

**EFFECTO DE LAS CARGAS DINÁMICAS DESARROLLADAS EN LA
INTERFAZ LLANTA – PAVIMENTO, EN LA VIDA POR FATIGA Y
AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**



RAMON JOSÉ PINEDA MORALES

YICELA JOHANNA RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

BARRANQUILLA

2020

**EFFECTO DE LAS CARGAS DINÁMICAS DESARROLLADAS EN LA
INTERFAZ LLANTA – PAVIMENTO, EN LA VIDA POR FATIGA Y
AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RAMON JOSÉ PINEDA MORALES

YICELA JOHANNA RODRÍGUEZ

TUTOR TESIS

OTTO ANDRÉS MORA LERMA

CO TUTOR TESIS

MIGUEL ÁNGEL FIGUEROA LOAIZA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

BARRANQUILLA

2020

Notas de aceptación:

Firma Jurado 1.

Firma Jurado 2.

Agradecimientos

Durante este proceso, queremos agradecerles a todas las personas que estuvieron involucradas en nuestra formación y aprendizaje. Su ayuda fue fundamental para culminar este gran sueño que hoy es una realidad.

Gracias a nuestro director, por su paciencia, dedicación y ayuda en el desarrollo del proyecto.

A la Corporación Universidad de la Costa por todo el conocimiento adquirido y por cada exigencia que nos convierten hoy en excelentes profesionales.

¡Simplemente Gracias!

Dedicatoria

A Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría, para poder culminar este trabajo.

A mis padres, por su constante apoyo y buenos consejos que me impulsaron para lograr este objetivo.

A mis profesores, por haber sido mi guía y brindarme su ayuda y conocimiento para el desarrollo de este proyecto.

Y a todos los amigos quienes me brindaron su ayuda incondicional para hacer posible la realización de este trabajo de investigación.

A la Corporación Universidad de la Costa por abrir sus puertas para formar profesionales.

Ramon Pineda

Dedicatoria

A Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría, para poder culminar este trabajo.

A mis padres, por su constante apoyo y buenos consejos que me impulsaron para lograr este objetivo.

A mis profesores, por haber sido mi guía y brindarme su ayuda y conocimiento para el desarrollo de este proyecto.

Y a todos los amigos quienes me brindaron su ayuda incondicional para hacer posible la realización de este trabajo de investigación.

A la Corporación Universidad de la Costa por abrir sus puertas para formar profesionales.

Yicela Rodríguez

Resumen

La presente investigación pretende evaluar el efecto que tienen las cargas dinámicas en la vida por fatiga y vida por ahuellamiento (Número de repeticiones admisibles por fatiga y por ahuellamiento), debido a que en la realidad los pavimentos están expuestos a cargas dinámicas y no a cargas estáticas como se realiza actualmente en los diseños de pavimentos. Con el fin de lograr los objetivos de la investigación, se estimaron cargas dinámicas en pavimentos con niveles de rugosidad (IRI) de 1 m/km a 10 m/km, temperaturas de 15 grados centígrados y 30 grados centígrados y una velocidad constante de 80 km/h, típicas de vías rurales en Colombia. Luego, se determinaron esfuerzos y deformaciones a las cuales estarían sometidos a partir de cada una de estas cargas dinámicas, para con esto estimar el número de repeticiones admisibles por fatiga y por ahuellamiento. Como resultado de la investigación, se puede concluir que, en los casos evaluados, la vida por fatiga era inferior a la vida por ahuellamiento, es decir que los pavimentos primero fallaría por fatiga, esto era de esperarse puesto que, al incrementar las cargas, se incrementan los esfuerzos en la superficie y por tanto se genera fatiga en los pavimentos asfálticos. Además, que los espesores de asfalto eran grandes, disminuyendo la probabilidad de ahuellamiento. Por otro lado, a medida que incrementa el valor del IRI, se disminuyen la vida por fatiga y ahuellamiento, esto significa que a medida que tenemos una vía con mayor IRI, la carga dinámica se incrementa y en consecuencia se reduce la vida útil del pavimento. En el caso de comparar pavimentos con mayores espesores de asfalto, se nota que esto mejora considerablemente la vida por fatiga y ahuellamiento, en especial esta última, ya que, al colocar altos espesores de asfalto, se reducen los esfuerzos encima de la subrasante. Finalmente, En el caso de la temperatura, para todos los casos a medida que se incrementa la temperatura de 15°C a 30°C, hay una reducción en el número de repeticiones admisibles, es decir que el efecto dinámico de las mezclas asfálticas a bajas temperaturas ayuda a soportar más número de ejes equivalentes.

Palabras clave: Cargas dinámicas, Rugosidad, fatiga, ahuellamiento, Índice de rugosidad internacional

Abstract

The present investigation intends to evaluate the effect that dynamic loads have on life due to fatigue and life due to rutting (Number of repetitions allowed due to fatigue and recess), due to the fact that pavements are actually affected by dynamic loads and not by static loads as currently performed in pavement designs. In order to achieve the objectives of the investigation, estimate dynamic loads on pavements with roughness levels IRI (International Roughness Index) of 1 m / km to 10 m / km, temperatures of 15 degrees Celsius and 30 degrees Celsius and a constant speed of 80 km / h, typical of rural roads in Colombia. Then, the stresses and deformations to which they would sometimes be from each of these dynamic loads were determined, for this to estimate the number of allowable repetitions due to fatigue and rutting. As a result of the investigation, it can be concluded that, in the cases evaluated, life due to fatigue was inferior to life due to rutting, that is because, pavements would first fail due to fatigue, this was to be expected since, as loads increased, then stresses on the surface are increased and therefore fatigue is generated in asphalt pavements. In addition, when we use thicker asphalt thicknesses, decreasing the likelihood of collapse by fatigue and rutting. On the other hand, a measure that increases the value of the IRI (International Roughness Index),, decreases the life due to fatigue and rutting, this means that it measures a measure that we have a path with greater IRI (International Roughness Index), the dynamic load is increased and consequently the useful life of the pavement; in the case of comparing pavements with greater thicknesses of asphalt, it is noted that this improves life due to fatigue and rutting, especially the latter, since, by placing high asphalt thicknesses, the stresses on the subgrade are reduced. Finally, in the case of temperature, for all cases as the temperature increases from 15 ° C to 30 ° C, there is a reduction in the number of permissible repetitions, that is, the dynamic effect of asphalt mixtures a Low temperature help resist more number of equivalent axes.

Keywords: *Dynamic Loads, Roughness, Fatigue, Rutting, International Roughness Index*

Contenido

Lista de tablas y figuras.....	13
Introducción	15
Objetivos	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos	16
Justificación.....	16
Estado del arte	18
Diseño de pavimentos flexible AASTHO 93	22
Diseño de pavimentos rígidos AASTHO 93	24
Diseño racional.....	25
Variable transito	29
Factor de equivalencia de carga por eje (FECE)	30
Factor camión	31
Ejes equivalentes – ESAL.....	32
Espectros de cargas	32
Rugosidad del pavimento	33
Cargas dinámicas.....	37
Metodología	39
Cargas dinámicas.....	40
Ecuaciones de transferencias	41
Estructura de pavimento	42

Estructura 1	42
Estructura 2	43
Calculo esfuerzo - deformacion.....	44
Temperaturas	44
Análisis Resultados	45
Conclusiones y Recomendaciones	49
Limitaciones	51
Referencias	52

Lista de tablas y figuras

Tablas

	Pág.
Tabla 1. Factores de calibración ecuaciones vida por fatiga	28
Tabla 2. Factores de calibración ecuaciones vida por Ahuellamiento	28
Tabla 3. Camiones típicos de la red vial nacional	29
Tabla 4. Cargas de referencia del pavimento flexible.....	31
Tabla 5. Cargas de referencia del pavimento rígido	31
Tabla 6. Valores de IRI exigidos en Dubái.....	36
Tabla 7. Valores de IRI exigidos en Canadá.....	36
Tabla 8. Valores de IRI exigidos en Colombia.....	37
Tabla 9. Cargas dinámicas	40
Tabla 10. Factores de calibración ecuaciones vida por fatiga Instituto del asfalto.....	42
Tabla 11. Factores de calibración ecuaciones vida por Ahuellamiento Instituto de asfalto	42

Figuras

	Pág.
Figura 1. Pavimento simple sin refuerzo	19
Figura 2. Pavimento simple reforzado	20
Figura 3. Pavimento continuamente reforzado	20
Figura 4. Circuitos de la prueba AASTHO.....	22
Figura 5. Estado de esfuerzo en pavimentos flexibles	26
Figura 6. Ecuaciones de transferencia	27
Figura 7. Ejemplo espectro de carga INVIAS	33

Pág.

Figura 8. Ejemplo perfil del pavimento	34
Figura 9. Modelo cuarto de carro.....	34
Figura 10. Valores de IRI banco mundial.....	35
Figura 11. Ejemplo cargas dinámicas	38
Figura 12. Estructura de pavimentos 1	43
Figura 13. Estructura de pavimentos 2	43
Figura 14. Curva maestra asfalto PG 58-28.....	44
Figura 15. Vida por fatiga estructura 1	45
Figura 16. Vida por ahuellamiento estructura 1.....	46
Figura 17. Vida por fatiga estructura 2	46
Figura 18. Vida por ahuellamiento estructura 2.....	47

Introducción

La variable tránsito es una de las variables fundamentales a la hora de realizar diseños de pavimentos rígidos, pavimentos flexibles y pavimentos articulados. De la buena estimación de esta variable, dependerá el comportamiento del pavimento durante su vida útil, así como de su durabilidad. Desde hace más de 60 años, se ha venido trabajado la caracterización de la variable tránsito a través de la metodología de Ejes equivalentes (Equivalent Single Axial Load), concepto que fue desarrollado en la prueba AASHO en Illinois, Estados Unidos en los años 50 (AASHTO, 1993). Esta metodología convierte el tránsito mixto de diferentes tipos de ejes a diferentes niveles de carga en un eje equivalente, el cual es el eje sencillo de rueda doble cargado a 80 kN. Paralelamente, los diseños de pavimentos empírico-mecanicista como el diseño de pavimento rígido a través de la metodología PCA (PCA, 1984), caracteriza el tránsito a través de espectros de carga, el cual no es más que una clasificación por cada tipo de eje y niveles de carga, de la frecuencia que estos pasaran por el pavimento durante su vida útil.

