Deformaciones de pandeo por gradiente térmico

Se aconseja:

- Máxima separación entre juntas (pies) 1,75 espesor losa (pulg)
- Máxima separación entre juntas (pulg) 21 espesor losa (pulg)
- Máxima separación entre juntas (m) 0,21 espesor losa (cm)

3.2.6.7 Armaduras

Los refuerzos no adheridos de hormigón armado con juntas u hormigón armado continuo deben tener armadura para mantener unidas las fisuras que se pueden



producir. Para su diseño vale lo ya dicho para pavimentos nuevos, excepto que el factor de fricción a considerar es más alto (2 a 4) debido a la adherencia entre el concreto asfáltico de la capa de separación y el refuerzo de hormigón.

3.2.6.8. Capa de separación

La función de la capa de separación es aislar el refuerzo de las fisuras y otros deterioros de la losa existente. La capa separadora más común y más exitosa es la de concreto asfáltico de 25 mm (1 pulg) de espesor. Esta capa sirve también como niveladora de la superficie existente.

Algunas capas delgadas usadas como rompedoras de adherencia no han dado buen resultado. Otras capas delgadas sí han dado resultado como ser tratamientos superficiales, sellado y arena-asfalto, siempre y cuando el pavimento existente no tenga muchos desplazamientos verticales diferenciales y losas rotas. Para caminos de tránsito intenso se debe considerar el problema potencial de erosión de la capa separadora. Un tratamiento superficial delgado se erosionara más fácil que un concreto asfáltico. Una solución interesante es usar como capa separadora una capa permeable de granulometría abierta que servirá como sistema de drenaje para captar las aguas. Este tipo de capa proveerá un excelente control de reflexión de fisuras, así como prevención de bombeo y erosión de la capa separadora.

3.2.7 Refuerzos de hormigón sobre pavimentos de concreto asfáltico.

3.2.7.1 Introducción

Los refuerzos de hormigón simple, hormigón armado con juntas y hormigón armado continuo sobre pavimentos de concreto asfáltico mejoran su capacidad estructural y sus condiciones funcionales. La realización de este tipo de refuerzo implica la realización de las siguientes tareas:

- 1) Reparación de áreas deterioradas y mejoramiento de las condiciones de drenaje.



- 2) Ensanche, si fuera necesario.
- 3) Fresado de la superficie existente si hubiera mucha distorsión o si la pendiente transversal fuera inadecuada.
- 4) Colocación de una capa niveladora de concreto asfáltico, si fuera necesario.
- 5) Colocación del refuerzo de hormigón.
- 6) Aserrado y sellado de juntas.

3.2.7.2 Factibilidad

Ésta es una alternativa factible para casi todos los pavimentos de concreto asfáltico. Es aún más ventajosa cuando el pavimento existente está seriamente deteriorado. Las condiciones en las cuales este tipo de solución no es factible son:

- 1) El monto de deterioro del pavimento existente de concreto asfáltico es pequeño y hay otras alternativas más económicas.
- 2) El espesor de refuerzo es inadecuado para respetar el gálibo en cruces bajo nivel.
- 3) El pavimento existente es susceptible de sufrir grandes asentamientos e hinchamientos.

En los casos en que fuera necesario habilitar rápidamente el refuerzo, se emplearán hormigones cori cemento de alta resistencia inicial. En algunos casos se han habilitado obras entre 6 y 24 horas después del colado del hormigón.

3.2.7.3 Tareas de reparación previas

Una de las grandes ventajas de esta solución es que las reparaciones del pavimento existente son muy escasas. Sin embargo, deben repararse los siguientes tipos de fallas para evitar la reflexión de fisuras.



Tabla 3-6 Tareas de reparación previas

Tipo de falla	Tipo de refuerzo	Reparación
Piel de cocodrilo	H°S°, H°A° c/juntas	No es necesaria
	H°A° continuo	parchar áreas con grandes deflexiones
Fisuras transversales	H°S° H°A° c/juntas	No es necesaria
	H°A° continuo	
Bombeo	H°S°, H°A° c/juntas	Drene de borde, si fuera necesario
	H°A° continuo	
Descascaramiento	H°S°, H°A° c/juntas	Remover la capa descascarada, si fuera
	H°A° continuo	
Asentamiento hinchamiento	H°S°, H°A° c/juntas	Nivelación con concreto asfáltico
	H°A° continuo	

Fuente: Guía AASHTO 93.

3.2.7.4. Control de reflexión de fisuras

En general no hay problemas en este rubro, sin embargo si el pavimento existente de concreto asfáltico tiene fisuras transversales severas por efecto térmico, se aconseja colocar algún tipo de capa separadora sobre las fisuras transversales para reducir el riesgo de reflexión de fisuras.

3.2.7.5. Diseño de espesores

El espesor requerido del refuerzo de hormigón es una función de la capacidad estructural requerida para satisfacer las demandas futuras de tránsito y del soporte dado por el pavimento existente de concreto asfáltico.

El espesor requerido de refuerzo responde a esta ecuación:

$$D_{of} = D_f$$

Siendo D_f el espesor de losa necesario para soportar el tránsito futuro.

Los espesores de losa de refuerzo varían entre 5 pulg. (12,5 cm.) a 12 pulg. (30 cm.) siendo lo más común de 7 a 10 pulg. (18 a 25 cm.).



CAPÍTULO IV

4. DIMENSIONAMIENTO DE REFUERZOS DE CONCRETO ASFÁLTICO Y REFUERZO DE HORMIGÓN EN REHABILITACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

4.1 Principios de dimensionamiento de los refuerzos de C°A° y H°S°

4.1.1 Diseño del refuerzo a lo largo del proyecto

El diseño de la reparación de un pavimento puede involucrar longitudes muy grandes. Hay dos maneras de abordar este problema y ambas tienen ventajas y desventajas. Éstas son:

Aproximación por sección uniforme. En este caso el proyecto es dividido en secciones de diseño y condiciones relativamente uniformes. Cada sección uniforme es considerada independientemente y los datos de entrada para encarar del diseño del refuerzo se obtienen a partir de cada sección. En base a éstos se diseña un espesor uniforme de refuerzo válido para esta sección.

Aproximación de punto por punto. Los espesores de refuerzo son determinados para puntos específicos a lo largo de una sección uniforme de diseño (Por ejemplo cada 300 pies o 90 m). Todos los datos de diseño se determinan para ese punto en cuestión.

4.1.2 Evaluación funcional del pavimento existente

Son los deterioros que afectan al usuario, pero que no comprometen la capacidad estructural del pavimento. Las soluciones para este tipo de fallas son:

4.1.2.1 Fricción superficial e hidropelaneo

Todos los tipos de pavimentos. Cuando hay poca fricción con pavimento húmedo debido a exudación de la superficie se recomienda un espesor delgado de refuerzo adecuado al nivel de tránsito de la calzada.



Capa superficial de concreto asfáltico. Baja fricción debido a exudación. En este caso se puede fresar la parte de material que ha sufrido exudación para evitar la repetición de este fenómeno a través del refuerzo e impedir ahuellamientos debidos a inestabilidad. Después del fresado de la capa superficial, se puede colocar una capa de buena fricción, con granulometría abierta o un espesor de refuerzo adecuado para el nivel de tránsito de la calzada.

Capa superficial de concreto asfáltico. Cuando hay hidropilano debido a ahuellamiento será necesario determinar cuál o cuáles capas han sido ahuelladas para obrar en consecuencia. En la tabla 18 se dan algunas soluciones.

Tabla 4-1 Solución para corregir ahuellamientos

Causas de ahuellamiento	Capa ahuellada	Solución
Espesor inadecuado de todo el paquete	Subrasante	Refuerzo grueso
Capa granular inestable debido a saturación	Base o sub base	Remover la capa inestable o refuerzo grueso
Capa inestable debido a baja resistencia al corte	Base	Ídem caso anterior
Mezcla asfáltica inestable incluyendo desprendimientos y peladuras	Superficie	Remover la capa inestable
Compactación por tránsito	Superficie, base o sub base	Fresar la superficie y nivelar el refuerzo

Fuente guía AASTHO 93.

4.1.2.2 Rugosidad superficial

a) Todo tipo de pavimentos. Distorsión de la superficie en forma de ondas largas, incluyendo levantamientos e hinchamientos. La solución es nivelar la superficie con un refuerzo de espesor variable.

b) Capa superficial de concreto asfáltico. Rugosidad debido al deterioro de grietas transversales, fisuras longitudinales y hundimientos. En este caso un refuerzo convencional sería una corrección temporaria hasta que aparezcan las fisuras por reflexión. Lo correcto es hacer una reparación en todo el espesor de las capas



alteradas y un refuerzo de concreto asfáltico de espesor adecuado con control de reflexión de fisuras.

c) Capa superficial de concreto asfáltico. Rugosidad por descascaramiento superficial. En este caso un simple refuerzo delgado de concreto asfáltico puede ser la solución. Si el descascaramiento es más profundo debería removerse toda la capa dado que este proceso continuará bajo el refuerzo.

4.1.3 Evaluación estructural del pavimento existente.

Las fallas estructurales son aquéllas que reducen la capacidad de carga del pavimento. Los procedimientos de diseño de refuerzos presentados aquí están basados en el concepto de que el tiempo y las cargas de tránsito reducen la capacidad del pavimento para resistir cargas y el refuerzo será diseñado para lograr que el pavimento vuelva a ser capaz de soportar cargas en un nuevo período de diseño.

En la fig. 4-1 se indican los conceptos generales de deficiencia estructural y capacidad estructural. Esta última se denota por SC (structural capacity). Cuando el pavimento es nuevo se tiene SC_0 . Para pavimentos flexibles, $SC=SN$, y para pavimentos rígidos, $SC=D$. Para pavimentos compuestos, $C^\circ A^\circ/H^\circ$, SC se expresa como un espesor equivalente de losa.

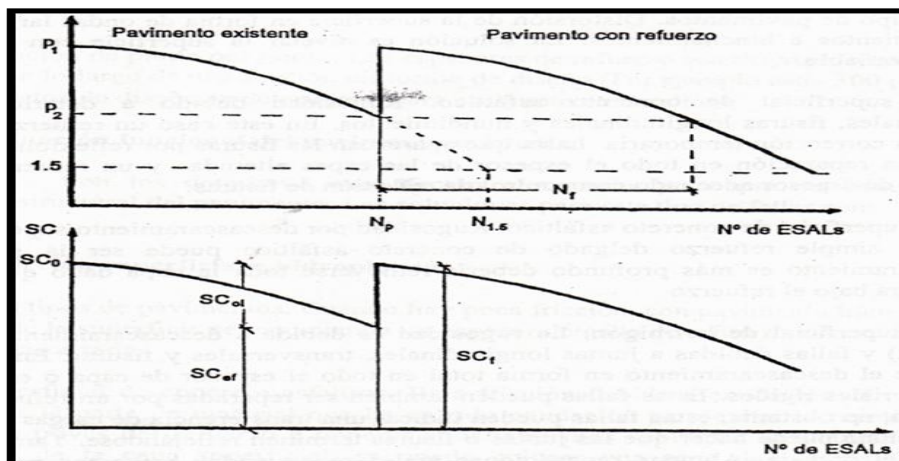


Fig. 4-1 Variación de la capacidad estructural de un pavimento en el tiempo



La capacidad estructural del pavimento declina por efecto del tiempo y del tránsito y en el momento de colocar el refuerzo, ésta ha pasado de SC_O a SC_{ef} (SN_{ef} para pavimentos flexibles, DC_{ef} para pavimentos rígidos).

Supongamos que para el tránsito futuro esperado se requiera una capacidad estructural SC . La diferencia $SC_f - SC_{ef} = SC_{ol}$ debe ser dada por el refuerzo. Este criterio de diseñar el refuerzo se llama la aproximación por deficiencia estructural. El problema más serio consiste en determinar SC_{ef} , lo cual no es para nada sencillo. Hay tres maneras de conocerlo:

- 1) Por observación visual y ensayos de materiales. Esto implica el estudio de los tipos de fallas presentes, así como el análisis de las condiciones de drenaje existentes complementadas con toma de muestras y ensayos de laboratorio.
- 2) Mediante ensayos no destructivos o "NDT" (non destructive test). Con determinados aparatos se pueden conocer las condiciones de la subrasante y de las distintas capas.
- 3) Por estudios de daños de fatiga por efecto del tránsito. En base al tránsito que ha pasado se puede inferir un daño por fatiga en el pavimento y, en base a ésta, determinar la vida remanente que le queda al pavimento.

4.1.3.1 Capacidad estructural basada en observación visual y ensayo de materiales

Es muy importante la observación visual del pavimento existente. El observador debería tener información en lo que concierne al diseño, construcción y mantenimiento del mismo. Se deben inventariar los tipos de falla presentes; algunas de ellas son: piel de cocodrilo, ahuellamiento, fisuras longitudinales o transversales que pueden derivar en baches en el caso de pavimentos flexibles. Para los pavimentos rígidos se tienen este tipo de fallas: descascaramiento en fisuras transversales roturas en esquina, punzonados (punchouts), etc.



Se debe analizar también el drenaje y correlacionar sus deficiencias con las fallas presentes.

Se recomienda el muestreo y ensayo de materiales. Esto permitirá conocer los espesores reales de cada capa y el estado de deterioro en que se encuentran. Los ensayos recomendados son los de resistencia para muestras asfálticas o de hormigón, ensayos de granulometría para analizar la degradación y contaminación de capas granulares. Si en muestras de hormigón se observan fallas de durabilidad, se recomienda consultar a un petrógrafo para conocer sus causas.

4.1.3.2 Capacidad estructural basada en el “NDT”

Es un método de mucho valor y rápido de ejecutar. Si está correctamente aplicado, el NDT proporciona mucha información y análisis en forma rápida y económica. El análisis, sin embargo, puede ser muy sensible a condiciones desconocidas y debe ser ejecutado por personal que conozca el tema y tenga experiencia en esta metodología.

La evaluación estructural con el NDT depende del tipo de pavimento. Para la evaluación de pavimentos rígidos, el NDT sirve para analizar tres aspectos:

- a) Eficiencia de transferencia de cargas en juntas y fisuras.
- b) Estimación del módulo efectivo de reacción de la subrasante (valor k).
- c) Estimar el módulo de elasticidad del hormigón (la resistencia del mismo es función del módulo de elasticidad).

Para pavimentos flexibles, el método del NDT permite analizar estos dos aspectos:

- a) Estimación del módulo resiliente de la subrasante
- b) Estimación del SN de la estructura del pavimento.



También se puede determinar con el NDT los módulos resilientes de las distintas capas del paquete, y con estos determinar el SN_{ef} aunque los resultados pueden ser dudosos, por lo que no es recomendable. Sin embargo, los valores de los módulos obtenidos sirven de guía para cuantificar el grado de alteración de cada capa.

Además con las medidas de las deflexiones se pueden cuantificar la variabilidad a lo largo del proyecto y subdividirlo en tramos de igual resistencia estructural.

4.1.3.3 Capacidad estructural basada en la vida remanente

El daño que produce la fatiga por repetición de cargas hace que sea cada vez menor el número de cargas que el pavimento pueda soportar.

La vida remanente del pavimento es el porcentaje de cargas que el pavimento podrá soportar con respecto al número de cargas que lo llevarían a rotura (serviciabilidad de 1,5). Entonces:

Vida remanente (remaining life)

$$RL = \frac{N_{1,5} - N_P}{N_{1,5}} \cdot 100 = \frac{1 - N_P}{N_{1,5}} \cdot 100$$

Donde:

N_P = Número de cargas hasta el momento actual

$N_{1,5}$ = Número de cargas que producen la rotura ($p_t = 1,5$)



El factor de condición CF (condition factor) (fig. 6) se define por la ecuación:

$$CF = \frac{SC_n}{SC_o} \Rightarrow SC_n = CF \cdot SC_o$$

Donde:

SC_n = Capacidad estructural del pavimento luego de N_p ESALs

SC_o = Capacidad estructural original del pavimento

SI $RL = 100\% \Rightarrow N_p = 0$ y $SC = SC_o \Rightarrow CF = 1$

SI $RL = 0\% \Rightarrow N_p = N_{1.5}$ y $SC = SC_{FALLA} \Rightarrow CF = 0.5$

$N_{1.5}$ puede ser determinado mediante la ecuación de diseño o con el uso de ábacos. Para ser congruente con el AASHO Road Test, se usará $PSI = 1,5$ y una confiabilidad $R=50\%$. En este caso puede dar $N_p > N_{1.5}$ y si esto ocurre se debe usar $CF=0,5$ para la estimación de SC_{ef} .

Este método adolece de algunas fuentes de error como ser:

- 1) La capacidad predictiva de las ecuaciones del AASHO Road Test.
- 2) La gran variación en el comportamiento de pavimentos con diseños idénticos.
- 3) La estimación del número de ESALs que han pasado.
- 4) Incapacidad para determinar fehacientemente el espesor de refuerzo. Para pavimentos muy deteriorados, el SN_{ef} o D_{ef} obtenidos por el criterio de vida remanente pueden ser mucho menores que los valores obtenidos por otros métodos. Se recomienda el método de la vida remanente para pavimentos con poco grado de deterioro.

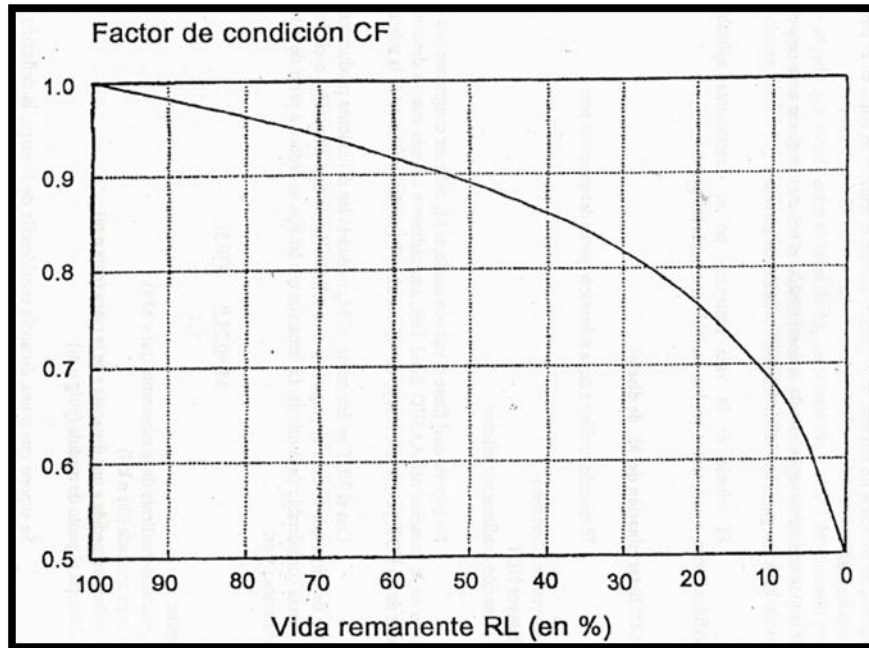


Fig. 4-2 Relación entre el factor de condición y la vida remanente

Los resultados obtenidos aplicando este criterio pueden tener errores por exceso o por defecto dado que no hay relación entre RL y el grado de deterioro observado. En efecto:

-Si en función del número de ejes que han pasado se determina una vida remanente muy pequeña, se colocaría un refuerzo muy grande, aunque el número de fallas en el pavimento sea reducido.

-Si la vida remanente según cálculo es considerable, el refuerzo a colocar sería pequeño, aun cuando haya una gran cantidad de fallas estructurales de gravedad.

El criterio de la vida remanente no es directamente aplicable, sin modificaciones, a pavimentos que han recibido uno o más refuerzos.

Lo mencionado anteriormente se emplea en los dos tipos de refuerzos estudiados.



4.2 Dimensionamiento de Refuerzos de Concreto Asfáltico sobre pavimentos Flexibles.

4.2.1 Introducción

Previo a la colocación de concreto asfáltico sobre un pavimento existente de concreto asfáltico deben tomarse en cuenta estas tareas:

- ❖ Reparación de áreas deterioradas y mejoras en el subdrenaje, si fuera necesario.
- ❖ Corrección del ahuellamiento superficial por fresado de la capa superficial o colocación de una capa de nivelación.
- ❖ Ensanche o construcción de carriles adicionales, si está previsto.
- ❖ Aplicación del riego de liga.
- ❖ Colocación de la sobrecarpeta de concreto asfáltico (incluyendo tratamiento de control de fisuras si fuera necesario).

4.2.2 Factibilidad

Este tipo de sobrecarpetas son comúnmente utilizadas, excepto cuando el pavimento existente esté tan deteriorado que justifique su remoción total. Los casos en que no es factible colocar el refuerzo de concreto asfáltico son:

- ❖ La cantidad de fisuras tipo piel de cocodrilo es muy grande que se impone una completa remoción y reemplaza de la superficie actual.
- ❖ Un ahuellamiento superficial excesivo que indique que los materiales del paquete tienen poca estabilidad para prevenir la recurrencia de este deterioro.
- ❖ La base granular o estabilizada existente muestra signos de importante



deterioro y el repararla para proveer un soporte uniforme no es conveniente.

- ❖ La base granular debería ser removida y reemplazada debido a infiltración y a contaminación de material proveniente de una capa inferior de poca resistencia.
- ❖ El descascaramiento y disgregación de la carpeta indican que ésta debe ser reemplazada.

4.2.3 Reparaciones previas

Sí de acuerdo al análisis realizado es todavía factible colocar un refuerzo, deben hacerse previamente las siguientes reparaciones cuya falla en su materialización podría incidir en la vida útil de la sobrecarpeta:

- ❖ Falla tipo piel de cocodrilo. Las áreas de fallas tipo piel de cocodrilo de gran severidad deben ser reparadas. Las áreas localizadas de fallas moderadas de piel de cocodrilo deben ser reparadas a menos que se implemente algún tipo de control de reflexión de fisuras. La reparación debe incluir la remoción de todo material débil que se encuentre por debajo.
- ❖ Fisuras lineales. Las fisuras lineales de alta severidad deben ser parchadas, Las fisuras con aberturas mayores de 6 mm deben ser rellenadas con una mezcla arena-asfalto. También debe preverse algún dispositivo de control de reflexión de fisuras para juntas transversales que experimenten movimientos de apertura y cierre.
- ❖ Ahuellamiento. Los ahuellamientos deben eliminarse mediante fresado o colocación de una capa niveladora. Cuando el ahuellamiento sea muy severo, mayor a 6 mm, se deberá realizar una investigación para determinar si se debe a fallas de capas inferiores, en cuyo caso habrá que



remover toda la estructura fallada.

- ❖ Irregularidades superficiales. Depresiones, sobreelevaciones y ondulaciones requieren una investigación y tratamiento especial y, en determinados casos, remoción.

4.2.4 Control de reflexión de fisuras

La reflexión de fisuras en la sobrecarpeta se debe a la concentración de deformaciones debidas a movimientos en el pavimento subyacente por las cargas que producen tensiones de flexión o corte o en su caso por movimiento horizontal debida a cambios térmicos. El efecto de las cargas está influenciado por los espesores y resistencia de la sobrecarpeta y las capas inferiores y las características de los vehículos. La influencia de la temperatura depende de las variaciones diarias y estacionales, el coeficiente de expansión térmica y la separación de fisuras.

Entre los métodos para control de fisuras, además de parches y rellenos previos, se tienen:

Las membranas sintéticas son muy efectivas en el control de reflexión de piel de cocodrilo con fisuración moderada. También pueden ser útiles para controlar reflexión de fisuras por temperatura, especialmente si están combinadas con relleno de fisuras. Sin embargo, son poco útiles para retardar reflexión de fisuras debidas a movimientos horizontales o verticales significativos.

Las capas inhibidoras de reflexión con espesores mayores de 80 mm de espesor han sido efectivas para controlar la reflexión de fisuras debidas a grandes movimientos. Estas capas inhibidoras de reflexión están formadas por material granular de granulometría abierta y un pequeño porcentaje de cemento asfáltico.

- ❖ El cortado y sellado de juntas en el refuerzo de concreto asfáltico en correspondencia con fisuras rectilíneas del pavimento existente puede ser efectivo para control de reflexión. Este método es muy efectivo para



sobrecarpetas de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón con juntas cuando los cortes coinciden sobre la junta o fisura rectilínea dentro de 25 mm.

- ❖ Un incremento del espesor de la sobrecarpeta. Esta solución reduce las tensiones de flexión y corte vertical bajo cargas y también reduce la variación de temperatura en el pavimento existente. De esta manera, espesores mayores de sobrecarpetas de asfalto son más efectivos que las de menor espesor porque retrasan la ocurrencia y deterioro por reflexión de fisuras.

4.2.5 Subdrenaje

Para un adecuado desempeño de un pavimento de asfalto que va a recibir una sobrecarpeta de asfalto debe asegurarse una buena condición del subdrenaje. La clave está en remover el exceso de agua de la plataforma y evitar la erosión e incrementar la resistencia de subbase y subrasante reduciendo de esta manera las deflexiones en el pavimento. Adicionalmente las mejoras en la subrasante disminuirán la disgregación de la superficie.

4.2.6 Método AASTHO de dimensionamiento del refuerzo de concreto asfáltico.

Cuando se coloca una sobrecarpeta para mejoras estructurales, el espesor a determinar depende de la capacidad estructural requerida para cubrir las demandas futuras de tráfico y el aporte que hace el pavimento existente.

La ecuación de diseño para sobrecarpeta es:

$$SN_{o1} = a_{o1} D_{o1} = SN_f - SN_{ef} \quad \text{Ecuación (4-1)}$$

Donde:

SN_{o1} = número estructural requerido para la sobrecarpeta



a_{o1} = coeficiente estructural para la sobrecarpeta

D_{o1} = espesor de la sobrecarpeta

SN_f = número estructural requerido para el tránsito futuro

SN_{ef} = número estructural efectivo del pavimento existente.

El espesor necesario de sobrecarpeta se obtiene siguiendo los pasos que se indican a continuación, los que proveen un método de diseño que recomienda hacer ensayos sobre el pavimento para obtener datos de entrada confiables. Si no es posible hacer esto, se puede encarar este problema mediante una observación visual de las fallas, obviando los pasos 4 y 5.

4.2.6.1 Diseño y construcción del pavimento existente (Paso 1)

Se debe recabar información sobre:

Espesor de cada capa y tipo de material usado.

Subrasante (registros durante la construcción, ensayos de suelos, etc.)

