

**DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO PARA LAS
ESTRUCTURAS PRESENTADAS DENTRO DEL MANUAL DE DISEÑO DE
IDU BASADO EN EL MODELO DE AGRIETAMIENTO POR FATIGA RPPR2**



**ING. MARÍA ANGÉLICA SALINAS TOVAR
CÓDIGO 61002090**

ARTICULO FINAL PROYECTO APLICADO INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
DICIEMBRE 2017**

DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO PARA LAS ESTRUCTURAS PRESENTADAS DENTRO DEL MANUAL DE DISEÑO DE IDU BASADO EN EL MODELO DE AGRIETAMIENTO POR FATIGA RPPR2

DETERMINATION OF THE MAINTENANCE FREQUENCY FOR THE STRUCTURES PRESENTED WITHIN THE IDU DESIGN MANUAL BASED ON THE FATIGUE CRACKING MODEL RPPR2

María Angélica Salinas Tovar
Ingeniera Civil, Aspirante a Especialista en Ingeniería de Pavimentos
Estudiante posgrados de la Universidad Militar Nueva Granada.
Bogotá, Colombia,
u6100290@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El comportamiento de un pavimento debe ser evaluado dentro de las primeras etapas de planeación, diseño y construcción para llegar a predecir la manera en que estas estructuras deben recibir un adecuado mantenimiento y/o rehabilitación alargando su serviciabilidad y estado dentro de su vida útil. En Colombia las bases de diseño están sustentadas en dos principales manuales el del Instituto Nacional de Vías e Instituto de Desarrollo Urbano sirviendo de guía para pavimentos rígidos sin incluir temas fundamentales como la gestión de pavimentos en especial en el mantenimiento y rehabilitación. De acá nace el interés del presente artículo de investigación en donde se centra en evaluar las frecuencias de mantenimiento de las estructuras presentadas dentro del manual de diseño de IDU de pavimento rígido para determinar el efecto de agrietamiento transversal mediante el modelo de fatiga RPPR2. Para el desarrollo del artículo se realizó como primer paso una identificación de las variables de diseño que presenta el IDU dentro de su manual de diseño, segundo una evaluación de estas variables dentro del modelo de fatiga RPPR2 donde se obtuvieron graficas de comportamiento del pavimento determinando como tercer punto la frecuencia de mantenimiento más adecuada para cada tipo de estructura. Dando como conclusión que cada tipo de estructura responde de manera diferente frente a la falla por agrietamiento producido por el efecto de fatiga en las losas de concreto y necesitan mantenimiento rutinario como limpieza y sello de fisuras, rehabilitación y reconstrucción total dependiendo del nivel de afectación de las losas.

Palabras clave: Pavimentos rígidos; falla por fatiga; agrietamiento transversal; mantenimiento de pavimentos; modelos de deterioro de pavimentos.

ABSTRACT

The behavior of a pavement must be evaluated within the first stages of planning, design and construction in order to predict how these structures should receive adequate maintenance and / or update their service and status within their useful life. In Colombia, the design bases are supported by two main manuals, the National Institute of Roads and the Urban Development Institute, which serve as a guide for rigid pavements and which include the fundamental elements such as the management of pavements especially for maintenance and rehabilitation. From here the interest of the present research article is born, where it focuses on evaluating the frequencies of maintenance of the structures within the design manual of IDU of rigid pavement to determine the effect of transverse cracking by means of the RPPR2 fatigue model. For the development of the article was carried out as a first step an identification of the design variables that the IDU presents within its design manual, second an evaluation of these variables within the fatigue model RPPR2 where the graphs of the behavior of the pavement were obtained determining as the third point, the most suitable maintenance frequency for each type of structure. Giving as a conclusion that each type of structure responds in a different way to the cracking failure produced by the fatigue effect in concrete hands and needs routine maintenance such as cleaning and seal cracks, rehabilitation and total reconstruction depending on the level of affectation of the slabs

Keywords: Rigid pavements; failure due to fatigue; transversal cracking; maintenance of pavements; deterioration models of pavements.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de pavimentos rígidos intervienen variables fundamentales (tránsito, tipo de suelo de soporte, estructura, materiales de construcción, factores climáticos, condiciones de drenaje, topografía, entre otros), que hacen que el diseño sea particular para cada tipo de proyecto. Sin embargo, la preocupación por hacer que las estructuras cumplan un periodo de diseño y presten la serviciabilidad adecuada para la cual se diseñó, trajo consigo que diferentes organizaciones a nivel mundial comenzarán a evaluar el comportamiento que tendrá el pavimento durante su etapa de vida mediante diferentes modelos de predicción.

Los pavimentos rígidos desde el momento de su construcción comienzan a presentar diferentes tipos de fallas y deterioros debidos a, los procesos constructivos a los que se son sometidos y a la calidad de los materiales y/o elementos que los conforman; dentro de los daños más comunes se pueden encontrar fisuras tempranas en las losas de concreto correspondientes a: cambios bruscos de temperatura, hidratación y/o curado inadecuados, falta de juntas que permitan que las losas se puedan mover fácilmente; también se existen fallas a lo largo de su vida útil como las grietas, escalonamiento,

descascamiento, piel de cocodrilo [1], entre otras, todas estas pueden afectar de manera parcial e total la funcionalidad del pavimento.

Para prevenir este tipo de fallas y determinar el mantenimiento y rehabilitación que el pavimento necesita, existen diferentes herramientas que permiten predecir el comportamiento de este y crear un sistema de toma de decisiones para optimizar su vida útil.

La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), es la entidad encargada de regular las diferentes especificaciones, normas y manuales de los pavimentos en Estados Unidos [2], y fue donde se empezó a ver la necesidad de incluir dentro de los manuales de diseño diferentes factores que influyen en el comportamiento del pavimento; en el año 2004 decidió basar su guía de diseño en un método mecanicista – empírico "MEPDG", que permite predecir el comportamiento de los pavimentos durante su periodo de diseño. Esta guía se basa en indicadores de rendimiento del pavimento, mediante diferentes variables de diseño como lo son los tipos de materiales a utilizar, estructura, construcción, clima, tránsito y sistemas de gestión de pavimentos, haciendo que estas se integren y permitan una evaluación completa y por ende un diseño real y certero [3].

La Federal Highway Administration (FHWA), en el año 2000 publicó un documento llamado "*Improved performance models for PCC pavement performance-related specifications. Volume I*", donde se hace un enfoque a las especificaciones de recomendación y aceptación de los pavimentos rígidos basándose en variados modelos de tipo predicción de comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil. Uno de estos modelos es el RPPR2 desarrollado por Yu *et al.*, en 1997, donde se tienen en cuenta variables fundamentales como las características de diseño y construcción, el tránsito y las variables climáticas (a las que estará expuesta la estructura), para determinar la predicción de pavimento en temas de agrietamiento. El modelo RPPR2 se puede resumir como la relación entre la fatiga acumulada y el porcentaje de losas agrietadas que se presentan en la estructura de pavimento [4].