Ambas metodologías consideran que el vehículo está estático, es decir sin movimiento, sin embargo, a lo largo de los años, diversos investigadores han demostrado que, al estar los vehículos en movimiento, las irregularidades en las vías inducen cargas dinámicas en la interfaz llanta – pavimento, que difiere significativamente de las cargas estáticas consideradas a la hora de hacer el diseño de pavimentos.

En la presente investigación, se pretende evaluar el efecto que tienen las cargas dinámicas en pavimentos flexibles en cuanto a su vida útil por fatiga y por ahuellamiento teniendo en cuenta los efectos dinámicos de las mezclas asfálticas.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el efecto de la carga dinámica desarrollada en la interfaz llanta - pavimento en la vida por fatiga y por ahuellamiento en pavimentos flexibles.

Objetivos Específicos

- Determinar las cargas dinámicas generadas en la estructura de pavimento debido al efecto de la rugosidad del pavimento y la velocidad del vehículo
- Evaluar la vida por fatiga en pavimentos flexibles
- Evaluar la vida por ahuellamiento en pavimentos flexibles

Justificación

La red vial de un país es fundamental para su desarrollo y crecimiento porque es el único medio que posibilita el transporte de las personas y las cargas.

En Colombia se evidencia un problema serio en cuanto a infraestructura vial de comunicación y esto representa una seria desventaja competitiva, la red de carreteras permite satisfacer las necesidades básicas de educación, trabajo, alimentación y salud siendo estas las principales actividades de un país, de manera que, al desarrollar un sistema vial eficiente y a su vez duradero contribuye directamente en la mejora económica de distintos sectores del país y en la satisfacción de las necesidades mencionadas anteriormente.

Por ello la calidad de las vías pavimentadas (Red primaria vial) debe ser optima y para esto se propone analizar de qué manera podrían ser mejorados los métodos de diseño de pavimentos(flexible), teniendo en cuenta variables que afectan la durabilidad y resistencia de

dichas estructuras, tales como la temperatura, propiedades viscoelásticas del asfalto, cargas dinámicas, deterioro del pavimento y tiempo de carga. Bien sabiendo que la mayoría de vías en Colombia están construidas en pavimento asfáltico y sus diseños se basan en INVIA 2012 que a su vez se basa en AASTHO 93 y los métodos de diseño contemplan la utilización de cargas estáticas, lo cual no es así ya que el tránsito está en constante movimiento diciéndonos que realmente la carga se desplaza con distintas velocidades e intensidad, colocando en tela de juicio la precisión de dicho método ya que no tiene en cuenta realmente las variables como se presentan y las propiedades de los elementos que conforman la estructura de pavimento flexible como lo son las propiedades visco-elásticas del asfalto.

Los métodos de diseño de pavimentos se basan en su mayoría en el análisis de cargas estáticas para definir la estructuración del mismo, que a gran escala define el comportamiento del pavimento para soportar las cargas que se presentan o concurren en este sea de cualquier tipo, es posible determinar fácilmente que la aplicación de estas cargas de diseño y servicio no son estáticas ya que el tránsito (Autos, Camiones, Buses, etc.) se encuentran sobre la estructura de pavimento en constante movimiento acompañadas de cambios repentinos de intensidad y posición. Desde la física de estructuras se sabe que para que una carga estática se asemeje al producido por la misma carga de forma dinámica se necesita de un coeficiente de impacto que no se aplica en ningún paso de las metodologías para el diseño de pavimento.

En investigaciones previas (MORA, 2016). Se analizó los efectos de la rugosidad del pavimento y la velocidad de los vehículos tienen un gran impacto en la mayoración en las cargas dinámicas lo cual reduce la vida útil del pavimento rígido, sin embargo no es así cuando hablamos del pavimento flexible ya que el asfalto posee innumerables características diferentes a las del concreto, se evidencia que las cargas dinámicas oscilan cuando se recorre por un perfil irregular, a razón del cambio de rugosidad que se presenta en el pavimento rígido que producen en algunos lugares mayores cargas estáticas a las que se consideraron en

el diseño de la estructura de pavimento lo cual le produce un aumento del tráfico sufriendo así un deterioro acelerado. Sucediendo esto cuando la rugosidad del pavimento rígido y la velocidad de los vehículos aumentan.

Se necesita conocer cómo responden los pavimentos flexibles frente a las cargas dinámicas teniendo en cuenta las propiedades viscoelásticas del asfalto que mitigan los efectos dinámicos (Sebaaly & Tabatabaee, 1993). Bien sabiendo que la respuesta mecánica del asfalto se fundamenta en la frecuencia de carga y la temperatura, lo cual se espera que una carretera de asfalto tenga un mejor rendimiento cuando las velocidades de los vehículos aumenten ya que al aumentar, el tiempo de carga se reduce. Además, como otras variables físicas que podrían afectar al pavimento flexible con la finalidad de evaluar el impacto de cada una de las variables en el número de repeticiones admisibles que puede soportar el pavimento y si estas concuerdan o en su efecto disminuyen o aumentan con respecto a un diseño estándar basado en cargas estáticas.

Estado del arte

Un pavimento es una estructura de obra civil sobre las cuales transitan los vehículos de la red vial nacional. Esta estructura, generalmente tiene capa de rodaduras en pavimentos rígidos y asfáltico, sin embargo, también podemos encontrar pavimentos articulados.

Debajo de estas carpetas, se localizan materiales granulares de excelente resistencia tales como bases y subbases dependiendo del tipo de pavimento, finalmente la capa de subbase se apoya sobre la subrasante (La cual puede ser mejorada con aditivos físicos o químicos, cuando presenta condiciones de resistencia muy pobres), constituyendo de esta manera una estructura de pavimento.

Concreto rígido: el pavimento en concreto rígido es uno de los más comunes usado a nivel mundial, este pavimento presenta un alto costo de inversión, sin embargo, los mantenimientos a los que debe ser sometido durante su vida útil son pocos. Se componen principalmente de una mezcla de cemento, agua, agregado grueso y fino, y es caracterizado por su resistencia a la flexión o módulo de rotura.

Existen tres diferentes tipos de pavimento rígido, los cuales se relacionan a continuación:

Pavimento rígido simple con juntas: Este pavimento presenta losas de geometría rectangulares con dovelas de trasferencias de carga en las juntas transversales y barras de amarre en las juntas longitudinales.

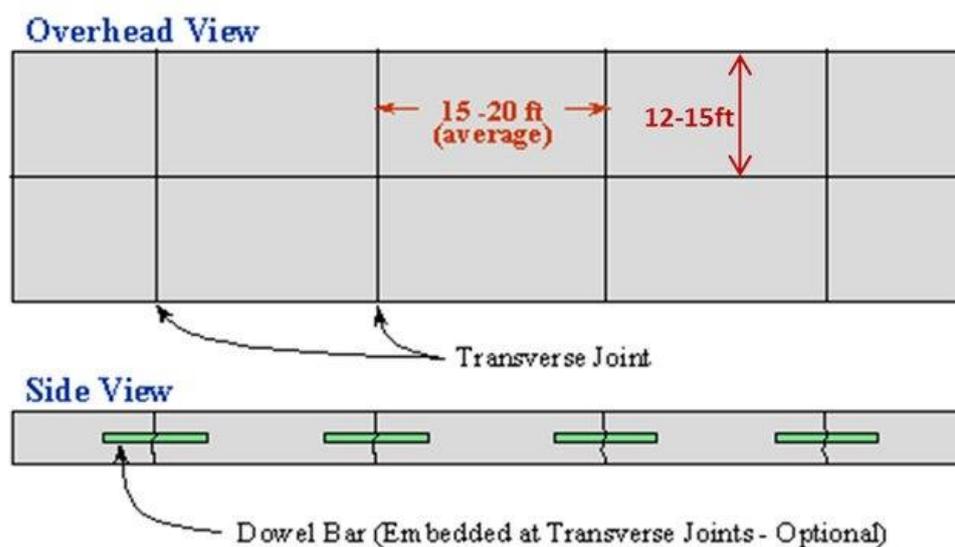


Figura 1. Pavimento simple sin refuerzo, Fuente Walubita et al, 2017

Pavimento rígido reforzado con juntas: Este pavimento presenta losas de geometría rectangulares o irregulares con dovelas de trasferencias de carga en las juntas transversales, barras de amarre en las juntas longitudinales y malla de refuerzo en su interior.

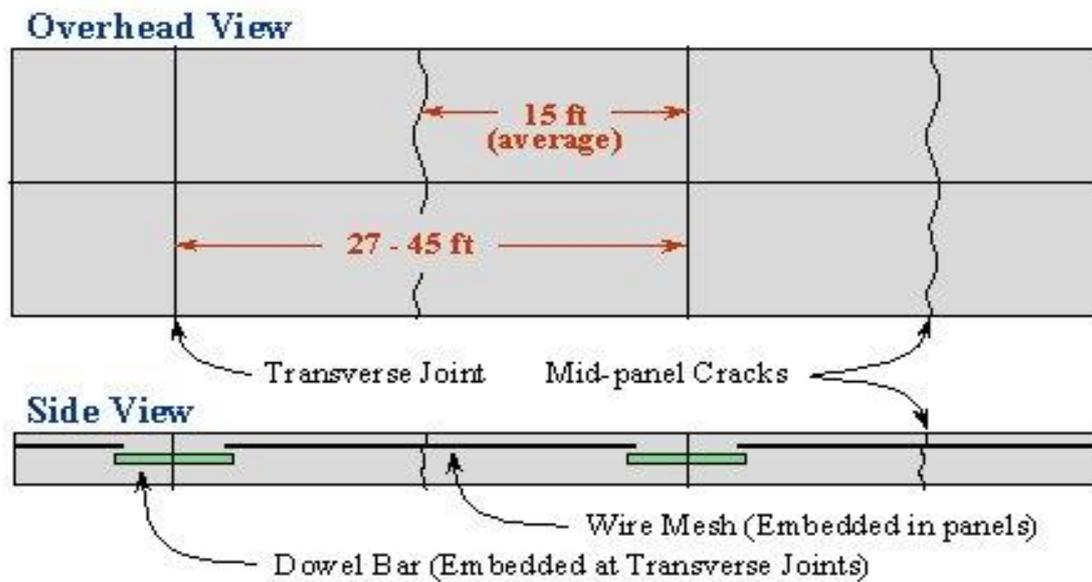


Figura 2. Pavimento simple reforzado, Fuente Walubita et ai, 2017

Pavimento continuamente reforzado: Este pavimento presenta juntas únicamente cuando termina la jornada de construcción, es decir que no presenta una modulación regular de juntas. Adicionalmente, lleva refuerzo a lo largo de la losa.