4.2.6.2 Análisis de tránsito (Paso 2)

- ❖ Cantidad de ESALs acumulados en el carril de diseño (N_p), para ser aplicado solamente si SN_{ef} se obtiene por el método de vida remanente.
- ❖ Cantidad de ESALs previstos en el carril de diseño durante el período de diseño (N_f).

4.2.6.3 Observación del estado del pavimento existente (Paso 3)

Es necesario detectar, distinguir y medir los tipos de fallas presentes. En base a los mismos; puedan determinarse los coeficientes estructurales. Se recomienda extraer muestras de los carriles más transitados para estimar estas cantidades. Se debe determinar:



- ❖ Porcentaje de superficie con piel de cocodrilo (baja, media y alta severidad).
- ❖ Número de fisuras transversales por 1.6 km (baja, media y alta severidad).
- ❖ Profundidad media del ahuellamiento.
- ❖ Evidencia de bombeo en fisuras y bordes de pavimentos.

4.2.6.4 Ensayos de deflexión (Paso 4)

Los ensayos de deflexión se recomiendan para analizar el pavimento de concreto asfáltico existente, especialmente para vías de alto volumen de tráfico. Las mediciones de deflexiones deben hacerse en correspondencia con la zona transitada por la rueda externa de los vehículos. Los intervalos varían entre 30 y 300 m. Se usan dispositivos que pueden transmitir cargas cerca de 40 KN. La carga puede ser pulsante o sinusoidal. Las deflexiones se miden en correspondencia con el centro de la carga y a ciertas distancias que se explican más adelante.

4.2.6.4.1 Módulo Resiliente de la subrasante

A ciertas distancias desde el lugar donde se aplica la carga, las deflexiones medidas en la superficie del pavimento se deben solamente a la subrasante y son independientes del diámetro del plato de carga. De esta manera, el Módulo Resiliente de la subrasante M_R puede ser retrocalculado con la medición de una simple deflexión y la magnitud de la carga, con el uso de la siguiente ecuación (AASHTO 1993).

$$M_R = \frac{0.24 \cdot P}{r \cdot d_r} \quad \text{Ecuación (4-2)}$$

Donde:

M_R = Módulo Resiliente retrocalculado



P = Carga aplicada

δ_r = Deflexión a la distancia r medida desde el centro de la carga

r = Distancia desde el centro de carga

Debido a que la deflexión se debe solamente a la deformación de la subrasante, no se necesita hacer un ajuste de temperatura cuando se calcula el MR.

La deflexión usada para retrocalcular el módulo de subrasante debe ser medida a una distancia tal del plato de carga que se llegue a realizar una buena estimación del módulo resiliente independientemente de los efectos en las capas superiores. Por otro lado, debe ser medida lo más próximo posible de tal manera que no se pierda la precisión. La distancia mínima puede determinarse mediante la siguiente relación:

$$r \geq 0.7 a_e$$

Donde:

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}$$

Ecuación (4-3)

Donde:

a_e = radio del bulbo de tensión en la interface pavimento subrasante

a = radio del plato de carga

D = espesor total del pavimento por encima de la subrasante

E_p = módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante

M_R = módulo resiliente de la subrasante



4.2.6.4.2 Módulo efectivo del pavimento

Si el módulo resiliente de la subrasante y el espesor total de todas las capas que están ubicadas por encima de la subrasante son conocidas o asumidas, el módulo efectivo de toda la estructura del pavimento puede ser determinado de las deflexiones medidas en el centro del plato de carga usando la siguiente ecuación:

$$d_o = 1.5pa \left(\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}}\right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}}{E_p} \right) \quad \text{Ecuación (4-4)}$$

Donde:

d_o = deflexión medida en el centro del plato de carga y ajustada a una temperatura de 20°C.

p = presión en el plato de carga

a = radio del plato de carga

D = espesor total de las capas del pavimento por encima de la subrasante

M_R = módulo resiliente de la subrasante

E_p = módulo efectivo de todas las capas del pavimento que están por encima de la subrasante

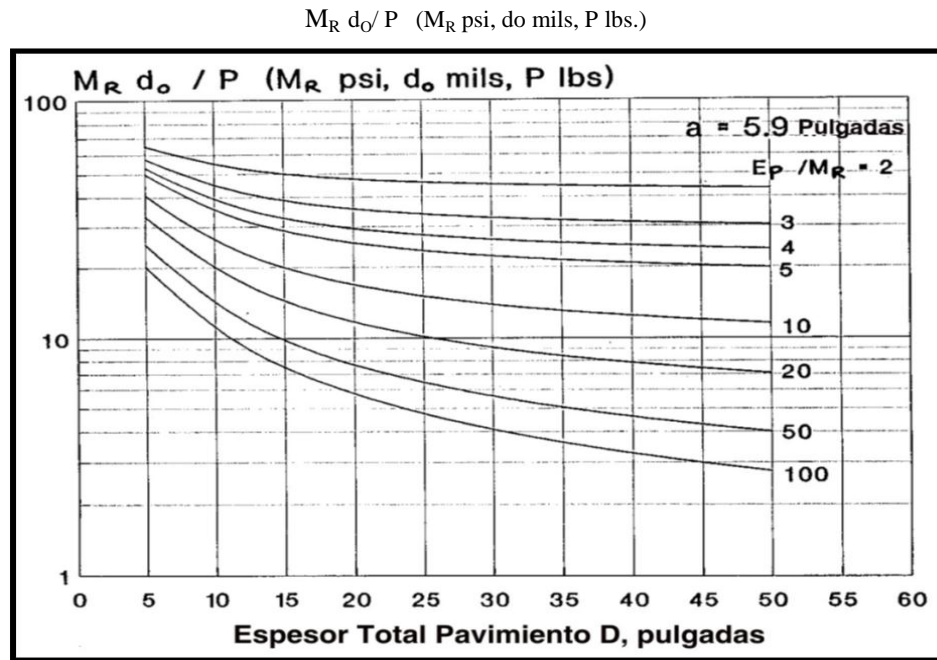
Es necesario determinar la temperatura de la mezcla durante la medida de la deflexión, lo que puede hacerse en forma directa o estimada en base a las temperaturas del aire y de la superficie.

Para placas de carga de 5,9 pulg (150 mm) la fig. 4-1 permite determinar la relación E_p/M_R y E_p puede ser determinado para un valor conocido o supuesto de M_R . El manejo de este gráfico es muy sencillo: Se conocen el espesor D del pavimento y M_R



($M_R = 0,24 P/r dr$), d_o se mide y se conoce $M_R d_o/P$ y con el valor de D se corta la curva correspondiente a E_p/M_R y luego se determina E_p .

Los valores de d_o , deben ser ajustados por temperatura para llevarlos a una temperatura de referencia de 20°C (68°F). Para ello pueden usarse los gráficos de la fig. 4.3 si el pavimento tiene una base granular o estabilizada con asfalto.



4.2.6.5. Muestreo y ensayo de materiales (Paso 5)

La extracción de núcleos y ensayo de materiales son recomendados para analizar al pavimento existente, especialmente en caminos de alto volumen de tráfico.

4.2.6.5.1 Módulo resiliente de la subrasante y materiales de las distintas capas

En caso de no ejecutar el ensayo con el FWD, se puede determinar también a partir de ensayos de laboratorio (AASHTO T294-91I) con una tensión desviante de 6 psi (41 kPa o 0,42 Kg/cm²) para equiparlo con la usada para determinar el $M_R=21$ MPa (3000 psi) del AASHTO Road Test.



Alternativamente, otros ensayos como el valor R, el CBR o ensayos de clasificación de suelos pueden ser realizados para, por medio de correlaciones, determinar el valor de M_R .

El examen visual de probetas de concreto asfáltico (núcleos) permitirá conocer distintos grados de alteración, disgregación y erosión. Lo propio puede hacerse con las capas base y subbase para determinar principalmente el grado de degradación y la posible contaminación de finos de las capas inferiores.

Los espesores de cada uno de las capas componentes deben ser medidas como resultado final de este acápite.

4.2.6.6 Determinación del SN requerido para el tránsito futuro (Paso 6)

El Número Estructural requerido (SN_f) se calcula utilizando los conceptos de diseño para pavimento nuevo. A continuación se discuten cada una de las variables tomando en cuenta la adopción de valores medios para el diseño de una sobrecarpeta sobre un pavimento de sección uniforme. En la siguiente página se presenta un formulario para facilitar la entrada de datos, este mismo formulario se presenta en la parte final de los siguientes capítulos.

4.2.6.6.1 Módulo resiliente efectivo de la subrasante.

La determinación de este módulo puede hacerse por alguno de estos tres métodos.

Ensayos de laboratorio como se han explicado en el paso 5

Cálculo a partir de medidas de deflexiones. Este valor debe ser ajustado para que sea consistente con el valor usado en los conceptos de diseño de pavimentos flexibles AASHTO 1993.



Estimación a partir de información disponible sobre suelos y relaciones desarrolladas a partir de estudios del módulo resiliente. Debe considerarse los cambios por contenido de humedad e influencia por los cambios estacionales.

El valor hallado por alguno de los tres métodos anteriormente explicados debe ser corregido por un factor C que no debe ser mayor a 0.33. Esto se realiza para que el resultado sea consistente con el valor de suelos medido en laboratorio para AASHTO Road Test y que es recomendado por esta guía.

4.2.6.6.2 Pérdida de serviciabilidad de diseño

Resulta de la diferencia entre la serviciabilidad inmediatamente después de colocada la sobrecarpeta, P_o , menos la serviciabilidad P_f en el momento de la nueva rehabilitación. Ver tabla correspondiente diseño de pavimentos flexibles.

4.2.6.6.3 Confiabilidad R de la sobrecarpeta

La confiabilidad afecta directamente el espesor de la sobrecarpeta. Se aplican los mismos conceptos que en el diseño de pavimentos nuevos, ver tabla correspondiente diseño de pavimentos flexibles. Para valores de confiabilidad en función de la clasificación funcional de la vía.

4.2.6.6.4 Desviación standard

Algunas fuentes de incertidumbre son diferentes para el diseño de una sobrecarpeta comparados con los del diseño de un pavimento nuevo. De esta manera, los valores recomendados para diseños nuevos no pueden ser apropiados para diseños de sobrecarpetas. Por tanto, se recomienda utilizar un valor mínimo de 0.49.

4.2.6.7 Determinación del Numero efectivo SN_{ef} del pavimento existente

Hay tres métodos para determinar el Número Estructural efectivo SN_{ef} de una sobrecarpeta de asfalto sobre un pavimento de asfalto: método del Ensayo no



Destructivo, método del Factor de Condición y método de Vida Remanente. Es conveniente usar los tres métodos para evaluar el pavimento, y luego seleccionar el valor de SN_{ef} basado en los resultados, haciendo uso del criterio ingenieril y de la experiencia.

4.2.6.7.1 Método de Ensayo no Destructivo (NDT)

En el método de Ensayo no Destructivo (NDT) se asume que la capacidad estructural del pavimento es una función de su espesor y rigidez totales. La relación entre SN_{ef} y E_p es:

$$SN_{ef} = 0,0045D (E_p)^{1/3} \quad \text{Ecuación (4-5)}$$

Donde:

SN_{ef} = número estructural efectivo (pulg)

D = espesor total del paquete estructural (pulg)

E_p = módulo efectivo de todo el paquete (psi)

ó, en unidades métricas:

$$SN_{ef} = 0,0024 D (E_p)^{1/3} \quad \text{Ecuación (4-6)}$$

Donde:

SN_{ef} = número estructural efectivo (mm)

D = espesor total del paquete estructural (mm)

E_p = módulo efectivo de todo el paquete (kPa)

E_p se determina a través de deflexiones como ya se ha explicado.

4.2.6.7.2 Observación visual y ensayo de materiales

En el caso de usar el método de observación visual y ensayo de materiales, se debe analizar la ecuación del número estructural:



$$SN_{ef} = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad \text{Ecuación (4-7)}$$

D_1 , D_2 y D_3 son los espesores de cada capa y m_2 y m_3 se determinan de acuerdo a las condiciones de drenaje.

Los valores de a_1 ; a_2 y a_3 serán menores que los que se consideran en un diseño nuevo debido al deterioro que presentan las capas.

4.2.6.7.3 Vida remanente

En el caso de usar el método de la vida remanente se tiene:

$$\text{Vida remanente (\%)} R_L = 100 (1 - N_p / N_{1,5}) \quad \text{Ecuación (4-8)}$$

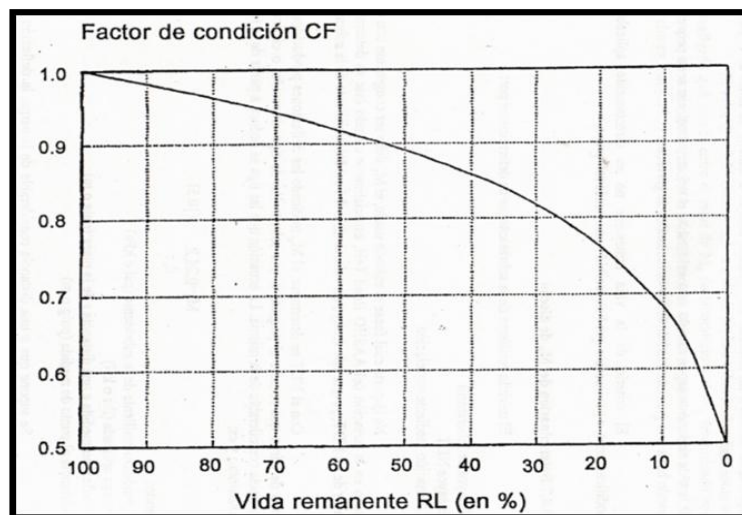
$N_{1,5}$ se estima con la ecuación de diseño o con el ábaco de diseño, determinando el número de ESALs que producen una serviciabilidad final de 1,5 (falla del pavimento). En este caso se debe usar una confiabilidad $R=50\%$.

El SN_{ef} se determina con la ecuación:

$$SN_{ef} = CF * SN_o \quad \text{Ecuación (4-9)}$$

CF se obtiene de fig. 4-4 en función de R_L .

Fig. 4-4 Abaco para determinar CF (fuente guía AASHTO)





SN_o es el número estructural del pavimento, si éste fuera nuevamente construido.

El proyectista debe reconocer que calculando SN_{ef} por este método no refleja ningún beneficio por reparaciones de sobrecarpetas previas. La estimación de SN_{ef} obtenida debe considerar un valor límite bajo. El SN_{ef} del pavimento será más alto si las reparaciones en la sobrecarpeta previa con deterioro por cargas asociadas (piel de cocodrilo) se han realizado. Este método para determinar SN_{ef} , sin modificación, en pavimentos de asfalto que ya han recibido una o más sobrecarpetas.

4.2.6.8. Determinación del espesor de la sobrecarpeta (Paso 8)

El espesor de la sobrecarpeta se determina con la expresión:

$$D_{ol} = \frac{SN_{ol}}{a_{ol}} = \frac{(SN_f - SN_{eff})}{a_{ol}} \quad \text{Ecuación (4-10)}$$

Donde:

SN_{ol} = número estructural requerido para la sobrecarpeta

a_{ol} = coeficiente estructural de la sobrecarpeta de concreto asfáltico

D_{ol} = espesor requerido de sobrecarpeta

SN_f = número estructural determinado en el paso 6

SN_{ef} = número estructural efectivo del pavimento existente



4.3 Dimensionamiento de Refuerzos de Hormigón Simple sobre pavimentos Flexibles.

4.3.1 Introducción

Los refuerzos de hormigón simple, hormigón armado con juntas y hormigón armado continuo sobre pavimentos de concreto asfáltico mejoran su capacidad estructural y sus condiciones funcionales. La realización de este tipo de refuerzo implica la realización de las siguientes tareas:

- ❖ Reparación de áreas deterioradas y mejoramiento de las condiciones de drenaje.
- ❖ Ensanche, si fuera necesario.
- ❖ Fresado de la superficie existente si hubiera mucha distorsión o si la pendiente transversal fuera inadecuada.
- ❖ Colocación de una capa niveladora de concreto asfáltico, si fuera necesario.
- ❖ Colocación del refuerzo de hormigón.
- ❖ Aserrado y sellado de juntas.

4.3.2 Factibilidad

Esta es una alternativa factible para casi todos los pavimentos de concreto asfáltico. Es aún más ventajosa cuando el pavimento existente está seriamente deteriorado. Las condiciones en las cuales este tipo de solución no es factible son:

- ❖ El monto de deterioro del pavimento existente de concreto asfáltico es pequeño y hay otras alternativas más económicas.
- ❖ El espesor de refuerzo es inadecuado para respetar el gálibo en cruces



bajo nivel.

- ❖ El pavimento existente es susceptible de sufrir grandes asentamientos y/o hinchamientos.

En los casos en que fuera necesario habilitar rápidamente el refuerzo, se emplearán hormigones con cemento de alta resistencia inicial. En algunos casos se han habilitado obras entre 6 y 24 horas después del colado del hormigón.

4.3.3 Tareas de reparación previas

Una de las grandes ventajas de esta solución es que las reparaciones del pavimento existente son muy escasas. Sin embargo, deben repararse los siguientes tipos de fallas para evitar la reflexión de fisuras.

Tabla 4-2
Recomendaciones de soluciones según tipo de falla

Tipo de falla	Tipo de refuerzo	Reparación
Piel de cocodrilo	H°S°, H°A° c/juntas H°A° continuo	No es necesaria parchar áreas con grandes deflexiones
Fisuras transversales	H°S°, H°A° c/juntas H°A° continuo	No es necesaria
Bombeo	H°S°, H°A° c/juntas H°A° continuo	Drenes de borde, si fueran necesarios
Descascaramiento	H°S°, H°A° c/juntas H°A° continuo	Remover la capa descascarada, si fuera severa
Asentamientos hinchamiento	H°S°, H°A° c/juntas H°A° continuo	Nivelado con concreto asfáltico

Fuente: Guía AASHTO 93.



4.3.4. Control de reflexión de fisuras

En general no hay problemas en este rubro, sin embargo si el pavimento existente de concreto asfáltico tiene fisuras transversales severas por efecto térmico, se aconseja colocar algún tipo de capa separadora sobre las fisuras transversales para reducir el riesgo de reflexión de fisuras.

4.3.5. Método AASTHO de Dimensionamiento de refuerzo de Hormigón.

El espesor requerido del refuerzo de hormigón es una función de la capacidad estructural requerida para satisfacer las demandas futuras de tránsito y del soporte dado por el pavimento existente de concreto asfáltico.

El espesor requerido de refuerzo responde a esta ecuación:

$$D_{ol} = D_f \quad \text{Ecuación (4-10)}$$

Siendo D_f el espesor de losa necesario para soportar el tránsito futuro.

Los espesores de losa de refuerzo varían entre 5 pulg (12,5 cm) a 12 pulg (30 cm) siendo lo más común de 7 a 10 pulg (18 a 25 cm).

Para determinar el espesor de refuerzo D_{ol} es necesario seguir los pasos que se indican a continuación. Es conveniente hacer ensayos de deflexiones sobre el pavimento existente. Si esto no fuera posible, se obviarán los pasos 4 y 5 y se reemplazarán por observación visual de las fallas y estimación de los datos de entrada.

4.3.5.1. Paso 1. Diseño del pavimento existente

1) Tipos de material existente y espesores de capa.



4.3.5.2. Paso 2. Análisis de tránsito

1) Número de ESALs futuro previsto en la trocha de diseño para el periodo diseño (Nf).

Conversión De Tránsito En ESALs.

La conformación del número equivalente de ejes de distinta naturaleza y peso en ESALs es una tarea compleja. Es necesario fijar bien los conceptos de qué tipo de eje y su peso es más importante que el peso del vehículo en lo que respecta al comportamiento del pavimento.

El tránsito es reducido a un número equivalente de ejes de una determinada carga que producirá el mismo daño que toda la composición del tránsito. Esta carga tipo según AASHTO es de 80 KN o 18 Kips. La conversión se hace a través de los factores equivalentes de carga LEF (load equivalent factor).

Así el factor equivalente de carga o LEF es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por una dada carga de un tipo de eje y la producida por el eje standard de 80 KN en el mismo eje.

4.3.5.3. Paso 3. Observación del estado del pavimento existente

No es necesario un relevamiento detallado del estado del pavimento existente distinguiendo y cuantificando cada tipo de falla encontrada. Sólo debe hacerse un relevamiento general que identifique sólo las fallas que puedan afectar el comportamiento del refuerzo de hormigón. Estos son:

1) Hinchamiento.

2) Signos de descascaramiento en el concreto asfáltico. Esto puede ser seno para el retuerzo de hormigón.



3) Grandes fisuras transversales que, sin una capa separadora, se reflejaran en el retuerzo.

4.3.5.4. Paso 4. Ensayos de deflexión

Es aconsejable realizarlos. Se deben medir las deflexiones en correspondencia con la zona transitada por la rueda externa de los vehículos. Los intervalos de medida varían entre 100 y 1000 pies (30 a 300 m). Se usan dispositivos FWD de 40 kN de carga. Las deflexiones se miden en el centro de la placa de carga y a una distancia suficientemente alejada de la misma. En base a estos valores se determina el módulo resiliente de la subrasante, M_R , y el módulo efectivo del pavimento E_p . En base a estos valores se determina el valor efectivo dinámico k mediante el gráfico de fig. 4-4 usando el módulo de subrasante M_R el módulo de las capas de pavimento E_p y el espesor total del pavimento existente D por encima de la subrasante. En este caso el valor de M_R , obtenido a partir de deflexiones necesario para determinar k , no debe ser ajustado por el factor C (0,33) como para el caso de la obtención del M_R de diseño para refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de concreto asfáltico.

4.3.5.5. Paso 5. Muestreo y ensayo de materiales

No son necesarios a menos de que existan fallas inusuales.

4.3.5.6. Paso 6. Determinación del espesor requerido de refuerzo para el tránsito futuro, D_f

Los datos necesarios son:

4.3.5.6.1. Valor efectivo estático k (Módulo de reacción de la subrasante).

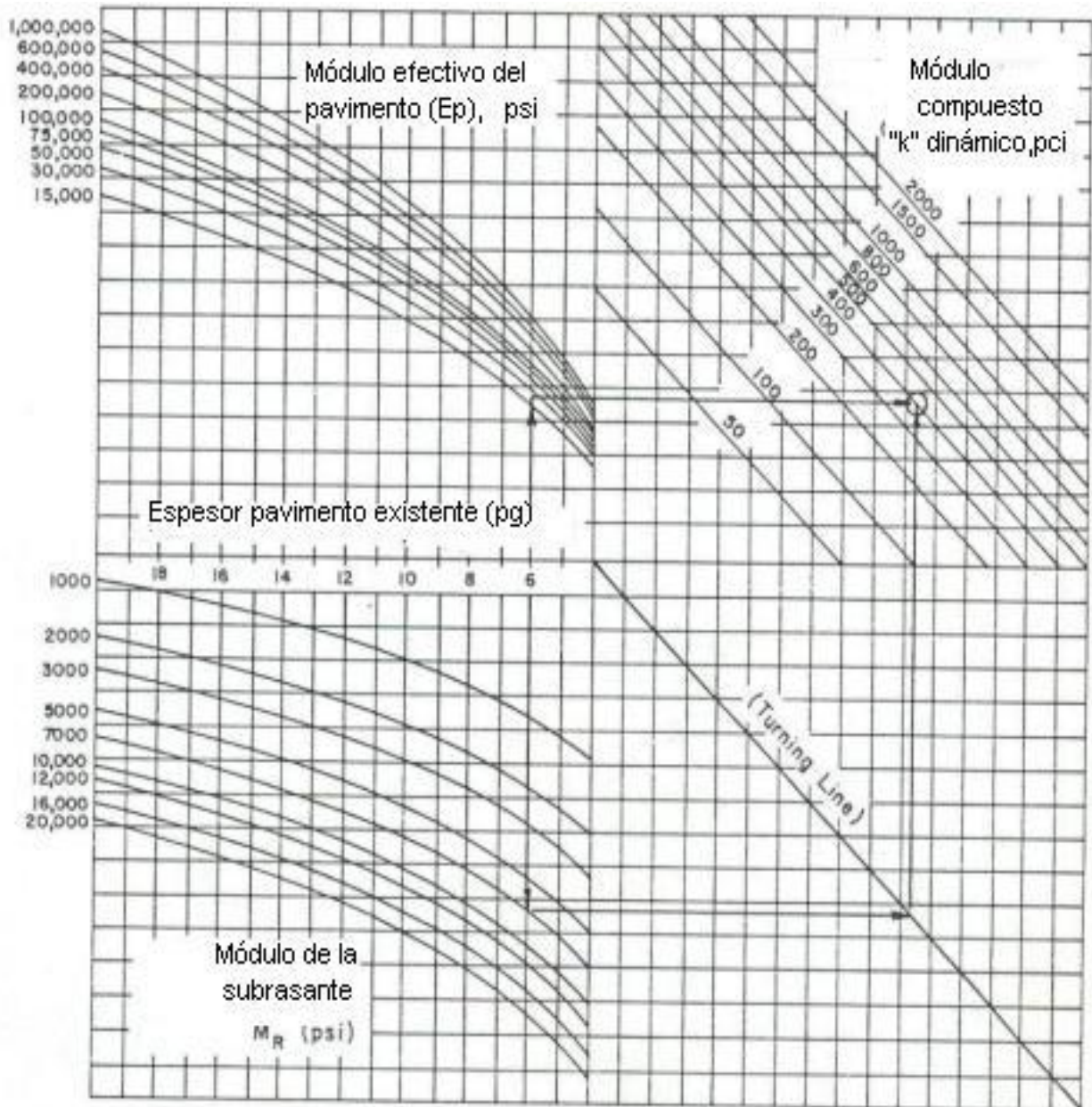
En la parte inferior del refuerzo de hormigón sobre el pavimento existente de concreto asfáltico). El mismo puede determinarse por alguno de estos métodos:



a) Determinación del valor efectivo dinámico k a partir de M_R , E_p y D (Ver paso 4).
Este valor se divide por 2 y se obtiene el k efectivo estático.

la guía AASHTO. Recomienda utilizar el siguiente ábaco.

Fig. 4-5 Abaco para determinar el valor de K estático.



Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

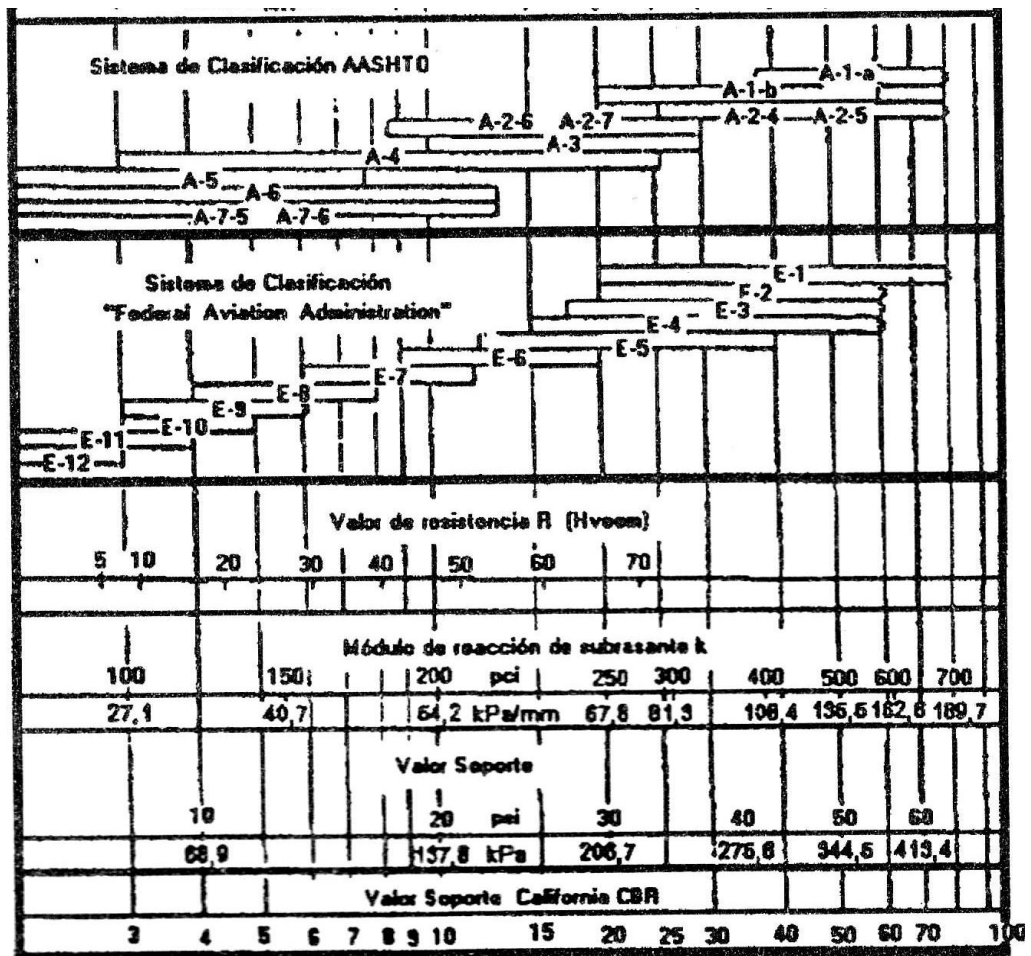


b) Sin embargo, de acuerdo a las recomendaciones de la norma AASHTO y al suplemento AASHTO-97, se puede efectuar una correlación de los valores soporte de la subrasante, obtenidos por otros métodos. Esto posibilita el empleo del valor de CBR, que también es un valor de medida de la capacidad soporte.

En base a un gran número de muestras y estudios se han podido desarrollar algunos valores estimativos del módulo de reacción del suelo en función a diferentes propiedades.

Diferentes autores han publicado sus resultados y en general no difieren notablemente.

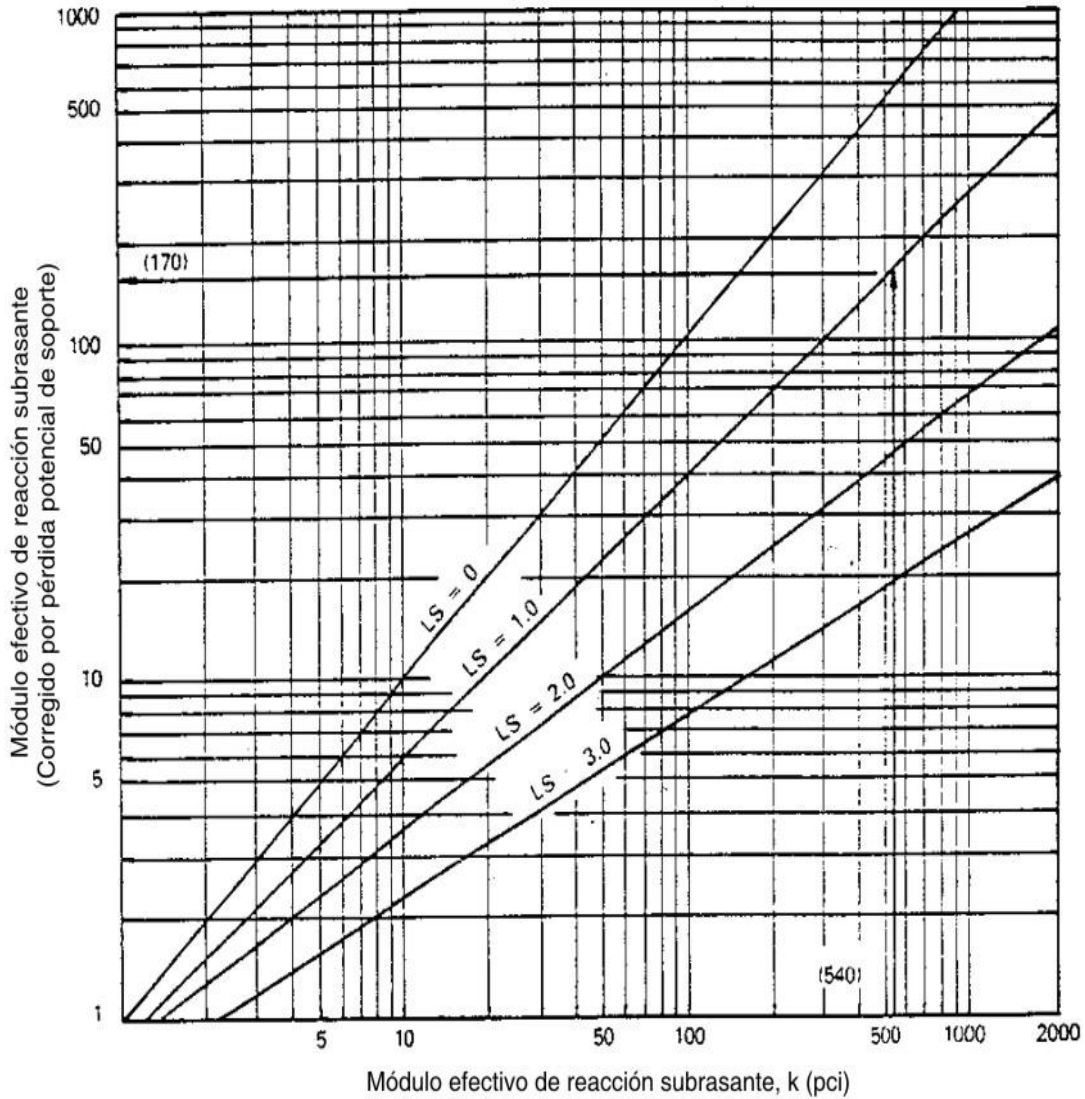
Figura 4-6 Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos





Luego se procede al ajuste del valor efectivo de K para tener en cuenta la pérdida de soporte de la sub base, LS. Por erosión, este ajuste se hace por medio de la figura 4-7.

Figura 4-7 Corrección del módulo efectivo de reacción por pérdida potencial de soporte



Con el valor de K corregido por pérdida de soporte determinado del ábaco de la figura 4-8 (K: es el valor efectivo de reacción de la subrasante).



4.3.5.6.2. Pérdida de serviciabilidad.

Es la diferencia entre la serviciabilidad inmediatamente después del refuerzo y la serviciabilidad en el momento de la próxima rehabilitación.

La serviciabilidad de un pavimento se define como la capacidad de servir al tipo de tránsito para el cual ha sido diseñado. Así se tiene un índice de serviciabilidad presente PSI (present serviciability index) mediante el cual el pavimento es calificado entre 0 (pésimas condiciones) y 5 (perfecto). En el diseño del pavimento se deben elegir la serviciabilidad inicial y final.

La inicial, P_o , es función del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción.

La final o terminal, P_t , es función de la categoría del camino y es adoptada en base a esta y al criterio del proyectista.

Los valores recomendados son:

Serviciabilidad inicial P_o

- Para Pavimentos Rígidos 4,5

Serviciabilidad final P_t

- Por Autopistas 2.5

- Para Carreteras 2.0

- Para Zonas Industriales 1.8

- Pavimentos Urbanos Principales 1.8

- Pavimentos Urbanos Secundarios 1.5



4.3.5.6.3. Coeficiente de transferencia de cargas J, función de la transferencia de cargas prevista para el refuerzo.

El coeficiente de transferencia de carga J es un factor usado en pavimentos rígidos para tener en cuenta la capacidad de la estructura del pavimento para transferir cargas a través de juntas y fisuras. La tabla 4.1 da recomendaciones sobre rangos de coeficientes J para distintas condiciones:

Tabla 4-3 coeficientes transferencia de cargas en pavimentos rígidos

Banquina	Concreto Asfáltico		Hormigón Vinculado A Calzada	
	Si	No	Si	No
Mecánica de transferencia de carga				
Tipo de pavimento				
Hormigón simple o armado c/juntas	3,2	3,8 – 4,4	2,5 – 3,1	3,6 – 4,2
Hormigón armado continuo	2,9 – 3,2	-----	2,3 – 2,9	-----

Fuente: Guía AASTHO 93.

El uso de banquetas de hormigón vinculadas a casadas o trochas exteriores ensanchadas reduce las tensiones y deformaciones en una losa. Es por eso que se usan valores menores de J.

Para pavimentos de hormigón armado continuo, el rango de J es entre 2,3 y 2,9 valor recomendado de 2,6.

Para pavimentos conjuntas, el valor de J varía entre 2,5 y 3,1, pudiéndose optar por cualquier valor en este rango basándose en la experiencia local.

La razón para tomar J menores en pavimentos con banquina de hormigón vinculada es porque se supone que los vehículos no transitan por la misma. Es necesario tener en cuenta que la zona crítica de la losa es la esquina y con esta premisa las cargas se alejan de ella permitiendo una reducción de espesores.



4.3.5.6.4. Módulo de rotura de concreto.

Éste puede ser determinado por algunos de los métodos:

Estimación a través de la resistencia a la tracción indirecta (ver paso 5)

Estimación a través del módulo elástico del pavimento existente:

$$S_c' = 43,5 \left(\frac{E}{10^6} \right) + 488,5$$

Donde

E = Módulo elástico del hormigón (psi)

En unidades métricas

$$S_c' = 43,5 \left(\frac{E}{10^6} \right) + 3370$$

Donde

Ec = Módulo elástico del hormigón (kpa)

El módulo de rotura o resistencia a la tracción por flexión del hormigón se determina con el ensayo a flexión con carga al tercio y está relacionado con f_c' a través de la ecuación.

$$S_c' = K(f_c')^{0.5}$$

Donde

f_c' = resistencia a la compresión simple del hormigón (psi)

Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce



como resistencia a la flexión por tensión ($S'c$) o Módulo de Ruptura (M_R) normalmente especificada a los 28 días.

Los valores que se muestran a continuación son valores de módulos de rotura del concreto recomendados en pavimentos rígidos nuevos.

Tabla 4-4
Módulo de Ruptura Recomendado

Tipo de Pavimento	MR recomendado	
	MPa	psi
Autopistas	5 MPa	725,2
Carreteras	5 MPa	725,2
Zonas Industriales	4.5 MPa	640.1
Urbanas Principales	4.5 MPa	640.1
Urbanas Secundarias	4.2 MPa	597.4

Fuente: AASHTO 93.

4.3.5.6.5. Módulo elástico del hormigón para refuerzo.

Módulo elástico del pavimento existente.

Para ello puede usarse alguno de estos métodos:

Calculó a partir de medidas des deflexión (paso 4)

Estimación a partir de la resistencia a la tracción indirecta

El módulo elástico del pavimento se determina con ecuación:

$$E = 57000(f_c')^{0.5}$$

Donde

E = módulo elástico del hormigón (psi)



f_c' = resistencia a la compresión simple del hormigón (psi)

En unidades métricas:

$$E = 150000(f_c')^{0.5}$$

E = módulo elástico del hormigón (KPa).

f_c' = resistencia a la compresión simple del hormigón (KPa).

Los valores de E varían entre 3×10^6 a 8×10^6 psi (20,000 a 56,000 MPa).
Considerados mayores a 40,000 MPa Hormigones de alta resistencia.

4.3.5.6.6. Pérdida de soporte.

Las juntas de esquinas que pueden tener una pérdida importante de soporte.

Las pérdidas de soporte en pavimentos de hormigón armado continuo pueden ser determinadas graficando la deflexión del borde de la losa o de la zona usada por las ruedas de los vehículos e identificando puntos con reflexiones excesivas. Toda falla de soporte debe ser corregida con estabilización de la losa. Para el diseño del espesor del refuerzo se debe considerar $LS = 1$

4.3.5.6.7. Confiabilidad de diseño R.

La selección del nivel apropiado de confiabilidad para el diseño de un refuerzo está dictada por el uso esperado de ese refuerzo. Un subdimensionado de un refuerzo tiene consecuencias más graves que un pavimento en el cual se espera que lleve un gran volumen de tránsito que un refuerzo que experimentara un bajo volumen de tránsito. En ambos casos habrá problemas, el refuerzo alcanzará los valores mínimos de serviciabilidad antes de lo provisto y será necesario realizar trabajos de reparaciones. En la tabla 4-5 Se dan niveles de confiabilidad aconsejados por AASHTO.



Tabla 4-5
Niveles De Confiabilidad

Tipo de caminos	Confiabilidad recomendada	
	Zona urbanas	Zona rural
Rutas interestatales y autopistas	85-99,9	85-99,9
Arterias	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Fuente: Guía AASTHO 93.

4.3.5.6.8. Desvío standard S_o para pavimentos rígidos.

En cuanto al desvío standard de las variables S_o , se recomienda para pavimentos rígidos un valor de 0,34 para el caso en que se considere la varianza del tránsito futuro y $S_o=0.39$ para el caso en que esta no esté considerada para cualquier tipo de refuerzo diseñado con la ecuación de diseño para pavimentos rígidos.

El comportamiento de pavimento y tránsito estimado en el periodo de diseño pueden ser determinados por un caso de diseño en particular si se dispone de suficiente información o en caso contrario se pueden usar los valores de tabla 3.4. Estos valores fueron desarrollados a partir de un análisis de varianza que existía en el AASTHO Road Test y en base a predicciones futuras de tránsito.

Tabla 4-6
Desvío Standard para pavimentos

Condición Del Diseño	Desvío Estándar
Variación en la predicción del	0,34 (pav. rígidos)
	0,44 (pav. flexibles)
Variación en la predicción del	0,39 (pav. rígidos)
	0,49 (pav. flexibles)

Fuente: Guía AASTHO 93.



4.3.5.6.9. Condiciones de drenaje del pavimento existente de concreto asfáltico para adoptar un coeficiente de drenaje Cd.

Es bien sabido que un buen drenaje aumenta la capacidad portante de la subrasante (el módulo resiliente aumenta cuando baja el contenido de humedad), mejorando la calidad del camino y permitiendo el uso de capas más delgadas.

Para el diseño de pavimentos rígidos se buscan los coeficientes de drenaje Cd que ajustan la ecuación de diseño que considera la resistencia de la losa, las tensiones y condiciones de soporte.

TABLA 4-7

Valores del Coeficiente de Drenaje C_d

CALIDAD DEL DRENAJE	PORCENTAJE DE TIEMPO EN EL QUE EL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTO A NIVELES DE HUMEDAD PRÓXIMOS A LA SATURACIÓN			
	MENOS DEL 1%	1 – 5 %	5 – 25 %	MAS DEL 25 %
Excelente	1,25 – 1,20	1,25 – 1,15	1,15 – 1,10	1,1
Bueno	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,0
Mediano	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,9
Malo	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,8
Muy malo	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80 – 0,70	0,7

Fuente: Guía AASHTO 93.

El bombeo o movimientos diferenciales verticales en juntas o fisuras son indicios de que haya problemas de drenaje. Se deben considerar condiciones pobres de drenaje, o sea Cd =1,0

4.3.5.7. Paso 7. Determinación del espesor de refuerzo

Se aplica la fórmula:

$$D_{01} = D_f \quad \text{Ecuación (4-11)}$$



4.3.5.8. Juntas

Las juntas transversales y longitudinales deben ser ejecutadas de la misma manera que para un pavimento nuevo, se aconseja limitar el espaciamiento entre juntas para controlar las tensiones de pandeo por gradiente térmico.

Se aconseja:

- Máxima separación entre juntas (pies) 1,75 espesor losa (pulg)
- Máxima separación entre juntas (pulg) 21 espesor losa (pulg)
- Máxima separación entre juntas (m) 0,21 espesor losa (cm)



CAPÍTULO V

APLICACIÓN PRÁCTICA

5.1 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

5.2 UBICACIÓN.

El tramo tiene su inicio en la población de Villamontes situada al sur del país, en la Provincia Gran Chaco del Departamento de Tarija, partiendo de esa población se extiende por la Ruta N° F-09, formando parte del corredor de integración internacional que vincula la ciudad de Santa Cruz con la república Argentina.

A lo largo del proyecto la carretera atraviesa los Departamentos de Tarija, y Santa Cruz, llegando a una longitud total de 98 Km, considerando las progresivas 351+002 (Villamontes) y 449+000 (Boyuiibe).

Longitud del Proyecto:

Las longitudes parciales del Proyecto se muestran en el siguiente detalle:

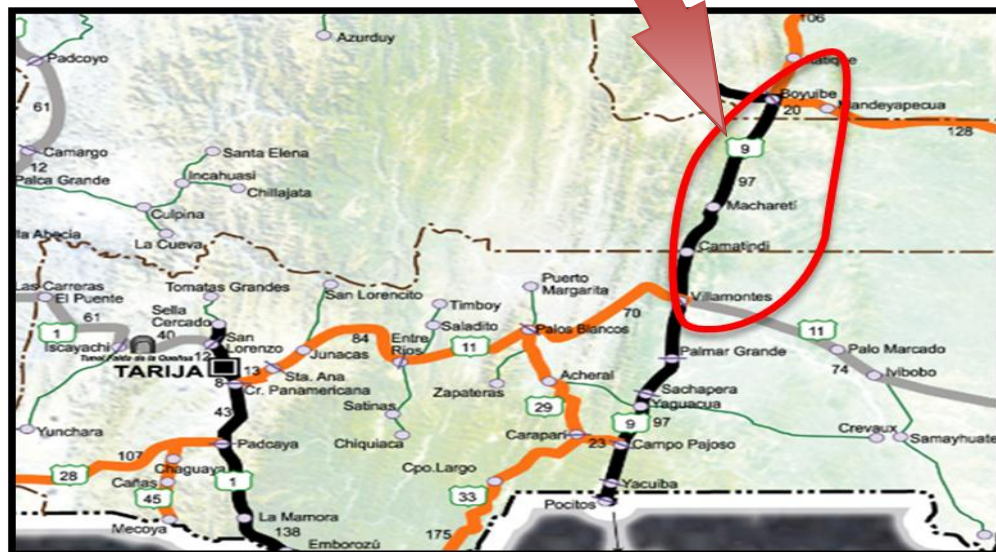
- Los tramos en los que se intervendrá mediante la Rehabilitación de 2do grado del pavimento flexible existente a través de refuerzos son:

Boyuiibe	Machareti	43 Km.
Machareti	Camatindi	21 Km.
Camatindi	Villamontes	34 Km.

La ubicación del tramo se muestra en la siguiente imagen.



UBICACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO



Ubicación del tramo. (Elaboración propia)



5.3 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El proyecto se encuentra dentro del Chaco boliviano, cuya región es una unidad geológica ubicada en el centro del continente abarcando una superficie aproximada de un millón de Km², siendo su ecosistema dinámico y frágil y sobre todo seco

El clima de la región se caracteriza por la formación de varios microclimas tanto en el Chaco Subandino como en el pie de monte. Según la zona, el promedio de precipitaciones fluctúa entre 600 y 900 mm anuales, pero existen años de extrema sequía cuando la precipitación llega a los 400 mm y años lluviosos que llega hasta 1.400 mm en algunos lugares.

La temperatura promedio anual, varía entre 16° y 25°. Durante el invierno soplan fuertes vientos del sur, en verano llega a registrarse una temperatura máxima de 43° en la sombra.

5.4 CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA

La carretera Villamontes - Boyuibe, presenta una carpeta asfáltica de refuerzo de 5 cm de espesor, tanto en la calzada de 7,20 m de ancho y en las bermas de un ancho de 1,50 m a cada lado.

Originalmente esta carretera fue construida con un tratamiento superficial doble (TSD) en la calzada, cuyas bermas en algunos sectores estaban protegidas por tratamiento superficial simple (TSS), imprimación simple y algunos sectores solo recubierto con material natural o tierra vegetal.

5.4.1 CONDICIÓN ACTUAL DE LA VÍA.

El estado en el que se encuentra hoy en día la vía, son apreciables y evidentes los problemas de la carpeta de rodadura a lo largo de todo el tramo; para lo cual para realizar el mantenimiento a través de la rehabilitación de 2do grado con el recapamiento con refuerzo se deberá realizar algunas mediciones, cuantificación de



fallas, ensayos de deflexiones, suelos, etc. Pero como el tramo es muy largo se deberá proceder a dividir en tramos o secciones homogéneas para poder realizar un mejor análisis y dar una solución por individual a cada tramo.

Los proyectos de rehabilitación son raramente limitados a secciones cortas del camino; estos son normalmente producidos por la necesidad de restaurar secciones largas del camino a estándares aceptables.

Los caminos pavimentados usualmente no son homogéneos en distancias largas. Tanto la geología subyacente, como los materiales utilizados en la construcción de las capas individuales (estructura del pavimento) varían a lo largo del proyecto. Además, un camino incluye una serie de secciones diferentes de varias longitudes, cada una con similar composición y comportamiento en respuesta a las cargas de tráfico.

Estas son caracterizadas generalmente por síntomas similares de deterioro. Estas secciones son conocidas como "secciones homogéneas" y pueden ser tan cortas como unos cientos de metros o tan largas como varios kilómetros.

5.4.1.1 Determinación de Secciones Homogéneas

La clave para investigar el deterioro del pavimento es la identificación previa de estas secciones homogéneas. Una vez identificadas, el camino se divide en una serie de secciones. Secciones con deterioro similar y estructuras de pavimento pueden ser agrupadas para propósitos de investigación detallados.

Identificación de secciones uniformes: La evaluación de los pavimentos permite obtener muy buena información sobre el estado estructural del pavimento y cada una de sus capas, a través de ello es factible determinar cambios en la capacidad estructural de los tramos, los cuales se pueden deber a:

- ❖ Cambio en el tipo de pavimento
- ❖ Deterioro
- ❖ Variación de espesores



❖ Cambio de la subrasante

Características estructurales: Dentro de la información que se obtiene en base a las mediciones, se puede nombrar algunas que son de mucha importancia al momento de caracterizar estructuralmente el estado de un pavimento:

- ❖ Deflexión Máxima
- ❖ Propiedades de la subrasante
- ❖ Propiedades de las capas inferiores

Se ha realizado la sectorización de tramos homogéneos por deflectometría utilizando el equipo deflectómetro de impacto, propiedad de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras); a través de la metodología de las Diferencias Acumuladas y se ha obtenido ocho tramos homogéneos los cuales se muestran en la tabla 5-1 con sus respectivas progresivas de inicio y fin del tramo, como ya se mencionó anteriormente se analiza por separado cada tramo para poder obtener la mejor solución si fuese necesario un recapamiento con refuerzo o solo se intervendrá con la mejora funcional.

Tabla 5-1. Sectorización de "Deflexiones "

Tramo Nº	Progresivas		Longitud (Km)	Observaciones
	Inicial	Final		
1	351+002	357+500	6,50	Villamontes
2	357+500	373+001	15,5	
3	373+001	383+001	10	
4	383+001	400+799	17,8	
5	400+799	414+401	13,6	
6	414+401	417+600	3,2	
7	417+600	430+999	13,4	
8	430+999	449+000	18	Boyuipe

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

Una vez dispuesta la sectorización se realizara el análisis estructural para cada uno de los tramos y se obtendrán las soluciones individuales.

NOTA. Cabe señalar que para el presente trabajo se realizara el análisis estructural para el tramo N° 5 de la carretera Villamontes – Boyuibe; porque de acuerdo a deflexiones obtenidas con el equipo deflectómetro de impacto, este tramo es el más



crítico ya que se presentara las deflexiones más elevadas en promedio de 816 um. De acuerdo a la clasificación de estas se consideran deflexiones elevadas aquellas que superen en valor de 700 um y bajas menores a 700um, razón suficiente para afirmar que se manifiesta la deficiencia estructural por lo que se tendrá que intervenir con la rehabilitación inmediata. Para ello se pretende utilizar refuerzo estructural del tipo flexible o rígido, los cuales serán las el punto de partida como alternativas de rehabilitación para el tramo en estudio.

Los datos de sectorización de las deflexiones del tramo N°5 se encuentran en el anexo No 1.

5.4.2 Evaluación superficial del pavimento.

En la evaluación deberá considerarse tanto la condición estructural como la funcional. La primera dice la relación con los defectos que estructuralmente contribuyen al deterioro del pavimento, la segunda valora cuan bien se comporta un pavimento para satisfacer los requerimientos de los usuarios.

En base a los resultados obtenidos mediante las mediciones realizadas, las cuales consisten en un inventario de deterioros superficiales del pavimento a objeto de identificar el tipo de deterioro, cuantificar, localizar y apreciar la severidad de los mismos. También se ha estudiado su condición estructural, mediante mediciones de deflexiones con deflectómetro de impacto.

Sin embargo al momento de inicio de obras se deberá cuantificar y ubicar algunas reparaciones previas necesarias antes de la colocación de la capa de refuerzo, con el fin de sanear la estructura del pavimento y prepararlo para recibir el refuerzo. A continuación se describen el estado de las más relevantes:

5.4.2.1 Calidad de la rodadura (IRI)

La calidad de rodadura es una indicación de la regularidad de la carretera Para esta evaluación se realizaron las mediciones del IRI (Índice de Regularidad Internacional),



utilizando el equipo Rugosimeter; propiedad de la ABC, en forma continua y a lo largo de todo el tramo, en la huella derecha tanto en el carril de ida así como de vuelta.