La Portland Cement Association (PCA), es una organización dedicada a promover la aplicación del cemento y el concreto en los Estados Unidos [5]. Esta organización estableció un procedimiento de diseño para determinar un espesor mínimo y dimensiones de la losa de concreto para pavimentos rígidos, este se basa en los efectos de fatiga por cargas repetitivas de tránsito generando agrietamiento de las losas [6], esta metodología tiene como fin obtener un diseño eficiente y económico, al momento de la construcción y el mantenimiento.

En Colombia el diseño, construcción y gestión de pavimentos está a cargo de entidades nacionales como El Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías (INVIAS), La Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), las Gobernaciones de cada departamento y para el caso específico de Bogotá el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). Estos organismos a lo largo del desarrollo de la infraestructura vial del país han venido desarrollando diferentes manuales, especificaciones y guías para desarrollar las actividades mencionadas al inicio de este párrafo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que cada una de sus

bases teóricas para desarrollar sus guías y manuales han sido normas y estándares internacionales como lo son las normas AASHTO y la metodología Portland Cement Association (PCA), especificaciones propias de los países de origen. Lo que ha originado una falta de información certera y clara de cómo se comportan realmente las estructuras con las características propias de nuestro país [7].

A pesar de esto, en los últimos años con el desarrollo de la globalización y la necesidad de crear estructuras mucho más competitivas y encontrándole un nuevo uso al concreto, se empezó la implementación de los pavimentos rígidos, quienes han tomado una fuerte importancia por su facilidad de construcción, sus características mecánicas para soportar grandes esfuerzos de compresión y cierto grado de flexión haciendo que resistan grandes cargas de tránsito, distribuyéndolas por toda su losa; en un pavimento rígido la losa es la encargada de soportar estos esfuerzos lo que permite mayor flexibilidad en temas de suelo de soporte [8].

El INVIAS desarrolló el “*Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajo, medio y altos volúmenes de tránsito*” con el apoyo del Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC) y el Ministerio de Transporte, brindando un catálogo de estructuras, fundamentadas en las variables que determinan los espesores de las losas de concreto que se comporten de la mejor forma frente a diferentes niveles de tránsito, características de la subrasante, materiales de soporte para el pavimento rígido y las propiedades del concreto a usar, como lo son sus especificaciones constructivas, donde los usuarios puedan escoger la más adecuada para la necesidad del proyecto [9].

En el 2013 el IDU con el apoyo del Banco de Desarrollo de América de Latina y la Universidad Nacional de Colombia publicaron la “*Cartilla guía de diseño con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá D.C*” en dónde se recopilaron diferentes estudios desarrollados por estas entidades en las últimas décadas con el fin de proponer métodos y soluciones para la construcción, mejoramiento y conservación de la infraestructura vial presentando una guía de estructuras de pavimentos basadas en las condiciones locales como materiales y procedimientos constructivos que se han venido aplicando en Bogotá [10].

Sin embargo, estos manuales no presentan un capítulo específico para las recomendaciones a nivel de gestión y mantenimiento para las estructuras que se encuentran dentro de ellos, simplemente hacen comentarios generalizado recomendaciones basados en experiencia de diferentes profesionales que llevan trabajando mucho tiempo en este campo.

Teniendo en cuenta la generalización presentada dentro de los manuales de diseño, nace el interés de realizar el presente documento, debido a las falencias encontradas a nivel de recomendaciones de mantenimiento, haciendo necesario reevaluar los daños más comunes en el pavimento rígido y como alcance de investigación, el efecto de agrietamiento de losas por fatiga excesiva y así evaluar las frecuencias de mantenimiento para las estructuras presentadas

dentro del manual de diseño de IDU de pavimento rígido para determinar el efecto de agrietamiento transversal mediante el modelo de fatiga RPPR2.

1. METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo tiene como propósito integrar información pertinente al diseño de pavimentos rígidos recopilada de los diferentes manuales que presentan las entidades estatales de Colombia, con el fin de determinar las características del comportamiento frente al agrietamiento de estas estructuras y así concluir cuál será la frecuencia de mantenimiento a la que estarán sometidas estos pavimentos frente a falla por fatiga que producen agrietamiento transversal durante su vida útil. Para el desarrollo de esta metodología, esta se dividió en tres partes:

Como primer punto se realizará una revisión del manual de diseño de pavimentos rígidos del IDU, que permitirá determinar qué variables de diseño de su catálogo de estructuras de la ciudad Bogotá y así evaluar el agrietamiento por fatiga.

En el segundo punto se identificarán las características de falla por agrietamiento de pavimentos rígidos, para las estructuras seleccionadas en Bogotá, pronosticando la ocurrencia de fallas durante el periodo de diseño, mediante la investigación teórica del porqué del agrietamiento transversal en las estructuras de pavimentos y cómo se basa el modelo RPPR2 para determinar las fallas de este tipo en las losas de concreto, por medio de curvas de comportamiento en el tiempo de diseño de los pavimentos contra el porcentaje de losas agrietadas, permitiendo determinar en qué momento el pavimento necesita una intervención de mantenimiento y cuantificándolo en el tiempo.

Como tercer punto se establecerán recomendaciones de mantenimiento y conservación de las estructuras presentadas dentro del manual de diseño del IDU, basados en los resultados que se obtuvieron del modelo de agrietamiento de fatiga RPPR2.

2. VARIABLES A UTILIZAR

2.1 TRÁNSITO

Para el diseño de pavimentos en concreto es necesario tener en cuenta el efecto que ejercen las cargas de tránsito sobre la estructura, ya que los vehículos que pasan por las losas de concreto ejercen elevadas presiones de inflado y de contacto generando consigo mayores esfuerzos lo que significa tener espesores más gruesos [11]. En Colombia el Ministerio de Transporte, mediante la resolución 4100 de 2004, reglamentó los límites de pesos y dimensiones de vehículos que transitan por la red vial del país, estos vehículos se clasifican por el número de ejes y llantas que los componen, permitiendo determinar la carga que estas ejercen sobre la estructura de pavimentos [12].

Para la determinación del tránsito es necesario calcular la distribución de cargas en los tipos de ejes que pasan durante el periodo de diseño que se proyecta la estructura de pavimento, esto comienza con un conteo de los vehículos que

pasan por la vía en estudio, determinando el Transito promedio Diario Semanal (TPDS), este tránsito se clasifica en función de ejes simples equivalentes de 8.2 Ton a lo largo del periodo de diseño de diseño [7].

