

Revisión De Diseños De Pavimentos Flexibles Mediante El Método Empírico Mecanicista De La AASHTO 2004.

Review Of Flexible Pavement Designs Using The Mechanistic Empirical Method Of AASHTO 2004.

Autores

Emily Virginia Cedeño Vélez¹, José Fernando Zambrano García², Ing. Eduardo Tejada Piusseaut³

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, Av. María José Urbina y Che Guevara Portoviejo, Manabí, Ecuador, ecedeno6663@utm.edu.ec / <https://orcid.org/0009-0003-1968-1344>

² Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, Av. María José Urbina y Che Guevara Portoviejo, Manabí, Ecuador, jzambrano1940@utm.edu.ec / <https://orcid.org/0000-0002-4220-4103>

³ Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias, Docente en Universidad Técnica de Manabí, Av. María José Urbina y Che Guevara Portoviejo, Manabí, Ecuador, eduardo.tejada@utm.edu.ec / <https://orcid.org/0000-0002-0589-9989>

RESUMEN

En la investigación se determina la capacidad resistente de la estructura del pavimento flexible en las condiciones de Portoviejo de la provincia de Manabí, Ecuador. Se consideraron diferentes niveles de tráfico de diseño, así como las condiciones climáticas y los materiales característicos de la zona. El módulo de la carpeta asfáltica en el diseño, se estimó a partir de la temperatura de la mezcla asfáltica, considerando la temperatura ambiente característica de la región. Se calcularon espesores de pavimentos flexibles mediante la Norma AASHTO 93 y con la Guía de Diseño Empírico Mecanicista AASHTO 2004, revisando en ambos casos, el comportamiento del pavimento durante el período de diseño, mediante los modelos empíricos del agrietamiento por fatiga y deformación permanente. Los resultados demuestran que las estructuras diseñadas mediante ambos procedimientos, con un nivel de confiabilidad del 90%, cumplen con los criterios de comportamiento, tanto para el agrietamiento, como en la deformación permanente. Sin embargo, muestran una diferencia apreciable en los espesores, siendo significativamente menores en las estructuras calculadas mediante el procedimiento AASHTO 2004 en comparación con las diseñadas aplicando la Norma AASHTO 93.

Palabras claves: pavimento flexible, diseño empírico mecanicista, deformación permanente, agrietamiento por fatiga.

ABSTRACT

The research determines the resistant capacity of the flexible pavement structure in the conditions of Portoviejo in the province of Manabí, Ecuador. Different levels of design traffic were considered, as well as the climatic conditions and materials characteristic of the area. The module of the asphalt folder in the design was estimated from the temperature of the asphalt mixture, considering the characteristic ambient temperature of the region. Flexible pavement thicknesses were calculated using the AASHTO 93 Standard and the AASHTO 2004 Mechanistic Empirical Design Guide, reviewing in both cases, the behavior of the pavement during the design period, through empirical models of fatigue cracking and permanent deformation. The results show that the structures designed by both procedures, with a level of reliability of 90%, meet the behavioral criteria, both for cracking and permanent deformation. However, they show an appreciable difference in thicknesses, being significantly lower in the structures calculated using the AASHTO 2004 procedure compared to those designed applying the AASHTO 93 Standard.

Keywords: flexible pavement, mechanistic empirical design, permanent deformation, fatigue cracking.

1. INTRODUCCIÓN

A través de la historia del Ecuador las infraestructuras viales han desempeñado un rol importante para la comunicación, el crecimiento y desarrollo socio-económico entre los pueblos o ciudades. Las vías se construyen con diferentes tipos de pavimentos, ya sean flexibles, rígidos, articulados o semirrígidos [1]. Los más utilizados en el Ecuador son los de tipos flexibles, conocidos también como pavimentos asfálticos, compuestos por una capa delgada superficial de mezcla asfáltica, colocada sobre la capa de base y ésta sobre la subbase. En estas estructuras las capas de base y subbase se componen de materiales granulares y la estructura descansa sobre el suelo compactado, llamado subrasante [2]

Según Fernández en 2020 [3], la carpeta asfáltica tiene la función de servir como superficie de rodamiento, además de impermeabilizar la estructura, siendo resistente a los esfuerzos producidos por las cargas del tráfico. La capa de base absorbe los mayores esfuerzos y los transmite a las capas inferiores, mientras que la subbase, de menor calidad que la base, cumple una función económica, ya que permite la sustitución de parte de la capa de base con la utilización de materiales de menor calidad.