La Calidad de la regularidad de la vía es un parámetro importante que indica la condición de la misma y las necesidades de conservación, los valores relacionados se detallan en términos de regularidad IRI (Índice de Rugosidad Internacional) (m/km) y se asignara por clase de carretera, los datos para cada tipo de superficie de rodadura, pavimentos asfálticos, de hormigón y de carreteras sin sellar se definen en términos de cuatro medidas cualitativas (buena, regular, pobre y deficiente), para los pavimentos asfálticos se han definido los siguientes rangos de IRI;

Tabla 5-2. Rangos de Rugosidad IRI

Clase de Carretera	Calidad de Rodadura IRI (m/km)			
	Buena	Regular	Mala	Muy mala
Red Vial Fundamental (Primaria)	IRI < 3	3 < IRI < 5	5 < IRI < 7	IRI > 7

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

De la sectorización realizada se tienen los valores de IRI medidos y se encuentran en el siguiente cuadro:

Tabla 5-3. Cuadro "Condición IRI"

Tramo No	Progresivas		Longitud (Km.)	IRI (m/km)	Condición
	Inicial	Final			
1	351+002	357+500	6,5	2,44	Buena
2	357+500	373+001	15,5	2,1	Buena
3	373+001	383+001	10	2,23	Buena
4	383+001	400+799	17,8	2,03	Buena
5	400+799	414+401	13,6	2,47	Buena
6	414+401	417+600	3,2	2,33	Buena
7	417+600	430+999	13,4	1,83	Buena
8	430+999	449+000	18	2,09	Buena
Total			98	2,19	Buena

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

Los valores obtenidos en la medición del proyecto están en promedio 2.19 m/km, es decir la calidad es Buena.



5.4.2.2 Deterioro superficial – Condición capa de rodadura.

Este parámetro está modelizado a partir de las formas de deterioro, la condición de la capa puede ser definida por una medida cualitativa, por ejemplo, nueva, buena, regular, pobre, deficiente, etc. Que representan las diferentes formas de deterioro. La diferencia entre las formas de deterioro depende si la capa de rodadura es bituminosa, de hormigón o sin sellar.

Para cada una de las clases de superficie pavimentada, se puede definir el número de medidas cualitativas y sus nombres. Entonces para cada medida cualitativa y para cada una de las clases de carreteras se pueden definir los valores medios de las formas relevantes de deterioro. Un grupo de datos detallados puede ser definido para todas las clases de carreteras o se puede especificar un grupo diferente para cada clase de carretera individualmente.

Valores de deterioro predefinidos para condición de la superficie - bituminosa, se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5-4. "Deterioro para condición de superficie bituminosa"

Forma de Deterioro	Unidad	Condición de la Capa de Rodadura				
		Nueva	Buena	Regular	Pobre	Deficiente
Fisuración	%	0	0	5	15	25
Desprendimiento del Árido	%	0	1	10	20	30
Baches	No/Km	0	0	0	5	50
Rotura de Bordes	m ² /Km	0	0	10	100	300
Profundidad media de Rodera	mm	0	2	5	15	25

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras.

Estos valores son los parámetros con los cuales se realiza la comparación de las mediciones de los deterioros realizadas en la red vial fundamental, con superficie de rodadura bituminosa.

En términos generales se entenderá por deterioro de pavimentos a una serie de manifestaciones superficiales de capa de rodadura, haciendo que la circulación vehicular sea menos segura, confortable y que los costos de operación sean mayores.



Cuando se producen daños que se manifiestan superficialmente en forma de pérdida de geometría, deterioro en el rodado u otros, deben analizarse cuidadosamente las causas de falla que los originan. En términos generales se pueden especificar cinco tipos:

- ❖ Diseño insuficiente de la estructura
- ❖ Inestabilidad de los terraplenes
- ❖ Deficiencias constructivas
- ❖ Solicitaciones no previstas
- ❖ Inadecuada Conservación

5.4.2.3 Ahuellamiento (Roderas).

El ahuellamiento o deformación transversal del pavimento es otro de los parámetros fundamentales de la metodología de evaluación de pavimentos. Por definición, ahuellamiento son las irregularidades del perfil transversal del camino asociadas a la acción del tránsito y producto de las deformaciones plásticas de las distintas capas de la estructura y de la subrasante.

Dadas las características de la estructura del pavimento, las deformaciones por ahuellamiento son escasas, la magnitud leve y no se pudo identificar con precisión un sector muy crítico.

Tabla 5-5. Cuadro "Ahuellamiento (mm)"

Tramo No	Progresivas		Longitud (Km.)	Profundidad (mm)	Condición
	Inicial	Final			
1	351+002	357+500	6,5	9,89	Regular
2	357+500	373+001	15,5	9,99	Regular
3	373+001	383+001	10	9,75	Regular
4	383+001	400+799	17,8	10,36	Regular
5	400+799	414+401	13,6	10,61	Regular
6	414+401	417+600	3,2	11,95	Regular
7	417+600	430+999	13,4	11,35	Regular
8	430+999	449+000	18	11,95	Regular
Total			98	10,73	Regular

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras.



Los ahuellamientos en el proyecto tienen valores de 10.73 mm que dan una condición regular.

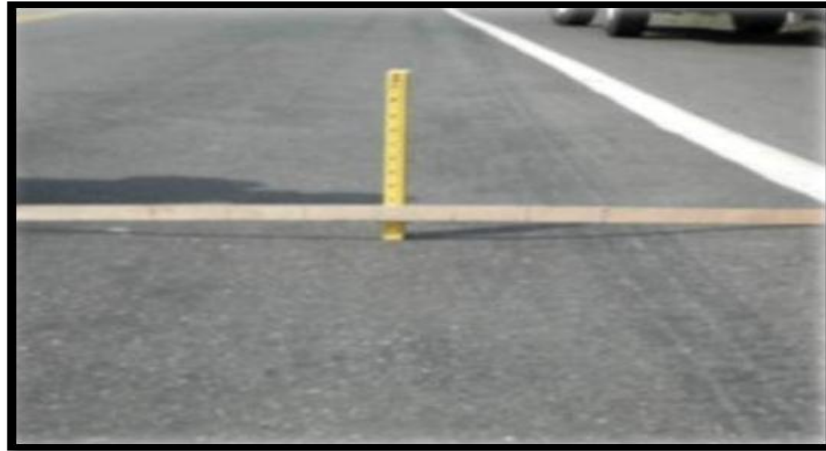


Imagen 5-1 Figura de ahuellamientos. Fuente elaboración propia

4.4.2.4 Fisuración.

La condición superficial se determina a través de la observación y registro de los tipos específicos de daños y sus niveles de severidad y extensión, que se localicen en la superficie de rodadura.

La frecuencia de estas fallas es escasa, no obstante la magnitud de ellas es de moderada a severa y la localización varía entre el carril izquierdo, carril derecho, o en ambos carriles. A continuación, se muestran fotografías de este tipo de fallas.



Imagen 5-2 de fisuración. Fuente elaboración propia



Se presentaron este tipo de fallas en algunos sectores, y la causa probable de estas grietas está identificada como asentamientos en los accesos y salidas de los puentes.

A continuación se muestra el cuadro los porcentajes de fisuración que se registró en cada uno de los ocho tramos de la carretera mencionada anteriormente.

Tabla 5-6. Cuadro "Fisuración (%)"

Tramo No	Progresivas		Longitud (Km.)	Ancho	Área (m2)	Fisuras (m2)	%	Condición
	Inicial	Final						
1	351+002	357+500	6.50	7.20	46,785.60	12,530.51	26.78	Deficiente
2	357+500	373+001	15.50	7.20	111,607.20	36,882.66	33.05	Deficiente
3	373+001	383+001	10.00	7.20	72,000.00	0.00	0.00	Buena
4	383+001	400+799	17.80	7.20	128,145.60	516,78	0,53	Buena
5	400+799	414+401	13.60	7.20	97,934.40	16,397.06	12,8	Regular
6	414+401	417+600	3.20	7.20	23,032.80	0.00	0.00	Buena
7	417+600	430+999	13.40	7.20	96,472.80	28,266.46	29.30	Deficiente
8	430+999	449+000	18.00	7.20	129,607.20	33,905.64	26.16	Deficiente
Total			98.00				16.08	Pobre

Fuente Administradora Boliviana de Carreteras.

La frecuencia de estas grietas es escasa, la magnitud moderada y se localizaron estas grietas en sentido longitudinal en el centro de los carriles o próximo a las bermas.

Los valores de la fisuración total (longitudinales y transversales) están en el orden del 16 %.

5.4.2.5 Bacheos y Parcheos, sello de grietas.

Corresponde a aéreas donde se ha realizado la remoción y reemplazo del pavimento original. La intervención puede ser superficial solo a nivel de la capa asfáltica mediante "Parcheo", o una intervención que involucre capas subyacentes mediante "Bacheo".

En todo el tramo la magnitud de las áreas reparadas con bacheo superficial, es muy escasa. Salvo algunos lugares puntuales donde estos trabajos son muy frecuente. Por otra parte, no se pudo identificar sectores donde se haya realizado trabajos de sello de grietas.



Se desconoce la causa de estas reparaciones (bacheo superficial). No obstante, por la magnitud se presume que haya sido el principio de una falla de piel de cocodrilo moderada.

5.4.2.6 Baches.

Desintegración total de la carpeta asfáltica que deja expuestos los materiales granulares lo cual lleva al aumento del área afectada y al aumento de la profundidad debido a la acción del tránsito. Dentro de este tipo de deterioro se encuentran los ojos de pescado que corresponden a baches de forma redondeada y profundidad variable, con bordes bien definidos que resultan de una deficiencia localizada en las capas estructurales.



Imagen 5-3 Figura bacheos: Fuente elaboración propia

Tabla 5-7. Cuadro “baches (No/Km)”

Tramo No	Progresivas		Longitud (Km.)	Área (m2)	Área Equiv.(m2)	Baches Equivalentes	Condición
	Inicial	Final					
1	351+002	357+500	6.50	4.00	0.47	9.00	Pobre
2	357+500	373+001	15.50	6.00	0.47	13.00	Pobre
3	373+001	383+001	10.00	0.00	0.47	0.00	Buena
4	383+001	400+799	17.80	1.00	0.47	2.00	Buena
5	400+799	414+401	13.60	1.00	0.47	2.00	Buena
6	414+401	417+600	3.20	0.00	0.47	0.00	Buena
7	417+600	430+999	13.40	2.00	0.47	4.00	Buena
8	430+999	449+000	18.00	2.00	0.47	4.00	Buena
Total			98.00				

Fuente Administradora Boliviana de Carreteras.



5.5 Evaluación Estructural del Pavimento

Para determinar la capacidad estructural del pavimento, se realizaron mediciones de deflexiones con el Deflectómetro de impacto FWD-1 (marca PHOENIX, tipo PRI2100 Propiedad de la Administradora Boliviana de Carreteras), sobre la calzada de la carretera en la huella derecha del carril de ida a cada doscientos (200) metros y luego en el carril de retorno también cada 200 metros aproximadamente, de tal manera que entre una y otra medida hubiera 100 m. de distancia alternadamente.

Para toda la serie de mediciones se utilizó el equipo FWD provisto con un total de nueve geófonos con separación entre uno y otro de; 0, 200, 305, 457, 610, 914, 1524, 1600, 1700 mm; para registrar el cuenco de deflexión producido por la aplicación de una fuerza aproximada de 40 kN sobre la superficie del pavimento.

El equipo deflectómetro de impacto utilizado para realizar la medición de deflexiones del tramo en estudio se muestra a continuación en la siguiente imagen.



Imagen 5-4 Deflectómetro de impacto FWD-1 (tipo PRI2100) Fuente ABC.



A continuación se muestra el detalle del plato de carga del deflectómetro de impacto.

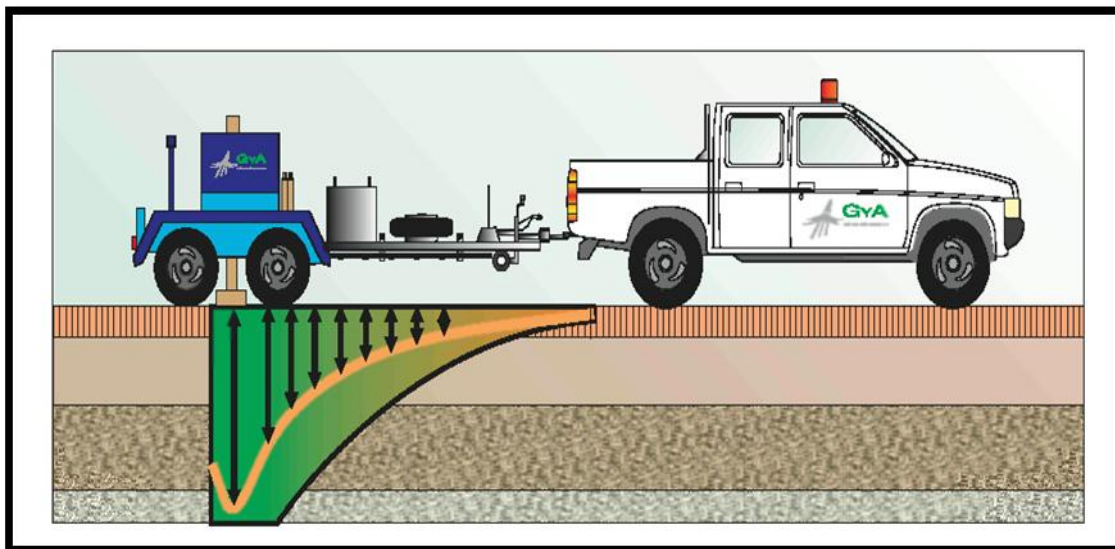


Figura 5-1 Plato de carga de 40 KN Deflectómetro de impacto

Es importante aclarar que no se realizaron mediciones cuando el punto de medición coincidía con deformaciones, agrietamientos.

En la tabla siguiente se muestran los valores medios de las deflexiones medidas en el geófono que se encuentra por debajo del plato de carga, con la cual se puede medir la deflexión de toda la estructura del pavimento, donde se han considerado como deflexiones altas cuando el Do es mayor a 700 um y bajas cuando las deflexiones en el Do sean menores a 700 um.

Tabla 5-8. "Condición Estructural (Deflexiones)"

Tramo No	Progresivas		Longitud (Km.)	Do	Deflexión
	Inicial	Final			
1	351+002	357+500	6.50	705.00	Alta
2	357+500	373+001	15.50	638.65	Baja
3	373+001	383+001	10.00	732.10	Alta
4	383+001	400+799	17.80	578.50	Baja
5	400+799	414+401	13.60	816.00	Alta
6	414+401	417+600	3.20	645.70	Baja
7	417+600	430+999	13.40	618.58	Baja
8	430+999	449+000	18.00	645.14	Baja
Total			98.00		

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras



Para el cálculo del refuerzo estructural fueron suprimidas algunas deflexiones consideradas demasiado elevadas (deflexión mayor a 1000 μm) con respecto a las deflexiones del tramo y/o subtramos, de no ser depuradas estas deflexiones se estaría sobre dimensionando el refuerzo.

5.5.1. Patologías o fallas que implican el deterioro estructural (Tramo N° 5).

Como se mencionó anteriormente se realiza el análisis estructural del tramo N°5 de la carretera Villamontes – Boyuibe. Por ser el tramo más crítico de acuerdo a los resultados de las deflexiones obtenidas por el deflectómetro de impacto. Además se deberá evaluar la superficie de rodadura ya que ciertas patologías o fallas pueden aportar para que se produzcan fallas estructurales en el pavimento flexible.

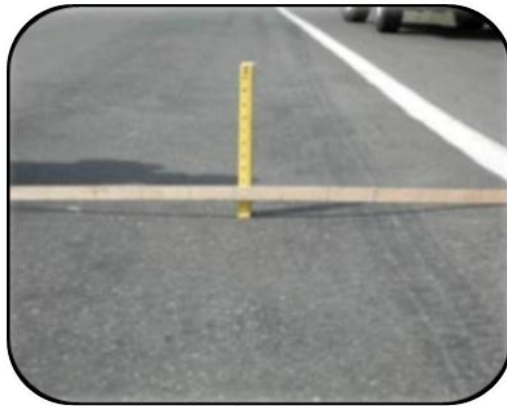
De lo mencionado anteriormente para evidenciar las diferentes patologías encontradas en la superficie de rodadura del pavimento del tramo en estudio. Se ubicó y se hizo un registro de la ubicación y además se clasificó según el tipo de severidad, además del registro fotográfico las cuales se mostraran seguidamente.

El tramo N°5 tiene una longitud de 13,6 km. Progresiva 400+799 – 414+401, a lo largo de todo el tramo, se realizó la cuantificación y registros de las fallas más importantes, se tomaron fotografías para tener un detalle fotográfico además de la ubicación correspondiente.

Entre los más comunes e importantes, tenemos a los siguientes tipos de fallas que aumentan o aligeran el deterioro estructural los cuales son los siguientes:

1. Ahuellamiento.

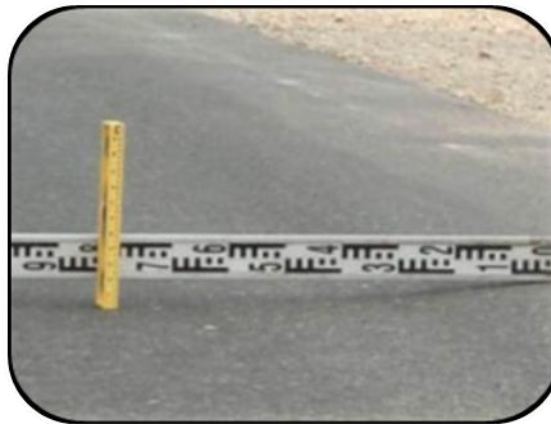
Depresión longitudinal continua en zonas localizadas, generalmente en la trayectoria de circulación de las llantas del vehículo, la cual puede generar levantamientos en las zonas adyacentes a lo largo de la depresión.



Ahuellamiento 20 mm
(prog 400+799)



ahuellamiento 15 mm
(prog 403+457)



Ahuellamineto 20 mm
(prog 407+234)

Las causas más probables de este tipo de deterioro son: cargas de tránsito superiores en magnitud y frecuencia a las utilizadas para el diseño de la estructura de pavimento; espesor de pavimento insuficiente; compactación o calidad deficiente de la base.

2. Fisuras longitudinales por fatiga.

Corresponden a fisuras predominantemente paralelas al eje de la vía y localizadas en áreas sujetas al tránsito vehicular (huellas del tránsito). El fisuramiento se inicia en la superficie de las capas asfálticas y evoluciona en sentido descendente.



Fisuras finas en la huella de rodamiento < 6 mm (prog 402+456)



Fisuras abiertas y con cierta frecuencia se encuentran ramificadas. (prog 408+345)



Fisuras muy ramificadas y/o muy abiertas. Bordes defisuras ocasionalmente degradados (prog 410+345)

Las causas más comunes de este tipo de deterioro son los altos esfuerzos horizontales de tensión producidos por las llantas de los vehículos pesados, así como una baja rigidez de la capa asfáltica superior, a causa de las altas temperaturas superficiales

3. Fisuras piel de cocodrilo

Corresponde a una serie de fisuras interconectadas que se generan formando polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente localizadas en áreas sujetas al tránsito vehicular. El fisuramiento se inicia en la parte inferior de las capas asfálticas



donde los esfuerzos y las deformaciones de tensión producto de las cargas repetidas de tránsito, alcanzan su mayor magnitud.



Formación de mallas grandes (>500mm), con fisuras finas, sin pérdida de material (prog 401+345)



Presencia de mallas más densas (<500mm), con pérdida ocasional de material, desprendimiento y ojos de pescado en formación (prog 413+234)



Presencia de mallas densas con fisuras muy abiertas y fragmentos separados (<200mm), con pérdida ocasional y/o generalizada de material. (prog 414+234)

La causa principal de estas fisuras es la fatiga de las capas asfálticas sometidas a repeticiones de cargas en un mismo sitio, superiores a las permisibles. Otra causa puede ser la insuficiencia estructural del pavimento.



5.5.2 Situación prevista para la intervención de la rehabilitación.

Además de lo citado anteriormente para la división en subtramos se han considerado; el aspecto visual de la carretera, la rugosidad del pavimento y los espesores de la estructura del pavimento del tramo en estudio.

De acuerdo a tanto las mediciones realizadas como la inspección visual detallada, en el aspecto de regularidad longitudinal la carretera Villamontes – Boyuibe presente de condición buena con un IRI promedio igual a 2,19 m/km., respecto al tramo N° 5 presente con un IRI igual a 2,47 m/km., lo cual clasifica al tramo en el aspecto de regularidad longitudinal de calidad buena., con relación al deterioro en cuanto a la fisuración tanto longitudinal como piel de cocodrilo manifieste con un valor promedio del 16 % en toda la carreta, respecto al tramo N° 5 presentes con un valor 12,8 %, lo cual clasifica a la superficie de la capa de rodadura de condición regular.

De acuerdo a las deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto para toda la carretera se realizó la sectorización de tramos homogéneos de los cuales se obtuvo ocho tramos, el tramo N° 5 es el que presenta las deflexiones más elevadas con valores promedios de 800 um que se considera de valor elevado. Por lo que se pone en manifiesto la deficiencia estructural y causa de esto se tiene que intervenir con la rehabilitación con refuerzos estructurales de los cuales se analizaran los refuerzos de Concreto asfáltico y Hormigón Simple como alternativas de rehabilitación para el tramo N° 5 de la carretera Villamontes – Boyuibe.

Se estima que después de la intervención de la Rehabilitación las condiciones superficiales y estructurales del tramo, especialmente la rugosidad y la adherencia mejoren la serviciabilidad del tramo, y prolonguen la vida útil por un lapso de aproximadamente de unos 10 años o mayor.



5.6 Determinación del Módulo Resiliente de la subrasante (M_R); Módulo Efectivo del pavimento (E_p); por Retroanálisis modular por deflexiones.

Módulo resiliente. El concepto de Módulo Resiliente se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables en toda la estructura del pavimento.

Módulo efectivo del pavimento. Es un valor obtenido de campo de la contribución estructural del pavimento existente. Su cálculo requiere un módulo resiliente de la subrasante y medición de deflexiones en nuestro caso obtenidas con el deflectómetro de impacto (FWD).

El método de diseño de estructuras de pavimentos propuesto por AASHTO, incorpora al módulo resiliente como parámetro representativo de la capacidad de soporte del suelo de fundación del camino. Para el desarrollo del modelo de comportamiento de los pavimentos flexibles.

5.6.1 Método de retroanálisis propuesto por AASHTO

Este método, permite determinar el módulo resiliente de la subrasante (M_R) y el módulo efectivo del pavimento (E_p), datos que pueden ser luego utilizados en la evaluación de la capacidad estructural del pavimento. En este método el pavimento se modela como un conjunto de dos capas, una correspondiente a todas las capas sobre la subrasante y otra correspondiente a la subrasante. Para explicar el procedimiento de retroajuste modular propuesto por AASHTO nos apoyaremos en la siguiente figura:

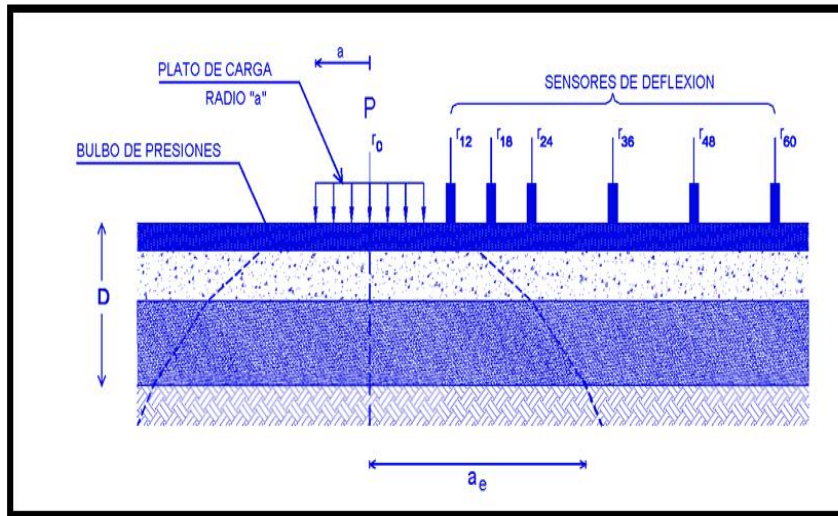


Figura 5-2. Esquema de retroanálisis de deflexiones (guía AASHTO 93)

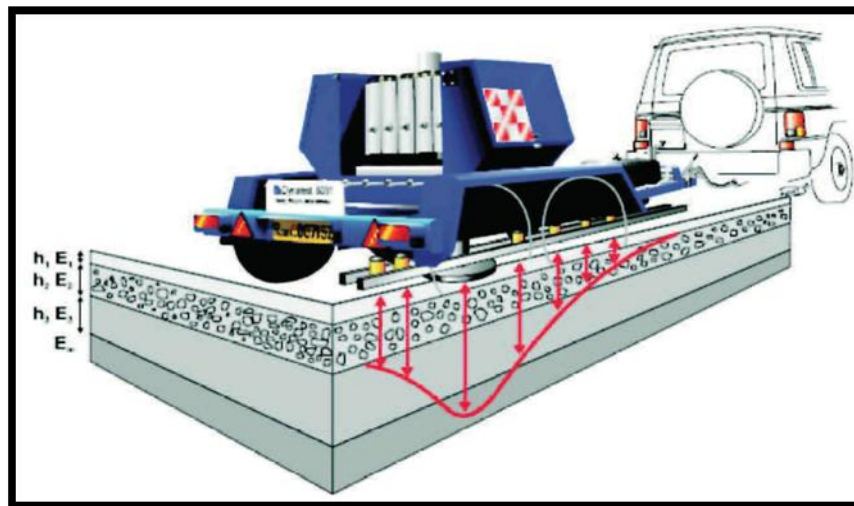


Figura 5-3. Esquema medición de deflexiones con deflectómetro de impacto

5.6.1.1 El Módulo Resiliente de la subrasante, se calcula usando la siguiente ecuación:

$$M_R = \frac{0.24 \cdot P}{r \cdot d_r} \quad \text{Ecuación (5-1)}$$

Dónde:

M_R = Módulo Resiliente retrocalculado



P = Carga aplicada

dr = Deflexión a la distancia r medida desde el centro de la carga

r = Distancia desde el centro de carga

El uso de la ecuación anterior su uso debe considerar las siguientes dos condiciones:

- ❖ En primer lugar, la deflexión debe ser medida a una distancia suficientemente alejada del plato de carga como para que esta deflexión se deba sólo a la deformación en la subrasante y sea independiente del efecto de las capas superiores, y además se pueda considerar la carga aplicada sobre el plato como una carga puntual que valide el uso de la ecuación anterior.
- ❖ Por otro lado, y en sentido contrario, la distancia no debe ser muy grande ya que las deflexiones podrían ser muy pequeñas y por lo tanto muy difíciles de medir con la exactitud necesaria.

