

2

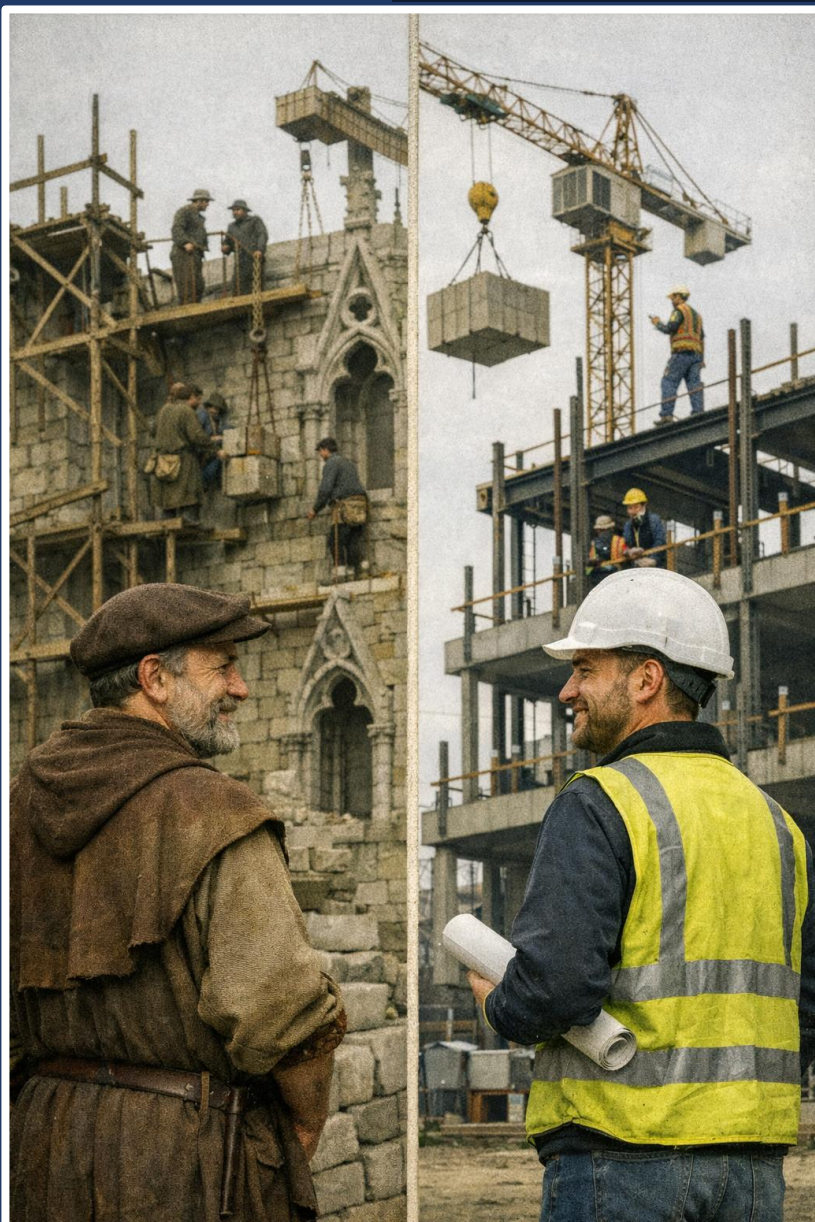
Análisis Del Exceso De Cargas De Vehículos Pesados En Niveles De Deterioro En Pavimentos Flexibles

Analysis of Heavy Vehicle Overloading and Its Impact on Flexible Pavement Deterioration Levels

Autores

Steven Adrián Martínez Marín
Estudiante, Universidad Técnica de
Manabí, Portoviejo, Ecuador
smartinez6607@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-8855-0222>

Eduardo Tejeda Piusseaut
Profesor, Universidad Técnica de
Manabí, Portoviejo, Ecuador
eduardo.tejeda@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0589-9989>



Nota Editorial: Recibido: 21 de abril 2026 Aceptado: 8 de junio 2026

2

Análisis Del Exceso De Cargas De Vehículos Pesados En Niveles De Deterioro En Pavimentos Flexibles

Resumen

El presente estudio analiza el efecto del incremento de cargas en el tránsito pesado sobre la vida útil de pavimentos flexibles, evidenciando la influencia directa del Factor de Camión (FC) en el deterioro estructural. Se parte de un escenario de diseño basado en un tránsito acumulado de $2,01 \times 10^6$ ejes equivalentes (ESALs) para un período de 20 años, el cual se contrasta con escenarios de incremento progresivo de cargas hasta una condición extrema de operación al 100% de la carga legal permitida. La metodología adoptada se fundamenta en un enfoque empírico–mecanicista, que integra la modelación estructural mediante el programa ALIZE con la formulación de leyes de fallo para la subrasante, la carpeta asfáltica y la deflexión del pavimento, obtenidas a partir de análisis de regresión. Los resultados demuestran que el incremento del FC, desde 1,25 hasta 3,77, genera un aumento significativo del tránsito acumulado, alcanzando valores de hasta $6,04 \times 10^6$ ESALs, lo que implica mayores exigencias estructurales. Asimismo, se determinó que el incremento de las cargas reduce de manera significativa el tiempo necesario para alcanzar el tránsito de diseño, acelerando el deterioro estructural del pavimento. Se concluye que el exceso de carga vehicular constituye un factor determinante en la reducción prematura de la vida de servicio, lo que hace indispensable fortalecer los controles de carga y considerar posibles escenarios de sobrecarga en el diseño estructural.

Palabras Clave

pavimentos flexibles, factor de camión, ejes equivalentes, sobrecarga vehicular, diseño empírico–mecanicista, leyes de fallo

2

Analysis of Heavy Vehicle Overloading and Its Impact on Flexible Pavement Deterioration Levels

Abstract

This study analyzes the effect of increased heavy traffic loads on the service life of flexible pavements, demonstrating the direct influence of the Truck Factor (TF) on structural deterioration. It begins with a design scenario based on a cumulative traffic volume of $2,01 \times 10^6$ equivalent single axle loads (ESALs) over a 20-year period, which is then compared with scenarios of progressively increasing loads up to an extreme operating condition at 100% of the legally permitted load. The methodology adopted is based on an empirical-mechanistic approach, integrating structural modeling using the ALIZE software with the formulation of failure laws for the subgrade, asphalt layer, and pavement deflection, obtained from regression analysis. The results show that increasing the TF from 1,25 to 3,77 generates a significant increase in cumulative traffic, reaching values of up to $6,04 \times 10^6$ ESALs, which implies greater structural demands. Furthermore, it was determined that increased loads significantly reduce the time required to reach design traffic, accelerating the structural deterioration of the pavement. It is concluded that excessive vehicle load is a determining factor in the premature reduction of service life, making it essential to strengthen load controls and consider potential overload scenarios in the structural design.