El método vigente en Ecuador para el diseño de pavimentos flexibles, es la conocida como Guía de diseño empírico AASHTO-93, incluida en la Norma Ecuatoriana Vial [4]. Como en todo procedimiento de diseño de pavimentos, involucra una serie de factores como son: el tráfico, las características de las capas estructurales, la resistencia de la subrasante y la influencia de las condiciones ambientales. Este último factor es de vital importancia en el diseño de un pavimento flexible, por la influencia que tienen las variaciones de temperatura en la resistencia y comportamiento de la mezcla asfáltica de superficie.

Según Amaya, en el 2019 [5], la metodología AASHTO 93 supone una estructura multicapa, en donde los espesores son obtenidos evaluando los números estructurales requeridos, de acuerdo a distintos parámetros en los que esta se basa.

La Guía más reciente para el diseño de pavimentos AASHTO, surgida en el 2002, se basa en un procedimiento empírico- mecanicista que integra en el diseño el clima y las cargas del tránsito, y la influencia de estos factores sobre el comportamiento de los materiales en el tiempo.

Es el método más avanzado en la actualidad dentro de los empírico-mecanicistas, pues incluye procedimientos para el análisis y diseño de pavimentos asfálticos y de hormigón, con el objetivo de proveer de una herramienta práctica para el diseño de estructuras de pavimentos nuevos y rehabilitados. Es un procedimiento integral de diseño que aplica tecnologías empíricas- mecanicistas, y el uso de un software orientado hacia el usuario, lo que representa un cambio importante en la forma en que se realiza el diseño del pavimento, Morales et al. en 2020 [6].

Para el diseño racional en los pavimentos flexibles es necesario establecer los valores admisibles que puede soportar una estructura, en determinados puntos críticos, referentes a la fatiga de la capa asfáltica, la deformación vertical en la subrasante, así como las deformaciones tangenciales, en caso de capas aglomeradas. La deflexión vertical que se produce en la superficie, por acción de la carga, es un valor crítico relacionado con la capacidad resistente del conjunto estructura y subrasante.

El objetivo principal de la investigación es evaluar diferentes estructuras de pavimentos flexibles mediante la norma de diseño vigente en Ecuador AASHTO 93, [7], incluyendo los criterios de comportamiento durante la vida de servicio considerados en la Guía de Diseño AASHTO 2004 [8], haciendo uso de datos sobre mezclas asfálticas del Laboratorio Central de Carreteras y Puentes de Francia (ALIZE). El propósito es determinar si las estructuras calculadas mediante la AASHTO 93 presentan un buen desempeño a lo largo de su periodo de diseño, mediante las leyes de fallo utilizadas por el procedimiento empírico-mecanicista de la nueva Guía, teniendo en cuenta los factores de tráfico, clima, materiales y suelos.

2. ANÁLISIS DE LOS PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO

2.1. Método De Diseño AASHTO-93.

El método de diseño AASHTO fue desarrollado en los Estados Unidos en la década del 60, basándose en un ensayo a escala real realizado durante 2 años en el estado de Illinois donde los suelos y climas son típicos para gran parte de este país, con el fin de desarrollar tablas, gráficos y modelos que representen las relaciones deterioro-solicitación de las distintas secciones ensayadas. A partir de la versión del año 1986, y la mejorada de 1993, el método AASHTO comenzó a introducir conceptos mecanicistas para adecuar algunos parámetros a condiciones diferentes a las que imperaron en el lugar del ensayo original [9].