La distancia mínima a utilizar en la ecuación (5-1), debe cumplir con la siguiente condición: $r \geq 0.7 a_e$

Donde:

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2} \quad \text{Ecuación (5-2)}$$

Donde:

a_e = radio del bulbo de tensión en la interface pavimento subrasante

a = radio del plato de carga

D = espesor total del pavimento por encima de la subrasante

E_p = módulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante



M_R = módulo resiliente de la subrasante

5.6.1.2 Módulo efectivo del pavimento

Si el módulo resiliente de la subrasante y el espesor total de todas las capas que están ubicadas por encima de la subrasante son conocidas o asumidas, el módulo efectivo de toda la estructura del pavimento puede ser determinado de las deflexiones medidas en el centro del plato de carga usando la siguiente ecuación:

$$d_o = 1.5pa \left(\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D^3}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right) \quad \text{Ecuación (5-3)}$$

Donde:

d_o = deflexión medida en el centro del plato de carga y ajustada a una temperatura de 20°C.

p = presión en el plato de carga

a = radio del plato de carga

D = espesor total de las capas del pavimento por encima de la subrasante

M_R = módulo resiliente de la subrasante

E_p = módulo efectivo de todas las capas del pavimento que están por encima de la subrasante.

El proceso antes descrito se puede automatizar mediante programas computacionales que siguen el proceso iterativo ilustrado en el diagrama de flujo contenido en la Figura 5-4.

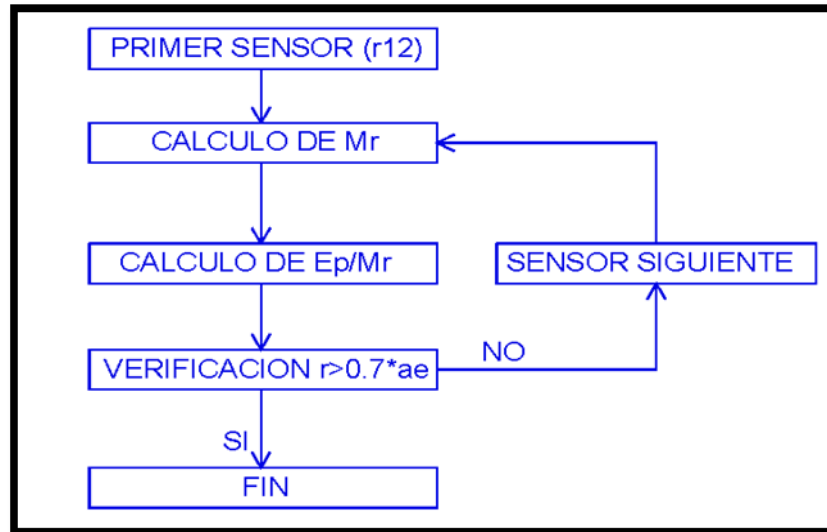


Figura 5-4 Algoritmo del método de retroanálisis de deflexiones

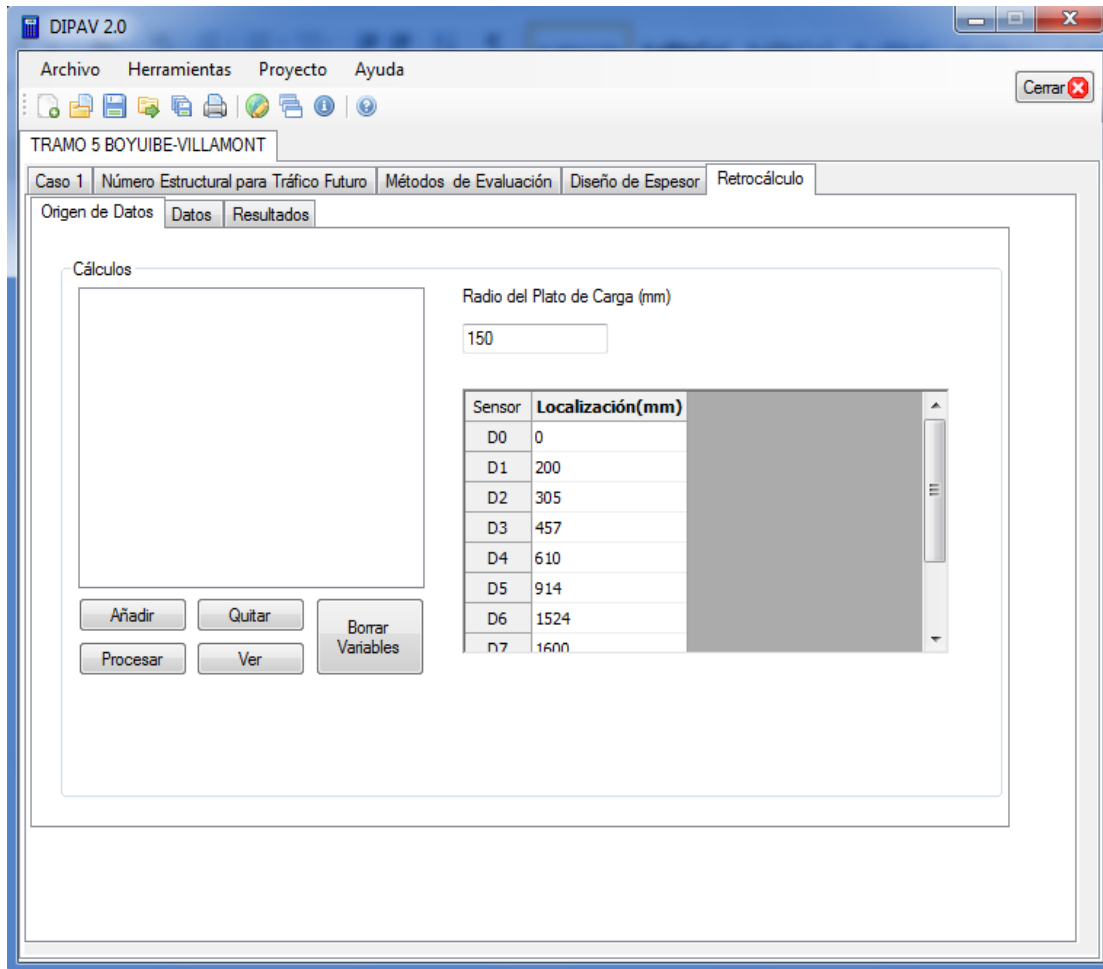
Para realizar el retroanálisis del cuenco de deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto se hizo uso del paquete DIPAV. 2 que se basa en la Guía AASHTO 93 y con dicho paquete se determinó los módulos resilientes de la subrasante y módulos efectivos del pavimento.

A continuación se muestran gráficas del uso del programa DIPAV.2 (Creado por el Instituto Boliviano del Hormigón) para realizar el retroanálisis y obtención de los parámetros estructurales nombrados anteriormente para el pavimento flexible del tramo en estudio.

Las planillas de los resultados de las deflexiones y resultados del retroanálisis se muestran en el anexo 1.



Fig. 5-5 Ingreso de datos (distancias de geófono a geófono) PROGRAMA DIPAV 2.



Fuente: Elaboración propia

Las distancias de la separación de geófono a geófono son las siguientes:

0, 200, 305, 457, 610, 914, 1524, 1600, 1700, respectivamente con las cuales los sensores miden la deflexión en toda la estructura del pavimento.



Fig. 5-6 Datos de carga y cuenco de deflexiones PROGRAMA DIPAV 2.

The screenshot shows the DIPAV 2.0 software interface. The main window title is "DIPAV 2.0". The menu bar includes "Archivo", "Herramientas", "Proyecto", and "Ayuda". The current project is "TRAMO 5 BOYUIBE-VILLAMONT". The "Datos" tab is active, showing input fields for:

- Espesor Total del Pavimento [mm]: 520
- Factor de Corrección del Módulo Resiliente, C: 0.33
- Espesor Existente CA [mm]: 50
- Nro. de Pruebas: 66
- Temperatura: 20

Buttons for "Confirmar" and "Exportar a Excel" are visible. Below the input fields is a table with the following data:

Utilizar	Carga(N)	Temperatura(°C)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
<input checked="" type="checkbox"/>	41437.44	23	500	360	292	212	133	67	40	31	27	
<input type="checkbox"/>	37022.94	31	1074	781	625	439	274	140	85	60	50	
<input type="checkbox"/>	38357.1	23	1006	735	651	440	270	122	77	58	48	
<input type="checkbox"/>	36218.52	31	1000	738	606	451	292	154	96	67	49	
<input checked="" type="checkbox"/>	38572.92	23	902	715	541	336	196	98	65	52	35	
<input checked="" type="checkbox"/>	38268.81	31	771	552	433	291	167	76	47	38	26	
<input checked="" type="checkbox"/>	38160.9	23	904	634	499	343	204	96	61	42	37	
<input checked="" type="checkbox"/>	41054.85	31	460	321	250	171	95	43	27	21	17	
<input checked="" type="checkbox"/>	38219.76	31	874	618	488	340	215	119	77	58	48	
<input checked="" type="checkbox"/>	42957.99	23	489	352	284	209	134	76	54	42	35	
<input checked="" type="checkbox"/>	38631.78	31	842	622	499	358	239	150	101	70	58	
<input checked="" type="checkbox"/>	42516.54	23	443	333	270	204	132	77	52	41	35	
<input checked="" type="checkbox"/>	39779.55	31	842	586	431	277	159	85	57	43	34	

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el módulo resiliente de diseño con retrocálculo, a partir de ensayos no destructivos, requiere del factor de ajuste C, para hacerlo consistente con el valor que representa la subrasante.

Un valor de 0.33 es recomendado para el factor de ajuste C; con este, entonces, se ajustan los valores del módulo resiliente obtenidos por retrocálculo a los valores del módulo resiliente real de la subrasante.



Fig. 5-7 Resultados obtenidos Módulo resiliente y Módulo efectivo PROGRAMA DIPAV 2.

TRAMO 5 BOYUIBE-VILLAMONT

Caso 1 | Número Estructural para Tráfico Futuro | Métodos de Evaluación | Diseño de Espesor | Retrocálculo

Origen de Datos | Datos | Resultados

Espesor Total del Pavimento [mm] 520 Nro. de Pruebas 66 Temperatura 20
 Factor de Corrección del Módulo Resiliente, C 0.33
 Espesor Existente CA [mm] 50

Confirmar Confirmar Exportar a Excel

Utilizar	Carga(N)	Temperatura(°C)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
<input checked="" type="checkbox"/>	41437.44	23	500	360	292	212	133	67	40	31	27	
<input type="checkbox"/>	37022.94	31	1074	781	625	439	274	140	85	60	50	
<input type="checkbox"/>	38357.1	23	1006	735	651	440	270	122	77	58	48	
<input type="checkbox"/>	36218.52	31	1000	738	606	451	292	154	96	67	49	
<input checked="" type="checkbox"/>	38572.92	23	902	715	541	336	196	98	65	52	35	
<input checked="" type="checkbox"/>	38268.81	31	771	552	433	291	167	76	47	38	26	
<input checked="" type="checkbox"/>	38160.9	23	904	634	499	343	204	96	61	42	37	
<input checked="" type="checkbox"/>	41054.85	31	460	321	250	171	95	43	27	21	17	
<input checked="" type="checkbox"/>	38219.76	31	874	618	488	340	215	119	77	58	48	
<input checked="" type="checkbox"/>	42957.99	23	489	352	284	209	134	76	54	42	35	
<input checked="" type="checkbox"/>	38631.78	31	842	622	499	358	239	150	101	70	58	
<input checked="" type="checkbox"/>	42516.54	23	443	333	270	204	132	77	52	41	35	
<input checked="" type="checkbox"/>	39779.55	31	842	586	431	277	159	85	57	43	34	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla que se muestra a continuación se presenta los parámetros estructurales determinados por el análisis de retrocálculo de deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto. Además se muestra el estado de las capas del tramo en estudio.



Tabla 5-9 (Condición estructural y deflectometría Tramo en estudio)

CUADRO - "ANÁLISIS DEFLEXIONES E ÍNDICES ESTRUCTURALES"																			
RUTA		RVF 001				PROYECTO:				BOYUIBE-VILLAMONTES									
TARIJA			TRAMO:					TRAMO 5			FECHA:						30/05/2012		
TRAMO	LCNG. (Km.)	ESTADO ACTUAL PAV.		DEFLEXIONES (mm)				ÁREA	IDB	DEFLEXIÓN MÁXIMA	CATEGORIZACION (Área y Def.)		CATEGORIZACION (s/IDB)	ÍNDICES ESTRUCTURALES		OBSERVACION ES			
		SUPERFICIE RODADURA	ESP. SUP. RODADUR A (mm)	Do	D30	D60	D90				SUB RASANTE (Deflexiones)	PAVIMENTO (ÁREA)		Mr (Kpa)	Ep (Kpa)				
				0	300	600	900	(mm)	(0.001 mm)	(0.001 mm)			Base /Sub rasante						
DESTINO: VILLAMONTES																			
N°5	13.60	CA	50	816.00	464.10	195.00	101.00	410,88	269.10	816.00	Muy Débil	Malo	Base deficiente	4621	31918.00				
TOTAL:		13.60																	

IDB: INDICE DE DAÑO EN LA BASE

FUENTE: ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS

Mr: MODULO RESILIENTE

Ep: MODULO EFECTIVO



5.7 ANÁLISIS DE TRÁFICO Y PROYECCIÓN

5.7.1 Fuente de datos de tráfico promedio diario.

Para realizar el análisis de tráfico se recurrió a información del conteo de vehículos en las estaciones de Campo Pajoso, Boyuibe, Cruce Macharetí y Sachapera las cuales son puntos de control de la Administradora Boliviana de Carreteras, A continuación se realizó la siguiente configuración de vehículos de acuerdo a la Estadística Vial sugerida por la ABC que se utilizara para el presente trabajo.

Vehículos Livianos:

- ❖ Automóviles
- ❖ Camionetas y Vagonetas Minibuses

Vehículos Buses:

- ❖ Microbuses (dos ejes)
- ❖ Buses Medianos (dos ejes)
- ❖ Buses Grandes (tres ejes)

Vehículos Camiones:

- ❖ Camiones Medianos (dos ejes)
- ❖ Camiones Grandes (dos ejes)
- ❖ Camiones Grandes (tres ejes)
- ❖ Camiones Semirremolque y Camiones Remolque

Los datos de conteo de vehículos y los porcentajes de composición vehicular con la se determinara el porcentaje de tráfico promedio diario anual se encuentra en el anexo N° 5.



La configuración establecida por la ABC se muestra a continuación en la siguiente gráfica:

Fig. 5-8 Detalle de composición vial según la ABC.

Nro.	Código	Clase de Vehículo	Gráfico	Descripción
1	AYV	01. Automóvil, Vagoneta		Automóviles y vagonetas
2	CTA	02. Camioneta		Camionetas tipo "Pick-Up" (Hasta 2 toneladas)
3	MNB	03. Minibus		Minibuses (Hasta 21 pasajeros)
4	MCB	04. Microbus		Microbuses
5	BM	05. Bus Mediano		Buses medianos (Hasta 35 pasajeros)
6	BG	06. Bus Grande		Buses grandes (Más de 35 pasajeros)
7	CME	07. Camión Mediano		Camión Mediano (De 2.5 - 10 Toneladas) [Nomenclatura por Configuración de ejes: 11]
8	CES	08. Camión de Eje Simple		Camiones de Eje Simple (Más de 10 Toneladas) [Nomenclatura por Configuración de ejes: 11]
9	CET	09. Camión de Eje Tandem		Camiones de Eje Tandem (Más de 10 toneladas) [Nomenclatura por Configuración de ejes: 12]
10	CSR	10. Camión Semi-remolque		Camiones con Remolque [Ver Descripción del Tipo de Camiones]
11	CCR	11. Camión con Remolque		Camiones con Semi-Remolque [Ver Descripción del Tipo de Camiones]
12	MT	12. Motocicletas		Motocicletas
13	OV	13. Otros Vehículos		Otros vehículos (Tractores, maquinaria de construcción, etc.)

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras.



Finalmente los resultados del estudio de tráfico realizados en este año con datos adquiridos de las estaciones de control de vehículos de la ABC. Se obtiene el porcentaje de tráfico promedio anual de la composición vehicular de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 5-10
Porcentaje de Tráfico promedio Diario anual

No	TIPO DE VEHÍCULO	% TPDA (2012)
1	Automóviles, Vagonetas	26,82
2	Camionetas	13,51
3	Minibuses	12,99
4	Microbuses	1,9
5	Bus Mediano	2,09
6	Bus Grande	5,21
7	Camión Mediano	6,43
8	Camión de eje Simple	4,01
9	Camión Eje Tándem	4,23
10	Camión Semi Remolque	20,28
11	Camión con remolque	2,23
12	Otros	0,2
	total	100

Fuente: Elaboración propia

5.7.2 Tráfico futuro Proyección.

En vista que el diseño del pavimento de la vía, se basa tanto en el tráfico actual así como en los incrementos de tránsito que se espera utilicen la carretera, resulta necesario realizar las proyecciones de Tránsito Futuro.

En primer lugar resulta necesario determinar el periodo de proyección del tráfico, el cual está en función de la vida útil del pavimento, así como las tasas de crecimiento, las cuales están en función de las tasas de crecimiento demográficas y macroeconómicas.

Para el presente trabajo se adoptara un periodo de proyección de diez años; debido a que se pretende realizar la rehabilitación con la utilización de refuerzos.

Para cuantificar la magnitud del tráfico futuro, existen numerosas metodologías que



permiten realizar las proyecciones del tráfico actual TPDA, considerando el crecimiento del tráfico normal mediante tasas de crecimiento anuales.

Para realizar una proyección del tráfico futuro, se partirá de los datos obtenidos de T.P.D.A considerando la clasificación del mismo de acuerdo al tipo de vehículo.

$$T_e = T_b * (1 + i)^n$$

Dónde:

Te: Tráfico del año inicial de la etapa

Tb: Tráfico del año base

i: Tasa de crecimiento

n: Número de años entre año base y el año inicial de la etapa

Para la proyección de tráfico normal se utilizaron las siguientes tasas de crecimiento para los tres grupos importantes de vehículos:

Vehículos Livianos:	6.5%
Vehículos Buses:	6,5%
Vehículos Camiones:	6,5%

Tabla 5-11. Valores comunes de tasas de crecimiento

Caso	Tasa de Crecimiento
Crecimiento Normal	1% a 3%
Vías Complementarias Saturadas	0% a 1%
Con Tráfico Inducido	4% a 5%
Alto Crecimiento	mayor al 5%

Fuente. Guía AASHTO 93

En la tabla que se muestran a continuación se presenta la proyección del tráfico para un periodo de 10 años para el tramo en estudio.



Tabla 5- 12

Tráfico Proyectado para el periodo de operación

Tasa Adoptada 6,50%

i = 0,065

TPDA 2012 932

Año	Tipo de vehículo												Acumulado
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2012 (%)	26,82	13,51	12,99	1,9	2,09	5,21	6,43	4,01	4,23	20,28	2,23	0,2	100
2012	250	126,83	121,1	17,67	19,5	48,54	59,96	37,34	39,42	189,01	20,76	1,86	932
2013	266,25	135,07	128,98	18,82	20,76	51,69	63,86	39,76	41,99	201,3	22,11	1,99	992,58
2014	283,56	143,85	137,36	20,04	22,11	55,05	68,01	42,35	44,72	214,38	23,55	2,11	1057,1
2015	301,99	153,2	146,29	21,35	23,55	58,63	72,43	45,1	47,62	228,31	25,08	2,25	1125,81
2016	321,62	163,16	155,8	22,73	25,08	62,44	77,14	48,03	50,72	243,15	26,71	2,4	1198,99
2017	342,52	173,76	165,92	24,21	26,71	66,5	82,16	51,15	54,01	258,96	28,45	2,55	1276,92
2018	364,79	185,06	176,71	25,78	28,45	70,82	87,5	54,48	57,52	275,79	30,3	2,72	1359,92
2019	388,5	197,09	188,19	27,46	30,3	75,43	93,18	58,02	61,26	293,72	32,27	2,9	1448,32
2020	413,75	209,9	200,43	29,24	32,27	80,33	99,24	61,79	65,25	312,81	34,37	3,08	1542,46
2021	440,64	223,54	213,45	31,15	34,37	85,55	105,69	65,81	69,49	333,14	36,6	3,29	1642,72
2022	469,28	238,07	227,33	33,17	36,6	91,11	112,56	70,08	74	354,8	38,98	3,5	1749,49
2023	499,79	253,55	242,11	35,33	38,98	97,04	119,88	74,64	78,81	377,86	41,51	3,73	1863,21
2024	532,27	270,03	257,84	37,62	41,51	103,34	127,67	79,49	83,94	402,42	44,21	3,97	1984,32
Acumulado del 2012-2024	4358,7	2211,2	2111,43	308,09	339,93	846,26	1045,47	650,94	687,34	3295,35	362,03	32,5	16249,24

Fuente: Elaboración propia



Tabla 5-13
Tráfico Acumulado para el periodo de análisis y Porcentaje de vehículos cargados

Periodo de análisis: 10 años
Período de análisis: 2012-2022

Tipo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
% Carga Completa	1	1	1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1
Acumulado del 2012- 2024	4358,7	2211,2	2111,43	215,66	237,95	592,38	731,83	455,66	481,14	2306,74	253,42	32,5
% Carga Parcial	0	0	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0
Acumulado del 2012- 2024	0	0	0	92,43	101,98	253,88	313,64	195,28	206,2	988,6	108,61	0

Fuente: Elaboración Propia

Tabla que contiene la composición de los porcentajes del peso de los vehículos para lo cual se adopta un 70 % para vehículos cargados completamente y 30 % por vehículos cargados parcialmente sugerencia estipulada por la ABC.

5.7.3 Cálculo Ejes Equivalentes.

5.7.3.1 Factores Equivalentes de Carga LEF.

De acuerdo al método AASHTO los pavimentos se diseñan para que resistan una determinada cantidad de cargas durante su vida útil, estas cargas son producidas por una variedad de vehículos, de diferentes pesos y cantidad de ejes. Ante esta diversidad y a efectos de cálculo, el método propone el "eje equivalente estándar" cuyo peso patrón es 80 KN.

El factor equivalente de carga LEF es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad ocasionada por una determinada carga de un tipo de eje y la producida por el eje patrón de 18 kips.

Los factores equivalentes de carga de la AASHTO están tabulados en función de cuatro parámetros: tipo de eje (simple, tandem, tridem), índice de serviciabilidad final (2, 2,5 y 3), carga por eje, y número estructural SN del pavimento (de 1 a 6”).



5.7.3.2 Factores de Equivalencia Vehicular

Debido a que la sollicitación de tránsito es producida por una variedad de vehículos, existe la necesidad de transformarlos a ejes equivalente estándar a través del Truck Factor "factor camión" o "factor equivalente vehicular" puesto que lo práctico es hacer aforos vehiculares que aforos de ejes.

Para determinar los Factores de Equivalencia Vehicular (FEV) de los vehículos que solicitan un pavimento, es recomendable realizar un censo de pesos por eje para cada tipo de vehículo de una determinada configuración o aplicar otras metodologías que simulen las cargas que aplican los vehículos en una carretera.

Tabla 5-14

Pesos de vehículos de acuerdo al censo de pesaje establecido por la ABC.