Keywords

flexible pavements, truck factor, equivalent axle loads, vehicle overload, empirical-mechanistic design, failure laws

1. INTRODUCCIÓN

En numerosos países en desarrollo, la circulación de vehículos pesados con exceso de carga constituye un problema recurrente, asociado principalmente a la limitada capacidad de control y fiscalización vehicular. En este contexto, se estima que entre el 60% y el 80% de los camiones superan los límites legales de carga, motivados fundamentalmente por razones económicas [1].

Esta práctica genera un incremento significativo en el deterioro estructural de los pavimentos, reduciendo de manera sustancial su vida útil. Asimismo, el crecimiento sostenido del transporte de carga, junto con la incorporación de vehículos de mayor capacidad, ha contribuido a intensificar este fenómeno en los últimos años [2].

Los límites de peso establecidos para el vehículo completo, así como para cada eje o grupo de ejes, influyen directamente tanto en la durabilidad del pavimento como en la seguridad vial [3]. El aumento del peso por eje, junto con la diversidad de configuraciones vehiculares, acelera el daño acumulado en la estructura del pavimento y genera un incremento considerable en los costos de mantenimiento y rehabilitación [4].

El deterioro del pavimento no depende exclusivamente de la carga vehicular, sino que también está condicionado por la calidad de los materiales, las características de la subrasante y el espesor de las capas estructurales, factores determinantes de su capacidad portante [5]. En este contexto, la identificación y clasificación de las patologías del pavimento constituyen herramientas fundamentales para evaluar la severidad del daño y definir estrategias de mantenimiento adecuadas [6]. De igual forma, la evaluación del estado superficial mediante el análisis de fisuras, ahuellamientos y desprendimientos permite establecer relaciones entre los daños observados y sus causas, orientando de manera más precisa las acciones de conservación [7].

Diversos estudios resaltan la relevancia de aplicar metodologías empírico-mecanicistas para analizar el comportamiento estructural del pavimento frente a cargas reales de tránsito, considerando de manera integrada variables como el volumen y tipo de tráfico, las condiciones ambientales y las propiedades mecánicas de los materiales y del suelo [8]. Como complemento esencial en este tipo de análisis, se incorporan las leyes de fallo o leyes de comportamiento, las cuales permiten relacionar los mecanismos de daño, tales como el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente, con las repeticiones de carga a lo largo de la vida útil de cada capa del sistema estructural. Estas leyes, orientadas a evaluar la fatiga de la mezcla asfáltica, la deformación permanente en la subrasante y la deflexión global de la estructura, resultan fundamentales para predecir la evolución del deterioro del pavimento.

Dado que en Ecuador no existen leyes de fallo oficialmente establecidas para el análisis mecanicista, en el presente estudio se adoptan modelos internacionales validados experimentalmente. Para ello, se realiza el análisis mecanicista de las estructuras mediante herramientas informáticas especializadas, como el software ALIZE, desarrollado por el Laboratorio Central de Carreteras y Puentes de Francia (LCPC), el cual permite calcular las tensiones y deformaciones internas generadas por las cargas del tránsito.

El objetivo del presente trabajo es demostrar cómo el exceso de carga en el tráfico pesado puede provocar una reducción significativa de la vida de servicio del pavimento, como consecuencia directa del incremento del factor de camión asociado al conjunto de vehículos pesados. Para ello, se parte de un escenario de tránsito existente que sustenta una estructura de diseño, definida en función del número de ejes equivalentes acumulados durante un período de 20 años y del factor de camión derivado del espectro vehicular observado. Asimismo, se plantea un escenario alternativo en el cual los camiones circulan con el 100% de la carga legal permitida, lo que conlleva un incremento sustancial de la estructura requerida para soportar el tránsito proyectado en el mismo período de diseño, debido al aumento del factor de camión y, en consecuencia, del número de ejes equivalentes.

Posteriormente, se desarrolla un análisis hipotético basado en incrementos progresivos de las cargas transportadas a distintos niveles, desde la condición de carga de diseño hasta un escenario extremo en el que todos los vehículos operan con la carga máxima legal permitida. Este incremento gradual genera un aumento del factor de camión y, por ende, del número de ejes equivalentes acumulados a lo largo del tiempo. Para cada nivel de carga se determina el tránsito equivalente acumulado y el año en que este alcanza el valor de diseño considerado para la estructura del pavimento. La diferencia entre el período de diseño y el momento en que el tránsito real iguala o supera el tránsito de diseño representa el intervalo durante el cual la estructura se encuentra sometida a solicitaciones superiores a las previstas en el cálculo, condición que puede acelerar de manera significativa los procesos de deterioro y reducir anticipadamente la vida útil del pavimento.

2. DETERMINACIÓN DE LAS LEYES DE FALLO DE LA SUBRASANTE Y DEL PAVIMENTO

El diseño de pavimentos mediante enfoques empírico-mecanicistas se fundamenta en la consideración, por una parte, de la respuesta estructural en términos de tensiones, deformaciones y desplazamientos frente a la aplicación de cargas y, por otra, en la verificación de que dichos efectos no superen los valores admisibles establecidos por las ecuaciones de fallo correspondientes a los materiales que conforman la estructura y la subrasante.

Las leyes de fallo constituyen expresiones de carácter empírico que permiten relacionar las tensiones o deformaciones inducidas en cada una de las capas del pavimento, así como en el suelo de subrasante, con la acción repetida de cargas a lo largo de un período determinado. Estas ecuaciones representan una herramienta fundamental para evaluar el comportamiento estructural de los pavimentos flexibles en función del tránsito proyectado y de las condiciones de servicio previstas.

2.1. LEY DE FALLO PARA LA SUBRASANTE

En el caso de la subrasante, se emplea una ecuación que define la deformación vertical máxima admisible en el suelo de cimiento, con el fin de evitar la ocurrencia de fallas prematuras ante la acción de las cargas de diseño. A nivel internacional, se han propuesto diversas leyes de fallo para la subrasante, que establecen la deformación máxima admisible según las repeticiones de cargas esperadas. La figura 1 presenta una representación gráfica de diferentes leyes de fallo desarrolladas por autores e instituciones de reconocido prestigio [9].