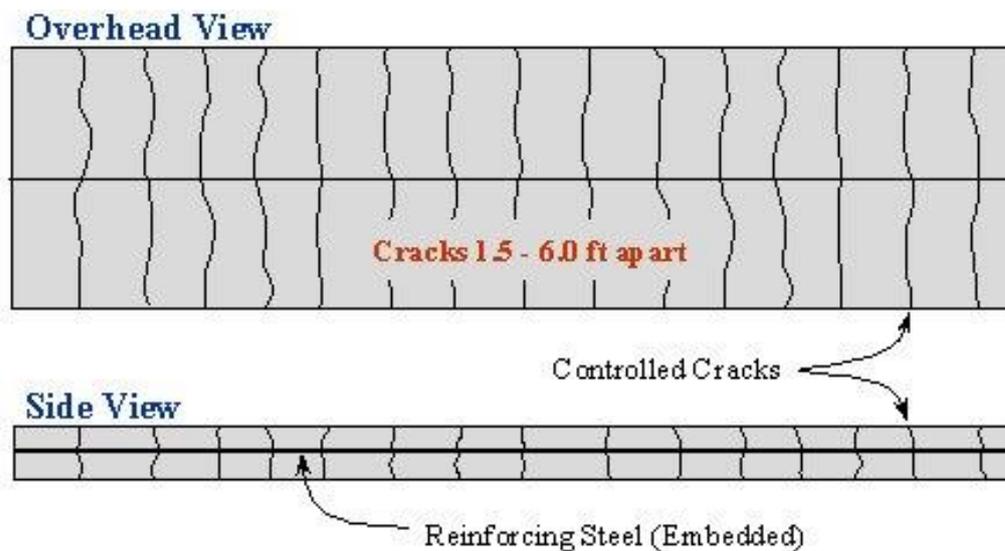


Figura 3. Pavimento continuamente reforzado, Fuente Walubita et ai, 2017

Concreto asfáltico: El pavimento en concreto asfáltico, es muy usado en Colombia a nivel de vías rurales, por lo que en estas vías se presenta altos niveles de velocidad, que impacta significativamente Enel comportamiento elástico de la mezcla asfáltica. Dicha mezcla generalmente está compuesta por cemento asfáltico, agregados grueso, filler y en ocasiones aditivos u otro tipo de modificaciones como caucho de llantas.

Existen alternativas al concreto asfáltico tale como asfalto espumado, emulsiones asfálticas o cuctbaks, que se utilizan para realizar tratamientos superficiales en vías de bajo tránsito, generalmente estos tratamientos tienen muy poca vida útil.

Base granular: es la capa que se encuentra bajo la capa de rodadura de un pavimento. Debido a su proximidad con la superficie, debe poseer alta resistencia a la deformación, para soportar las altas presiones que recibe. CBR entre 80 – 95% según INVIAS.

En Colombia existen distintos tipos de base para construcción de pavimentos según las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013)

ART 330 – 13 Base granular

ART 340 – 13 Base estabilizada con emulsión asfáltica

ART 351 – 13 Base tratada con cemento

Subbase granular: Es la capa que se encuentra entre la base y la subrasante en un pavimento. Debido a que está sometida a menores esfuerzos que la base, su calidad puede ser inferior, CBR entre 30 - 40% según INVIAS

Las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013), presenta los requerimientos de subbase granular en el artículo 320-13.

A continuación, se presentará una revisión del estado del arte a cerca de diseños de pavimentos, caracterización de la variable tránsito, rugosidad del pavimento y efectos de la carga dinámica en las estructuras de pavimentos.

Diseño de pavimentos flexible AASTHO 93

Una de las primeras metodologías de diseño de pavimento, fue la desarrollada en estados unidos y conocida como la metodología AASTHO 93, dicha metodología nació de un experimento a gran escala en Illinois. En dicho experimento, se tenían unos circuitos (Ver siguiente figura), en los cuales se tenían distintos tipos de pavimento (rígido, flexible y combinación de ambos en obras de rehabilitación), distintos espesores y subrasantes. Sobre estos circuitos circulaban camiones cargados y luego un panel de experto calificaba el pavimento en función a su serviciabilidad.

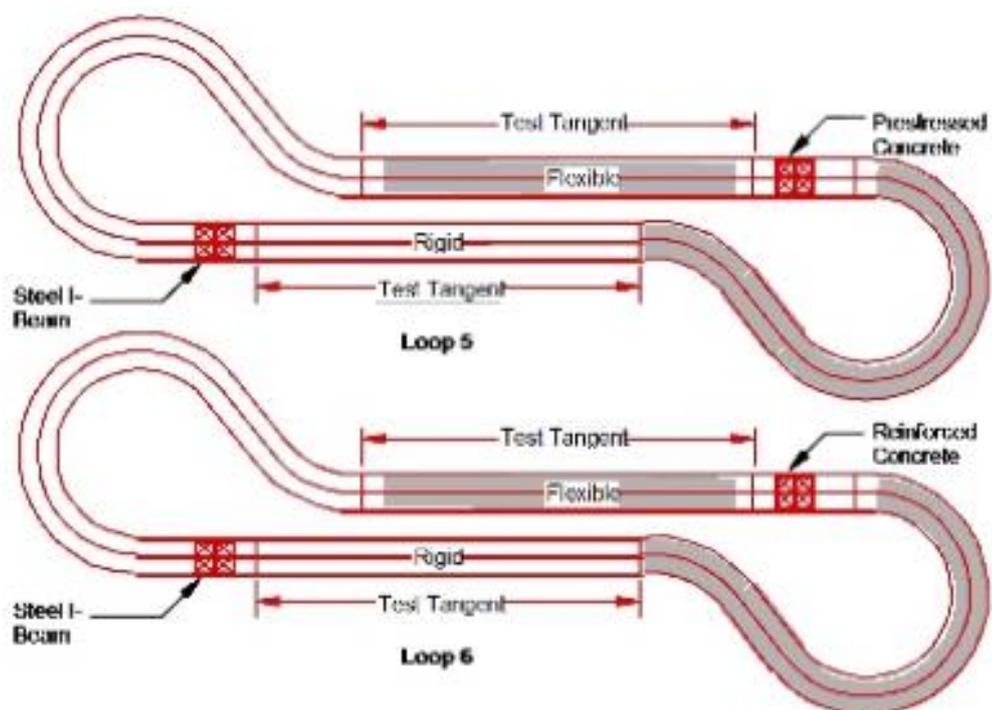


Figura 4. Circuitos de la prueba AASTHO. Fuente Pavementintective.org

La metodología AASTHO 93 utiliza como criterio de diseño el concepto de serviciabilidad.

La pérdida de serviciabilidad debido a las cargas de tráfico es calculada a través de una ecuación empírica, derivada del experimento desarrollado por la AASHO, en el cual se estudió el comportamiento bajo diferentes condiciones de esfuerzo.

Teniendo estos datos, se desarrollaron una ecuación para realizar diseño de pavimentos asfálticos, la cual se muestra a continuación:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R(S_0) + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.31 \log_{10}(MR) - 8.07$$

Ecuación 0-1. Ecuación AASTHO 93 para diseño de pavimentos flexibles. Fuente AASTHO, 93

Donde:

- W18 - El tránsito, especificado como el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- PSIo - Nivel de serviciabilidad inicial
- PSIf - Nivel de serviciabilidad final
- Mr - El módulo resiliente de la subrasante
- SN- El número estructural del pavimento (depende de los coeficientes estructurales, coeficientes de drenaje y espesores de cada una de las capas)
- mi - La calidad del drenaje
- Zr - Nivel de confianza
- So - Desviación estándar

Diseño de pavimentos rígidos AASTHO 93

El diseño de pavimentos rígidos es muy similar al diseño de pavimentos flexible a través de la metodología AASTHO 93, sin embargo, se calcula el espesor de la losa (D) en lugar del número estructural (SN).

Esta metodología usa como criterio de diseño el concepto de **serviciabilidad**, donde el espesor del pavimento está dado por la magnitud de la pérdida de esta en la vida útil del pavimento.

La pérdida de serviciabilidad debido a las cargas de tráfico es calculada a través de una ecuación empírica derivada del experimento desarrollado por la AASHO (AASHTO road test (1958-1960)), en el cual se estudió el comportamiento bajo diferentes condiciones de esfuerzo.

Se evaluaron pavimentos rígidos, utilizando diferentes configuraciones de carga, espesores de capa de rodadura y base, además se evaluó en hormigón simple y reforzado.

El objetivo principal fue desarrollar relaciones entre las cargas del tránsito pesado aplicadas, la estructura del pavimento y la pérdida de serviciabilidad

La siguiente ecuación presenta la solución de diseño para pavimentos rígidos a través de la metodología AASTHO 93.

$$\text{Log } W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5 - 1.5}\right)}{\frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \log \left[\frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left[\frac{E_c}{k} \right]^{0.25}} \right]} \right]$$

Ecuación 0-2. Ecuación AASTHO 93 para diseño de pavimentos rígidos. Fuente AASTHO 93

Donde:

- W18 - El tránsito, especificado como el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- PSIo - Nivel de serviciabilidad inicial
- PSIf – Nivel de serviciabilidad final
- K - El módulo de reacción de la subrasante
- D- Espesor de losa
- Cd - La calidad del drenaje
- Zr – Nivel de confianza
- So – Desviación estándar
- E – Modulo de elasticidad del concreto
- S’c – Modulo de rotura del concreto
- J – Coeficiente de transferencia de carga

Diseño racional

Hasta el momento las metodologías analizadas se basan en ensayos empíricos para determinar los espesores de las estructuras de pavimento, sin embargo, actualmente se usan metodologías empírico – mecanicista para la realización de diseños de pavimentos.

Esta metodología es conocida como metodología racional, la cual permite calcular esfuerzo y deformaciones en la estructura de pavimento, con el fin de estimar la vida útil por fatiga y ahuellamiento.