No	TIPO DE VEHÍCULO	PESO VACIO	CARGA ÚTIL	PESO TOTAL
		Ton	Ton	Ton
1	Automóviles, Vagonetas	1,6	-	1,6
2	camionetas (Hasta 2 Ton,)	2	-	2
3	Minibuses (Carga Completa)	2	3	5
3	Minibuses (Carga parcial)	2	1,35	3,35
4	Microbuses (Carga completa)	6	3,2	9,2
4	Microbuses (Carga parcial)	6	1,44	7,44
5	Bus Mediano (Carga completa)	10	5,3	15,3
5	Bus Mediano (Carga parcial)	10	2,39	12,39
6	Bus Grande (Carga completa)	14	5,8	20,8
6	Bus Grande (Carga parcial)	14	3,06	17,06
7	Camión Mediano (2,5 -10 Ton) (Carga completa)	4	5,5	9,5
7	Camión Mediano (Carga Parcial)	4	2,48	6,48
8	Camión de eje Simple (Hasta 10 Ton)	7	11	18
8	Camión de eje Simple (Carga Parcial)	7	4,95	11,95
9	Camión Eje Tándem (10 Ton o más)	10	15	25
9	Camión Eje Tándem (Carga Parcial)	10	6,75	16,75
10	Camión Semi Remolque	19,3	23,7	43
10	Camión Semi Remolque (Carga parcial)	19,3	10,67	29,97
11	Camión con remolque	19	35	54
11	Camión con remolque (Carga parcial)	19	15,75	34,75
12	otros	-	-	-

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras



Tabla 5-15
FACTORES DE EQUIVALENCIA DE ACUERDO AL TIPO DE VEHÍCULO (REF. DE CONCRETO ASFÁLTICO)

No	TIPO DE VEHÍCULO	PESO VACIO	CARGA ÚTIL	PESO TOTAL	PESOS POR EJE								FACTOR DE EQUIVALENCIA				
					EJE DELANTERO		EJES TRASEROS						Para pf = 2,5 y SN = 3				
							EJE 1		EJE 2		EJE 3		DELANTERO	TRASERO 1	TRASERO 2	TRASERO 3	TOTAL Ce
					Ton	kip	Ton	kip	Ton	kip	Ton	kip	Ton	kip	C1	C2	
1	Automóviles, Vagonetas	1,6	-	1,6	0,8	1,8	0,8	1,8		-		-	0,00011	0,00011			0,00022
2	camionetas (Hasta 2 Ton.)	2	-	2	1	2,2	1	2,2		-		-	0,000641	0,00064			0,00128
3	Minibuses (Carga Completa)	2	3	5	2	4,4	3	6,6				-	0,005528	0,02462			0,03014
3	Minibuses (Carga parcial)	2	1,35	3,35	1,34	3	2,01	4,4					0,001623	0,00562			0,00725
4	Microbuses (Carga completa)	6	3,2	9,2	3	6,6	6,2	13,7		-		-	0,025	0,361			0,38586
4	Microbuses (Carga parcial)	6	1,44	7,44	2,43	5,3	5,01	11,1					0,011	0,17			0,18124
5	Bus Mediano (Carga completa)	10	5,3	15,3	5,3	11,7	10	22		-		-	0,208	2,186			2,39411
5	Bus Mediano (Carga parcial)	10	2,39	12,39	4,29	9,5	8,09	17,8					0,096	0,967			1,06316
6	Bus Grande (Carga completa)	14	5,8	20,8	5,5	12,1	15,3	33,7		-		-	0,238	1,081			1,31921
6	Bus Grande (Carga parcial)	14	3,06	17,06	4,51	9,9	12,55	27,7					0,116	0,525			0,64064
7	Camión Mediano (2,5 -10 Ton) (Comp)	4	5,5	9,5	3,2	7,1	6,3	13,9		-		-	0,032	0,388			0,41904
7	Camión Mediano (Carga Parcial)	4	2,48	6,48	2,18	4,8	4,29	9,5					0,007	0,096			0,10363
8	Camión de eje Simple (Hasta 10 Ton)	7	11	18	7	15,4	11	24,2		-		-	0,566	3,22			3,78562
8	Camión de eje Simple (Carga Parcial)	7	4,95	11,95	4,65	10,2	7,3	16,1					0,129	0,66			0,78917
9	Camión Eje Tándem (10 Ton o más)	10	15	25	7	15,4	18	39,7		-		-	0,566	1,994			2,55971
9	Camión Eje Tándem (Carga Parcial)	10	6,75	16,75	4,69	10,3	12,06	26,6					0,154	0,458			0,61223
10	Camión Semi Remolque	19,3	23,7	43	7	15,4	18	39,7	18	39,7		-	0,566	1,994	1,994		4,55391
10	Camión Semi Remolque (Carga parcial)	19,3	10,67	29,97	4,88	10,8	12,54	27,6	12,54	27,6			0,154	0,524	0,524		1,2027
11	Camión con remolque	19	35	54	7	15,4	18	39,7	11	24,2	18	39,7	0,566	1,994	3,22	1,994	7,77402
11	Camión con remolque (Carga parcial)	19	15,75	34,75	4,5	9,9	11,58	25,5	7,67	16,9	12,54	27,6	0,115	0,399	0,79	0,524	1,82754
12	Otros				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia



A continuación se muestra el resumen de los resultados obtenido del análisis de los factores de equivalencia vehicular para todos los tipos mencionados anteriormente.

Tabla 5-16
Coefficientes de conversión (Pav. flexibles)

No	TIPO DE VEHÍCULO	C_e
1	Automóviles, Vagonetas	0,0002208
2	Camionetas (Hasta 2 Ton.)	0,001283
3	Minibuses (Carga Completa)	0,03
3	Minibuses (Carga parcial)	0,007
4	Microbuses (Carga completa)	0,386
4	Microbuses (Carga parcial)	0,181
5	Bus Mediano (Carga completa)	2,394
5	Bus Mediano (Carga parcial)	1,063
6	Bus Grande (Carga completa)	1,319
6	Bus Grande (Carga parcial)	0,641
7	Camión Mediano (2,5 -10 Ton) (Comp)	0,419
7	Camión Mediano (Carga Parcial)	0,104
8	Camión de eje Simple (Hasta 10 Ton)	3,786
8	Camión de eje Simple (Carga Parcial)	0,789
9	Camión Eje Tándem (10 Ton o más)	2,56
9	Camión Eje Tándem (Carga Parcial)	0,612
10	Camión Semi Remolque	4,554
10	Camión Semi Remolque (Carga parcial)	1,203
11	Camión con remolque	7,774
11	Camión con remolque (Carga parcial)	1,828
12	Otros	-

Fuente: Elaboración Propia

5.7.3.3 Ejes Equivalentes Acumulados

El número de ejes equivalentes acumulados $EE_{8,2}$ que solicitaran a la calzada durante "n" (años), para el tramo en estudio, se calculó tomando en cuenta el siguiente periodo de análisis:

2012 – 2012 Periodo de construcción

2013 – 2024 Periodo de servicio

Con la ecuación que se muestra a continuación, es posible determinar $EE_{8,2}$ para cada año.



$$EE_{8.2} = TPDA \times DS \times DC \times FEV \times 365$$

Dónde:

DS = Distribución de tráfico por sentido

DC = Distribución de tráfico por carril

TPDA = Tráfico medio diario anual

FEV = Factor de equivalencia vehicular

Los parámetros que se adoptaran para determinar los ejes equivalentes para todos los tipos de vehículos mencionados anteriormente para el tramo en estudio son:

DS = Factor de distribución direccional; usualmente se considerado igual a **0,5**, ya que el transporte en ambos sentidos es similar;

DC = Factor de distribución por carril; varía según el número de carriles de la calzada en cada dirección. Para un carril por cada sentido de tránsito (caso común en las carreteras de Bolivia): **DC = 0.6**. Para dos carriles por cada sentido fuente ABC.

Con el TPDA acumulado para el periodo de diseño, con los factores de equivalencia vehicular que se determinaron anteriormente se calculara el número de ejes equivalentes acumulados para el tramo en estudio para un periodo de 10 años.



Tabla 5-17
EJES EQUIVALENTES PARA REFUERZO DE CONCRETO ASFÁLTICO.

Período de Análisis : 10 Años

Período de Análisis : 2012-2024

TRAMO : Villamontes Cr Rt 11 - Boyuibe

No	TIPO DE VEHÍCULO	T.P.D.A. PROYECTADO	T.P.A. PROYECTADO	COEFICIENTE DE CONVERSIÓN	NÚMERO DE REPETICIONES
1	Automóviles, Vagonetas	4358,7	1591,58	0,000221	3,52E+02
2	Camionetas (Hasta 2 Ton.)	2211,2	807,42	0,001283	1,04E+03
3	Minibuses (Carga Completa)	2111,43	770,99	0,03	2,31E+04
3	Minibuses (Carga parcial)	-	-	0,007	0,00E+00
4	Microbuses (Carga completa)	215,66	78,75	0,386	3,04E+04
4	Microbuses (Carga parcial)	92,43	33,75	0,181	6,11E+03
5	Bus Mediano (Carga completa)	237,95	86,89	2,394	2,08E+05
5	Bus Mediano (Carga parcial)	101,98	37,24	1,603	5,97E+04
6	Bus Grande (Carga completa)	592,38	216,31	1,319	2,85E+05
6	Bus Grande (Carga parcial)	253,88	92,7	0,641	5,94E+04
7	Camión Mediano (2,5 -10 Ton) (Comp)	731,83	267,23	0,419	1,12E+05
7	Camión Mediano (Carga Parcial)	313,64	114,53	0,104	1,19E+04
8	Camión de eje Simple (Hasta 10 Ton)	455,66	166,38	3,786	6,30E+05
8	Camión de eje Simple (Carga Parcial)	195,28	71,31	0,789	5,63E+04
9	Camión Eje Tándem (10 Ton o más)	481,14	175,69	2,56	4,50E+05
9	Camión Eje Tándem (Carga Parcial)	206,2	75,29	0,612	4,61E+04
10	Camión Semi Remolque	2306,74	842,31	4,554	3,84E+06
10	Camión Semi Remolque (Carga parcial)	988,6	360,99	1,203	4,34E+05
11	Camión con remolque	253,42	92,54	7,774	7,19E+05
11	Camión con remolque (Carga parcial)	108,61	39,66	1,828	7,25E+04
12	Otros	32,5	11,87	-	0,00E+00
				TOTAL	7,04E+06

ESALs = 4224837,49
ESALs = **4,22E+06**



5.8 Dimensionamiento del refuerzo de Concreto Asfáltico para el pavimento flexible del Tramo en Estudio.

El espesor requerido del refuerzo debe responder a esta ecuación:

$$D_{ol} = \frac{SN_{ol}}{a_{ol}} = \frac{(SN_f - SN_{ef})}{a_{ol}}$$

Donde:

SN_f = Estructural para tráfico futuro

SN_{ef} = Número Estructural efectivo

a_{ol} = Coeficiente estructural del refuerzo.

5.8.1 Determinación del Número Estructural para tráfico futuro SN_f .

Con la finalidad de determinar el espesor de refuerzo estructural, a continuación se presentan los parámetros de cálculo.

5.8.2 Índice de Serviciabilidad

Serviciabilidad es la condición de un pavimento para proveer un manejo seguro y confortable a los usuarios en un determinado momento.

En el presente estudio, se consideraron los índices de serviciabilidad inicial para pavimento flexible $P_o = 4,2$ y serviciabilidad final $P_f = 2,5$; conforme recomienda la (Ref.: AASHTO Guía para el diseño estructural de pavimentos.)

5.8.3 Confiabilidad (R)

La selección del nivel apropiado de confiabilidad para el diseño de pavimento está determinada por el deterioro esperado del pavimento; un nivel de confiabilidad alto



implica un pavimento más costoso. Por otra parte un nivel de confiabilidad bajo da como resultado pavimentos económicos pero con mayor costo de mantenimiento.

En nuestro caso se adoptó un nivel de confiabilidad de $R = 85 \%$ ($ZR = - 1,037$) indicado para arterias principales y una desviación estándar combinada de $S_o=0,49$ para pavimento flexible.

5.8.4 Determinación Número Estructural efectivo

El número estructural efectivo (SN_{eff}) es una medida de la capacidad estructural remanente de un pavimento existente. Cuando se diseña una sobre carpeta de concreto asfáltico sobre un pavimento del mismo material, AASHTO recomienda obtener SN_{eff} mediante los tres métodos de evaluación disponibles que a continuación se presentan.

5.8.5 Métodos de Análisis

Existen tres métodos para obtener el número estructural efectivo del pavimento como ser:

- ❖ Método de Análisis de Componentes
- ❖ Método de Ensayo no Destructivo
- ❖ Método análisis de materiales (Ensayos destructivos)

Para determinar el número estructural efectivo del pavimento se hará uso del método de ensayo No Destructivo utilizando el módulo resiliente y módulo efectivo del pavimento determinado por el análisis de retrocálculo por deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto.



5.8.6 Método de Ensayo no Destructivo

Para la determinación de SN_{ef} el método de ensayo no destructivo se basa en asumir la capacidad estructural como una función de su espesor total y rigidez global. Los cálculos para SN_{eff} usan la siguiente ecuación:

$$SN_{ef} = 0.0045D^3\sqrt{E_p}$$

Donde:

D = Espesor Total de todas las capas de pavimento sobre la Subrasante, mm

E_p = Módulo efectivo de las capas del pavimento sobre la Subrasante psi

a) Espesor total de todas las Capas del Pavimento existente

El espesor total de todas las capas de pavimento existente (D) es uno de los datos requeridos. Se introduce directamente y debe incluir el espesor de todas las capas sobre la Subrasante, incluyendo la capa de rodadura.

b) Módulo efectivo del Pavimento Calculado a Partir de Datos de Campo

El módulo efectivo del pavimento (E_p) es un valor obtenido de campo de la contribución estructural del pavimento existente. Su cálculo requiere un módulo resiliente de la Sub rasante y mediciones de deflexiones en nuestro caso obtenidas con el deflectómetro de impacto (FWD). Este "Retrocálculo" se describe con mayor detalle en los párrafos mencionados anteriormente.

Para poder hacer uso de este método además de las deflexiones se necesita conocer los espesores de las diferentes capas del pavimento flexible en estudio y que serán mostrados a continuación en la siguiente tabla



Tabla 5 - 18
Espesores de capas. Tramo en estudio

TRAMO No	PROGRESIVAS		LONG. (Km.)	ESPEJOR ACTUAL DE LA CAPA EN mm				
	DESDE	HASTA		SUPERFICIE DE RODADURA	ESP.SUP. RODADURA (mm)	BASE	SUB BASE	ESPEJOR TOTAL DEL PAV. (mm)
5	400+799	414+401	13.60	CA	50	200	270.00	520.00

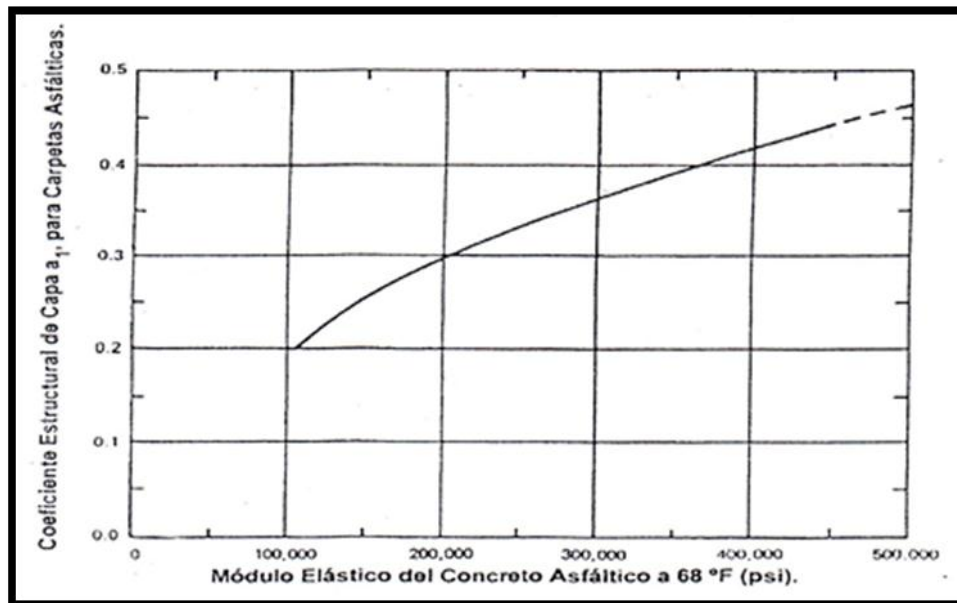
Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

c) Coeficiente estructural del refuerzo de Concreto Asfáltico.

El coeficiente estructural se obtendrá de acuerdo a la siguiente gráfica para lo cual se asumirá un módulo elástico del Concreto Asfáltico igual a 450000 psi de forma de brindar mayor seguridad y resistencia al refuerzo a utilizar y de establecer un espesor moderado.

Fig. 5-9 Gráfica para determinar el coeficiente estructural de capa "a1" en función del módulo elástico del Concreto Asfáltico

$a_1 = 0.44$



Fuente: guía AASHTO 93.



5.8.7 Determinación del Espesor del Refuerzo

Se optara por la elección de 10 años de periodo de diseño para el refuerzo de concreto asfáltico y refuerzo de hormigón ya que se hará un análisis comparativo en 10 años de vida útil para cada refuerzo, sin embargo se puede hacer la selección de más de 10 años en ambos casos y considerando que se trata de sobrecarpetas y no de pavimentos nuevos.

En función a las consideraciones citadas en los acápite anteriores, se determinó un número estructural requerido SN_{req} . Como se podrá apreciar, el valor de cálculo de SN_{req} . Es la diferencia entre el SN_f y S_{Nef} . Este número estructural requerido se calculó en base Método de Ensayo no Destructivo.

5.8.8 Cálculo del número estructural para soportar el tráfico futuro (SN_f):

Luego de analizar cada uno de los parámetros que se necesitan para el dimensionamiento de refuerzos de Concreto Asfáltico se tiene:

Tabla 5-19

Datos para el dimensionamiento del refuerzo de concreto asfáltico

VARIABLES DEFINITIVOS PARA CÁLCULO DEL ESPESOR "TRAMO 5"	VALORES
ESALs.	$W_{18} = 4.22E+6$ ESALs
Confiabilidad	$R = 85\%$ ($ZR = -1.037$)
Desviación estándar	$S_0 = 0.49$
Pérdida de serviciabilidad	$P_o - P_f = 4.2 - 2.5 = 1.7$
Módulo Resiliente M_R	$M_R = 6709.982$ psi
Módulo efectivo E_p	$E_p = 46344.40$ psi
Espesor total del pavimento D	$D = 20.47$ pulg = 520 mm
Coefficiente estructural a_o (refuerzo)	$a_o = 0.44$

Fuente: Elaboración propia

Con los datos mostrados anteriormente se calcula el SN_f ingresando en la ecuación para determinar SN_f o también utilizando el ábaco para pavimentos flexibles propuesta por la guía AASHTO 93:



La fórmula con el que se determina el Número estructural para resistir el tráfico futuro se muestra a continuación:

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN_f + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{0.40 + \frac{4.2 - 1.5}{1094 (SN_f + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

Además se puede usar paquetes computacionales para facilitar el cálculo del número estructural para soportar el tráfico futuro se hará uso del programa AASHTO 93 del autor colombiano Luis Ricardo Vásquez Varela Año 2000. La imagen se muestra a continuación.

Figura 5-10 Determinación del Número estructural SN_f Programa AASHTO 93.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' window with the following data:

- Tipo de Pavimento:** Pavimento flexible, Pavimento rígido
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):** 85 % $Z_r = -1.037$, $S_o = 0.49$
- Serviciabilidad inicial y final:** PSI inicial = 4.2, PSI final = 2.5
- Módulo resiliente de la subrasante:** $M_r = 6709.982$ psi
- Información adicional para pavimentos rígidos:**
 - Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi): []
 - Módulo de rotura del concreto - S_c (psi): []
 - Coefficiente de transmisión de carga - (J): []
 - Coefficiente de drenaje - (Cd): []
- Tipo de Análisis:** Calcular SN, Calcular W_{18}
- Resultados:** $W_{18} = 4.22E6$, **Número Estructural:** $SN = 4.44$
- Buttons: **Calcular**, **Salir**

Fuente: elaboración propia.

Haciendo uso de la fórmula, ábaco y programa AASHTO 93 se determinó el número estructural SN_f para soportar el tráfico futuro dando el siguiente resultado.



$$SN_f = 4.44 \text{ pulg o } 112,776 \text{ mm}$$

5.8.9 Cálculo del número estructural efectivo método NDT (Método no destructivo)

Se determina con el módulo efectivo del pavimento obtenido del retrocálculo de deflexiones y con el espesor total del pavimento la expresión a la que se simplifica es:

$$SN_{ef} = 0.0045D^3\sqrt{Ep}$$

D = 20.47 pulg o 520 mm (espesor total del pavimento a rehabilitar.)

Ep = 46340,40 psi (módulo efectivo del pavimento)

$$SN_{ef} = 3.31 \text{ pulg} = 84 \text{ mm}$$

5.8.10 Calculo del espesor total del refuerzo de concreto asfáltico.

Una vez obtenido el Número estructural para soportar el tráfico futuro y el número estructural efectivo del pavimento y además determinado el coeficiente estructural del concreto asfáltico obtenido del ábaco se calcula el espesor del refuerzo con la siguiente fórmula:

$$D_{ol} = \frac{SN_{ol}}{a_{ol}} = \frac{(SN_f - SN_{ef})}{a_{ol}}$$

$$D_{ol} = \frac{(112,776 \text{ (mm)} - 84 \text{ (mm)})}{0.44} =$$

D_{ol} = 65 mm (Espesor del refuerzo de Concreto Asfáltico para el pavimento flexible del tramo en estudio.



5.9 Dimensionamiento del refuerzo de hormigón para el pavimento flexible del tramo en estudio.

El espesor requerido del refuerzo debe responder a esta ecuación:

$$D_{of} = D_f$$

Donde:

Dof = Espesor requerido del refuerzo de hormigón

Df = Espesor del refuerzo necesario para soportar el tránsito futuro

5.9.1 Determinación del espesor requerido del refuerzo para el tránsito futuro, D_f .

Para determinar el espesor del refuerzo de Hormigón se empleará el método AASHTO, (American Association of Estate Highway and Transportation Officials). El procedimiento determina el espesor del refuerzo de Hormigón para que pueda soportar el paso de un número W18 de ejes equivalentes de 18,000 Lb. (8.20 TN) sin que se produzca una disminución en el índice de servicio (PSI) superior a un cierto valor, el cual se calcula a partir de una serie de medidas en el pavimento (regularidad superficial, agrietamiento, baches, etc.).

La fórmula utilizada por el método es la siguiente:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \times S_o + 7,35 \times \log_{10}(D + 1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 1}{(D + 1)^8}}$$

$$+ (4,22 - 0,32p_t) \times \log_{10} \left[\frac{S_c * C_d [D^{0,75} - 1,132]}{215,63 * J \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c / k)^{0,25}} \right]} \right]$$



Donde:

W_{18} = N° de cargas de 18 kips (80 KN) previstas en su vida útil

Z_R = Abscisa correspondiente a un área igual a la confiabilidad R en la curva de distribución normalizada.

S_0 = Desviación estándar de todas las variables

$D = D_f$ = Espesor del refuerzo de H° para soportar el tráfico futuro en pulgadas

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño

P_t = Serviciabilidad final

$S_c = f_{cd}$ = Módulo de rotura del hormigón en unidades psi

J = Coeficiente de transferencia de cargas

C_d = Coeficiente de drenaje

E_c = Módulo de elasticidad del hormigón en psi

K = Módulo de reacción de la subrasante (Coef. de balasto) en psi/pulg

Con la finalidad de determinar los espesores de refuerzo estructural, a continuación se presentan los parámetros de cálculo de la estructura.

5.9.2 Desviación normal (Z_R)

Este parámetro se encuentra en función del nivel de confiabilidad que se le otorgue al pavimento, para el refuerzo de hormigón consideramos que tendrá un 75 %, este valor se adoptara para no sobredimensionar el refuerzo de hormigón ya que valores más altos de confiabilidad harán que el espesor del refuerzo sea más costoso. Con este dato obtenemos la desviación normal tabla 2-8 del capítulo 2.

Para $R = 75 \%$

$Z_R = -0.764$



5.9.3 Desviación estándar S_o

Para pavimentos rígidos, la AASHTO recomienda adoptar para S_o valores que estén comprendidos entre 0.30 a 0.40, Para el caso donde la variación del tráfico futuro proyectado está considerada, la Guía de Diseño AASHTO recomienda un valor de 0.34. En situaciones donde no está considerada, se recomienda un valor de 0.35.

$S_o = 0,35$ (Para el refuerzo de Concreto Asfáltico).

5.9.4 Pérdida de Serviciabilidad de diseño.

Es la diferencia entre la serviciabilidad inmediatamente después del refuerzo y la serviciabilidad en el momento de la próxima rehabilitación.

La inicial, P_o De acuerdo a la AASHTO ha elaborado una tabla donde se califica a la serviciabilidad inicial.

Tabla 5-20
Valores de Serviciabilidad Inicial

Serviciabilidad Inicial	Condición
0 – 1	Muy Pobre
1 – 2	Pobre
2 – 3	Regular
3 – 4	Buena
4 – 5	Muy Buena

Fuente: Método de Diseño AASHTO-93

En la Guía para el Diseño de Pavimentos AASHTO-93 se recomienda, que para pavimentos rígidos la serviciabilidad inicial debe ser igual $P_o = 4.5$.

La final o Terminal, P_t las recomendaciones de AASHTO para la selección de la serviciabilidad final son:

Volumen Alto (>10.000 TPDA)	3.0-3.5
Volumen Medio (3,000 - 10,000 TPDA)	2.5-3.0



Bajo Volumen (< 3,000 TPDA)

2.0-2.5

En el presente estudio, considerando la importancia de la carretera, se adopta un valor de **pt = 2.5**.

Perdida de serviciabilidad APSI = 2.0

5.9.5 Coeficiente de drenaje Cd.

Depende de dos parámetros: la calidad del drenaje que viene determinada por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada del pavimento y el porcentaje de tiempo a lo largo del año, durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximas a la saturación. Dicho porcentaje depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje, la guía AASHTO define cinco calidades de drenaje de acuerdo a la siguiente tabla 5-21.

El valor del mismo depende de dos parámetros: la calidad del drenaje, que viene determinada por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada del pavimento, y el porcentaje de tiempo a lo largo del año durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad aproximándose a la saturación.

TABLA 5-21
Calidades de Drenaje

CALIDAD DEL DRENAJE	TIEMPO QUE TARDA EL AGUA EN SER EVACUADA
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	(el agua no se evacua)

Fuente: Guía AASHTO 93.

Combinando las variables anteriormente indicadas, se recomienda adoptar para **C_d** los valores indicados en la Tabla 5-22.



TABLA 5-22

Valores del Coeficiente de Drenaje C_d

CALIDAD DEL DRENAJE	PORCENTAJE DE TIEMPO EN EL QUE EL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTO A NIVELES DE HUMEDAD PRÓXIMOS A LA SATURACIÓN			
	MENOS DEL 1%	1 – 5 %	5 – 25 %	MAS DEL 25 %
Excelente	1,25 – 1,20	1,25 – 1,15	1,15 – 1,10	1,1
Bueno	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,0
Mediano	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,9
Malo	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,8
Muy malo	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80 – 0,70	0,7

Fuente: Guía AASHTO 93.

Asumiendo un drenaje de mediana calidad, y que el tiempo de exposición del pavimento con humedades próximas a la saturación de 5 % a 25 % obtenemos el coeficiente:

$$C_d = 1.00$$

5.9.6 Coeficiente de transmisión de cargas: J

El coeficiente de transferencia de carga J es un factor usado en pavimentos rígidos para tener en cuenta la capacidad de la estructura del pavimento para transferir cargas a través de juntas y fisuras. La tabla 5-23 da recomendaciones sobre rangos de coeficientes J para distintas condiciones:

Tabla 5-23 coeficientes de transferencia de carga

Banquina	Concreto Asfáltico		Hormigón Vinculado A Calzada	
	Si	No	Si	No
Mecánica de transferencia de carga				
Tipo de pavimento				
Hormigón simple o armado c/juntas	3,2	3,8 – 4,4	2,5 – 3,1	3,6 – 4,2
Hormigón armado continuo	2,9 – 3.2	-----	2.3 – 2,9	-----

Fuente: Guía AASHTO 93.



De acuerdo a la guía AASHTO 93 recomienda para el uso de refuerzos de Hormigón un coeficiente de transmisión de carga igual a:

$$J = 3.2$$

5.9.7 Módulo rotura del hormigón.

Es un parámetro muy importante como variable de entrada para diseño de pavimentos rígidos en este caso para el refuerzo de hormigón. Es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como resistencia a la flexión por tensión ($S'c$) o Módulo de Ruptura (M_R) normalmente especificada a los 28 días. Los cuales se recomiendan en la tabla 5-24.