Dentro del manual de diseño del IDU se realizaron conteos y aproximaciones estadísticas para determinar el TPD que transita por las principales vías de Bogotá, en donde se evaluarán las siguientes tres categorías para el diseño de pavimentos rígidos dentro de un periodo de diseño de 20 años [10]:

Tabla 1. Categoría de tránsito de diseño

Denominación	NEE (Número de ejes equivalentes de 8.2 T) para 20 años-Pavimento rígido
T1-1	$NEE \leq 2.345.000$
T2-1	$2.345.000 < NEE \leq 4.690.000$
T2-2	$4.690.000 < NEE \leq 7.000.000$

Fuente: Diseño de pavimentos de bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá, 2012, pp. 13 [10].

2.2 SUBRASANTE

La subrasante se puede definir como la cimentación donde se apoyará la estructura del pavimento, dada su importancia es necesario determinar la capacidad de soporte o resistencia necesaria para soportar las deformaciones de las cargas de tránsito a la cuales estará expuesta el pavimento.

Para esto es necesario evaluar características principales como la composición del suelo, humedad y en especial el comportamiento mecánico que se mide mediante el ensayo California Bearing Ratio (CBR), donde se determina el índice de resistencia que tiene la subrasante y la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación de los materiales que componen al pavimento mediante el Módulo Resiliente. Con estos parámetros se puede llegar a calcular el espesor necesario que tendrá el pavimento rígido [8].

El IDU cuenta con la zonificación geotécnica de la ciudad de Bogotá, obtenida mediante la recopilación de datos suministrados por los diferentes informes técnicos (relacionados con esta área) de los proyectos realizados en la capital a lo largo del tiempo, y con dicha información se pudo llegar a la caracterización de la subrasante que se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de subrasante para Bogotá

Tipos de Subrasante	CBR (%)	Módulo Resiliente (MPa)
SR1	<1.5	<11.25
SR2	1.5-2.5	11-19
SR3	2.5-3.5	19-26
SR4	3.5-4.0	26-40
SR5	>4.0	>40

Fuente: Diseño de pavimentos de bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá, 2012 [10].

Para la selección de las estructuras del IDU se decide dejar por fuera el tipo SR1 teniendo en cuenta un rango de CBR menor a 1.5 no sirve para fundar ningún tipo de estructura sobre el debido a su poca resistencia mecánica, por lo cual se decide trabajar con las siguientes subrasantes:

Tabla 3. Subrasante seleccionado para evaluación de estructuras

Tipo de subrasante	CBR (%)
SR2	2.0
SR3	2.5
SR4	3.5
SR5	4.0

Fuente: Elaboración propia.

2.3 MATERIAL DE SOPORTE

En los pavimentos rígidos el objetivo de contar con una base o subbase en donde se apoye la losa de concreto para prevenir el efecto de fallas estructurales (el bombeo que se produce entre las placas), incrementar la capacidad de soporte del pavimento, dicho incremento puede representar una reducción en los espesores de diseño haciendo más económico el pavimento. Entre estos soportes se encuentran capas de material granular o bases estabilizadas con cemento [7].

El IDU dentro de su manual de diseño establece que la losa de pavimentos debe estar apoyada por una subbase granular que cumpla con el comportamiento mecánico y los requerimientos de granulometría establecidos dentro de sus especificaciones [10].

Se eligieron dos tipos de soporte que se evaluarán en las estructuras de pavimento, ya que, son las usualmente más utilizadas en la construcción de pavimentos debido a la efectividad que tienen para soportar la losa del pavimento.

Tabla 4. Tipo de soporte seleccionado para evaluación de estructuras

TIPO DE SOPORTE
BG (15 cm de base granular)
BEC (15 cm de base estabilizada con cemento)

Fuente: Elaboración propia.

2.4 MATERIAL DE SOPORTE

Dentro de la construcción del pavimento rígido es de gran importancia la buena calidad y la alta durabilidad del concreto hidráulico a utilizar debido a las altas cargas de tránsito a la cual estará sometida la estructura. Para esto el concreto debe tener una resistencia adecuada a la flexión que se encuentra en un rango de módulo de rotura entre 4.0 y 4.5 MPa, el concreto por debajo de los 3.8 MPa se deberá usar según la experiencia en lugares en donde los materiales que

soporten la losa del pavimento rígido tengan una excelente calidad mecánica y se comporten como un conjunto, ya que, este concreto no tiene las mejores características mecánicas [7].

2.5 CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO RÍGIDO

Para la determinación de espesores por el método PCA influye de forma significativa el método de transferencia de carga que se vaya a usar, entre estos se encuentran los pasadores de juntas transversales los cuales usualmente son barras lisas de 1/8" de espesor con respecto a la losa, con profundidad de 12 veces el diámetro de la losa y una separación entre barras de 30 cm IDU [10], y el confinamiento lateral entre las losas de concreto con bermas, bordillos o andenes. El uso del confinamiento lateral en los pavimentos ayuda a reducir los esfuerzos a flexión y las deflexiones que se llegan a producir por las cargas de tránsito en los pavimentos [7]. Por lo tanto, para la evaluación de agrietamiento en las estructuras seleccionadas del manual se estimará el uso de Dovelas y No Berma.

2.6 RESUMEN DE LAS VARIABLES SELECCIONADAS A EVALUAR:

A continuación, se presenta un cuadro resumen donde se relacionan las variables a analizar:

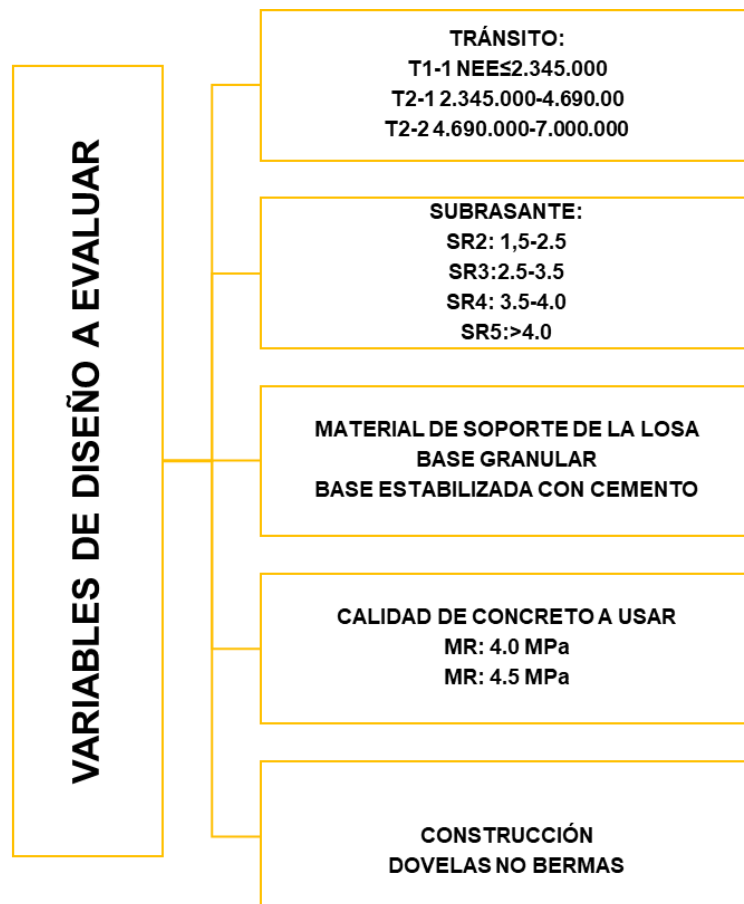


Figura 1. Variables seleccionadas a evaluar
Fuente: Elaboración propia.