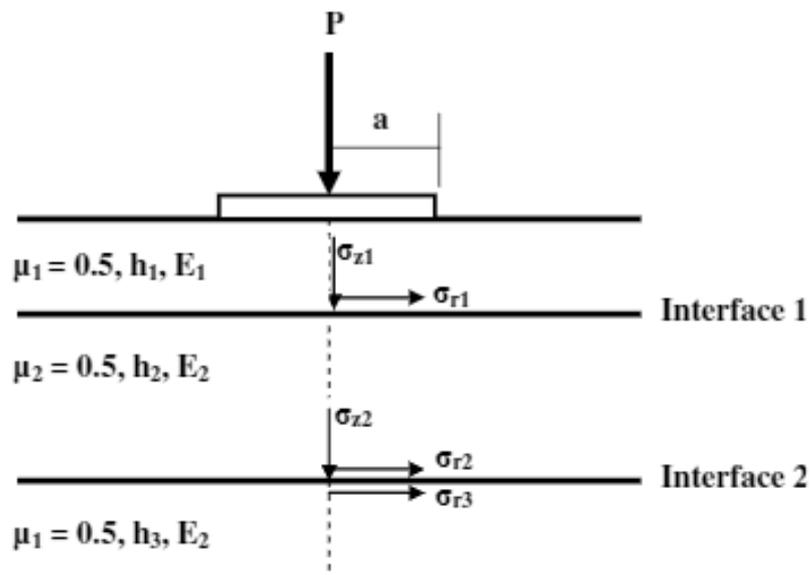
La fatiga en pavimentos flexibles se refiere a los daños ocasionados por la circulación del vehículo que generan grietas en la parte inferior de la carpeta asfáltica y con el tiempo, se

refleja en la superficie, en forma de grietas longitudinales, transversales o piel de cocodrilo. Kerkhoven & Dormon (1953) fueron los primeros en sugerir que la deformación a tensión en el fondo de la carpeta asfáltica rige la vida por **fatiga del pavimento**.

Por su parte el ahuellamiento se refiere a la deformación vertical sufrida por la subrasante cuando esta se ve expuesta a esfuerzos superiores a los que puede soportar; Saal & Peel (1960) sugirieron que la deformación vertical en la parte superior de la subrasante condiciona la vida por **ahuellamiento** del pavimento

En la siguiente figura, se presentan los puntos de localización para el cálculo de esfuerzo y deformación, de manera de estimar la vida útil por fatiga y ahuellamiento

Figura 5.



Nota: Estado de esfuerzo en pavimentos flexibles, Fuente Ekwulo & Eme, 2009

A partir de los esfuerzos y deformaciones calculados, se hacen uso de ecuaciones de transferencia, que permiten obtener el número de repeticiones admisibles por fatiga y por ahuellamiento. La siguiente imagen presenta un esquema de las ecuaciones de transferencia:

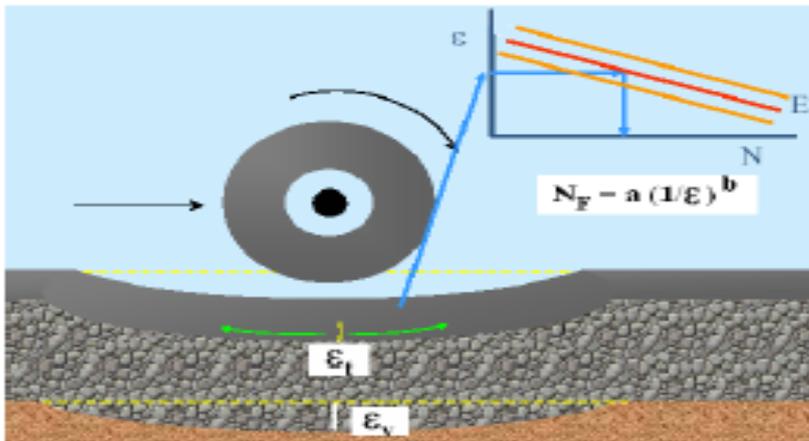


Figura 6. Ecuaciones de transferencia, Fuentes INVIAS, 2008

De manera general, la vida por fatiga se rige según la siguiente ecuación de transferencia:

$$NF = f_1 \varepsilon_r^{-f_2} E_1^{f_3}$$

Ecuación 0-3. Numero de repeticiones admisibles por fatiga. Fuente Ebrahim & Behiri, 2012

Mientras que la vida por ahuellamiento se rige según la siguiente ecuación de transferencia:

$$NA = f_4 \varepsilon_z^{-f_5}$$

Ecuación 0-4. Numero de repeticiones admisibles por ahuellamiento. Fuente Ebrahim & Behiri, 2012

Donde:

NF Representa el número repeticiones de falla por fatiga

NR Representa el número repeticiones de falla por ahuellamiento

ε_r Deformación unitaria a tensión fondo carpeta asfáltica

ε_z Deformación unitaria a compresión encima de la subrasante

E_1 Modulo elasticidad mezcla asfáltica

f Coeficientes de calibración

A lo largo de los años diversos autores han calibrados ecuaciones de transferencia para fatiga y ahuellamiento, las cuales se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 1.

Factores de calibración ecuaciones vida por fatiga

No	Organización	f_1	f_2	f_3
1	Asphalt Institute	0.0795	3.291	0.854
2	Shell Research	0.0685	5.671	2.363
3	US Army Corps of Engineers	479.156	5	2.66
4	Belgian Road Research Center	4.92E-14	4.76	0
5	Transport and Road Research Laboratory	1.66E-10	4.32	0
6	Federal Highway Administration	0.1001	3.565	1.474
7	Illinois DOT	5.00E-06	3	0
8	Austin Research Engineers (ARE)	0.4875	3.0312	0.06529

Nota: Adaptado de Ebrahim & Behiry, 2012

Tabla 2.

Factores de calibración ecuaciones vida por Ahuellamiento

No	Organización	f_4	f_5
1	Asphalt Institute	1.365E-09	4.477
2	Shell Research	6.15E-07	4
3	US Army Corps of Engineers	1.81E-15	6.527
4	Belgian Road Research Center	3.05E-09	4.35
5	Transport and Road Research Laboratory	1.13E-06	3.75

Nota: Adaptado de Ebrahim & Behiry, 2012

Dichos parámetros de calibración son generalmente usados por los consultores de pavimento para lograr determinar el número de repeticiones admisibles por fatiga y ahuellamiento de sus estructuras previamente diseñadas por la metodología AASTHO 93.

Variable tránsito

La variable tránsito es la variable más importante en el diseño de una vía, el volumen y dimensiones de los vehículos condicionan el diseño geométrico de las vías, así como también el número y peso de los ejes de los vehículos son determinantes en el diseño de la estructura del pavimento.

El deterioro en el pavimento es proporcional al tránsito acumulado, diferentes tipos de vehículos y configuraciones de ejes producen efectos diferentes, que se traducen en distintos niveles de deterioro en el pavimento.

La clasificación de los vehículos en Colombia se encuentra reglamentada por el por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) (Resolución 4100 de 2014), tal y como se presenta en la siguiente figura:

Tabla 3.

Camiones típicos de la red vial nacional

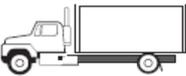
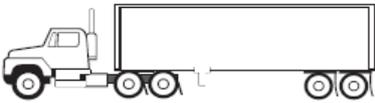
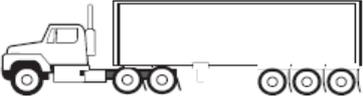
Designación	Configuración	Descripción
2		Camión de dos ejes Camión sencillo
3		Camión de tres ejes Doble tracción
3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes
3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes

Figura 1.1. Representación esquemática de los vehículos de transporte de carga más comunes en el país (fuente: resolución 4100 de 2004)

Nota: Fuentes INVIAS, 2018

Factor de equivalencia de carga por eje (FECE)

Debido a la dificultad que genera la estimación del daño causado por cada vehículo que utiliza un pavimento, se encontró apropiado expresar la cantidad de daño producida por cada carga en términos de la cantidad equivalente de daño ocasionado por una carga de referencia. (AASTHO, 93)

La carga de referencia utilizada por la mayor parte de agencias viales para el diseño y evaluación de pavimentos es un eje simple, con sistema de rueda doble, de 80 kN (18 kips o 8.2 tn) con una presión de inflado 586kPa. (AASTHO, 93). El concepto de carga equivalente de referencia fue desarrollado a partir de datos obtenidos en el ASSHO Road Test, Illinois (1958-1960).

En dicha prueba, pavimentos construidos con iguales diseños fueron sometidos a la acción de diferentes cargas y configuraciones de ejes, de manera que pudiera determinarse el efecto producido por cada tipo de eje y carga sobre el deterioro del pavimento, expresado en términos de pérdida del Índice de Servicio Presente (ISP) (Serviciabilidad).

El FECE puede ser expresado en términos de la magnitud de las cargas involucradas, las cuales deben corresponder a la misma configuración de cargas por eje:

$$FECE = \left(\frac{P_i}{p_r} \right)^n$$

Ecuación 0-5. Ley de la cuarta potencia, Fuente INVIAS 2018

Donde:

n es un coeficiente empírico

P_i carga aplicada

P_r Carga de referencia

Para pavimentos flexibles el valor n normalmente es igual a 4, y las cargas de referencia se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4.

Cargas de referencia del pavimento flexible

TIPO DE EJE	CARGA DE REFERENCIA	
	kN	T
Simple de rueda simple	65	6.6
Simple de rueda doble	80	8.2
Tándem de rueda doble	146	15.0
Triple de rueda doble	225	23.0

Nota: Fuentes INVIAS 2008

En el caso de pavimentos rígidos, los valores de n y carga de referencia se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 5.

Cargas de referencia del pavimento rígido

Eje	Direccional	Sencillo de llanta doble	Tándem	Trídem
Carga patrón (kN)	60,00	81,81	132,14	184,00
Exponencial	4	4,5	4,2	4,3

Nota: Fuentes INVIAS 2018

Factor camión

Los Factores de Equivalencia de Carga por Eje (FECE) proporcionan una manera de expresar niveles equivalentes de daño entre ejes; sin embargo, resulta más conveniente expresar ese daño en términos de la cantidad de deterioro producida por un determinado vehículo.

Al sumar los daños generados por todos los ejes de un vehículo, se obtiene la cantidad de daño producido por una pasada de dicho vehículo

Se entiende como factor camión al número de aplicaciones de ejes sencillos estándar, correspondientes al paso de un vehículo comercial.

Ejes equivalentes – ESAL

El número de ejes equivalentes (ESAL) se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$ESAL = TPD * \%Vp * FC * DD * DC * 365$$

Ecuación 0-6. Calculo ESAL, Fuente INVIAS, 2008

Donde:

ESAL: Numero de ejes equivalentes de 80 kN

%Vc: Porcentaje de vehículos pesados

FC: Factor camión

DD: Factor de Distribución direccional

DC: Factor de distribución por carril

Espectros de cargas

Espectros de carga, es la metodología mediante la cual, caracteriza el tránsito a través de la magnitud de la carga y el tipo de eje y la frecuencia con las que estos pasaran durante el periodo de diseño del pavimento (INVIAS, 2013)

Los espectros de carga se obtienen haciendo operativos de pesajes y registrando un histograma de frecuencia por eje de las cargas obtenidas en campo.