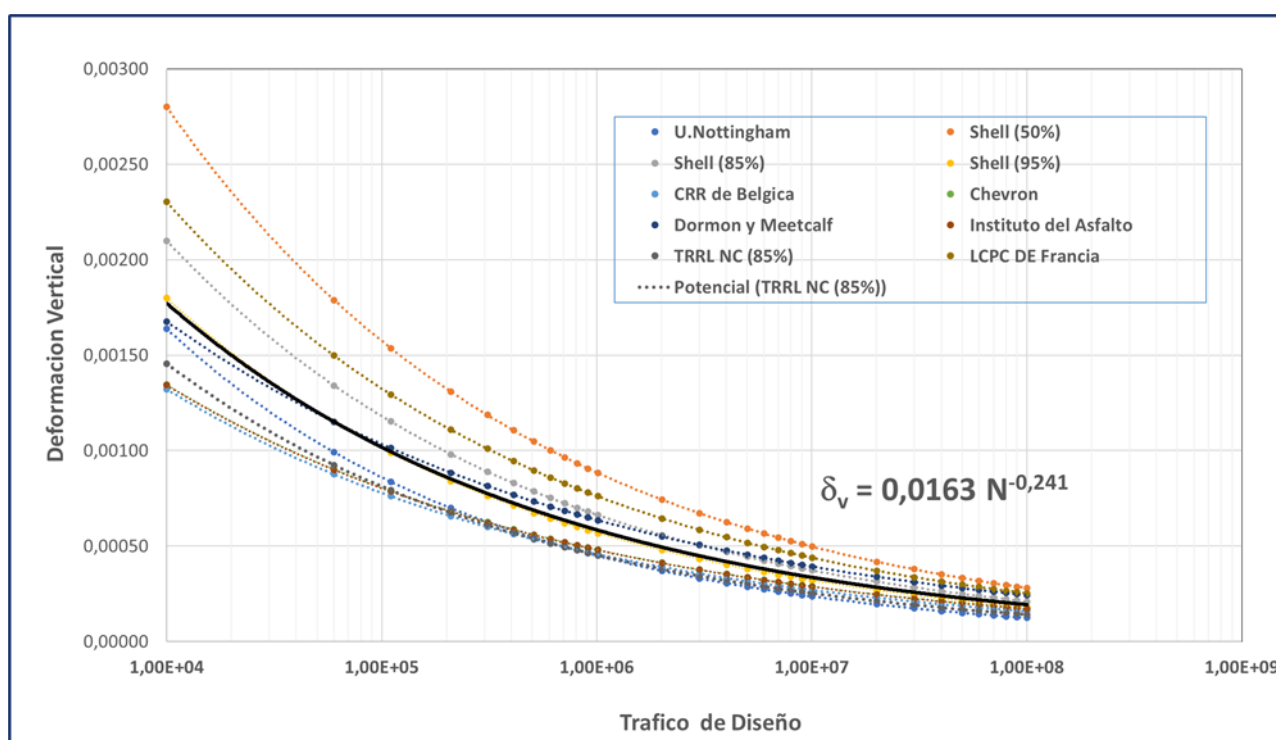


Fig. 1- Representación de leyes de fallo del suelo de subrasante, según diversos autores e instituciones internacionales, y curva de regresión obtenida.

A partir de estas ecuaciones se obtuvo una muestra de valores de deformación vertical en la subrasante en función del tránsito de diseño. Cada valor fue considerado como una observación individual y el conjunto de resultados como una muestra estadística. Ante la ausencia de una ley de fallo desarrollada a nivel nacional, con base en dichas muestras, se realizó un análisis de regresión, para obtener una ecuación de fallo aplicable a la determinación de los valores admisibles de deformación vertical para el suelo de cimiento o subrasante. La ecuación de regresión obtenida responde a la siguiente forma:

$$\varepsilon_v = 0,0163 N^{-0,241} \quad (1)$$

Donde ε_v representa la deformación vertical admisible en la subrasante, correspondiente a N aplicaciones de carga equivalentes a la carga de cálculo de 8,2 toneladas.

2.2 LEY DE COMPORTAMIENTO DE LA CAPA ASFÁLTICA

La combinación de las distintas leyes de fallo permitió obtener una expresión unificada mediante análisis de regresión, considerando cada ecuación individual como una muestra de valores observados. Este procedimiento estadístico hizo posible integrar los criterios de fatiga desarrollados por diversos autores e instituciones de referencia internacional, alineados conceptualmente con el enfoque empírico-mecanicista adoptado por la AASHTO para el diseño de pavimentos flexibles. En la figura 2 se presenta la representación gráfica de las diferentes leyes de fallo reportadas en la literatura especializada [9], junto con la curva resultante del proceso de regresión.

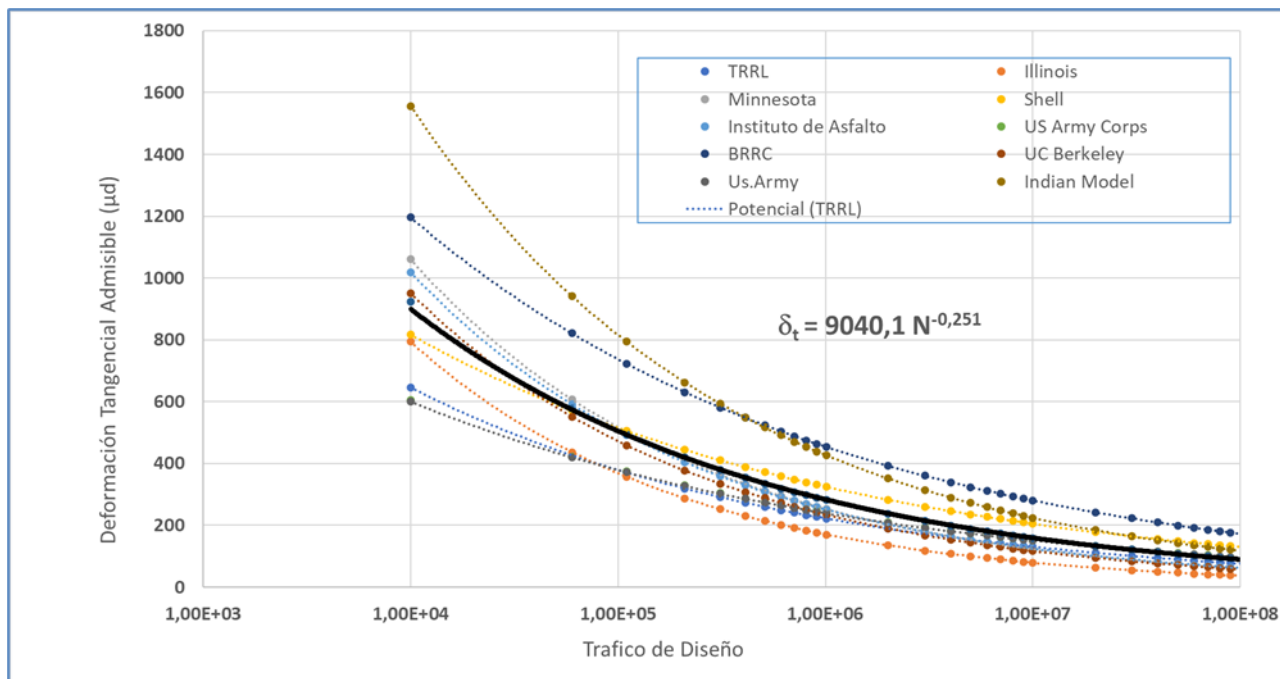


Fig. 2- Representación de leyes de fallo a fatiga de la capa asfáltica, según diversos autores e instituciones internacionales [10] y la curva de regresión obtenida.