2.8 ESTRUCTURAS SELECCIONADAS DEL MANUAL DE DISEÑO DEL INVIAS

Mediante la evaluación anterior de variables a estudiar se tienen en cuenta las siguientes estructuras tomadas del manual de diseño del IDU:

Tabla 5. Estructuras seleccionadas del catalogo de estructuras.

ESTRUCTURA	ESPESOR (cm)	TRANSITO N° EJES EQUIVALENTES DE 8,2 Ton	SUBRASANTE CBR	LONGITUD DE LOSA (m)	ANCHO DE LOSA (m)	CONCRETO A USAR MPa	MATERIAL SOPORTE	CONSTRUCCIÓN
A	20	2,000,000	2	3,25	3,25	4,0 Y 4,5	BG Y BEC	DOVELAS SIN BERMA
B	22	<2,345,000	1,5-2,5	3,25	3,25	4,0 Y 4,5	BG Y BEC	DOVELAS SIN BERMA
C	24	2,345,000-4,690,000	2,5-3,5	3,25	3,25	4,0 Y 4,5	BG Y BEC	DOVELAS SIN BERMA
D	25	4,690,000-7,000,000	3,5-4,0	3,25	3,25	4,0 Y 4,5	BG Y BEC	DOVELAS SIN BERMA

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se muestran los espesores dados por el catálogo de estructuras a evaluar del manual de diseño del IDU, estas estructuras se procederán a ser evaluadas mediante el modelo RPPR2 para la determinación de agrietamiento a través de los 20 años de periodo de diseño.

3. BASES TEORICAS MODELO DE AGRIETAMIENTO RPPR2

El modelo RPPR2 desarrollado por Yu *et al.* en 1997, se basa principalmente en metodologías mecanicistas presentadas dentro del manual "MEPDG" de la AASHTO que tiene en cuenta la evaluación y análisis del daño y deterioro que tienen los pavimentos de concreto con juntas simples JPCP. El agrietamiento transversal tiende a presentarse como respuesta del pavimento al efecto repeticiones elevadas de cargas de tránsito a lo que se le denomina como fatiga, este tipo de daños se dan principalmente perpendicularmente en el eje central del carril del pavimento [13].

Este agrietamiento se produce en las losas de concreto se calcula como el porcentaje de número de losas agrietadas totales en el pavimento y se puede calcular con la ecuación "(1)".

$$CRK = \frac{100}{1 + FD^{C_3}} \quad (1)$$

Donde:

CRK: Es la cantidad pronosticada de agrietamiento en la losa de concreto.

FD: Daño por fatiga.

C₃: Factor de calibración para el modelo RPPR2 es de -1.66.

Para poder determinar las acumulaciones de daño por fatiga se debe considerar factores de condición crítica para el agrietamiento transversal en las losas de concreto mediante la ecuación "(2)":

$$FD = IDAM + \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

Donde:

n: Número de cargas aplicadas

N: Número de carga admisible

IDAM: Daño por fatiga existente o pasado.

El número de cargas admisibles se determina utilizando la ecuación “(3)” para fatiga:

$$\log N_{i,j,l,k,m} = C_1 \left(\frac{M_R}{\sigma_i} \right)^{C_2} + 0.4371 \quad (3)$$

Donde:

N: Número de repeticiones admisibles por agrietamiento

MR: Módulo de rotura del concreto

σ = Esfuerzo crítico total de tensión debido al tráfico y cargas ambientales

C1, C2= Constantes de calibración C1=2.00 y C2= 1.41 constantes para el modelo RPPR2.

El cálculo del daño por fatiga es un proceso de suma de daños son calculados, el agrietamiento total combinado se determina utilizando la ecuación “(4)”:

$$TCRACK = (CRK_{BU0} + CRK_{BU1} + CRK_{BU2} + \dots + CRK_{BU_n}) * 100 \quad (4)$$

Donde:

TCRACK: Agrietamiento total en (%)

CBK_{BUj}: Cantidad prevista de agrietamiento

CRK R: Cantidad de grietas transversales reparadas.

Mediante las ecuaciones relacionadas anteriormente se calculan el porcentaje de losas agrietadas durante el periodo de diseño mediante análisis de sensibilidad en donde se logrará determinar el tiempo estimado para el mantenimiento periódico necesario para estructuras presentadas dentro del manual de diseño de pavimentos de concreto rígido del IDU. Teniendo en cuenta que el manual del IDU no cuenta con recomendaciones de mantenimiento para pavimentos rígidos y se pueden llegar a comparar con las presentadas dentro del manual del INVIAS nacen de la recopilación de experiencias a lo largo del tiempo, sin embargo, no se tiene en cuenta las condiciones particulares para cada estructura y será lo que se evaluará dentro de los resultados del presente artículo.

Tabla 6. Actividades y frecuencias para el mantenimiento de los pavimentos en concreto.

ACTIVIDAD	FRECUENCIA
Reposición material sello de juntas	5-7 años
Reconstrucción del 5%, área construida mediante reparaciones parciales o totales	10 años
Demolición y reconstrucción del 5% del área construida	15-20 años

Fuente: Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito , 2008 [9].

4. PROCEDIMIENTO

Para el cálculo de la fatiga acumulada de las estructuras presentadas dentro de la Tabla 5 se usó de una hoja de cálculo en donde se relacionan las ecuaciones presentadas en el numeral 3. Como primer paso se procede a calcular el esfuerzo que produce fatiga en condición crítica para el agrietamiento transversal (aquí se relacionan los datos básicos como el espesor de la losa, modulo elástico, módulo de rotura, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansión térmica, módulo combinado entre la subrasante y las bases granulares o la base estabilizada con cemento, dimensión de la losa, carga de una llanta lo cual se relaciona con 9000 lb, presión de llanta 80 psi y el periodo de diseño a donde que quiere calcular el pavimento), haciendo uso de “(3)”.

Los esfuerzos de tensión máximo calculados en el fondo de la losa disminuyen notablemente cuando se usa como material de soporte capas de base estabilizadas con cemento, ya que, al momento de aplicar la carga de tránsito esta se reparte sobre toda la losa de concreto pero el material de soporte aumenta la capacidad de soporte haciendo que el esfuerzo que se disipe sea mucho menor en la estructura del pavimento.