Las variables consideradas en este método de diseño son: Tráfico de diseño (Número de ejes equivalentes de 18kips), Número Estructural (SN), Módulo resiliente de la subrasante (M_R), Módulos dinámicos de las capas de base y subbase, Calidad de drenaje (Cd), Pérdida de Serviciabilidad (ΔPSI), Período de diseño, Confiabilidad del diseño, y Desviación standard de todas las variables (S_0). El Número Estructural (SN) es un valor adimensional que expresa la resistencia que necesita un pavimento construido sobre una subrasante con módulo conocido, para soportar el tránsito de diseño. Para el diseño el método se basa en el modelo empírico que se muestra en la ecuación 1:

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 9,36 \log (SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}}{0,40 + \frac{1,094}{(SN+1)^{5,15}}} + 2,32 \log M_R - 8,07 \quad (1)$$

Donde:

- W_{18} = Número previsto de ejes equivalentes de 18 kips (80 kN)
- Z_R = Abscisa correspondiente a un área igual a la confiabilidad R en la curva de Distribución Normal
- S_0 = Desviación standard de todas las variables
- ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad
- M_R = Módulo resiliente de subrasante

2.2. Método Empírico Mecanicista AASHTO 2004.

Según Gómez (2005) [10], la Guía de Diseño "Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide" (ME-PDG por sus siglas en inglés), combina componentes que determinan la respuesta del pavimento debido a las cargas, a través de modelos matemáticos y los componentes empíricos, relacionan las respuestas del pavimento con su funcionamiento, cada tipo de deterioro se vincula a una respuesta crítica del pavimento. Por consiguiente, el método, para estructuras nuevas y de rehabilitación, combina el análisis mecanicista de los pavimentos con verificación empírica del comportamiento, a través de la predicción de determinados tipos de deterioros.

En relación con el tráfico la Guía de diseño AASHTO 2004 [8] establece importantes diferencias respecto a la Guía del 93. En lugar de calcular los ejes equivalentes durante la vida de diseño, considera el efecto producido en la estructura por el espectro de cargas para los ejes simples, tándem, trídem y cuádruple, en cada mes de la vida de la estructura.

También considera de forma explícita, las condiciones ambientales que tienen un efecto significativo en el comportamiento de los pavimentos flexibles. La interacción de los factores climáticos con los materiales de pavimento y las cargas que éste soporta es bastante compleja. Los factores tales como precipitación, temperatura, ciclos de hielo-deshielo (no aplicables en Ecuador) y la profundidad del nivel freático afectan directamente la capacidad de soportar cargas a las capas de pavimento y al comportamiento del mismo [10].

2.2.1. Análisis Mecanicista Del Pavimento Flexible Según La Guía De Diseño Empírico-mecanicista AASHTO 2004..

El procedimiento ME-PDG, en términos generales, consiste en adoptar inicialmente una serie de parámetros estructurales para el pavimento (número y tipo de capas, indicadores de resistencia para las capas, características de la explanada), y establecer las condiciones de tránsito y clima a las que estima que se verá sometido a lo largo del período de diseño [11].

La metodología no utiliza una ecuación de regresión para el diseño, sino recomienda la aplicación de la teoría elástica, y modela el medio mediante diferentes capas horizontales, homogéneas, con comportamiento elástico en la explanada, bases granulares y comportamiento visco-elástico para los materiales asfálticos. Mediante el procedimiento se calcula la respuesta del pavimento en cuanto a deformaciones y tensiones asociadas a las cargas de tráfico y a las condiciones climáticas, acumulando el daño producido durante el período de diseño.

2.2.2. Criterios De Comportamiento Del Pavimento Flexible Según La Guía De Diseño Empírico-Mecanicista AASHTO 2004.

La evaluación del comportamiento empírico del pavimento para el diseño, está basado en las grietas por fatiga de la superficie hacia abajo y del fondo hacia arriba de la superficie asfáltica, las grietas por temperatura de la mezcla asfáltica, las grietas por fatiga en capas estabilizadas químicamente, la deformación permanente del pavimento completo de las capas asfálticas y el Índice de Regularidad Internacional (IRI). El diseñador debe seleccionar alguno o todos estos indicadores de comportamiento y establecer criterios para evaluar el diseño y hacer modificaciones si es necesario. Los criterios de comportamiento para cada falla en la estructura dependerán de la tolerancia del diseño de la carretera.