Sin embargo, INVIAS presenta una manera sencilla de determinar los espectros de carga a partir de resultados históricos de operativos de pesaje en la red vial nacional.

A continuación, se presenta un ejemplo de espectros de carga para un camión tipo C3S3.

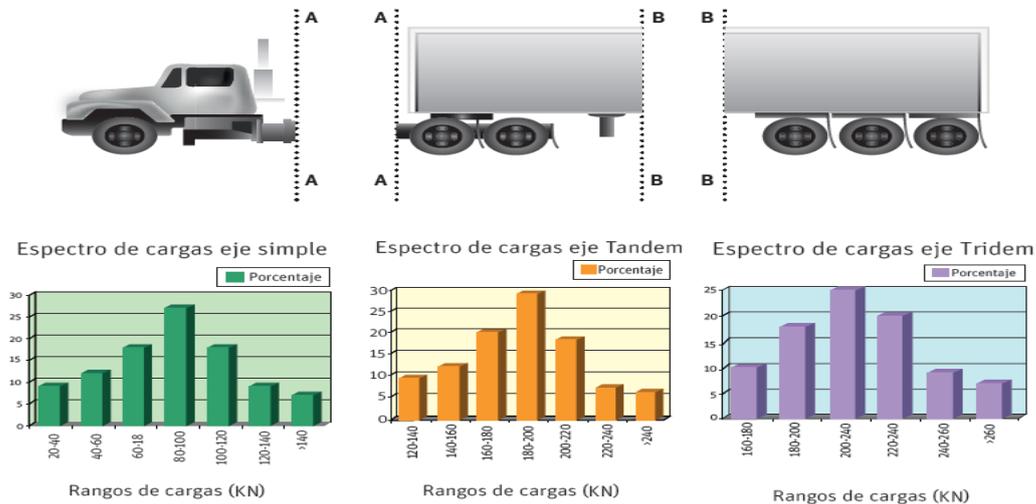


Figura 7. Ejemplo espectro de carga INVIAS. Fuente INVIAS, 2013

Rugosidad del pavimento

Se entiende por rugosidad en pavimento a todas aquellas irregularidades del perfil longitudinal de una carretera, que causan vibraciones en los vehículos que la cruzan (INV-790, 2013).

Un perfil de pavimento es la representación de las elevaciones versus abscisado de la vía, dichas mediciones se pueden hacer directamente con topografía (mira y nivel) o se pueden usar equipos más sofisticados con miras láser que pueden a través de reflexión, calcular las elevaciones de manera precisa a lo largo de un tramo de una vía.



Figura 8. Ejemplo perfil del pavimento. Fuente Mora, 2016

El parámetro internacionalmente aceptado que mide la rugosidad de una vía es el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), esta variable fue propuesta por el Banco Mundial en 1986 para evaluar el confort los usuarios sobre la condición de la superficie del pavimento.

El IRI, se puede definir como la acumulación de movimiento vertical al cual está sometido la suspensión de una llanta a una velocidad de referencia de 80 km / h. (Caro y Peña, 2012).

El modelo para calcular el IRI, se conoce como modelo de cuarto de carro y se presenta a continuación:

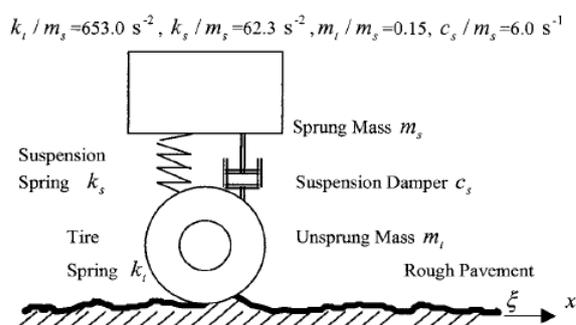


Figura 9. Nota: Modelo cuarto de carro. Fuente Sun, 2001

Las variables del modelo de cuarto de carro están normalizadas la norma ASTM E1916 son los siguientes:

m_i : Masa no amortiguada del modelo, la cual representa la llanta, el neumático, el eje y suspensión.

m_s : Masa amortiguada del modelo, la cual representa una porción del vehículo y los pasajeros.

k_t : Suspensión proporcionada por la llanta del vehículo.

k_s : Suspensión proporcionada por los amortiguadores.

C_s : Amortiguamiento de la masa superior

Siendo el IRI una variable de confort calidad de las vías, el banco mundial (Sayers et al, 1986) desarrollo unos umbrales de valores de IRI, dependiendo del tipo de vía, los cuales se presenta a continuación:

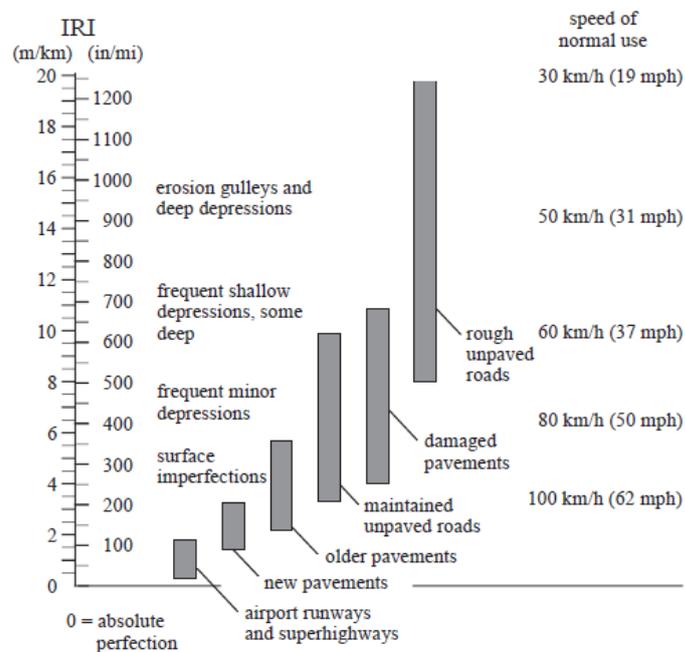


Figura 10. Nota: Valores de IRI banco mundial. Fuente Sayers et al, 1986

En una investigación desarrollada por Geonaga, Fuente & Mora (2016), presentaron valores de IRI tipos exigidos en diferentes países del mundo, dentro de los cuales se destacan:

Dubái:

Tabla 6.

Valores de IRI exigidos en Dubái

Road type	Inicial IRI mean in 1000 m
Highways / Expressway (urban)	0,9+/-0,05
Highways / Expressway (rural)	1,0+/-0,05
Arterial road	1,0+/-0,05
Collector road	1,2+/-0,05
Local Street	1,5+/-0,05
Industrial areas	1,5+/-0,05

Nota: Fuente: Goenaga, Fuentes y Mora. Ingeniera e Incestigacion 2017

Canadá:

Tabla 7.

Valores de IRI exigidos en Canadá

Percentage with maximum IRI (100 m sections)	IRI (m/km)
70%	1,2
90%	1,4
100%	1,8

Nota: Fuente: Goenaga, Fuentes y Mora. Ingeniera e Incestigacion 2017

Vías concesionadas Colombia:

Tabla 8.

Valores de IRI exigidos en Colombia

Comfort level	IRI (m/km)
Very Good	2,0–3,50
Good	3,5–4,50
Regular	4,50 –6,50
Poor	> 6,5

Nota: Fuente: Goenaga, Fuentes y Mora. Ingeniera e Incestigacion 2017

Como se puede observar en Colombia se es más permisible que en otros países con respecto al valor del IRI.

Cargas dinámicas

Cuando un vehículo transita por una vía que presenta irregularidades, se inducen cargas dinámicas que son trasmitidas de las llantas a la estructura de pavimento, estas cargas dinámicas afectan la vida útil del pavimento, ya que en muchas ocasiones superan la carga estática con la cual fue diseñado el pavimento.

Las cargas dinámicas pueden ser modeladas con un modelo de cuarto de camión, en el cual se pueden convertir las aceleraciones verticales de las masas del modelo en un componente de la carga dinámica desarrollada en la interfaz del pavimento.

A lo largo de los años, diversos investigadores han demostrado que la rugosidad del pavimento inducen cargas dinámicas, que son considerablemente mayores a las cargas estáticas consideradas previamente en el diseño tales con los caso de Shi y Cai (2009), Kim, Rhee, Park y Yun, (2009) y Liu (1999), los cuales de manera general en sus investigaciones desarrolladas concluyen que las variaciones de rugosidad y velocidad inducen cargas

dinamicas en la estructura de pavimento y a su vez estas cargas dinamicas son la causa de la fatiga del pavimento y daños durante la vida de servicio.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de cargas dinamicas desarrolladas en la interface llanta pavimento que generan tres tipos de ejes de un vehiculo pesado (Eje tandem Walking Beam, Eje tandem Leaf Spring y Eje sencillo estandar) que circula a 20 km/h por una via que tiene un IRI de 5.1 m/km

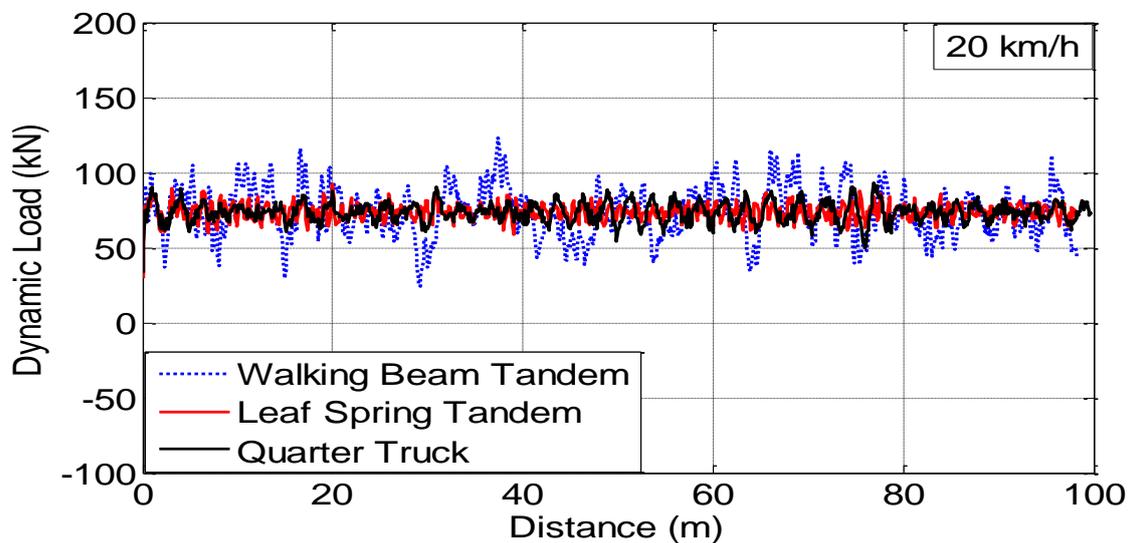


Figura 11. Ejemplo cargas dinámicas. Fuente Mora, 2016

En una investigación desarrollada por Geonaga, Fuentes & Mora (2019), identificaron que en algunos lugares específicos a lo largo de una sección de pavimento, se pueden generar altas cargas dinámicas debido a irregularidades de la superficie, por lo tanto, con el fin de tener en cuenta el daño producido por una sola pasada de un vehículo propusieron un índice de corrección de tráfico (TCF). El TCF relaciona el concepto de daño relativo en función a la carga dinámica con relación a la carga dinámica elevada al potencia n .