Tabla 7. Esfuerzo calculado de las estructuras evaluadas

ESTRUCTURA	Espesor de losa cm	Espesor de losa in	PCC Modulo de elasticidad	PCC Modulo de Rotura psi	PCC Modulo de Rotura Mpa	Coeficiente de Poisson μ	Coef. Exp. Termica $\alpha, ^\circ F$	Modulo combinado psi/in	Largo de losa L, ft	Ancho de losa W, ft	Load P lb.	Presión de Inflado q, psi	Esfuerzo Calculado
A	20,0	7,9	3551550	580	4,0	0,15	5,50E-06	110	10,7	10,7	9,000	80	366,0
	20,0	7,9	3551550	580	4,0	0,15	5,50E-06	400	10,7	10,7	9,000	80	299,2
	20,0	7,9	3888709	653	4,5	0,15	5,50E-06	110	10,7	10,7	9,000	80	370,4
	20,0	7,9	3888709	653	4,5	0,15	5,50E-06	400	10,7	10,7	9,000	80	303,5
B	22,0	8,7	3551550	580	4,0	0,15	5,50E-06	138	10,7	10,7	9,000	80	304,7
	22,0	8,7	3551550	580	4,0	0,15	5,50E-06	517	10,7	10,7	9,000	80	252,1
	22,0	8,7	3888709	653	4,5	0,15	5,50E-06	138	10,7	10,7	9,000	80	308,4
	22,0	8,7	3888709	653	4,5	0,15	5,50E-06	517	10,7	10,7	9,000	80	255,6
C	24,0	9,4	3551550	580	4,0	0,15	5,50E-06	178,7	10,7	10,7	9,000	80	256,4
	24,0	9,4	3551550	580	4,0	0,15	5,50E-06	681,6	10,7	10,7	9,000	80	211,5
	24,0	9,4	3888709	653	4,5	0,15	5,50E-06	178,7	10,7	10,7	9,000	80	259,4
	24,0	9,4	3888709	653	4,5	0,15	5,50E-06	681,6	10,7	10,7	9,000	80	214,6
D	25,0	9,8	3551550	580	4,0	0,15	5,50E-06	197,3	10,7	10,7	9,000	80	236,8
	25,0	9,8	3551550	580	4,0	0,15	5,50E-06	616,5	10,7	10,7	9,000	80	201,6
	25,0	9,8	3888709	653	4,5	0,15	5,50E-06	197,3	10,7	10,7	9,000	80	239,6
	25,0	9,8	3888709	653	4,5	0,15	5,50E-06	616,5	10,7	10,7	9,000	80	204,4

Fuente: Elaboración propia.

Con el esfuerzo calculado se relacionan datos de tránsito, ejes por año, porcentaje de ejes en el borde (10% generalmente) y porcentaje de vehículos en el día (entre 80 y 90%). Calculando las acumulaciones de daño por fatiga mediante la relación entre la carga aplicada y la carga admisible haciendo uso de “(2)”.

Para evaluar las cargas o repeticiones admisible N se relaciona mediante el nivel de esfuerzos aplicados, que relaciona el esfuerzo de tensión máximo esperando en el fondo de la losa calculado en la tabla anterior y el valor de la resistencia o el módulo de rotura del concreto utilizado [14], mediante la siguiente relación presentada en “(5)”:

$$Carga\ admisible = 10^{2,13 * \left(\frac{\sigma}{MR}\right)^{-1.2}} \quad (5)$$

La carga aplicada es una relación entre el número de ejes equivalentes que se esperan durante el periodo de diseño, el porcentaje de ejes en el borde y el porcentaje de vehículos que se esperan durante un día.

Tabla 8. Daño presentado por fatiga en las estructuras

ESTRUCTURA		ESFUERZO (psi)	RESISTENCIA (psi)	CARGAS ADMISIBLES	CARGAS APLICADAS	DAÑO DE FATIGA POR AÑO
A	1	366	580	5.020	180000	3585,701%
	2	299,2	580	51.726	180000	347,989%
	3	370,4	653	16.053	180000	1121,291%
	4	303,5	653	219.440	180000	82,027%
B	1	304,7	580	40.873	211050	516,358%
	2	252,1	580	617.034	211050	34,204%
	3	308,4	653	174.214	211050	121,144%
	4	255,6	653	3.658.242	211050	5,769%
C	1	256,4	580	469.487	422100	89,907%
	2	211,5	580	13.982.510	422100	3,019%
	3	259,4	653	2.792.759	422100	15,114%
	4	214,6	653	125.638.938	422100	0,336%
D	1	236,8	580	1.739.538	630000	36,217%
	2	201,6	580	37.249.286	630000	1,691%
	3	239,6	653	12.382.841	630000	5,088%
	4	204,4	653	385.435.763	630000	0,163%

Fuente: Elaboración propia.

Como tercer paso se realiza la proyección de la cantidad de agrietamiento producida por fatiga en las losas de concreto de en total mediante "(1)", en donde se realiza una suma acumulativa de este daño durante los 20 años del periodo de diseño

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Con de los datos obtenidos del procedimiento anterior se realizó la gráfica en donde se relacionan el porcentaje de losas agrietadas vs. los años del periodo de diseño, en donde se obtuvieron para las cuatro estructuras evaluadas las siguientes graficas:

ESTRUCTURA A

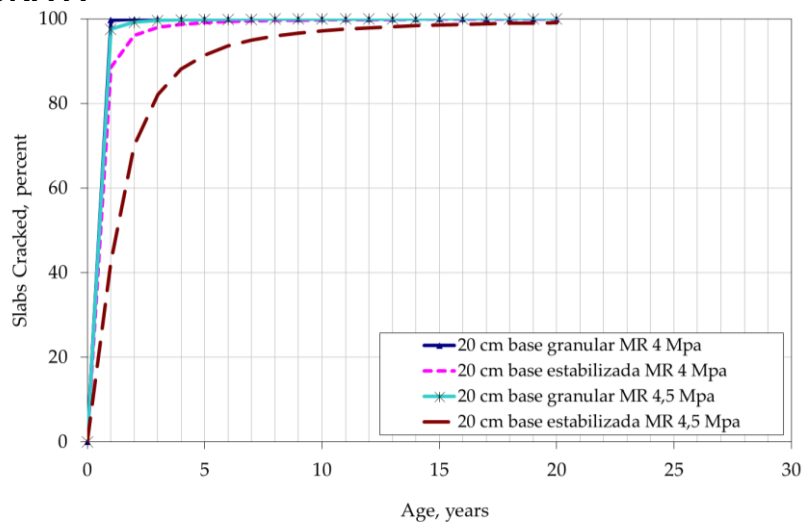


Figura 2. Porcentaje de losas agrietadas estructura A vs. Años de vida útil

Fuente: Elaboración propia.