– **Grietas por fatiga del fondo hacia arriba.**

Las grietas clásicas por fatiga desde el fondo hacia arriba, se manifiestan como las fallas piel de cocodrilo en la carretera. Se producen cuando se permite la infiltración del agua en las capas subyacentes del pavimento que pueden causar fallas estructurales. De acuerdo a la Guía de diseño AASHTO 2004 [8], los valores típicos están en el orden de 25 a 50% del área total del carril.

– **Deformación permanente total.**

La deformación permanente o ahuellamiento se manifiesta típicamente como roderas dentro de las trayectorias de la llanta. La deformación permanente total en la superficie, es la acumulación de la deformación permanente en la capa asfáltica y en las capas no ligadas de la estructura. El ahuellamiento es un factor importante en la pérdida de regularidad del pavimento, que puede también crear problemas funcionales tales como acumulación de agua y de conducción para los vehículos durante los cambios de carril, AASHTO 2004 [8].

El criterio de funcionamiento para la deformación permanente total se define en términos de la profundidad máxima de la rodera en la trayectoria de la rueda. Las profundidades máximas típicas de la rodera están en el orden de 0,76 a 1,27 cm (0,3 – 0,5 pulgadas). Este valor límite depende de la política específica utilizada por cada institución encargada del diseño, AASHTO 2004 [8].

– **Índice Internacional de Regularidad (IRI).**

El criterio de comportamiento para la regularidad del pavimento se define a través del IRI aceptable al final de la vida de diseño. Los valores finales del IRI son elegidos por el diseñador y el valor calculado no debe ser excedido para el nivel de confiabilidad seleccionado en el diseño. Típicamente los valores que se utilizan para el IRI final está en el intervalo de 2,5 a 4,0 m/km (150 a 250 pulgada/milla), dependiendo de la categoría de la carretera, y de la confiabilidad del diseño, además de los criterios de la institución encargada del diseño, AASHTO 2004 [8].

3. DESARROLLO

La investigación se fundamenta en la determinación de la capacidad de resistencia de la estructura del pavimento flexible para diferentes tráficos de diseño, en las condiciones climáticas y de materiales de base y subbase característicos de la provincia de Manabí en el Ecuador. Para su desarrollo se determinaron primero las estructuras de pavimento aplicando la Norma AASHTO 93 [7], considerando los módulos de resiliencia en los materiales y factores como: el tráfico, las características de las capas estructurales, la resistencia de la subrasante y la influencia de las condiciones ambientales. Los espesores calculados fueron posteriormente revisados mediante la Guía de Diseño AASHTO 2004 [8], para evaluar su comportamiento durante el período de diseño, según los modelos empíricos incluidos en ella: el IRI, las deformaciones permanentes y el agrietamiento.

3.1 Características De Los Materiales De La Estructura.

En los pavimentos flexibles como materiales de superficie se pueden usar mezclas asfálticas en caliente, en frío y tratamientos superficiales. Los materiales que se emplean como bases o subbases deben ser no aglomerados. Los suelos de subrasantes pueden ser mejorados o estabilizados. Se puede utilizar la compactación, mezclarlo con otro material o utilizar algún tipo de aditivo para mejorar alguna de sus propiedades.

3.1.1. Carpeta Asfáltica.

La carpeta asfáltica es la capa superior de un pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento para los vehículos, cuya función es impedir las infiltraciones del agua al interior del pavimento y su desgaste, resistiendo los efectos abrasivos del tráfico vehicular. De acuerdo con Gómez [10], la propiedad primaria de rigidez de interés para materiales asfáltico es la temperatura- tiempo que depende del módulo dinámico. Las propiedades del módulo del concreto asfáltico se conoce que son una función de la temperatura, relación de cargas, envejecimiento y características de la mezcla, tales como su rigidez, granulometría de los agregados, contenido de asfalto y relación de vacíos.