Como resultado del análisis se obtuvo la ecuación (2) de fallo por fatiga de la carpeta asfáltica:

$$\varepsilon_t = 9040,1 N^{-0,251} \quad (2)$$

Donde ε_t representa la deformación tangencial admisible en la base inferior de la carpeta asfáltica, y N corresponde al número de aplicaciones de carga equivalentes, referidas a la carga estándar de diseño de 8,2 toneladas, conforme al criterio adoptado por la AASHTO 1993. Esta formulación se fundamenta en el principio de que la fatiga de la capa asfáltica del pavimento flexible se produce cuando las deformaciones por tracción inducidas en la fibra inferior de la capa asfáltica superan un umbral crítico, generando fisuración progresiva bajo la acción repetida del tránsito.

En este sentido, la ecuación obtenida es conceptualmente consistente con el criterio de fatiga de la AASHTO, el cual establece una relación inversa entre la deformación de tracción admisible y el número de repeticiones de carga, permitiendo evaluar la vida a fatiga del pavimento en función del tránsito proyectado. Por tanto, la expresión propuesta constituye una herramienta válida para el análisis del desempeño estructural del pavimento flexible y su verificación frente a los requerimientos de diseño establecidos por la normativa AASHTO, particularmente en contextos donde no se dispone de leyes de fallo desarrolladas a nivel nacional.

2.3. LEY DE COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

De manera análoga, se recopilaron diversas leyes de comportamiento asociadas a la deflexión del pavimento, las cuales permiten evaluar la respuesta elástica global del sistema estructural frente a la aplicación repetida de cargas. Estas expresiones empíricas relacionan la deflexión superficial con el número de repeticiones de carga, constituyéndose en un indicador indirecto del estado estructural y de la capacidad portante del pavimento. En la figura 3 se muestra la representación gráfica de las diferentes leyes de deflexión propuestas por autores e instituciones de reconocimiento internacional [11], junto con la tendencia obtenida a partir del análisis de regresión

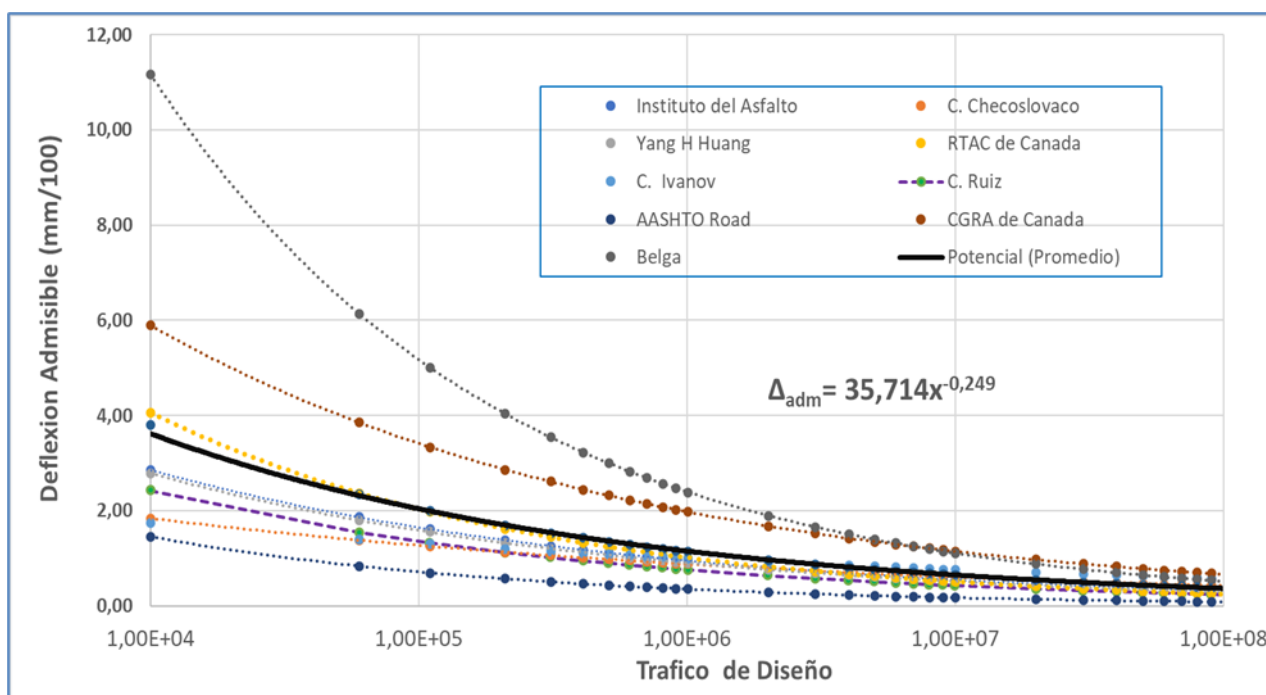


Fig. 3- Representación de comportamiento para la deflexión elástica admisible de la estructura del pavimento, según diversos autores e instituciones internacionales [10], y curva de regresión obtenida.

Como resultado del proceso de regresión se obtuvo la ecuación (3) de deflexión admisible:

$$\Delta = 35,714 N^{-0,249} \quad (3)$$

Donde Δ representa la deflexión admisible del pavimento, y N corresponde al número de aplicaciones de carga equivalentes, referidas a la carga estándar de diseño de 8,2 toneladas, conforme al criterio adoptado por la AASHTO 1993. Esta relación refleja el comportamiento elástico del pavimento flexible, en el cual la deflexión admisible disminuye a medida que se incrementa el número de repeticiones de carga, en concordancia con los principios de daño acumulativo considerados en la metodología AASHTO.

La ecuación obtenida resulta conceptualmente consistente con el enfoque de la AASHTO, que emplea la deflexión como un parámetro representativo del desempeño estructural del pavimento, especialmente en la evaluación de pavimentos en servicio y en el control de la capacidad estructural remanente. En este contexto, la expresión propuesta constituye una herramienta complementaria para la verificación del diseño estructural del pavimento flexible y su comportamiento frente al tránsito proyectado, particularmente en escenarios donde no se dispone de modelos de deflexión desarrollados a nivel nacional.

3. CARACTERIZACIÓN DEL TRÁNSITO DE DISEÑO CONSIDERANDO DIFERENTES ESCENARIOS DE SOBRECARGA

Para el desarrollo de la investigación se seleccionó, de manera hipotética, una vía urbana de dos carriles sometida al tránsito de vehículos pesados, para la cual se asumió un espectro de cargas (frecuencias diarias de camiones) característico de la ciudad de Portoviejo, Ecuador. A partir de este tránsito se estimó el Factor de Camión, considerando condiciones de carga asignadas de forma aleatoria, en las cuales cada vehículo de la muestra transporta una carga comprendida entre cero (vehículo vacío) y la carga máxima permitida por la normativa legal vigente. Con ello, se obtuvo un valor inicial del Factor de Camión (FC) correspondiente a la muestra analizada.

Posteriormente, se consideraron diferentes incrementos en las cargas transportadas por los vehículos, generándose de manera aleatoria nuevos Factores de Camión con valores superiores al valor inicial. Al mantener constante, tanto el espectro de cargas como el volumen total de camiones de la muestra, se simulaban distintos escenarios de incremento de carga, lo cual se traduce en un aumento del FC y, en consecuencia, en incrementos del número de ejes simples equivalentes (ESALs) acumulados durante el período de servicio del pavimento.