El daño de fatiga presentada para la estructura A (Fig. 1) muestra un comportamiento deficiente, debido a que, a menos de 5 años de su vida útil se encontrarán entre 80 y 100% del total de losas agrietadas, las cuales necesitarán reconstrucción total de esta sin embargo la que presenta una mejor respuesta es la base estabilizada con cemento el cual aporta a una baja de agrietamiento por fatiga.

Dentro de los resultados obtenidos en la Tabla 8 se observan que los cuatro tipos de estructuras tienen un porcentaje de fatiga mucho mayor a 100% y teniendo en cuenta el modelo de diseño de PCA está fallando desde su inicio de vida útil, por lo cual se debe reconsiderar el uso de este espesor para este tipo de losa de concreto, a pesar de que tiene un tránsito relativamente bajo de 2 millones de ejes, por lo que se asume que para una carga mayor de tránsito tendrá fallos de fatiga mucho mayores.

ESTRUCTURA B

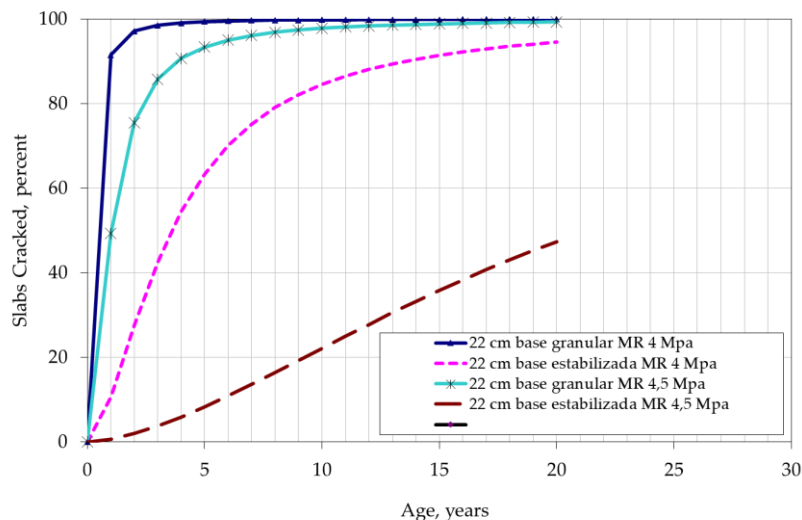


Figura 3. Porcentaje de losas agrietadas estructura B vs. Años de vida útil
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la estructura B (Fig.3), que contiene un espesor de losa de 22cm de concreto muestra falla estructural ya que de nuevo se repite el mismo modelo de daño que la estructura anterior en la losa que está soportada sobre bases granulares sin importar el tipo de concreto que se usa, sin embargo el uso de un concreto de mayor rigidez arroja un porcentaje de fatiga menor al 50% por lo que durante su vida de servicio presentará un adecuada variación del agrietamiento, las cuales necesitarán mantenimiento rutinario, sin embargo el uso de un concreto de menor especificación no mejora la condición de daño por agrietamiento ya que llevará un mayor trabajo en temas de mantenimiento durante su vida útil.

ESTRUCTURA C

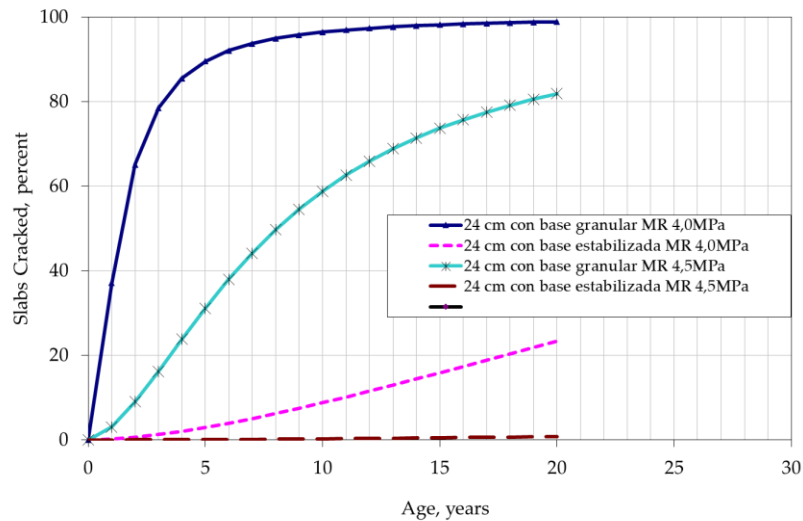


Figura 4. Porcentaje de losas agrietadas estructura C vs. Años de vida útil
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la estructura C (Fig. 4) se evidencia una mejor respuesta al agrietamiento por fatiga como se puede observar los pavimentos que a los 5 años de vida útil tienen más de su 30% de losas agrietadas en donde se llevará a cabo mantenimiento de mayores características que simplemente una limpieza de grietas como si lo puede tener las estructuras que están soportadas sobre bases estabilizadas con cemento.

ESTRUCTURA D

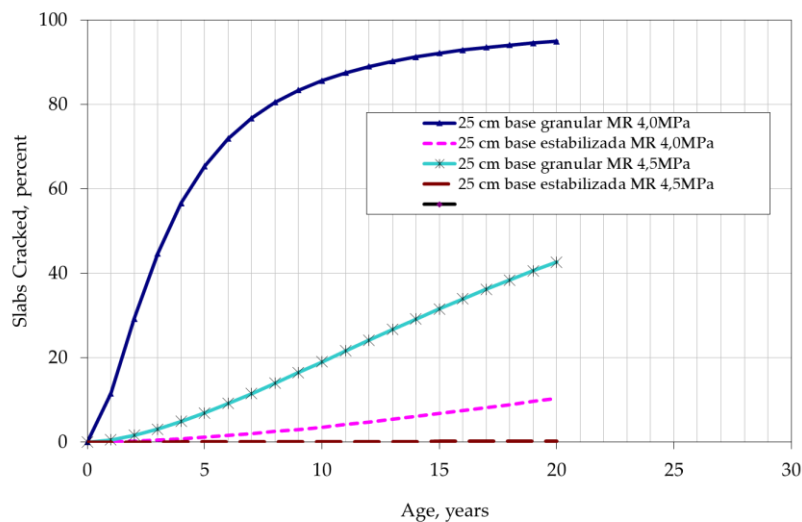


Figura 5. Porcentaje de losas agrietadas estructura D vs. Años de vida útil
Fuente: Elaboración propia.

La estructura D (Fig. 5) es la que mejor respuesta presenta al agrietamiento durante su vida útil las bases granulares con el concreto a usar tienen menor agrietamiento en la vida útil, sin embargo, el espesor usado puede llegar a ser algo costoso.