– Temperatura del pavimento y módulo resiliente de la carpeta asfáltica

El módulo resiliente de la carpeta asfáltica en el diseño, dependerá de la temperatura del pavimento según las condiciones climáticas; debido a la susceptibilidad del asfalto a las variaciones de temperatura, lo que condiciona diferentes valores del módulo de la carpeta durante el año. Para su determinación, se dispuso de información de la temperatura ambiente máximas y mínimas de la ciudad de Portoviejo de los años 2021 y 2022, definiéndose como representativa de la región las observadas en el año 2022, cuyos valores promedios mensuales se muestran en la Figura 1.

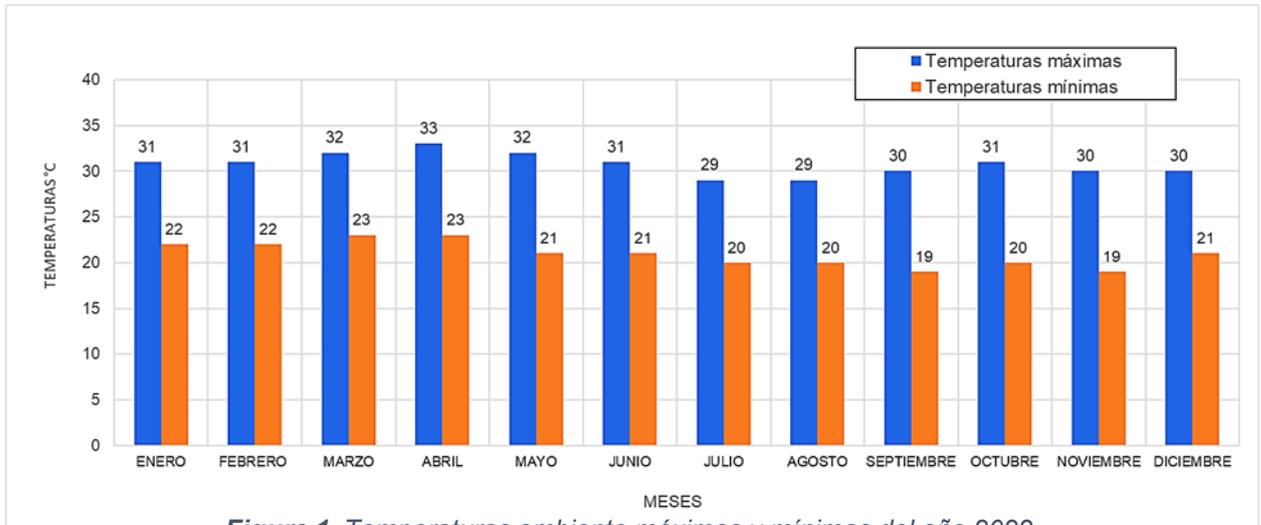


Figura 1. Temperaturas ambiente máximas y mínimas del año 2022.

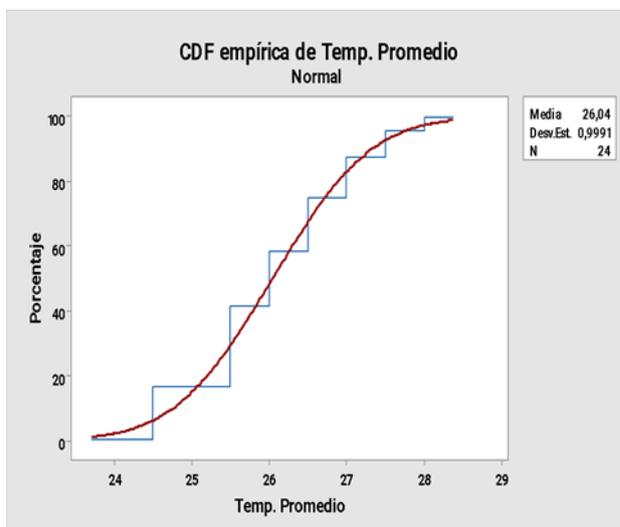


Figura 2. Gráfico de frecuencias de temperatura ambiente.