Cálculo de ejes equivalentes (ESALs)

El tránsito de diseño, expresado en ejes simples equivalentes a 18 kips (82 kN), denominados ESALs por sus siglas en inglés, se determina mediante la siguiente ecuación (4):

$$ESALs = ADT_0 \cdot TKS \cdot GF \cdot DD \cdot LD \cdot FC \cdot 365 \quad (4)$$

donde:

- ADT_0 : Tránsito Promedio Diario anual inicial (veh/día)
- TKS : Proporción de vehículos pesados
- GF : Factor de crecimiento del tránsito
- DD : Factor de distribución direccional
- LD : Factor de distribución por el carril de diseño
- FC : Factor de camión

Se parte de un tránsito inicial con un Tránsito Promedio Diario (ADT) de 2 000 vehículos/día, de los cuales el 16% corresponde a camiones. Para la proyección del tránsito durante el período de diseño se consideró una tasa de crecimiento anual del 3%. El factor de crecimiento acumulado del tránsito para un período determinado se calcula mediante la ecuación 5:

$$GF = \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad (5)$$

Donde r es la tasa de crecimiento anual y n el período de diseño, expresado en años. Para un período de diseño de 20 años, el factor de crecimiento obtenido es de 27,27.

El factor de distribución direccional (DD), correspondiente a una condición de tráfico balanceado, se adoptó con un valor de 0,50, mientras que el factor de distribución por carril (LD) se consideró igual a 1 para una vía bidireccional. Con base en los valores de tránsito observados, la composición vehicular y las condiciones geométricas y operativas de la vía, se estimó un tránsito de diseño acumulado de $2,0 \times 10^6$ ejes equivalentes de 18 kips.

El Factor de Camión (FC) se define como la relación entre el número de ejes equivalentes de diseño y el número de camiones de la muestra analizada, obteniéndose un valor inicial de $FC = 1,25$, el cual se adopta como valor base de diseño. En estas condiciones, el número acumulado de Ejes Simples Equivalentes (ESALs) resulta $2,01 \times 10^6$ ejes, valor que se considera representativo del tránsito de diseño de la vía.

Con el fin de evaluar el impacto del exceso de carga vehicular sobre el desempeño estructural del pavimento, se analizaron escenarios adicionales mediante el incremento del Factor de Camión a valores de 1,42, 1,61 y 1,81, correspondientes a aumentos de carga del 5%, 10% y 15%, respectivamente, en relación con la condición inicial de diseño. Adicionalmente, se evaluó un escenario extremo en el que se asume que la totalidad de los camiones circulan con la carga legal máxima permitida, obteniéndose un valor de $FC = 3,77$. Este escenario representa la condición más desfavorable, al considerar que el 100% de los vehículos pesados de la muestra operan bajo la carga máxima autorizada por la normativa vigente [12].

A medida que se incrementa el Factor de Camión, el número de ESALs acumulados en el diseño presenta variaciones significativas, tal como se muestra en la tabla 1, alcanzándose un valor máximo de $6,04 \times 10^6$ ESALs en el escenario teórico en el que los camiones circulan con el 100% de la carga máxima permitida

Tabla 1- Ejes equivalentes acumulados en el periodo de diseño

Factor de Camión (FC)	1,25	1,42	1,61	1,81	3,77
ESALs	2,01E+06	1,99E+06	1,93E+06	2,90E+06	6,04E+06

4. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

4.1. DISEÑO DE PAVIMENTO PARA LAS CARGAS DE DISEÑO

El diseño estructural del pavimento se realizó mediante un procedimiento empírico–mecanicista, utilizando el programa ALIZE, el cual permite evaluar la respuesta mecánica del sistema multicapa ante la aplicación repetida de cargas. Se adoptó una carga de cálculo de 8 200 kg por eje simple, equivalente a 2 050 kg por rueda, con una presión de contacto de 6,5 kg/cm², lo que representa un radio de carga equivalente de 10 cm.

La aplicación de esta carga sobre la estructura del pavimento flexible genera deformaciones críticas en puntos específicos del sistema: una deformación tangencial por tracción en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, asociada al fenómeno de fatiga, y una deformación vertical de compresión en la subrasante, relacionada con la pérdida de capacidad portante. Ambos parámetros fueron considerados como criterios de control del diseño estructural, de acuerdo con el enfoque empírico–mecanicista.

Las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la estructura del pavimento se determinaron a partir de correlaciones con el CBR de diseño de las capas de base y subbase. Con base en los valores exigidos para dichas capas, se establecieron el módulo resiliente y el coeficiente de Poisson correspondientes. La capa de base granular, con un CBR de 80 presentó un módulo resiliente de 500 MPa, mientras que la subbase granular, con un CBR de 30%, mostró un módulo de 300 MPa; en ambos casos se adoptó un coeficiente de Poisson de 0,35, característico de materiales no aglomerados.

Para la carpeta asfáltica se consideró un módulo resiliente de 1 150 MPa, obtenido de la referencia [13], valor representativo de una temperatura media del pavimento de 36°C, correspondiente a las condiciones climáticas de la ciudad de Portoviejo. Dada la baja capacidad portante de la subrasante, caracterizada por un CBR de 2,5% y un módulo resiliente de 25 MPa, se incorporó una capa de mejoramiento con un CBR de 20%, para un módulo resiliente de 200 MPa y un espesor de 15 cm, con el fin de mejorar la respuesta estructural del sistema.

Los valores admisibles de deformación, tanto para la subrasante como para la carpeta asfáltica, se determinaron mediante las leyes de fallo obtenidas previamente, considerando un tránsito de diseño de $6,04 \times 10^6$ ejes equivalentes. La deformación tangencial admisible en la carpeta asfáltica se estableció en 236,69 μ d, mientras que la deformación vertical máxima admisible en la subrasante fue de 493,43 μ d.

Estos límites admisibles fueron comparados con los valores de deformación calculados mediante el programa ALIZE, a partir de los cuales se determinaron los espesores de las capas que garantizan que las deformaciones inducidas no superen los valores permisibles. Como resultado del proceso de diseño, se obtuvo un espesor de 8 cm para la carpeta asfáltica, así como 20 cm y 22 cm para las capas de base y subbase, respectivamente. Bajo esta configuración estructural, se registraron valores de 186 μ d para la deformación tangencial en la carpeta asfáltica y 441,1 μ d para la deformación vertical en la subrasante, verificándose que ambos se mantienen por debajo de los límites admisibles establecidos.

En la tabla 2 se presentan de forma sintética los resultados obtenidos. Estos evidencian que, bajo las condiciones de tránsito de diseño, las deformaciones críticas tanto en la capa asfáltica como en la subrasante se mantienen dentro de los límites admisibles, permitiendo alcanzar el número de ejes equivalentes al final del período de diseño previsto, en concordancia con los criterios de dimensionamiento establecidos. Asimismo, la condición de carga de diseño se adoptó como escenario de referencia como base para el análisis comparativo frente a escenarios alternativos de carga.