Como resumen del daño de las diferentes estructuras presentadas estructuras A y B presentan las características más altas de daño como se observa en la (Fig. 6) las cuales no son recomendadas para la construcción de pavimentos rígidos dando que superan más del 100% de fatiga y donde a lo largo del tiempo puede llegar a ser perjudicial para la estructura debido a que aparecerán agrietamiento transversal durante su vida útil y por lo tanto su mantenimiento llega a ser más costoso. Como se observa en la (Fig. 6) la estructura que presenta un mejor comportamiento a este fenómeno son las bases estabilizadas con cemento respecto a las bases granulares debido a usar este tipo de soportes hace que el módulo de la subrasante aumente y ayude a disipar mejor los esfuerzos que producen el efecto de fatiga en los pavimentos.

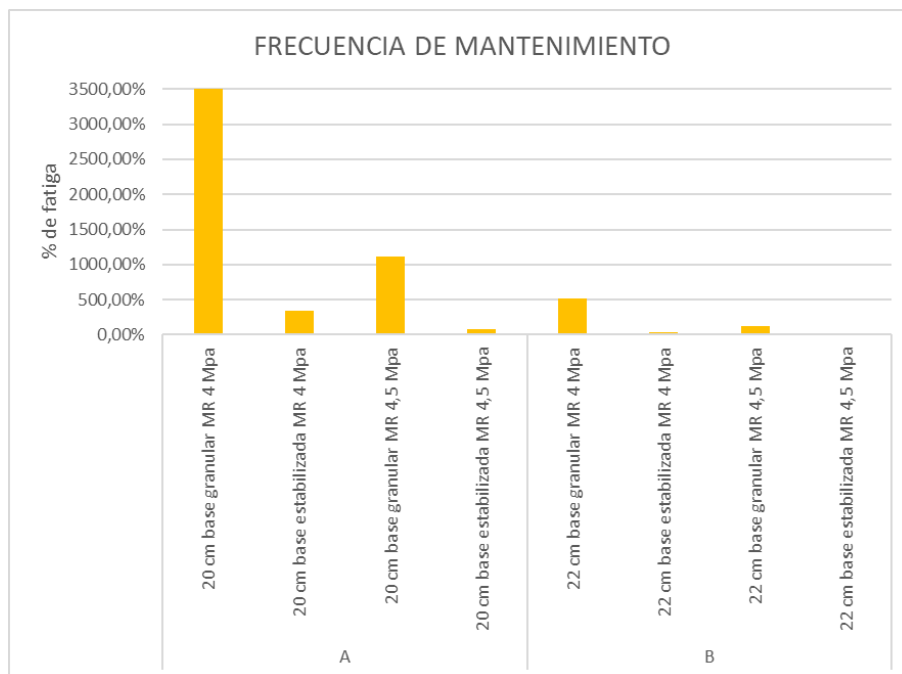


Figura 6. Porcentaje de fatiga de las estructuras A B
Fuente: Elaboración propia.

Las estructuras C y D cumplen con el porcentaje admisible para el fallo por agrietamiento en las no superan el 100% de fatiga en el pavimento (Fig. 7), de nuevo presenta el mismo comportamiento las bases estabilizadas en cemento que en las estructuras A y B en cuanto mejoran notablemente el porcentaje de losas agrietadas.

Otro factor a tener en cuenta es el tema económico dado que los espesores muy altos en concreto pueden llegar a ser costosos en proyectos donde niveles de tránsito no sean muy grandes sin embargo se establece que con un espesor de 24cm acompañado con materiales de soporte como bases granulares para tránsitos entre 2 millones de ejes hacia arriba pueden a llegar a ser una buena solución constructiva, sin embargo si lo que se desea es tener una estructura que no presenten daños a lo largo de su vida útil y si así lo necesita el proyecto usar bases estabilizadas con cemento ayudará a disminuir en más de 80% del daño por fatiga.

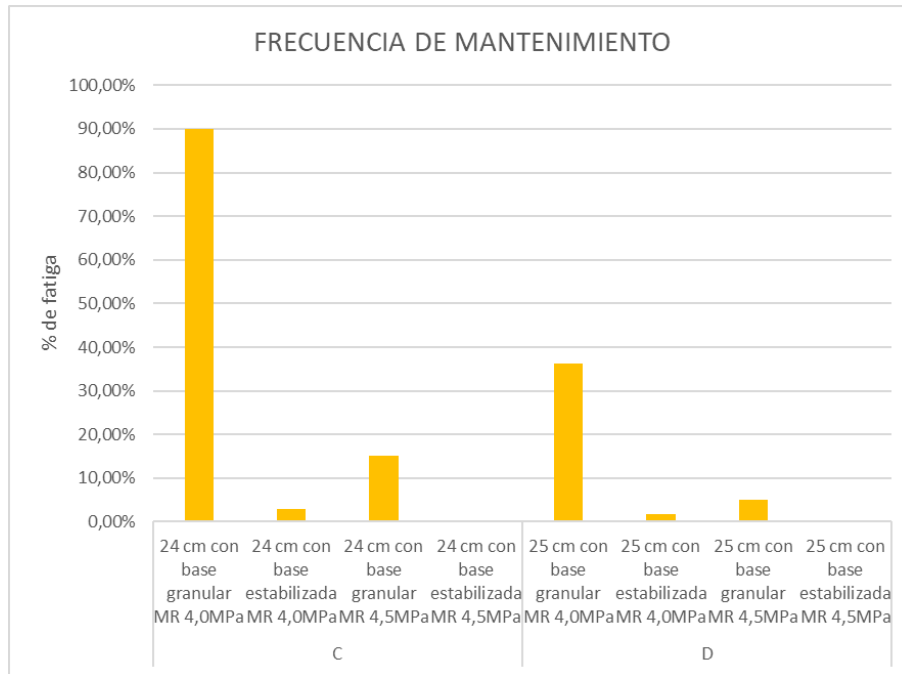


Figura 7. Porcentaje de fatiga de las estructuras A B
Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados presentes de la falla de agrietamiento para los pavimentos rígidos se presentan las siguientes frecuencias de mantenimiento dentro de la Tabla 9:

Tabla 9. Frecuencia de mantenimiento de las estructuras

FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO		
A	20 cm base granular MR 4MPa	Rehabilitación total a menos de los 5 años de servicio del pavimento por presencia del 100% de losas de agrietamiento en donde pueden hacerse actividades de parcheo o reemplazo de espesor parcial de losas o retiro y reemplazo parcial o total de losas.
	20 cm base estabilizada MR 4MPa	
	20 cm base granular MR 4,5MPa	
	20 cm base estabilizada MR 4,5MPa	
B	22 cm base granular MR 4MPa	Rehabilitación total a menos de los 5 años de servicio del pavimento por presencia del 100% de losas de agrietamiento.
	22 cm base estabilizada MR 4MPa	En los dos primeros años se puede hacer una limpieza de juntas y reparación, pero a los 10 años de la vida útil es necesario realizar una rehabilitación general.
	22 cm base granular MR 4,5MPa	Reparación total a menos de los 5 años de servicio del pavimento por presencia del 100% de losas de agrietamiento.