A partir de los registros de temperatura del año 2022, se determinó la temperatura ambiente característica de Portoviejo, para una probabilidad del 75%, igual a 26.7 grados Centígrados. El gráfico de la figura 2 representa las frecuencias de temperaturas ambiente durante el año, obtenidas mediante el programa de funciones estadísticas básicas y avanzadas Minitab 18. Con esta se obtuvo la temperatura de cálculo del pavimento en las condiciones ambientales de la región.

Para establecer la temperatura de cálculo de la mezcla asfáltica se determinó un promedio de temperatura entre la máxima y la mínima estimadas durante el año en la región, a partir de la temperatura ambiente característica (26,7°C). Las ecuaciones desarrolladas por el SRHP (Strategic Highway Research Program) según Aenlle et al. 2020 [12], permite obtener las temperaturas máxima y mínima del pavimento a una profundidad de 20mm, teniendo en cuenta la temperatura ambiente (T_{aire}), la latitud (Lat), la desviación estándar (σ), el coeficiente de la desviación normal estándar (Z), y la profundidad en la mezcla (H), de acuerdo siguientes ecuaciones:

$$\text{Máxima: } T_{20mm} = (T_{aire} - 0,00618 Lat^2 + 0,22890 Lat + 42,2)(0,9545) - 17,78 + Z\sigma \quad (2)$$

$$\text{Mínima: } T_{pav} = T_{aire} + 0,051 H - 0,000063H^2 - Z\sigma \quad (3)$$

Los cálculos dan como resultados una temperatura máxima en el pavimento durante el año de 47,8°C y una mínima de 26,7°C, por lo cual la temperatura promedio a considerar es de 36,9°C.

En el repositorio de datos sobre mezclas asfálticas del Laboratorio Central de Carreteras y Puentes de Francia (ALIZE), en función de la temperatura promedio del pavimento, se puede estimar un módulo resiliente para la mezcla asfáltica de 1150 MPa (equivalente a 163231 psi).

3.1.2. Materiales Para Base Y Sub-Base Del Pavimento.

Los materiales utilizados como subbases según el Ministerio de Transportes y Obras Públicas del Ecuador, pueden ser de tres tipos, que se diferencian por su granulometría, que son:

- Clase 1: Subbases construidas con agregados obtenidos por trituración de roca o gravas, por lo menos el 30%.
- Clase 2: Subbases construidas con agregados obtenidos mediante trituración o cribado en yacimientos de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas.
- Clase 3: Subbases construidas con agregados naturales y procesados.

Los materiales de Bases según el MTOP (Ecuador), podrán ser de cuatro clases diferentes, con las siguientes condiciones:

- Clase 1: Constituidas por agregados gruesos y finos, triturados en un 100% de acuerdo y graduados uniformemente según dos diferentes granulometrías (A y B).
- Clase 2: Constituidas por fragmentos de roca o grava trituradas, cuya fracción de agregado grueso será triturada al menos el 50% en peso.
- Clase 3: Constituidas por fragmentos de roca o grava trituradas, cuya fracción de agregado grueso será triturada al menos el 25% en peso.
- Clase 4: Son bases constituidas por agregados obtenidos por trituración o cribado de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas.

De acuerdo a la normativa de Ecuador, los materiales utilizados en las diferentes clases de bases y subbases granulares, estarán exentos de materias vegetales, basura, terrones de arcilla o sustancias que puedan causar fallas en el pavimento. En cuanto a la capacidad de soporte a CBR, las subbases deberán ser igual o mayor al 30% y en las bases debe ser superior al 80%, los límites de consistencia en ambas capas del pavimento tendrán iguales exigencias, para el Índice de Plasticidad se exige un valor menor e igual al 6% y para el Límite Líquido un valor inferior o igual al 25%. La dureza del material evaluado por el Coeficiente de Desgaste de los Ángeles, será inferior al 50% para las subbases y 40% para las bases. En ambos casos se exige una densidad mínima mayor o igual al 100% de la densidad máxima del Modificado.