$$TCF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{W_i}{W_s} \right)^n$$

Ecuación 0-7. Calculo TCF. Fuente, Goenaga, Fuentes & Mora, 2019

Donde:

w_i Representa la carga dinámica en cada instante

N Representa el número de puntos de elevación medidos en el perfil de pavimento

w_s Representa la carga estática

De dicha investigación se determinó una ecuación general para determinar el TCF en función del IRI y la velocidad de circulación del vehículo

$$TCF = 1 + 0.0039 \cdot IRI^2 + 0.0003 \cdot V$$

Ecuación 0-8. Calculo TCF en función de IRI y velocidad. Fuente, Goenaga, Fuentes & Mora, 2019

Metodología

La presente investigación pretende evaluar el efecto que tiene la carga dinámica desarrollada en la interface llanta pavimento, en la vida por fatiga y ahuellamiento en pavimentos asfálticos, teniendo en cuenta sus propiedades viscoelásticas que pueden mitigar este fenómeno.

Para esto, se tomará una estructura de pavimento convencional y se analizará a diferentes niveles de cargas dinámicas (Calculadas a partir de diferentes niveles de IRI). A dicha estructura y para todos los casos, se determinaron los esfuerzos y deformaciones en el fondo de la carpeta asfáltica y encima de la subrasante, para luego, con uso de una ecuación de transferencia, determinar el número de repeticiones admisibles por fatiga y por ahuellamiento.

Cargas dinamicas

Para estimar las cargas dinamicas, se utilizo la ecuacion desarrollada por Goenaga , Fuentes & Mora (2019), que permite conocer el valor del TCF para distintos niveles de IRI y a su vez conociendo el valor del TCF y de la carga estatica de referencia (80 kN) determinar la carga dinamica promedio del tramo de pavimento. Este analisis se hizo para 80 km/h, la cual es una velocidad tipica de vias rurales en colombia y un rango de valores de IRI entre 1 m/km a 10 m/km, con incremento constante de 1 m/km.

A continuacion se presentan estas cargas dinamicas calculadas.

Tabla 9.

Cargas dinámicas

IRI (m/km)	Velocidad km/h	TCF	W dinamica (kN)	W dinamica/4 (kN)
1	80	1.0279	80.55	20.14
2	80	1.0396	80.78	20.20
3	80	1.0591	81.16	20.29
4	80	1.0864	81.67	20.42
5	80	1.1215	82.33	20.58
6	80	1.1644	83.10	20.78
7	80	1.2151	83.99	21.00
8	80	1.2736	84.99	21.25
9	80	1.3399	86.07	21.52
10	80	1.414	87.24	21.81

Fuente: *Elaboración propia*

Ecuaciones de transferencias

Se utilizaon ecuaciones de tranferencia del instituto del asfalto para calcular el numero de repeticiones admisibles por fatiga y ahuellamiento.

Fatiga

$$NF = f_1 \varepsilon_r^{-f^2} E_1^{f^3}$$

Ecuación 0-1. Numero de repeticiones admisibles por fatiga. Fuente Ebrahim & Behiri, 2012

Ahuellamiento

$$NA = f_4 \varepsilon_z^{-f^5}$$

Ecuación 0-2. Numero de repeticiones admisibles por ahuellamiento. Fuente Ebrahim & Behiri, 2012

Donde:

N_F Representa el número repeticiones de falla por fatiga

N_R Representa el número repeticiones de falla por ahuellamiento

ε_r Deformación unitaria a tensión fondo carpeta asfáltica

ε_z Deformación unitaria a compresión encima de la subrasante

E_1 Modulo elasticidad mezcla asfáltica

f Coeficientes de calibración

Los factores de calibración usados en la ecuación del instituto del asfalto fueron los siguientes:

Tabla 10.

Factores de calibración ecuaciones vida por fatiga Instituto del asfalto

No	Organización	f_1	f_2	f_3
1	Asphalt Institute	0.0795	3.291	0.854

Nota: Adaptado de Ebrahim & Behiry, 2012

Tabla 11.

Factores de calibración ecuaciones vida por Ahuellamiento Instituto de asfalto

No	Organización	f_4	f_5
1	Asphalt Institute	1.365E-09	4.477

Nota: Adaptado de Ebrahim & Behiry, 2012

Estructura de pavimento

La dos estructura de pavimento típicas evaluada esta compuesta de:

Estructura 1

- Carpeta asfáltica PG 58-28 de espesor igual a 10 cm con comportamiento viscoelástico
- Base granular clase A con CBR de 95% y 15 cm de espesor
- Subbase granular Clase A con CBR de 40% y 20 cm de espesor

Tal como se muestra en la siguiente figura



Figura 12. Estructura de pavimentos 1. Fuente: Elaboración propia

Estructura 2

- Carpeta asfáltica PG 58-28 de espesor igual a 20 cm con comportamiento viscoelástico
- Base granular clase A con CBR de 95% y 15 cm de espesor
- Subbase granular Clase A con CBR de 40% y 20 cm de espesor

Tal como se muestra en la siguiente figura

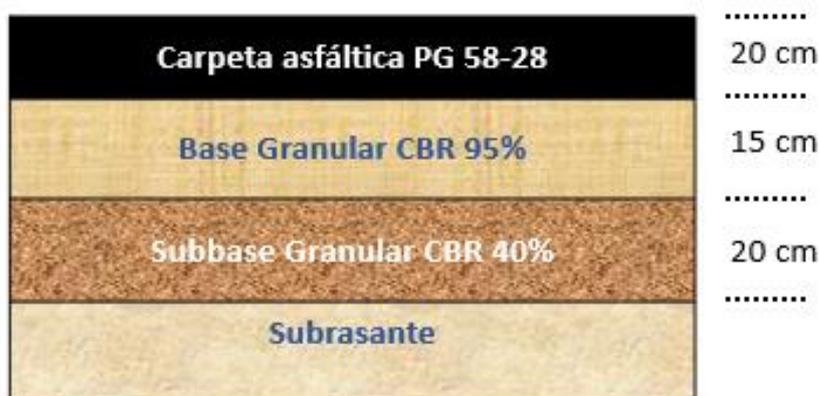


Figura 13. Estructura de pavimentos 2. Fuente: Elaboración propia

Para el concreto asfáltico, se utilizó la siguiente curva maestra que representa el módulo dinámico de este.

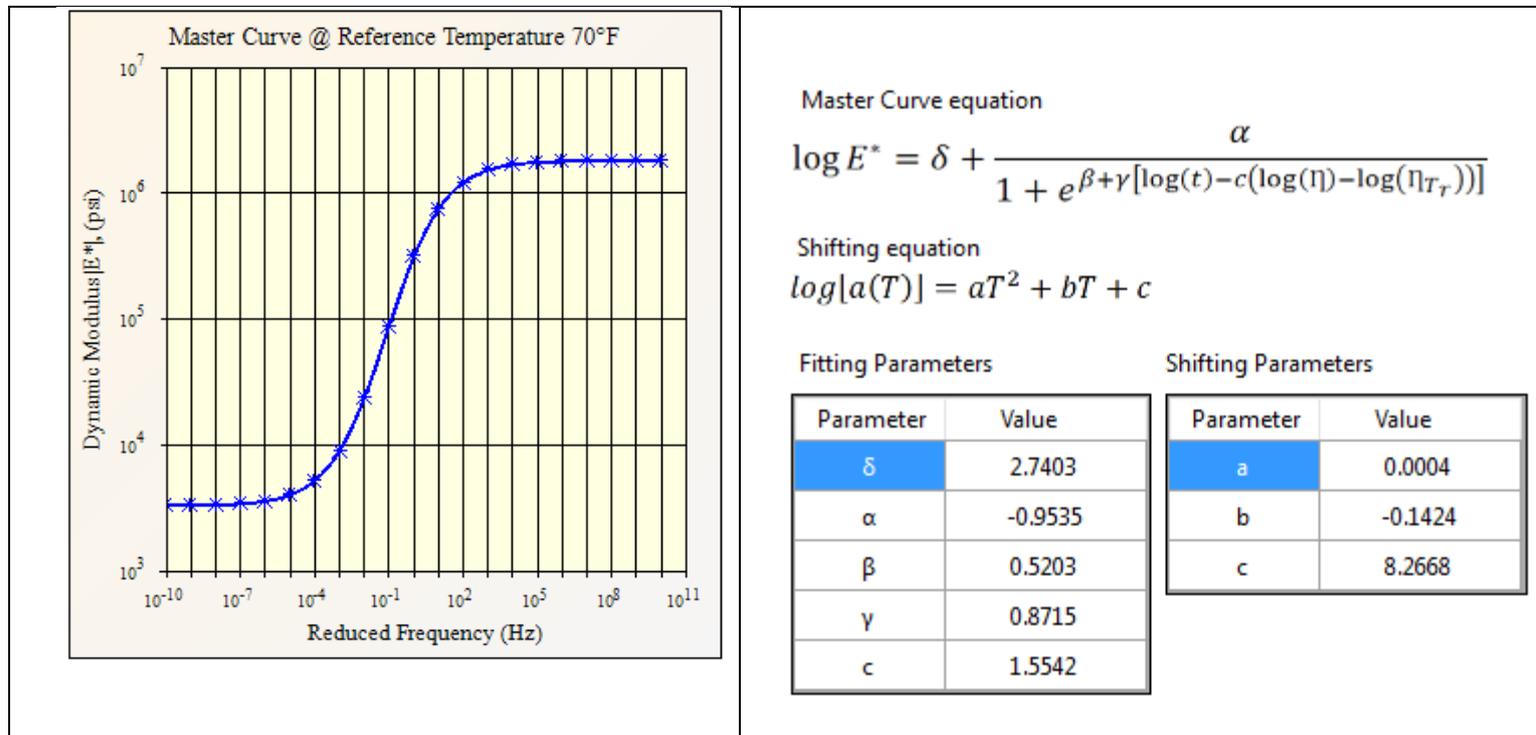


Figura 14. Curva maestra asfalto PG 58-28, Fuente 3D Move Software.