Tabla 2- Diseño del pavimento para el tráfico normal de $6,04 \times 10^6$ ejes equivalentes. Verificación de deformaciones admisibles para el escenario de carga normal.

VALORES ADMISIBLES		ESTRUCTURA		VALORES CALCULADOS	
Deformación tangencial (μd)	Deformación vertical (μd)	Capas	Espesores (cm)	Deformación tangencial (μd)	Deformación vertical (μd)
236,69		Superficie	8	186	
		Base	20		
		Subbase	22		
		Mejoramiento	15		
	493,43	Subrasante			441,1

4.2. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA CON CARGA MÁXIMA

Con el propósito de evaluar el comportamiento estructural del pavimento bajo condiciones más exigentes, se desarrolló un nuevo diseño del pavimento considerando las cargas máximas por eje correspondientes a los distintos tipos de camiones pesados, conforme a los límites legales vigentes en Ecuador para el tránsito vehicular. En este escenario, se asumió que cada vehículo de la muestra circula con el 100% de la carga máxima legal permitida [12].

Este incremento en las solicitaciones estructurales generó un Factor de Camión de 3,77, lo que se traduce en un total acumulado de $6,04 \times 10^6$ ejes equivalentes para un período de diseño de 20 años, valor previamente determinado en el epígrafe 2. Esta condición representa el escenario más desfavorable en términos de demanda estructural sobre el pavimento.

Para la evaluación se emplearon las leyes de fallo utilizadas en la condición de carga de diseño, con el fin de garantizar la consistencia metodológica en la comparación de resultados. A partir de dichas expresiones se determinaron los valores admisibles, obteniéndose una deformación tangencial permisible de 179,50 μd en la carpeta asfáltica y una deformación vertical máxima admisible de 378,35 μd en la subrasante.

Bajo este nivel de tránsito, se verificó que, para cumplir con los límites establecidos en condiciones de carga máxima, fue necesario incrementar el espesor de la carpeta asfáltica de 8 cm a 13 cm, manteniéndose constantes los espesores de las capas de base, subbase y mejoramiento, con valores de 20 cm, 22 cm y 15 cm, respectivamente. Con esta configuración estructural, el pavimento presenta deformaciones calculadas de 164,7 μd en la carpeta asfáltica y 372,7 μd en la subrasante, valores que se encuentran dentro de los rangos admisibles definidos por las leyes de fallo adoptadas.

En el análisis correspondiente a la condición de carga máxima se obtuvo que los espesores estructurales inicialmente propuestos bajo condiciones de carga de diseño resultan insuficientes para satisfacer los criterios de verificación ante solicitaciones más severas, siendo necesario incrementar el espesor de la carpeta asfáltica como medida de refuerzo estructural. Este resultado pone de manifiesto la alta sensibilidad del desempeño del pavimento flexible frente al aumento de cargas por eje, particularmente en contextos donde el control de pesos vehiculares es limitado.

Tabla 3- Diseño del pavimento para el tráfico correspondiente a la carga máxima de $2,01 \times 10^6$ ejes equivalentes. Verificación de deformaciones admisibles para el escenario de carga máxima.

VALORES ADMISIBLES		ESTRUCTURA		VALORES CALCULADOS	
Deformación tangencial (μd)	Deformación vertical (μd)	Capas	Espesores (cm)	Deformación tangencial (μd)	Deformación vertical (μd)
179,50		Superficie	13	164,7	
		Base	20		
		Subbase	22		
		Mejoramiento	15		
	378,35	Subrasante			164,7

5. EFECTO DEL INCREMENTO DE CARGAS SOBRE LA VIDA DE SERVICIO DEL PAVIMENTO

Para analizar el efecto del incremento de cargas sobre el pavimento, se comparó la vida de servicio alcanzada por la estructura bajo distintos escenarios de carga, desde la condición de diseño hasta un escenario de solicitaciones máximas. En consecuencia, el análisis abarca desde la condición de tránsito normal de diseño (TF = 1,25), correspondiente a un tránsito acumulado de $2,01 \times 10^6$ ejes equivalentes (ESALs) durante un período de diseño de 20 años, hasta un escenario hipotético en el que los camiones circulan con la carga legal máxima, para el cual el tránsito acumulado alcanza $6,04 \times 10^6$ ESALs (TF = 3,77).

Para estimar la variación en la vida útil del pavimento frente a estos niveles de carga, se determinó, para cada escenario, el tiempo requerido para que el número de ejes equivalentes alcance el valor correspondiente al tránsito de diseño ($2,01 \times 10^6$ ESALs). Los resultados, resumidos en la tabla 4, evidencian que el incremento del nivel de sobrecarga reduce de manera significativa el tiempo necesario para alcanzar dicho umbral. A partir de ese momento, el tránsito pesado actúa sobre una estructura que ha agotado su período de diseño, lo que acelera los procesos de deterioro y compromete su desempeño estructural.

Tabla 4- Vida útil estimada del pavimento para diferentes factores camión.

Período de diseño: 20 años TPDA inicial = 2000 veh/día Porcentaje de camiones = 16,1%		Distribución por sentido = 50% Distribución por carril de diseño = 100% Tasa de crecimiento anual = 3%			
Factor de Camión	1,25	1,42	1,61	1,81	3,77
Factor de crecimiento (GF)	27,27	24,03	21,25	18,86	9,06
Vida útil estimada del pavimento (Años)	20,0	18,2	16,5	15,0	8,0
Tráfico estimado en 20 años	2,01E+06	1,99E+06	1,93E+06	2,90E+06	6,04E+06

En los escenarios intermedios de sobrecarga, el umbral de daño estructural se alcanza en plazos considerablemente menores que los correspondientes al tránsito normal. En particular, para TF = 1,42 el límite se supera aproximadamente a los 18 años; para TF = 1,61, alrededor de los 16 años; mientras que en el escenario más severo (TF = 3,77), el agotamiento estructural ocurre cerca de los 8 años.

El deterioro del pavimento flexible se manifiesta como una pérdida progresiva de capacidad estructural, producto de la acumulación de solicitaciones inducidas por el tránsito pesado. Bajo condiciones de sobrecarga, este proceso se acelera, provocando que los criterios de falla se alcancen de forma anticipada respecto al período de diseño.

Este comportamiento pone en evidencia que la exposición continua a cargas superiores a las reglamentarias compromete el desempeño estructural del pavimento y reduce su vida útil efectiva. En consecuencia, el exceso de carga vehicular se configura como un factor determinante del deterioro prematuro del pavimento flexible, lo que justifica la implementación de medidas de control de carga o la adopción de ajustes en el diseño estructural, a fin de garantizar un desempeño adecuado durante el período de servicio.

La representación gráfica del tránsito acumulado para cada escenario (figura 4), permite visualizar de manera comparativa el efecto de los distintos factores de camión y, por ende, del incremento de las cargas sobre el pavimento.