Tabla 5-24
Módulo de Ruptura Recomendado

Tipo de Pavimento	MR recomendado	
	MPa	psi
Autopistas	5 MPa	725,2
Carreteras	5 MPa	725,2
Zonas Industriales	4.5 MPa	640.1
Urbanas Principales	4.5 MPa	640.1
Urbanas Secundarias	4.2 MPa	597.4

Fuente: AASHTO 93.

De acuerdo a la tabla mostrada se empleara un concreto con módulo de ruptura de:

$$S'c = 725.2 \text{ psi o } 5 \text{ MPa}$$



5.9.8 Módulo de elasticidad E_c del hormigón

Se recomienda determinarlo de acuerdo con el procedimiento descrito en las normas ASTM C469, o en su defecto, correlacionarlo con otras características del material, como puede ser su resistencia a compresión.

El Módulo de Elasticidad del concreto está íntimamente relacionado con su Módulo de Ruptura. Existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Rotura. El más utilizado es:

$$E = 57000(f'_c)^{0.5}$$

Donde:

E = Módulo elástico del hormigón (psi).

f'_c = Resistencia a la compresión simple del hormigón (psi).

$f'_c = 270 \text{ Kg/cm}^2$

$$E_c = 3,1E6 \text{ psi} = 20000 \text{ MPa}$$

Se adoptó el valor de 270 kg/cm² para la compresión simple del hormigón, ya que es un valor adecuado con resistencia moderada y no muy elevada, además el diseño de pavimentos rígidos según la guía AASHTO 93, recomienda no utilizar valores inferiores a los 180 kg/cm², y pavimentos que requieran mayores resistencias hasta los 310 kg/cm², por lo que para el tramo en estudio se consideró un valor moderado de 270 kg/cm². De manera de no hacer al pavimento muy costoso en relación al costo.

5.9.9 Ejes equivalentes W18.

Para poder determinar los ejes equivalentes para el refuerzo de Hormigón se hace uso de los coeficientes de factor de equivalencia de carga y factor de vehículo que se



emplean para el cálculo de pavimentos rígidos, el cálculo se muestra en el anexo N°4 análisis de tráfico se obtuvo:

$$W18 = 6.1E+6 \text{ ESALs (Para refuerzo de Hormigón)}$$

5.9.10 Valor estático efectivo k debajo del pavimento existente.

Este se puede determinar por alguno de estos métodos:

Cálculo del k efectivo dinámico determinado por retroajuste modular del cuenco de deflexiones. Dividiendo el valor obtenido por 2 se obtiene el k efectivo estático.

Estimación a partir de datos de suelos, tipo de base y espesores, usando el gráfico de capítulo 4, tabla 4-6. Esta alternativa es simple, pero el valor k obtenido puede ser algo burdo y debería, además, ajustarse por variaciones estacionales.

Para el presente trabajo se adoptara el método no destructivo el cual hace uso de las deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto.

Tabla 5-25
Espesores de capa; Indices estructurales del Tramo en estudio.

TRAMO No	PROGRESIVAS		LONG. (Km.)	ESPEJOR ACTUAL DE CAPAS				ÍNDICES ESTRUCTURALES	
	DESDE	HASTA		ESP.SUP. RODADURA (mm)	BASE	SUB BASE	ESPEJOR TOTAL DEL PAV. (mm)	Mr (Psi)	Ep (Psi)
5	400+799	414+401	13.60	50	200	270.00	520.00	6709.98	46344.40

Fuente: Elaboración propia

Con los datos del módulo resiliente de la subrasante, módulo efectivo del pavimento obtenidos del retroajuste modular del cuenco de deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto; se hace el uso de ábaco de la figura 5-11 de la guía AASHTO con el cual se obtendrá el valor K dinámico para luego determinar el K estático dividiendo a K dinámico entre 2.

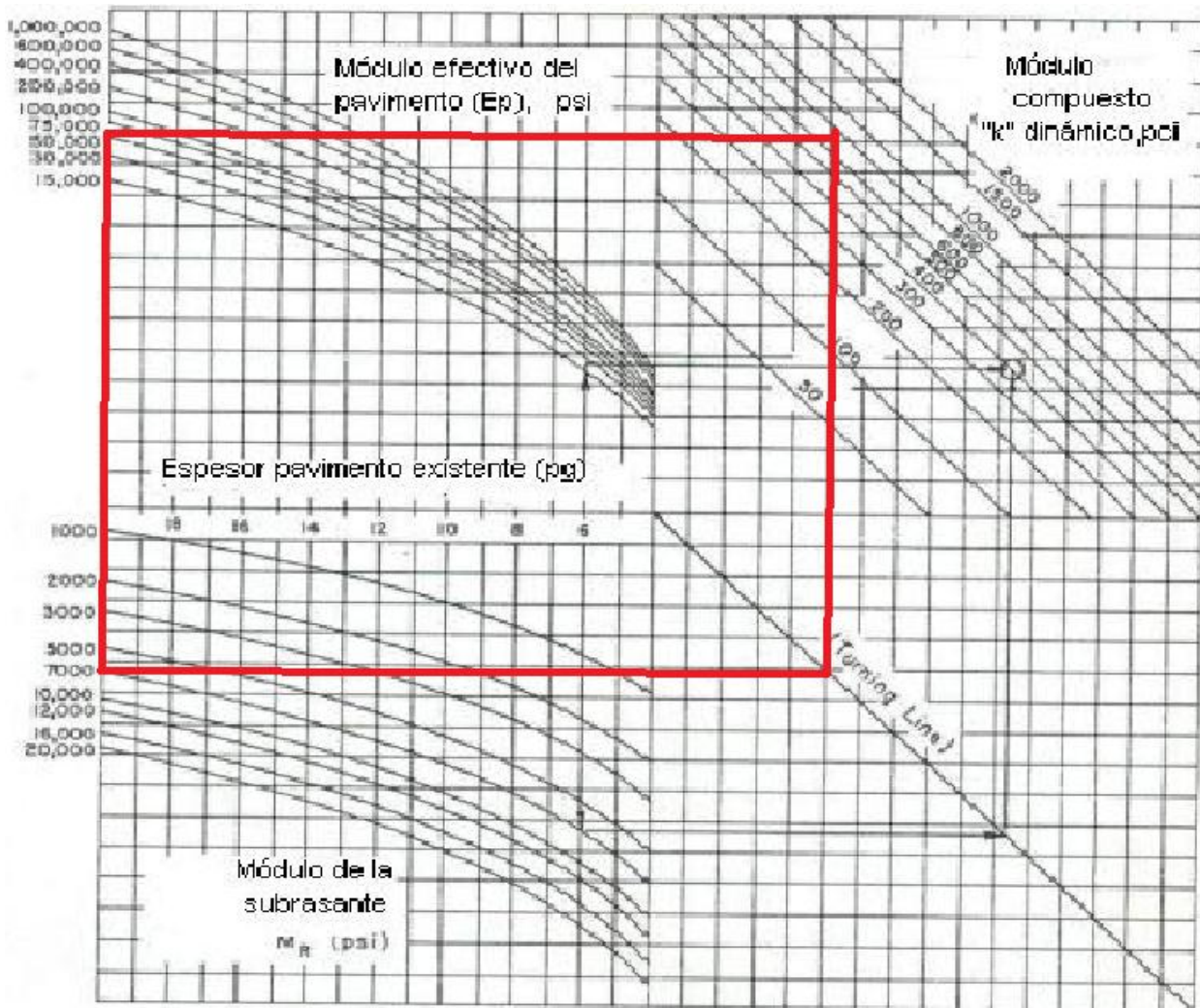
Se realiza la corrección del K estático por pérdida de soporte de las capas de granulares que conforman la estructura de todo el pavimento.



LS = 1 recomendado para uso de refuerzos de hormigón en pavimentos flexibles según la guía AASHTO.

A continuación se muestra el ábaco para determinar el K estático en función del módulo resiliente de la subrasante, módulo efectivo y espesor total del pavimento.

Fig. 5-11 Ábaco para determinar el valor de K estático guía AASHTO 93



$$M_r = 6709.98 \text{ Psi}$$

$$E_p = 46344.40$$

$$D = 20.47 \text{ plg}$$



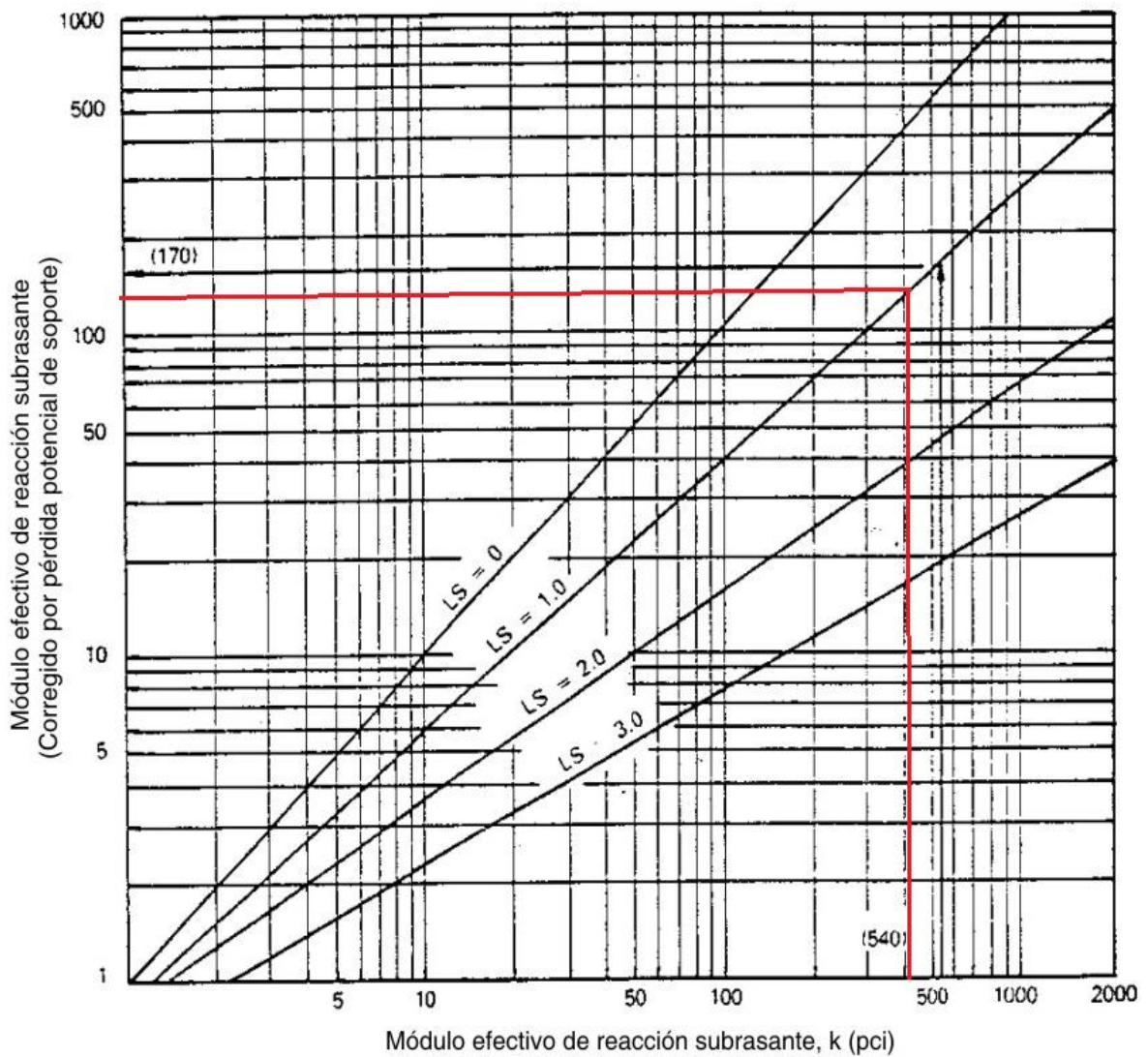
Con los datos del tramo en estudio se determina el valor del K estático ingresando al ábaco se obtiene K Dinámico 800 pci luego se determina el K estático mediante.

$$K \text{ Estático} = K \text{ Dinámico} / 2 = 800 / 2 =$$

$$K \text{ Estático} = 400 \text{ pci}$$

A este valor se le debe hacer la corrección por pérdida por soporte y se utiliza el siguiente ábaco.

Fig. 5-12 Ábaco para determinar el valor de K estático corregido guía AASHTO 93





Asumiendo un valor de $LS = 1$ sugerido para refuerzos de hormigón en pavimentos flexibles. Se determina K que viene a ser el módulo de reacción de la subrasante según la guía AASHTO. Se obtiene el módulo de reacción de la subrasante el cual es:

$$K = 150 \text{ Pci.}$$

Los parámetros ya definidos se muestran a continuación en la siguiente tabla con los cuales se realiza el dimensionamiento del espesor del refuerzo de hormigón para el tramo en estudio.

Tabla 5-26
Datos para el dimensionamiento del refuerzo de Hormigón

Variables definitivos para cálculo del espesor tramo N° 5	Valores
ESALs.	W18 = 6.1E+6 ESALs
Confiabilidad	R = 75 % (ZR = -0.764)
Desviación estándar	S0 = 0.35
Pérdida de serviciabilidad	P0-P1 = 4.5 – 2.5 = 2.0
Módulo elástico del H°	E = 20000 MPa = 3.1xE+6 psi
Módulo de rotura del H°	Ft= 5 MPA = 725.2 psi
Módulo efectivo de la subrasante	K = 150 pci
Coef. transf. de cargas	J = 3.2
Coef. de drenaje	Cd = 1.00

Fuente: Elaboración propia

Con estas consideraciones se obtiene D_f haciendo uso de la fórmula, ábaco y además del programa computacional AASHTO 93 del autor colombiano Luis Ricardo Vásquez Varela año 2000.

A continuación se muestra los resultados obtenidos por el programa, y fórmula sugerida por la Guía AASHTO 93.



Figura 5-13 Determinación del espesor D_f Programa AASHTO 93.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software interface. The 'Tipo de Pavimento' section has 'Pavimento rígido' selected. 'Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)' is set to '75 % Zr=0.674' and 'So = 0.35'. 'Serviciabilidad inicial y final' shows 'PSI inicial = 4.5' and 'PSI final = 2.5'. 'Módulo de reacción de la subrasante' is set to 'k = 150 pci'. Under 'Información adicional para pavimentos rígidos', 'Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)' is 3.1E6, 'Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)' is 725.2, 'Coeficiente de transmisión de carga - (J)' is 3.2, and 'Coeficiente de drenaje - (Cd)' is 1. The 'Tipo de Análisis' section has 'Calcular Df' selected, showing 'W18 = 6.1E6'. The 'Espesor de losa (plg)' section shows 'D = 6,7'. 'Calcular' and 'Salir' buttons are at the bottom.

Fuente Elaboración propia

Fórmula para determinar el D_f (Espesor para soportar el tráfico futuro)

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log(\Delta PSI)}{1 + \frac{1.625 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_1) \log \left[\frac{S_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J (D^{0.75} - 18.42 (k/E_c)^{0.25})} \right]$$

Finalmente se obtiene D_f (Espesor para soportar el tráfico futuro).

$$D_f = 6.7 \text{ plg} = 170 \text{ mm}$$



5.9.11 Determinación del espesor de refuerzo método AASHTO, D_{of}

Se emplea esta ecuación:

Donde:

D_{of} = Espesor requerido del refuerzo de hormigón

D_f = Espesor de losa necesario para soportar el tráfico futuro.

$D_{of} = 6.7$ pulg

$D_{of} = 170$ mm. (Espesor del refuerzo de Hormigón para el pavimento flexible del tramo en estudio).

5.9.12 Diseño de las juntas del refuerzo de Hormigón Simple.

5.9.12.1 Introducción

Las juntas tienen por fin mantener las tensiones que soporta el pavimento de hormigón, dentro de los límites admisibles, previniendo la formación de fisuras grietas irregulares. Detalles de los diferentes tipos de juntas.

El diseño de juntas en los Refuerzos de Hormigón Simple o armado es parecido al de los pavimentos de concreto, y son las responsable del control del agrietamiento, así como de mantener la capacidad estructural del pavimento y su calidad de servicio en los más altos niveles al menor costo anual. Además las juntas tienen funciones más específicas, como lo son:

El control del agrietamiento transversal y longitudinal provocado por las restricciones de contracción combinándose con los efectos de pandeo o alabeo de las losas, así como las cargas del tráfico.



Una construcción adecuada y a tiempo, así como un diseño apropiado de las juntas incluyendo un efectivo sellado, son elementos claves para el buen comportamiento del sistema de juntas.

5.9.12.2 Junta transversal de contracción

Las juntas transversales de contracción principalmente controlan el agrietamiento natural de los pavimentos de concreto. Su espaciamiento, profundidad del corte y el tiempo en que se deba realizar son factores críticos para el comportamiento de las juntas, por lo que un adecuado diseño específico el intervalo de juntas que va a controlar las grietas y proveer una adecuada transferencia de carga entre las juntas.

Existe una regla práctica que nos permite dimensionar los tableros de losas para inducir el agrietamiento controlado bajo los cortes de losas, sin necesidad de colocar acero de refuerzo continuo:

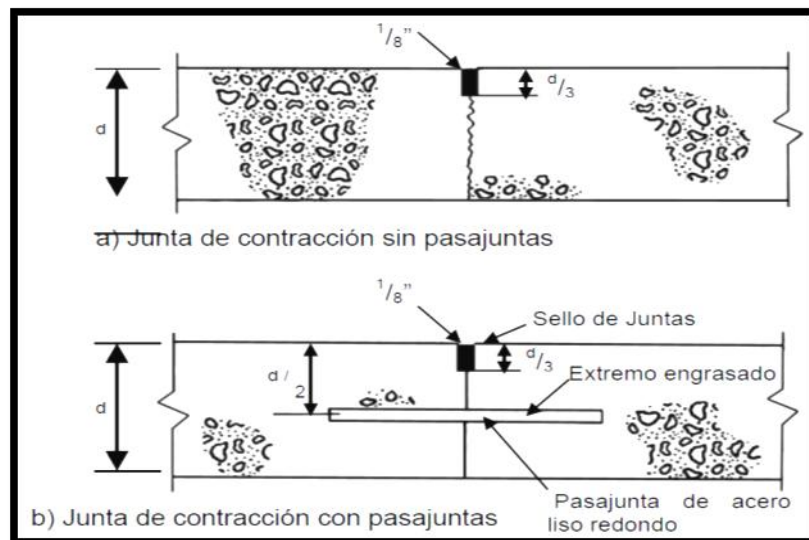
$$S_{JT} = (21a24)D$$

Donde:

S_{JT} = Separación de Juntas Transversales cm.

D = Espesor del Pavimento cm.

Figura 5-14 Sección de una junta transversal de contracción con y sin pasajuntas.





5.9.12.3 Juntas longitudinales.

Las juntas longitudinales evitan la formación del agrietamiento longitudinal que de lo contrario. Estas grietas normalmente se desarrollan por los efectos combinados de las cargas y las restricciones del alabeo de la losa una vez que el pavimento está sujeto al tránsito. En la colocación de refuerzos de hormigón de dos o más carriles un espaciamiento de 3 a 5 metros tiene un propósito doble, el del control del agrietamiento y la declinación de los carriles. Lo cual es recomendable la separación de juntas dentro de este rango según lo recomienda la metodología del diseño de juntas para refuerzos de hormigón de la guía AASHTO 93.

Para el refuerzo de Hormigón para el tramo en estudio se adoptara los siguientes valores:

Juntas transversales = 3,6 m.

Juntas Longitudinales = 4,0 m

5.9.13 Pasajuntas para el refuerzo de Hormigón.

El tamaño de las pasajuntas depende del espesor de la losa. La tabla 5-27 muestra el diámetro y longitud de las pasajuntas para diferentes espesores de losa como lo recomienda la PCA (1975). Se puede apreciar que el diámetro de las pasajuntas es igual a un octavo del espesor de la losa.

Tabla 5-27 Diámetro y longitudes recomendadas en pasajuntas.

Espesor de losa		Barras Pasajuntas					
		Diámetro		Longitud		Separación	
cm	In	mm	In.	cm	In.	cm	In
13 a 15	5 a 6	19	$\frac{3}{4}$	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	$1\frac{1}{4}$	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	$1\frac{1}{2}$	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	$1\frac{3}{4}$	56	22	46	18

Fuente: Guía AASHTO 93.



En una edición reciente de diseño de juntas, la PCA (1991) recomienda el uso de pasajuntas de 1.25 in de diámetro para pavimentos de autopistas con espesores menores a 10 in y pasajuntas de diámetro de 1.5 in para pavimentos con espesores mayores a 10 in. Se necesitan pasajuntas con un diámetro mínimo de 1.25 a 1.5 in para controlar fallas mediante la reducción del esfuerzo de carga en el concreto.

Las pasajuntas se usan en las juntas transversales para transferir las cargas a las losas adyacentes. El esfuerzo y la deflexión en la junta son mucho más pequeños cuando las cargas son soportadas por dos losas que cuando es por una sola. El uso de pasajuntas puede minimizar las fallas de bombeo y de diferencia de elevación de juntas, las cuales han sido consideradas como factores importantes para la transferencia de carga.

5,10 VENTAJAS Y DESVENTAJAS ENTRE REFUERZOS ESTRUCTURALES.

5.10.1 Concreto asfáltico como material de refuerzo.

Es una alternativa de rehabilitación, la cual es una técnica que consiste en colocar un pavimento flexible sobre la estructura existente de pavimento flexible, y que permita aumentar la vida útil de la vía.

El diseño de esta tipo de rehabilitación se realiza como si fuera un pavimento flexible nuevo, la diferencia radica en que la estructura de soporte será la estructura de pavimento flexible existente.

El refuerzos de concreto asfáltico es la mezcla de agregados pétreos, cemento asfáltico y filler; el filler es un modificador del asfalto que aumenta la cohesión interna del ligante y mejora el comportamiento a fatiga del mismo. Asimismo, el concreto asfáltico debe poseer una cantidad de ligante asfáltico, que conforme a un huso granulométrico se cumplan las condiciones requeridas para el diseño.

El refuerzo de concreto asfáltico presenta las siguientes ventajas y desventajas:



5.10.1.1 Ventajas del refuerzo de concreto asfáltico.

- ❖ Es de fácil y rápida aplicación.
- ❖ La interrupción del tráfico es mínima.
- ❖ Tiene un costo muy competitivo en comparación con otras técnicas de rehabilitación.
- ❖ Proporciona la suficiente resistencia a las cargas impuestas por el tráfico vehicular.
- ❖ El costo de construcción es menor que en el del refuerzo rígido y con las nuevas tecnologías, los refuerzos de concreto asfáltico requieren un mantenimiento mínimo.
- ❖ Por su color oscuro, evita reflejos y deslumbramientos causantes de accidentes.
- ❖ Es reciclable es en su totalidad, lo que trae importantes ventajas ambientales, ecológicas y económicas.
- ❖ La contaminación auditiva por el paso de los vehículos, es nueve decibeles menor si el vehículo rueda sobre una superficie de concreto asfáltico que de hidráulico. En volumen, esto equivale a 4 veces menos ruido.
- ❖ Ofrece gran suavidad en el rodamiento, lo que permite ahorrar hasta un 4.5% en el consumo de combustible.

5.10.1.2 Desventajas del refuerzo de concreto asfáltico.

- ❖ Ahuellamientos en la superficie del pavimento.
- ❖ Presenta reflexión de fisuras, si es que no se ha colocado un dispositivo de control de éstas.
- ❖ No se utiliza en vías de alto volumen de tráfico pesado, porque se requiere un refuerzo de gran espesor, lo cual no es económico.
- ❖ En pasos a bajo nivel cuando las condiciones de gálibo no permiten colocar el refuerzo.



5.10.2 REFUERZO DE HORMIGÓN SIMPLE:

Es una alternativa de rehabilitación llamada también Whitetopping, el cual es una técnica que consiste en colocar un pavimento rígido sobre la estructura existente de pavimento flexible, que permite aumentar la vida útil de la vía, disminuyendo el costo del mantenimiento y brinda la posibilidad de mejorar las condiciones geométricas, igualmente proporciona una mayor seguridad y comodidad para los usuarios de la vía minimizando los costos de operación y de tiempos de viaje. El diseño de esta tipo de rehabilitación se realiza como si fuera un pavimento rígido nuevo, la diferencia radica en que la estructura de soporte será la estructura de pavimento flexible existente.

Igualmente con este tipo de rehabilitación se puede mejorar el diseño geométrico de las vías tanto en lo longitudinal ajustando las pendientes, como en lo transversal corrigiendo los peraltes.

5.10.2.1 Ventajas del Refuerzo de Hormigón.

- ❖ Disminución en los costos de mantenimiento.
- ❖ No se requiere de personal altamente calificado.
- ❖ Los equipos necesarios para la ejecución de esta actividad no son difíciles de conseguir.
- ❖ Las sobrecapas de hormigón son particularmente efectivas donde las restricciones presupuestales y los altos niveles de tránsito hacen que las interrupciones en el tráfico y las actividades de mantenimiento sean intolerables.
- ❖ Los recubrimientos de hormigón ofrecen beneficios a largo plazo, puesto que reduce considerablemente el tiempo y las demoras causadas por el mantenimiento de una superficie de asfalto.



5.10.2.2 Desventajas del Refuerzo de Hormigón.

- ❖ Tiene un costo inicial mucho más elevado que los refuerzos de concreto asfáltico.
- ❖ Se debe tener cuidado en el diseño.
- ❖ El proceso de construcción es más lento que en los refuerzos de concreto asfáltico.

5.11. COMPARACIÓN TÉCNICO – ECONÓMICA ENTRE LOS REFUERZOS DE CONCRETO ASFÁLTICO Y HORMIGÓN COMO ALTERNATIVAS DE REHABILITACION.

En este trabajo se hace una reflexión sobre el comportamiento de los refuerzos de Concreto Asfáltico y Hormigón Simple como alternativas de rehabilitación en pavimentos flexibles, con el propósito de establecer algunos elementos comparativos entre ellos.

A partir de los análisis realizados se indican las principales tendencias observadas en el comportamiento de las dos alternativas, se generan algunas recomendaciones y se establecen algunas comparaciones para tratar de delimitar las condiciones generales que pudiesen hacer conveniente la utilización de uno u otro tipo de refuerzo.

La evaluación de ambas alternativas de refuerzos estructurales mencionados anteriormente se basa en un análisis técnico y económico.