Calculo esfuerzo - deformacion

Para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones, se hizo uso del software 3D move, desarrollado por la Universidad de Nevada en Estados Unidos, el cual permite calcular esfuerzos y deformaciones en estructuras de pavimento sometidas a cargas en movimiento y simulando el asfalto con propiedades viscoelásticas.

Temperaturas

Para tener en cuenta el efecto de la temperatura, se hizo uso de dos temperaturas de 15 °C y 30°C

Análisis Resultados

Luego de calcular la carga dinámica para cada nivel de IRI, se ingresaron las estructuras de pavimento con cada una de sus características mecánicas (módulos resilientes, módulos dinámicos y espesores), se calcularon los esfuerzos y deformaciones en el fondo de la carpeta asfáltica y encima de la subrasante a 15°C y 30°C.

Teniendo los esfuerzos y deformaciones, se aplicaron las ecuaciones de transferencia, obteniendo los siguientes resultados:

Estructura 1

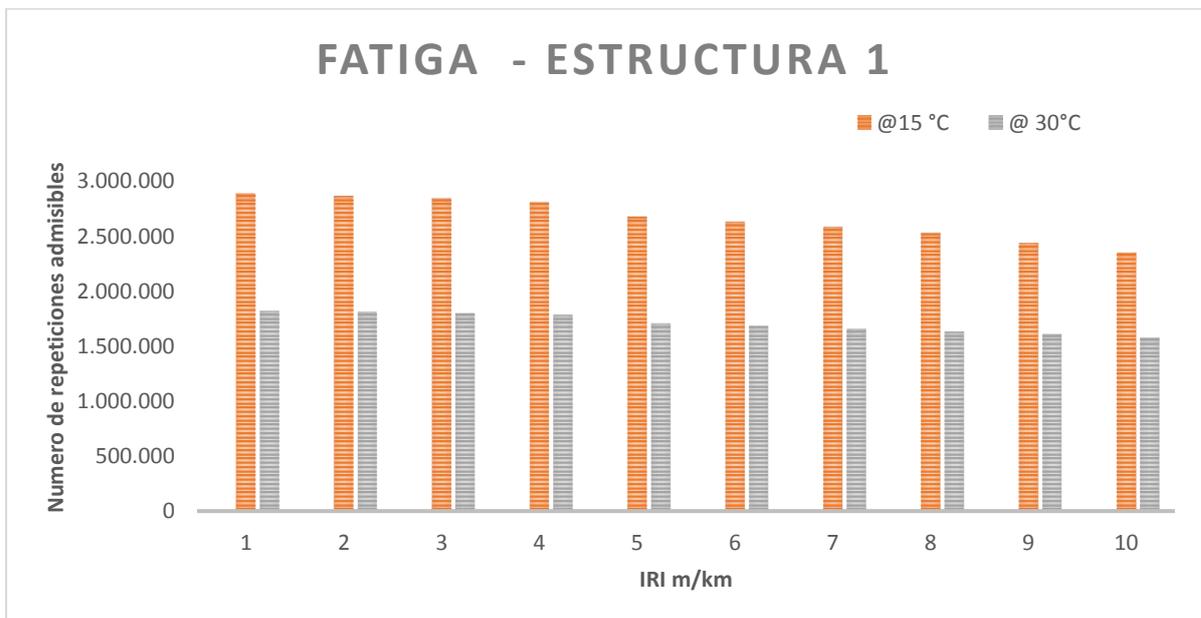


Figura 15. Vida por fatiga estructura 1. Fuente: Elaboración propia

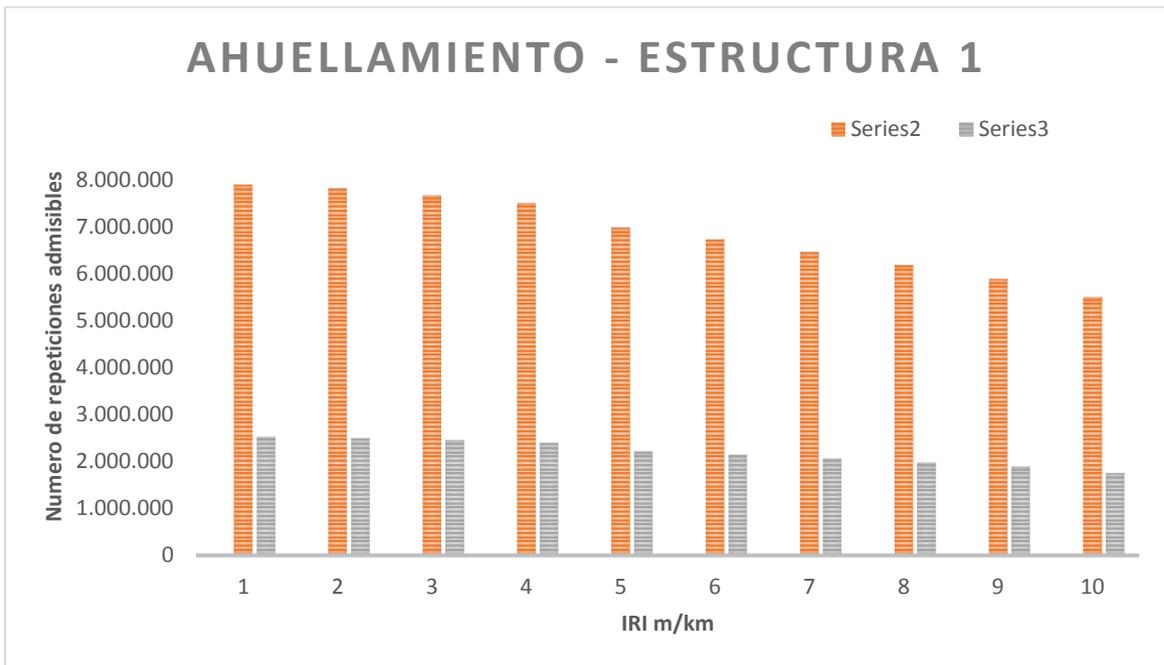


Figura 16. Vida por ahuellamiento estructura 1. Fuente: Elaboración propia

Estructura 2

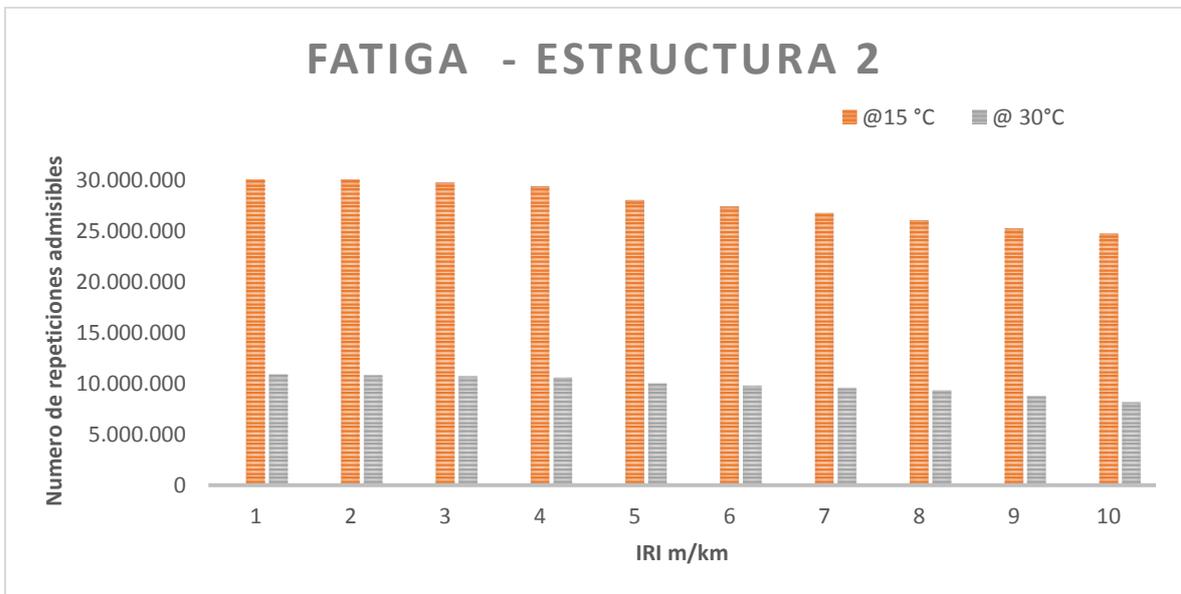


Figura 17. Vida por fatiga estructura 2. Fuente: Elaboración propia

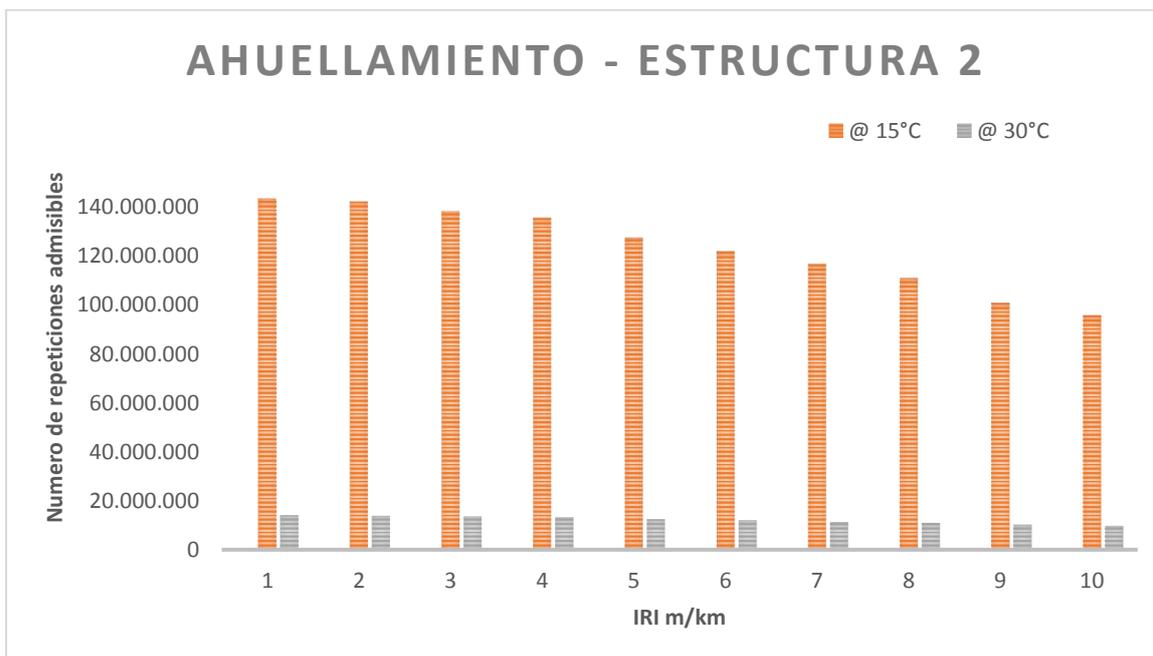


Figura 18. Vida por ahuellamiento estructura 2. Fuente: Elaboración propia

De las anteriores graficas se pueden concluir sobre el efecto dinámico que tienen las cargas a las que está sometido un pavimento asfaltico a diferentes temperaturas y diferentes niveles de rugosidad de la vía por la cual transita, de manera general se puede inferir que:

- En los casos evaluados, la vida por fatiga era inferior a la vida por ahuellamiento, es decir que los pavimentos primero fallaría por fatiga, esto era de esperarse puesto que, al incrementar las cargas, se incrementan los esfuerzos en la superficie y por tanto se genera fatiga en los pavimentos asfalticos.
- A medida que incrementa el valor del IRI, se disminuyen las vidas por fatiga y ahuellamiento, esto significa que a medida que tenemos una vía con mayor IRI, la carga dinámica se incrementa y en consecuencia se reduce la vida útil del pavimento
- Cuando comparamos pavimentos con mayores espesores de asfalto, se nota que esto mejora considerablemente la vida por fatiga y ahuellamiento.

- En el caso de la temperatura, para todos los casos a medida que se incrementa la temperatura de 15°C a 30°C, hay una reducción en el número de repeticiones admisibles, es decir que el efecto dinámico de las mezclas asfálticas a bajas temperaturas ayuda a soportar más número de ejes equivalentes.
- Se hace importante analizar en futuras investigaciones el efecto que tienen la velocidad en la vida por fatiga y ahuellamiento, dado que a medida que se disminuye la velocidad, el asfalto está sometido a más tiempo de carga, lo que genera deformaciones permanentes, así como también a mayor velocidad, menor tiempo de carga y mejores características dinámicas del asfalto que puedan contrarrestar los efectos dinámicos

Conclusiones y Recomendaciones

El tránsito es de las variables más fundamentales a la hora de realizar diseño de pavimentos, ya que este condiciona directamente los espesores de la infraestructura vial (Subbase, base y carpeta de rodadura). Una buena estimación del tránsito nos conlleva a construir un pavimento que soporte el tránsito durante su vida útil, mientras que, si no realizamos una buena estimación de esta variable, puede que el pavimento se deteriore mucho antes de lo previsto.

Como se pudo observar a lo largo de la investigación, actualmente el tránsito se caracteriza mediante las metodologías de los ejes equivalentes (ESAL) y la metodología de espectros de cargas. Ambas metodologías consideran que el vehículo se encuentra estático en la vía, estando esto apartado de la realidad ya que en la vía los vehículos circulan en movimiento, haciendo de esta manera que se presenten cargas dinámicas en la interface llanta pavimento, las cuales en algunos casos superan la carga estática de diseño (Ya sea por la metodología de Ejes equivalentes o espectros de cargas) y de esta manera el pavimento experimenta un deterioro acelerado sin llegar a cumplir con su vida útil.

Debido a esto, en esta investigación, se buscó en el estado del arte la generación de las cargas dinámicas en pavimento, y a través de una ecuación desarrollada por investigadores, se determinaron cargas dinámicas promedio en tramos de vías con valores específicos de IRI.

Teniendo estas cargas, se sometieron estructuras de pavimento, para determinar los esfuerzos y deformaciones a las cuales estarían sometidos y a partir de esto, estimar el número de repeticiones admisibles por los criterios de falla de fatiga y ahuellamiento. Esto se realizó para una velocidad constante de 80 km/h, niveles de rugosidad de 1 m/km a 10 m/km y temperaturas de 15 grados centígrados y 30 grados centígrados.

Como resultado de la investigación, se puede concluir que, en los casos evaluados, la vida por fatiga era inferior a la vida por ahuellamiento, es decir que los pavimentos primero

fallaría por fatiga, esto era de esperarse puesto que, al incrementar las cargas, se incrementan los esfuerzos en la superficie y por tanto se genera fatiga en los pavimentos asfálticos.