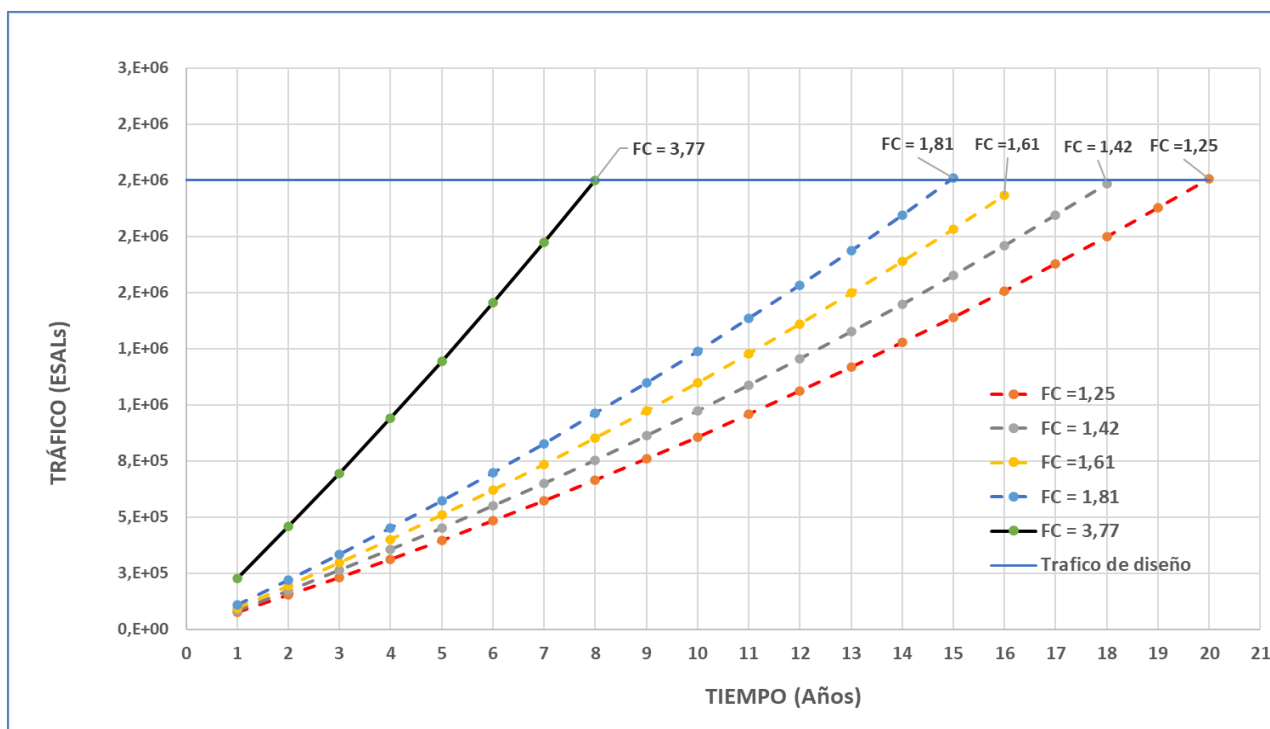


Fig. 4. Influencia del factor camión en la vida útil estimada del pavimento flexible.

Los resultados evidencian que el aumento del factor de camión reduce de forma significativa el tiempo en que se alcanza el tránsito de diseño, adelantando el cumplimiento de los criterios de agotamiento estructural. En este sentido, una estructura diseñada para soportar un tránsito de $2,0 \times 10^6$ ejes equivalentes en un período de 20 años alcanza dicho umbral en un plazo considerablemente menor cuando las cargas transportadas por los vehículos pesados superan las previstas en el diseño, siendo esta reducción tanto más pronunciada cuanto mayor es el incremento de carga por camión. Asimismo, una vez superado el tránsito de diseño, el mantenimiento rutinario resulta insuficiente para alcanzar los 20 años previstos, siendo necesarias intervenciones de rehabilitación. En este contexto, el incremento del espesor de la capa asfáltica se presenta como una alternativa técnica indispensable para soportar el aumento del tránsito asociado al exceso de cargas [10].

La ley de comportamiento del pavimento flexible, obtenida mediante regresión en el epígrafe 3.3, permite determinar la deflexión máxima admisible de la estructura para garantizar un nivel específico de tránsito. En la figura 5 se representa esta relación entre la deflexión y el tráfico equivalente acumulado a lo largo del tiempo, considerando una tasa de crecimiento del 3%.

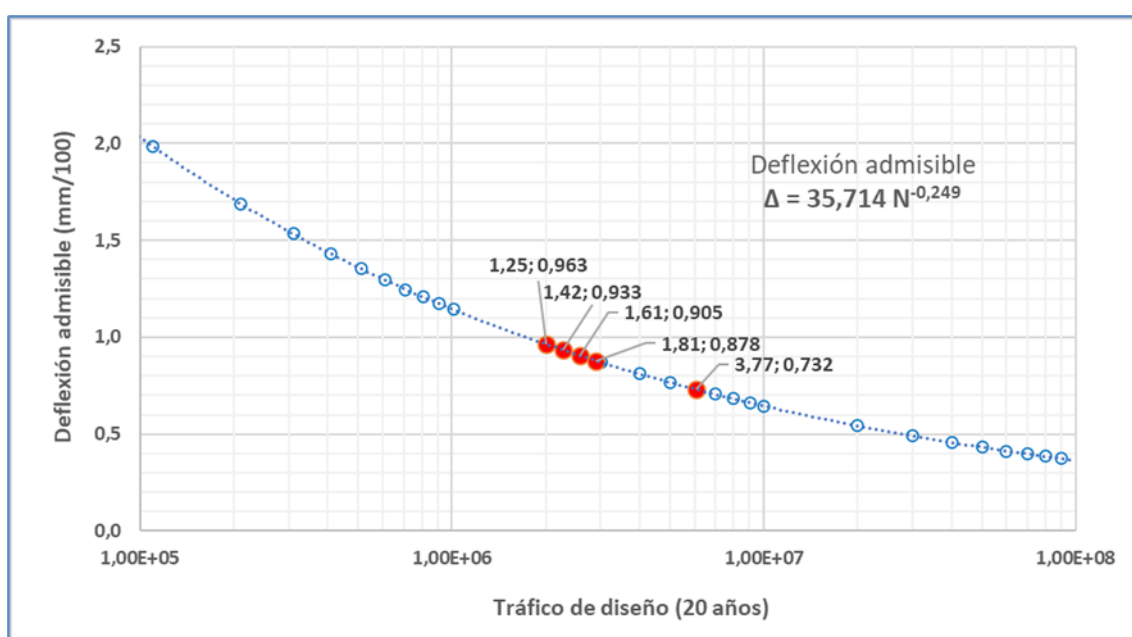


Fig. 5- Deflexión elástica admisible del pavimento en la medida en que se incrementa el tráfico acumulado. Representación de las deflexiones exigidas para los diferentes escenarios de cargas.