Para realizar el análisis técnico, se hará mención de las ventajas técnicas. Para entender el comportamiento de la estructura del refuerzo en el pavimento flexible a ser rehabilitado, los espesores fueron diseñados utilizando la guía AASTHO 93 (Uso de sobrecarpetas), analizando por separado entre una y otra alternativa, sus características más importantes, como ser parámetros y factores de diseño. Sus espesores finales se compararon para llevar a cabo una evaluación económica con los valores típicos de coste de construcción.



5.11.1 EVALUACIÓN TÉCNICA.

Para entender las ventajas técnicas de ambas alternativas, se debe realizar una evaluación técnica. Esta evaluación técnica también incluye la modelación de los espesores de los refuerzos, que se obtuvieron usando la metodología AASHTO 93 como se mencionó anteriormente.

5.11.1.1 COMPARACIÓN DE VENTAJAS TÉCNICAS

Con el propósito de establecer las ventajas técnicas más importantes para ambas alternativas sobre todo en el aspecto de rehabilitación de pavimentos flexibles, basándose en las ventajas y desventajas de ambos refuerzos se llega a obtener la siguiente tabla que muestra las ventajas técnicas más importantes que se deben tomar en cuenta a la hora de hacer la elección entre las alternativas.

El siguiente cuadro muestra las ventajas técnicas más importantes consideradas para realizar la elección entre una y otra alternativa.



TABLA 5-28
CUADRO COMPARATIVO DE LAS VENTAJAS TÉCNICAS ENTRE
REFUERZOS ESTRUCTURALES

VENTAJAS TECNICAS	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
	REFUERZO DE CONCRETO ASFÁLTICO	REFUERZO DE HORMIGÓN SIMPLE
Superior capacidad de carga.	SÍ	NO
Resistencia de reserva para sobrecargas no previstas	SÍ	NO
Resistencia a la deformación.	SÍ	NO
No se requieren recapamientos periódicos ni realizar muchas reparaciones.	NO	SÍ
Construcción rápida y económica.	NO	SÍ
Planificación de larga vida.	SÍ	NO
La rapidez para realizar la rehabilitación y la posibilidad de habilitar el tráfico vehicular en poco tiempo.	NO	SÍ
Disminución en los costos de mantenimiento.	SÍ	NO
No se requiere de personal altamente calificado.	NO	NO
Los equipos necesarios para la ejecución de esta actividad no son difíciles de conseguir.	NO	SÍ

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



Del análisis de la tabla mostrada anteriormente se puede realizar un resumen de la relación entre las diferencias y ventajas técnicas entre una y otra alternativa.

TABLA 5-29
REF. DE HORMIGÓN VERSUS REF. DE CONCRETO ASFÁLTICO

REFUERZO DE HORMIGÓN	REFUERZO DE CONCRETO ASFÁLTICO
Vida útil mínima de 20 años.	Vida útil de 10 años, aproximadamente.
Calidad de la superficie casi permanente.	calidad buena (Con mantenimiento)
Mayor resistencia mecánica y abrasión.	Resistencia baja y deformabilidad alta.
Poco mantenimiento.	Mas mantenimiento.
Mayor rugosidad superficial.	Superficie más lisa.
Fáciles de construir (poco equipo).	Plantas de asfalto.
Materiales locales.	Materiales importados (divisas).
Costo inicial elevado.	Costo inicial moderado

5.11.1 Diseño de los refuerzos

Compara la producción (espesores principalmente), las recomendaciones de la metodología de diseño mencionado anteriormente para los refuerzos de manera que algunos criterios constantes y se utilizaron durante todo el análisis. Por lo tanto, el diseño sigue los procedimientos basados en los mismos parámetros de entrada (por ejemplo, el tráfico, el periodo de diseño, análisis de deflexiones, etc.).

Consideraciones Generales del diseño de los refuerzos.

- ❖ Pavimento de dos carriles, uno por sentido.
- ❖ Diseño de 10 años.
- ❖ Partidas referidas a marzo 2012 (análisis de tráfico).
- ❖ Ancho de carril de 3.6 metros.
- ❖ Espesor de la carpeta de rodadura actual: 50 mm.
- ❖ Deflexión máxima en el tramo en estudio: 816 um.



Refuerzo de Concreto Asfáltico (ALTERNATIVA 1).

- ❖ $W18 = 4,22E6$ ESALs (para pavimentos flexibles)
- ❖ Índice de serviciabilidad inicial de 4.2.
- ❖ Desviación estándar de 0.49
- ❖ Coeficiente estructural del refuerzo de $C^{\circ}A^{\circ}$ (aof = 0.44)
- ❖ Número estructural: Número estructural para soportar tráfico futuro ($SN_f = 112.776$ mm). Número estructural efectivo ($SN_{ef} = 84$ mm) respectivamente.
- ❖ Espesor del refuerzo $C^{\circ}A^{\circ}$ (65 mm = 6,5 cm.)

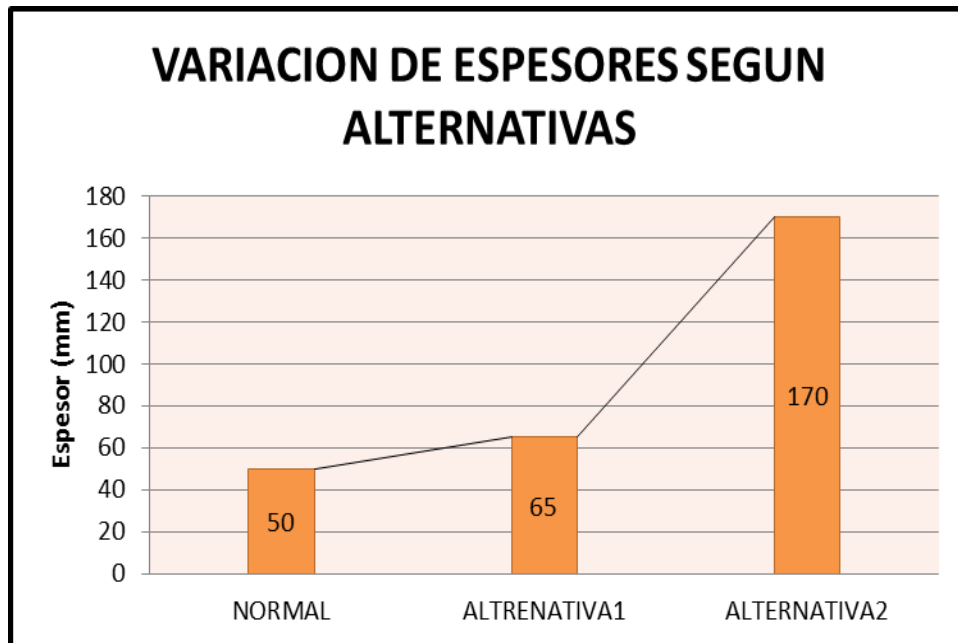
Refuerzo de Hormigón Simple (ALTERNATIVA 2).

- ❖ $W18 = 6,1E6$ ESALs (para pavimentos rígidos)
- ❖ Índice de serviciabilidad inicial de 4.5.
- ❖ Desviación estándar de 0.35.
- ❖ Módulo de rotura a flexión de 270 kg/cm².
- ❖ Coeficiente de drenaje de 1.0.
- ❖ Factor J de 3.2.
- ❖ Espesor del refuerzo de $H^{\circ}S^{\circ}$ (170 mm = 17 cm)

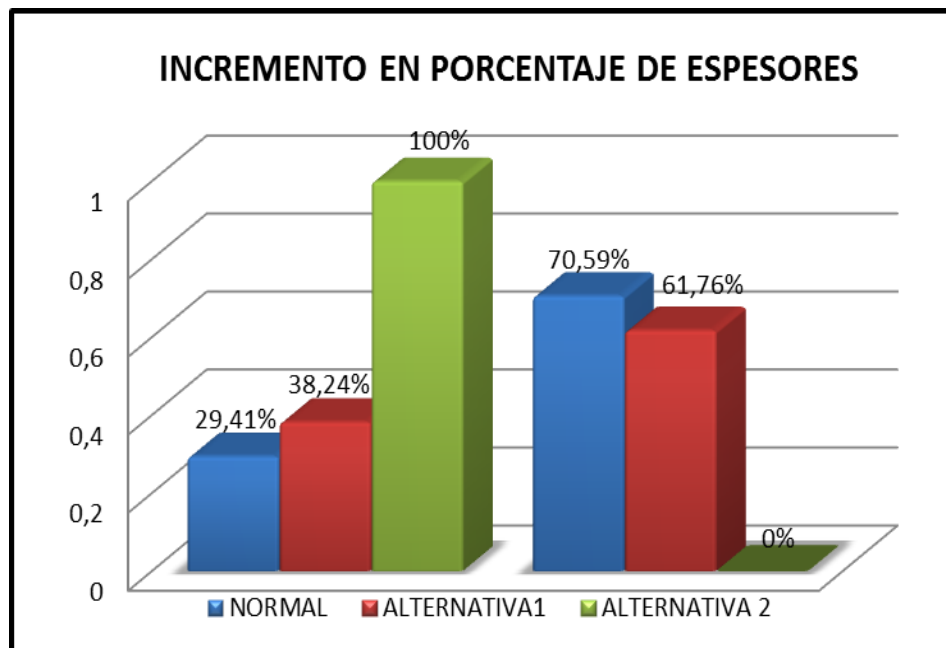
En la siguiente gráfica se aprecia la variación del espesor, comparados desde el estado normal, Alternativa 1 y la Alternativa 2.



Gráfica 5-1 variación de espesor entre Alternativas.



Gráfica 5-2 Diferencia en porcentajes comparadas con el espesor más elevado de de ambas alternativas y el estado normal.





Una vez obtenidos los espesores de los refuerzos se evaluarán económicamente para obtener el costo de construcción para cada alternativa.

5.11.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA.

En un proyecto de rehabilitación siempre se presentan alternativas diferentes con las cuales se pretende dar solución a la problemática que atraviesa el pavimento. En este caso hemos analizado las alternativas de refuerzo estructural con refuerzo de Concreto Asfáltico y refuerzo de Hormigón; Para las cuales se analiza su costo total que se necesita para realizar la rehabilitación con cualquiera de las alternativas.

El análisis económico fue basado en los costos unitarios en las unidades más convenientes que se adoptan para cada ítem requerido por ambas alternativas. Hay que señalar que no se hizo un análisis de costo exhaustivo y a detalle de todas las actividades que se necesitan para poder ejecutar el recapamiento en ambos casos, pero se analizaron las actividades necesarias con los cuales no se podría realizar y ejecutar el trabajo en obra para las dos alternativas.

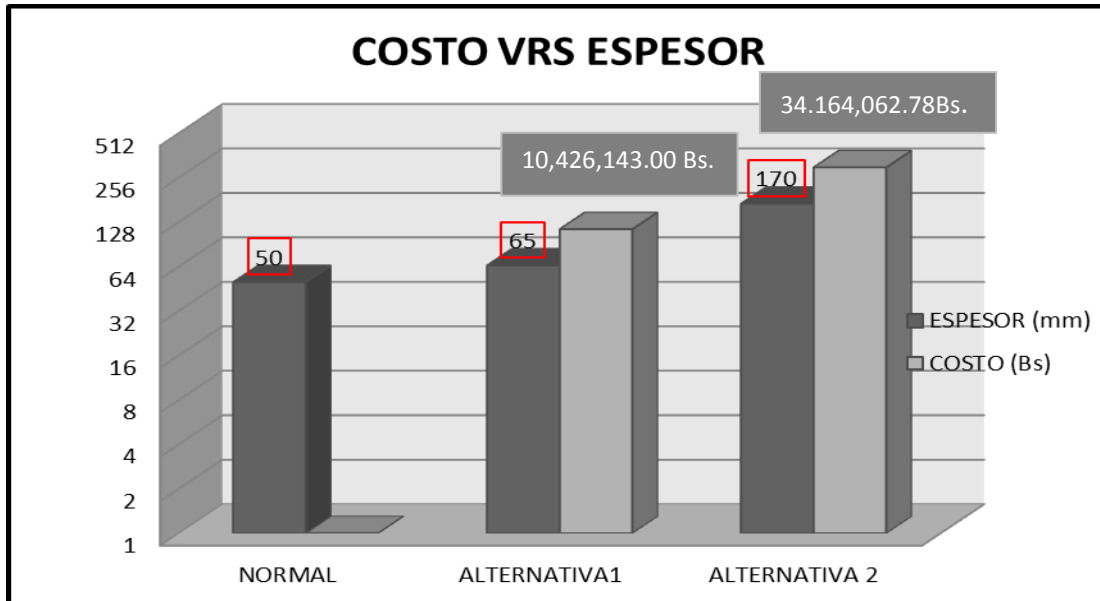
- **Alternativa 1.** La cual es con el refuerzo de Concreto Asfáltico del tipo Flexible con un espesor de 6.5 cm. De espesor, al utilizar esta alternativa en la longitud total del tramo que es igual a 13,6 km. obtenemos un costo de 10,426,143.00 Bs., no cubre todos los ítems necesarios para poder realizar el recapamiento, pero si cubre las necesarias como se mencionó anteriormente
- **Alternativa 2.** Con un refuerzo de Hormigón del tipo Rígido el cual tiene un espesor de 17,5 cm. Con una resistencia de 270 kg/cm², obtenemos un costo de 34.164,062.78Bs.

Los costos unitarios y el presupuesto total se encuentran el anexo N°6.

A continuación se muestra la gráfica de la variación del costo de cada alternativa con relación a con el espesor obtenido.



Gráfica 5-3 Variación del costo en Bs. Vrs. Espesor en mm.



A continuación se muestra el cuadro comparativo técnico - económico resultante del análisis de las alternativas estudiadas, basándose en las ventajas técnicas más importantes necesarias para la rehabilitación de pavimentos flexibles, además de la modelación del espesor es decir; la adopción de los parámetros y factores de diseño empleados para ambas alternativas, etc.



TABLA 5-30. CUADRO COMPARATIVO TÉCNICO - ECONÓMICO.

ALTERNATIVA 1: REFUERZO DE CONCRETO ASFÁLTICO

ALTERNATIVA 2: REFUERZO DE HORMIGÓN SIMPLE

PARÁMETROS	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
PERIODO DE DISEÑO (años)	10	10
W18(ESALS)	4,22E+06	6,11E+06
DEFLEXION MÁXIMA EN LA ESTR. DEL PAV: um	816	816
CONFIABILIDAD ESTANDAR: R%	85	75
MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE (Mr: Psi)	6709.98	-
MÓDULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO (Ep: Psi)	46344,4	-
MÓDULO EFECTIVO DE LA SUB RAZANTE(K:Pci)	-	150
MÓDULO DE ROTURA DEL HORMIGÓN (fcd:Mpa)	-	5
MÓDULO ELASTICO DEL HORMIGÓN (Ec:Mpa)	-	-
NÚMERO ESTRUCTURAL PARA SOPORTAR EL TRÁFICO FUTURO: mm	112,776	-
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO: mm	84	-
ESPESOR EFECTIVO PARA SOPORTAR EL TRÁFICO FUTURO: mm	-	170
ESPESOR REQUERIDO DEL REFURZO: mm	65	170
ESPESOR TOTAL DE REFUERZO + carpeta de rodadura actual: mm	115	180
COSTO TOTAL DEL REFUERZO: Bs	10,426,143.00	34,1640,72.78
VENTAJAS TÉCNICAS EN REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES		
NO SE REQUIEREN RECAPAMIENTOS PERIÓDICOS NI REALIZAR MUCHAS REPARACIONES	NO	SÍ
PLANIFICACION DE LARGA VIDA	SÍ	NO
DISMINUCION DE LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO	SÍ	NO
EQUIPOS EMPLEADOS	Fáciles de construir (poco equipo).	Plantas de asfalto.
MATERIALES EMPLEADOS	Materiales locales.	Materiales importados (divisas).
PRESUPUESTO	Costo inicial elevado.	Costo inicial moderado
VIDA ÚTIL APROXIMADA: años	10	20

FUENTE : ELABORACIÓN PROPIA



CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.

- El Diseño de refuerzos estructurales del tipo flexible y rígido, los cuales para el presente trabajo se analizaron por separado, los refuerzos de concreto asfáltico y refuerzos de hormigón simple como alternativas de utilización en rehabilitación de pavimentos flexibles, los cuales obedecen a parámetros del comportamiento del lugar de emplazamiento, tomando como variables de entrada, la caracterización del tránsito, las propiedades mecánicas de los materiales y del terreno de fundación, las condiciones climáticas, las condiciones de drenaje y los niveles de serviciabilidad y confiabilidad, etc.
- Para ambas alternativas se utilizó la metodología de la guía AASHTO – 93, en la cual el cálculo del espesor del refuerzo estructural, relaciona las variables anteriores, considerando principalmente los Factores Equivalentes de ejes tipo de 80 kN o 18 Kips o ESALs vehicular (Equivalent Simple Axial Load), diferenciando de los refuerzos de Concreto Asfáltico y refuerzo de Hormigón; en la adopción de coeficientes de equivalencia de carga y equivalencia vehicular. En cuanto a las propiedades típicas de las capas de la estructura del pavimento flexible se analizaron el módulo resiliente y módulo efectivo del pavimento para los refuerzos de concreto asfáltico, el módulo de reacción de las subrasante para el refuerzo de hormigón simple, estos parámetros estructurales son necesarios para el dimensionamiento de los espesores de ambas alternativas y se las determinó por el método de ensayos no destructivos empleando las deflexiones obtenidas por el deflectómetro de impacto.
- En cuanto a las fallas en pavimentos flexibles fueron analizadas únicamente las fallas que ocasionan o aumentan el deterioro estructural con las cuales se



sustenta y justifica la rehabilitación del tramo. Entre las más comunes encontradas en el tramo en estudio se tiene:

- ❖ Los ahuellaminetos. Para el tramo en estudio tienen valores de 10.73 mm que son clasificados de una condición regular.
 - ❖ Fisuras longitudinales y transversales además de las de la piel de cocodrilo. La frecuencia de estas grietas es escasa, la magnitud moderada y se localizaron estas grietas en sentido longitudinal en el centro de los carriles o próximo a las bermas.
 - ❖ Los baches en porcentaje moderado y no se encontraron sectores muy críticos en el tramo en estudio.
- Para el tramo en estudio se adoptará el tramo N° 5 de la carretera Villamontes – Boyuibe. Ubicado entre las progresivas 400+799 – 414+234 con una longitud total de 13,6 km.
 - El estado actual del tramo en estudio, según la cuantificación y registro de las mediciones de los distintos tipos de fallas además de las deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto, en relación al aspecto de regularidad longitudinal IRI (Índice de Rugosidad Internacional) igual a 2,47 m/km. Lo cual clasifica al tramo de condición buena, con relación al deterioro en cuanto a la fisuración tanto longitudinal como piel de cocodrilo manifieste con un valor igual al 12,6 % con lo cual se clasifica a la superficie de rodadura de condición regular según Tabla 5-4 (Deterioro para condición de superficie bituminosa). Respecto a las mediciones de deflexiones se obtuvieron las más elevadas para el tramo N°5 con valores promedios de 816 um. Considerando a este el tramo más crítico debido a la deficiencia estructural y al estado de la superficie.
 - Para el refuerzo de Concreto Asfáltico ALTERNATIVA 1 para el tramo en estudio se adoptaron conforme lo recomienda la guía AASHTO 93. Como si se



tratase de pavimentos flexibles nuevos, respecto a los factores de diseño de espesores, con relación a la confiabilidad estándar se adoptó un valor de 85 % de manera de no obtener espesores elevados ni costosos con relación a los costos de mantenimiento, la serviciabilidad inicial igual a 4,2; final igual a 2,5 los parámetros de las propiedades de los materiales como el módulo resiliente, módulo efectivo del pavimento fueron determinados por el análisis de deflexiones como se mencionó anteriormente.

- Para el refuerzo de Hormigón Simple (ALTERNATIVA 2). Respecto a los factores de diseño de espesores, con relación a la confiabilidad estándar se adoptó un valor de 75 % de manera de obtener un espesor moderado y no sobredimensionar el espesor y hacerlo muy costoso, por lo que se ve conveniente este valor, la serviciabilidad inicial igual a 4,5; final igual a 2,5 valores adoptados de igual manera que para el diseño de pavimentos rígidos nuevos, en relación a las propiedades de los materiales como ser el módulo de rotura de concreto se adoptó según lo recomienda la guía AASHTO 93 (Diseño de pavimentos rígidos) un valor de 5 MPa normalmente especificado a los 28 días, para el módulo de elasticidad del concreto se adoptó una resistencia de 270 Kg/cm² para la compresión simple del hormigón, ya que es un valor adecuado con resistencia moderada y no muy elevada, no se recomienda utilizar valores inferiores a los 180 kg/cm², y pavimentos que requieran mayores resistencias hasta los 310 kg/cm², por lo que para el tramo en estudio se consideró un valor moderado de 270 kg/cm². De manera lograr que el refuerzo sea resistente pero no muy costoso.
- Respecto a la comparación técnica respecto a las ventajas técnicas consideradas más importantes entre una y otra alternativa se realizó el siguiente cuadro de comparación.



TABLA 5-29
REF. DE HORMIGÓN VERSUS REF. DE CONCRETO ASFÁLTICO

REFUERZO DE HORMIGÓN	REFUERZO DE CONCRETO ASFÁLTICO
Vida útil mínima de 20 años.	Vida útil de 10 años, aproximadamente.
Calidad de la superficie casi permanente.	calidad buena (Con mantenimiento)
Mayor resistencia mecánica y abrasión.	Resistencia baja y deformabilidad alta.
Poco mantenimiento.	Mas mantenimiento.
Mayor rugosidad superficial.	Superficie más lisa.
Fáciles de construir (poco equipo).	Plantas de asfalto.
Materiales locales.	Materiales importados (divisas).
Costo inicial elevado.	Costo inicial moderado

Fuente: Elaboración propia

- Además hay que argumentar que según la factibilidad de ambas alternativas estudiadas, el refuerzo de hormigón simple se acomoda mejor a cualquier pavimento flexible que necesite una rehabilitación.
- Los espesores finales obtenidos del proceso metodológico del dimensionamiento de ambas alternativas es el siguiente:
 - ❖ ALTERNATIVA 1: Refuerzo de Concreto Asfáltico, Espesor = 6,5cm.
 - ❖ ALTERNATIVA 2: Refuerzo de Hormigón Simple, Espesor = 17,5cm.
- La variación de espesores de una y otra alternativa con relación al estado del espesor del pavimento actual, realizando una comparación con la alternativa 2 de mayor espesor, varía en 79,56 % respecto del estado actual y 65,34 % respecto de la alternativa 1.
- Del análisis económico resultantes se obtiene el presupuesto total de construcción de ambas alternativas las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

**ALTERNATIVA 1:**

- ❖ Longitud total del tramo: 13,6 Km.
- ❖ Espesor del refuerzo de concreto asfáltico: 6.5 cm.
- ❖ Costo Total del refuerzo de C°A°: 10,426,143.00 Bs.

ALTERNATIVA 2:

- ❖ Longitud total del tramo: 13,6 Km.
- ❖ Espesor del refuerzo de hormigón Simple: 17.5 cm
- ❖ Costo total del ref. de H°S°: 34.164,062.78 Bs.

- De la comparación económica entre ambos refuerzos; se podría decir que el refuerzo de concreto asfáltico es más factible por el costo inicial que se necesitara para su ejecución. La variación de costos entre una y otra alternativa, muestra claramente que la alternativa de refuerzo de hormigón simple triplica en el costo respecto de la del refuerzo de concreto asfáltico, debido a que el espesor es mayor, por qué respecto al diseño y ejecución del refuerzo de Hormigón así lo requiere.
- De acuerdo a criterio mío de las dos alternativas analizadas para el tramo N° 5 de la carretera Villamontes – Boyuibe. Considero que la alternativa 2 es la más factible porque de acuerdo al análisis técnico de las propiedades del refuerzo de Hormigón son más favorables que las del refuerzo de concreto asfáltico, para justificar esta elección nos basamos en el estado en el que se encuentra el tramo, es decir que presenta las deflexiones más elevadas, la superficie de la carpeta asfáltica se encuentra en estado regular y debido a que en este tipo de refuerzo del tipo rígido no se necesita realizar muchas reparaciones antes del colocado del refuerzo y no así en los refuerzos de concreto asfáltico que si se necesita muchas reparaciones, debido al tiempo y costo que se necesita para realizar el mantenimiento en los refuerzos de concreto asfáltico por lo que a largo plazo no



es conveniente. La o las empresas a cargo de la carretera no invertirán tiempo ni costo a largo plazo en los mantenimientos, porque del estudio de las ventajas técnicas el refuerzo de hormigón es mucho más favorable en cuestión de resistencia, durabilidad, por lo que los materiales empleados en la ejecución de refuerzo pueden ser obtenidos del lugar de trabajo, en cambio los materiales para el refuerzo de concreto asfáltico se tiene que obtener de otros países ya que nuestro país no cuenta con este material, por lo que a criterio nuestro el refuerzo de hormigón es más factible y aceptable para el tramo en estudio.

6.2 RECOMENDACIONES.

- Para el diseño de espesores de refuerzos se debe realizar la elección de niveles de confiabilidad moderados y correctamente elegidos, con tal de obtener espesores no muy elevados y muy costosos, ni espesores muy pobres que requieran de mucho mantenimiento, por lo que se recomienda adoptar valores óptimos de confiabilidad.
- Para realizar la cuantificación registro y medición de las diferentes fallas del tramo en estudio es recomendable que se adjunte el detalle fotográfico y la ubicación de las mismas de manera que se haga más fácil y mejor elaborada la evaluación funcional y estructural del tramo en estudio.
- Para justificar y sustentar que el tramo en estudio necesite una rehabilitación es necesario realizar la medición de deflexiones con equipos que sean capaces de realizar esta tarea, para obtener la respuesta estructural del tramo ya que estos equipos son modernos y precisos, por lo que es recomendable obtener estos equipos con los cuales se logra estas mediciones.
- Para la colocación de cualquiera de los dos refuerzos mencionados para este trabajo se debe realizar la reparación de las áreas deterioradas como ser fisuras, grietas, baches, y otros deterioros en la superficie del pavimento flexible.



- Se debe recabar información histórica del tramo en estudio, como ser año de construcción, periodo de diseño etc.

- Se recomienda el uso de programas computarizados además de usar las fórmulas y ábacos que se recomiendan en la Guía AASTHO para realizar el dimensionamiento de los refuerzos.