Además, que los espesores de asfalto eran grandes, disminuyendo la probabilidad de ahuellamiento. Por otro lado, a medida que incrementa el valor del IRI, se disminuyen las vida por fatiga y ahuellamiento, esto significa que a medida que tenemos una vía con mayor IRI, la carga dinámica se incrementa y en consecuencia se reduce la vida útil del pavimento.

En el caso de comparar pavimentos con mayores espesores de asfalto, se nota que esto mejora considerablemente la vida por fatiga y ahuellamiento, en especial esta última, ya que, al colocar altos espesores de asfalto, se reducen los esfuerzos encima de la subrasante.

Finalmente, En el caso de la temperatura, para todos los casos a medida que se incrementa la temperatura de 15°C a 30°C, hay una reducción en el número de repeticiones admisibles, es decir que el efecto dinámico de las mezclas asfálticas a bajas temperaturas ayuda a soportar más número de ejes equivalentes.

Finalmente, se hace importante exigir vías con altos estándares de calidad, dentro de los cuales se condicione el valor del IRI, es decir construir y mantener vías con IRI bajos, ya que como vimos a lo largo de la investigación a medida que se incrementa el IRI se disminuye la vida por fatiga y vida por ahuellamiento (Número de repeticiones admisibles por fatiga y número de repeticiones admisibles por ahuellamiento).

Limitaciones

De manera general, se hace importante analizar en futuras investigaciones el efecto que tienen la velocidad en la vida por fatiga y ahuellamiento, dado que a media que se disminuye la velocidad, el asfalto está sometido a más tiempo de carga, lo que genera deformaciones permanentes, así como también a mayor velocidad, este se será expuesto a menor tiempo de carga propiciando una mejor respuesta del asfalto debido a sus características dinámicas que podrían contrarrestar los efectos de las cargas en movimiento.

Referencias

- 3D – Move Analysys Software. Universidad Reno Nevada
- AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Behiry, A. E. A. E. M. (2012). Fatigue and rutting lives in flexible pavement. Ain Shams Engineering Journal, 3(4), 367-374.
- Caro, F., & Peña, G. (2012). Análisis y criterios para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en vías urbanas colombianas que orienten la elaboración de una especificación técnica. Artículo Intekhnia, 7(1), 57-72.
- Ekwulo, E. O., & Eme, D. B. (2009). Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. African Journal of Environmental Science and Technology, 3(12).
- Goenaga, B, Fuentes, L, & Mora, O. (2016). Evaluation of the methodologies used to generate random pavement profiles based on the power spectral density: An approach based on the International Roughness Index.
- Goenaga, B., Fuentes, L., & Mora, O. (2019). A practical approach to incorporate roughness-induced dynamic loads in pavement design and performance prediction. Arabian Journal for Science and Engineering, 44(5), 4339-4348.
- INV E-790. (2013). Determinacion del indice internacional de rugosidd (IRI) para medir la rugosidad (Irregularidades de la superficie) de pavimentos.
- INVIAS. (2008). Guia Metodologica para el Diseño de obras de Rahabilitacion de pavimentos asfalticos de carreteras. Ministerio de Transporte.
- INVIAS. (2008). Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para vias con bajos, medios y altos volúmenes de transito. Medellin: Intituto Colombiano Productores de Cemento.

INVIAS. (2013). Instituto Nacional De Vías - Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras en Colombia.

INVIAS. (2013). Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.

KERKHOVEN, R., & DORMON, M. (1953). Some Considerations on the California Bearing Ratio Method for the Design of Flexible Pavement. Shell Bitumen Monograph No. 1 .

Kim, S, Rhee, S, Park, H, & Yun, D. (2009). Correlations among Pavement Surface Roughness, Moving Dynamic Vehicle Loads, and Concrete Pavement Performance. Performance Modeling and Evaluation of Pavement Systems and Materials, 25 - 31.

Liu, B. (1999). SURFACE ROUGHNESS EFFECT ON DYNAMIC. JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING, 332 - 337.

Mora (2016). DESARROLLAR DE UNA METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS QUE PERMITA INCORPORAR EL EFECTO DE LA RUGOSIDAD EN LA CARGA DINÁMICA TRANSMITIDA AL PAVIMENTO. Tesis de maestría. Universidad del Norte

Portland Cement Association. (1984) The Design for Concrete Highway and Street Pavements. PCA, Skokie, IL, U. S. A.

Resolucion 4100. Ministerio de transporte de colombia

SAAL, R., & PELL, S. (1960). Kolloid-Zeitschrift MI. 61-71: Heft 1

Sawyers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. (No. Technical Paper 46).

Sebaaly, P., & Tabatabaee, N. (1993). Influence of Vehicle Speed on Dynamic Loads and Pavement Response. Transportation Research Record, 107–114.

Shi, X, & Cai, C. (2009). Simulation of Dynamic Effects of Vehicles on Pavement Using a 3D Interaction Model. JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING © ASCE, 736 - 744.

Sun. L. (2001) Developing spectrum based models for international roughness index and present serviceability index. JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING.

Walubita, L. F., Nyamuhokya, T. P., Romanoschi, S. A., & Souliman, M. I. (2017). A MECHANISTIC-EMPIRICAL IMPACT ANALYSIS OF DIFFERENT TRUCK CONFIGURATIONS ON A JOINTED PLAIN CONCRETE PAVEMENT (JPCP). CIVIL ENGINEERING JOURNAL-STAVEBNI OBZOR, 4, 507-529.