Se observa que, a medida que el tráfico aumenta, la deflexión admisible en el diseño del pavimento debe ser menor. Expresado de otra manera, se ilustra un principio fundamental del diseño estructural: a mayor número de ejes equivalentes de diseño, los espesores y la calidad de los materiales que conforman la estructura deben asegurar una menor deflexión integral. A partir de este concepto, es posible analizar desde otro punto de vista, las consecuencias del incremento de cargas por encima de las consideradas en el diseño original del pavimento.

Para la estructura diseñada en las condiciones normales de tránsito (con un factor de carga, FC, igual a 1,25), se requiere una deflexión vertical de 0,96 mm/100, suficiente para soportar un tráfico de diseño de $2,0 \times 10^6$ ejes equivalentes. No obstante, si los vehículos pesados circularan con el 100% de la carga legal máxima, la deflexión admisible debería reducirse a 0,732 mm/100 para poder garantizar un tránsito acumulado de $6,04 \times 10^6$ ejes durante el periodo de diseño, porque la deflexión máxima requerida disminuye conforme aumenta el tráfico acumulado.

En síntesis, si una estructura ha sido diseñada para una deflexión máxima de 0,963 mm/100 en función de un determinado nivel de tránsito, pero en la práctica recibe un tráfico acumulado superior, debido, por ejemplo, a la circulación de vehículos con sobrecarga, es previsible que experimente fallas prematuras. En consecuencia, cuando el pavimento alcance el volumen de tránsito para el cual fue originalmente diseñado, presentará ya un deterioro progresivo significativo.

6. CONCLUSIONES

La formulación de leyes de fallo para la subrasante, la carpeta asfáltica y la estructura global del pavimento, a partir de análisis de regresión basados en modelos internacionales, permitió obtener expresiones consistentes con el enfoque empírico-mecanicista. Estas constituyen herramientas válidas para la estimación de deformaciones y deflexiones admisibles en contextos donde no se dispone de modelos calibrados a nivel nacional.

El análisis mecanicista evidencia que el pavimento diseñado presenta un desempeño estructural adecuado bajo condiciones de tránsito de diseño, manteniendo las deformaciones dentro de los límites admisibles tanto en la carpeta asfáltica como en la subrasante. No obstante, si se supera dicho tránsito, por efecto de excesos de carga, el mantenimiento rutinario resulta insuficiente para garantizar el período de servicio previsto, siendo necesarias intervenciones de rehabilitación. En este sentido, el incremento del espesor de la carpeta asfáltica se configura como una medida necesaria para soportar mayores niveles de sollicitación.

El diseño estructural bajo condición de carga normal, correspondiente a $2,01 \times 10^6$ ESALs en un período de 20 años, satisface los criterios de deformación admisible mediante una estructura compuesta por 8 cm de carpeta asfáltica, 20 cm de base, 22 cm de subbase y 15 cm de mejoramiento. Sin embargo, bajo condiciones de carga máxima (TF = 3,77), esta configuración resulta insuficiente, requiriéndose incrementar el espesor de la carpeta asfáltica a 13 cm para cumplir con los criterios de verificación, lo que evidencia la alta sensibilidad de los pavimentos flexibles al incremento de las cargas por eje.

La evaluación de la vida de servicio demuestra que la sobrecarga reduce significativamente el tiempo en que se alcanza el tránsito de diseño, pasando de 20 años en condiciones normales a 18, 16 e incluso 8 años en escenarios más severos, en función del incremento del factor de camión.

En general, a mayor número de ejes equivalentes de diseño, los espesores y la calidad de los materiales que conforman la estructura deben garantizar una menor deflexión integral. Cuando una estructura ha sido diseñada para un nivel específico de tránsito y, en la práctica, recibe un tráfico acumulado superior debido a la circulación de vehículos sobrecargados, es previsible la aparición de fallas prematuras.

En conjunto, los resultados confirman que la sobrecarga vehicular constituye un factor determinante en el deterioro prematuro del pavimento, al acelerar los procesos de fatiga y deformación permanente. Esto implica la necesidad de mayores espesores estructurales y limita la efectividad del mantenimiento rutinario como única estrategia de conservación.

1. Jongga, J. (2021). El impacto de la sobrecarga en la vida de diseño del pavimento flexible. <https://www.researchgate.net/publication/349099685>
2. Sallo Callañaupa, R. (2022). Influencia de la sobrecarga de vehículos pesados en el nivel de deterioro del pavimento flexible (Tesis de maestría). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/8530>
3. Gomes, S. V., Fontul, S., Knight, I., & Breemersch, T. (2023). The effect of overweight vehicles on road pavements and safety. *Transportation Research Procedia*, 72, 4010–4017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523006750>
4. Shahi1, P. B. & Nepali, B, B (2020). Impacto de los vehículos sobrecargados en el pavimento flexible: Estudio de caso de la carretera Belhiya-Butwal en Nepal. <https://www.researchgate.net/publication/344903358>
5. Sushmita, B., Xiaohua, L. & Feng, W. (2023) Comprender los efectos de los factores estructurales y la carga del tráfico en el rendimiento del pavimento flexible. *Revista internacional de ciencia y tecnología del transporte*. Volumen 12, p 258-272. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043022000211>
6. Andrade, D., Hernández, K. D., & Salomón, M. L. (2020). Revisión de las metodologías de evaluación y tipos de rehabilitación de las patologías presentes en pavimentos flexibles (Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia). Repositorio Universidad Cooperativa de Colombia. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/28526>
7. Mamani Luque, J. R., & Núñez Velásquez, M. A. (2022). Nivel de deterioro del pavimento flexible (PCI) y propuesta de mejora en la Av. Bohemia Tacneña – Distrito Gregorio Albarracín Lanchipa – Tacna [Tesis de licenciatura, Universidad de Tacna]. Repositorio institucional de la Universidad de Tacna. <https://hdl.handle.net/20.500.12969/2424>
8. Lainez, D. V. (2022). Análisis estructural y comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante los softwares IMT-PAVE y WINDEPAV 2.6 del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93". <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8445>
9. Higuera Sandoval, C. H. (2007). Leyes de comportamiento de la deformación vertical admisible de compresión en pavimentos flexibles. *Revista Facultad de Ingeniería*, 16(23), 17–24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940756002>
10. Orobio, A., & Gil, J. (2015). Análisis de costos de construcción asociados al diseño racional de pavimentos con diferentes modelos de fatiga. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(3), 177–188. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732015000300003
11. Higuera-Sandoval, C. H. (2008). Leyes de comportamiento de la deflexión admisible en pavimentos flexibles. *Revista Facultad de Ingeniería*, 17(25), 7–14. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940758002>
12. MTOP. Acuerdo Ministerial 018-2016. Tabla nacional de pesos y dimensiones para vehículos de cargas. Ministerio de Transportes y Obras Públicas de Ecuador. <https://vlex.ec/vid/expidense-normas-aplicacion-control-641694821>
13. Vélez, E. V. C., García, J. F. Z., & Piusseaut, E. T. (2023). Revisión de diseños de pavimentos flexibles mediante el método empírico mecanicista de la AASHTO 2004. *Revista Ciencia y Construcción*, 4(3), 57-67. <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/210>