	22 cm base estabilizada MR 4,5MPa	En los primeros cinco a siete años se puede hacer una limpieza de juntas y sello de grietas, a los doce años de la vida útil es necesario realizar una reconstrucción.
C	24 cm con base granular MR4,0MPa	Rehabilitación de la losa de pavimentos en los primeros 5 años, se puede desde el año 1 al 5 realizar un resellado de fisuras lo cual puede ayudar a retardar este proceso
	24 cm con base estabilizada MR 4,0MPa	Para este tipo de estructura se puede realizar limpieza estas agrietamiento y parcheos para poder manejar de una forma correcta este tipo de grietas a los 7 años como también se puede realizar un cocido de grietas donde se pueda mejorar la características de mantenimiento
	24 cm con base granular MR 4,5MPa	Resellado de juntas y limpieza general para que el agua no ingrese al pavimento generando mayores problemas a los 5 años.
	24 cm con base estabilizada MR 4,5MPa	Resellado de juntas y limpieza general para que el agua no ingrese al pavimento generando mayores problemas a los 10 años.
D	25 cm con base granular MR 4,0MPa	Rehabilitación de la losa de pavimentos en los primeros 8 años, se puede desde el año 1 al 8 realizar un resellado de fisuras lo cual puede ayudar a retardar este proceso
	25 cm con base estabilizada MR 4,0MPa	Para este tipo de estructura se puede realizar limpieza estas agrietamiento y pareceos para poder manejar de una forma correcta este tipo de grietas a los 10 años como también se puede realizar un cocido de grietas donde se pueda mejorar la característica de mantenimiento
	25 cm con base granular MR 4,5MPa	Resellado de juntas y limpieza general para que el agua no ingrese al pavimento generando mayores problemas a los 10 años.
	25 cm con base estabilizada MR 4,5MPa	Resellado de juntas y limpieza general para que el agua no ingrese al pavimento generando mayores problemas a los 10 años anqué no es necesario mediante los resultados obtenidos en la (Fig. 5)

Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Se puede determinar que las diferentes variables comparadas no pueden llegar a presentar la misma característica de comportamiento a través del tiempo para cada una de las estructuras seleccionadas por lo cual llegar a generalizar la frecuencia de mantenimiento puede llegar a ser perjudicial para la estructura de un pavimento como lo presenta la Tabla 6 que si puede llegar a ser aplicables para las estructuras tipo C Y D.

Para disminuir los efectos de fisuración transversal en las losas de concreto se concluye que al incrementar el espesor de la losa y/o incrementar la resistencia del concreto a usar, como se reflejó en las gráficas de las estructuras planteadas, a mayores valores de dichas variables la fatiga disminuye considerablemente, sin embargo, es necesario tener en cuenta si la necesidad del proyecto y las posibilidades económicas lo permiten.

Para controlar la acción de fatiga a la cual estará sometida las estructuras de pavimentos a la repetición de cargas de tráfico, además de un soporte adecuado y con el uso de materiales de mejor calidad que la subrasante ayudará a que el consumo de esfuerzo sea menor al 100% y el daño por fatiga no sea tan excesivo en las losas de concreto.

Las bases estabilizadas, en especial con cemento, aumentan la resistencia a la fatiga de forma significativa llegando a eliminar este fenómeno en un 100% durante su vida útil.

A pesar de que el pavimento tenga este tipo de comportamiento frente a la fatiga, no es necesario olvidar que una gran parte de que el pavimento se deteriore en su totalidad es la frecuencia con que se le realiza mantenimiento preventivo, rehabilitación y reconstrucción. Es necesario no basarse simplemente en las características arrojadas por las estructuras sino de realizar trabajos de inspección rutinaria para determinar el tipo de falla y cuál es la solución más adecuada para esta.

Teniendo en cuenta que las gráficas presentadas son una aproximación de la realidad y pueda que esta condición cambie con el tiempo puede llegar a ser una base para contar con un plan de conservación en donde se pueden ir enfocando los trabajos necesarios de mejoramiento del pavimento y así garantizar que este pueda prestar el servicio necesario a lo largo de su vida útil. Contando con este plan de mejoramiento se puede tener un ahorro significativo en el costo del pavimento.

REFERENCIAS

- [1] G. P. López, F. O. Camargo y F. G. Toledo, "Estudio e investigación del estado de las obras de la red nacional de carreteras. Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos", Bogotá D.C, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/664->

- [manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-rigidos/file](#), consultado el 17 de octubre del 2017.
- [2] AASHTO, "Guide for Mechanistic-Empirical Design", National cooperative highway reasearch program transportation, Illinois, 2004.
- [3] W. B. Mena Abadía, "Implementación de modelo climático de la MEPDG "AASHTO 2008" en Colombia para tres condiciones climáticas", tesis inédita de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2013, pp. 23.
- [4] Federal Highway Administration, "Improved prediction models for PCC pavement performance-related specifications, Volumen I": Final Report., 2000.
- [5] Duravía concretando caminos, metodología de diseño PCA 84, Antecedentes, [En línea], Disponible en: <http://www.duravia.com.pe/wp-content/uploads/COLECCIONABLE-DURAVIA-VIII.2.pdf>, de donde se tomó el documento [consultado: 22 Octubre 2017].
- [6] Redacción Blog 360° en concreto, Argos, Diseño de pavimentos de concreto método PCA, [En línea], Disponible: <http://blog.360gradosenconcreto.com/disenio-de-pavimentos-de-concreto-metodo-pca/>, de donde se tomó el documento [Último acceso: 22 Octubre 2017].
- [7] C. A. Naranjo, Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos en concreto., Medellín: Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2004.
- [8] A. Montejo Fonseca, Ingeniera de pavimento para carreteras, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002.
- [9] Instituto colombiano de productores de cemento, Ministerio de transportes e Instituto nacional de vías, "Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito", Instituto colombiano de productores de cemento, 2008.
- [10] Instituto de Desarrollo Urbano, Banco de desarrollo de América Latina, Universidad Nacional de Colombia, Guía de pavimento para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C., Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2013.
- [11] F. S. Sabogal, Curso de Diseño de Pavimentos, Escuela Colombiana de Ingeniería, 2017. [En línea]. Disponible: http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%204.pdf, de donde se tomó [Último acceso: 2 Noviembre 2017].
- [12] Ministerio de Transporte, Resolución 004100, Republica de Colombia, Bogotá D.C., 28 de diciembre de 2004

- [13] AASHTO, "Pavement design guide a manual of practice", American Association of State highway and transportation official, Illinois, 2008.
- [14] Secretaría de comunicaciones y transporte, "Conceptos mecanicistas en pavimentos", Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila Qro, 2004.