El módulo resiliente para la base granular, en la guía de diseño AASTHO 93, obtenido en función del CBR, para el porcentaje igual al 80%, equivale a un valor de 28000 psi (197 MPa) y para la subbase granular con CBR mínimo de 30% el módulo es de 15000 psi (106 MPa). El módulo de la subrasante es de 5%, lo que equivale a 7500 psi (53 MPa).

3.2. Dimensionamiento De Las Estructuras Mediante La Guía AASTHO 93 Y Su Revisión Mediante La Guía De Diseño Empírico-mecanicista AASTHO 2004.

Una vez definidas las propiedades resistentes de los materiales, se establecen las siguientes condiciones de diseño para la estructura de pavimento flexible: periodo de diseño de 15 años, nivel de confiabilidad del 95%, valor estándar de 1,645; Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) de 4,2 y 2,5 inicial y final respectivamente, por tanto, la pérdida de serviciabilidad es de 1,7. La estructura está expuesta un 25% del tiempo a nivel de humedad próximo a saturación con un drenaje bueno, por lo que representa un coeficiente de 1 para la base y la subbase.

Para tener en cuenta el espectro de tráficos característicos posible de la región de Portoviejo en los cálculos de las estructuras se plantearon tres diferentes tráficos de diseño: 5×10^5 ; 1×10^6 y $2,5 \times 10^6$ ejes equivalentes de 18kips (82 kN) acumulados durante el período de diseño (ESALs). Los resultados de los diseños se muestran en la Tabla 1.

Las estructuras diseñadas a partir de la AASHTO 93 fueron evaluadas con la Guía de diseño Empírico Mecanicista 2004, estableciéndose nuevos espesores en las estructuras para cada tipo de tráfico, los que se muestran también en la Tabla 1.

Tabla 1. Espesores de pavimento calculados (en cm) según los métodos AASHTO-93 y la Guía de diseño Empírico Mecanicista 2004.

| Capas del pavimento | Módulo (psi) | Tráfico de diseño (ESALs) | | | | | |
|---------------------|--------------|---------------------------|-------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | 5×10^5 | | 1×10^6 | | $2,5 \times 10^6$ | |
| | | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 |
| Superficie | 163231 | 18 | 10 | 20 | 13 | 23 | 15 |
| Base | 28000 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Subbase | 15000 | 13 | 13 | 15 | 15 | 20 | 20 |

3.2.1 Revisión Del Comportamiento De Las Estructuras Por La Guía De Diseño Empírico-Mecanicista AASHTO 2004.

El comportamiento de las estructuras calculadas por ambos procedimientos se evaluó aplicando el software MEPDG, de la Guía de Diseño Empírico Mecanicista AASHTO 2004, con el propósito de comparar la evolución de los deterioros durante la vida de servicio de dichas estructuras en cada tráfico de diseño considerado.

Las fallas que se producen durante el periodo de vida útil para ser comparadas con los límites mínimos de diseño de cada deterioro, según la Guía AASHTO 2004, para el pavimento flexible son: Agrietamiento de abajo hacia arriba (falla Piel de cocodrilo), Deformación Permanente y el Índice de Regularidad Internacional (IRI).

– Agrietamiento de abajo hacia arriba (falla Piel de cocodrilo).

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para el máximo agrietamiento de abajo hacia arriba (piel de cocodrilo) de las estructuras calculadas por ambos procedimientos, evaluados mediante los modelos empíricos de la Guía AASHTO 2004. Los resultados muestran el agrietamiento para el 50% y 90% de confiabilidad en el diseño, estableciéndose un límite máximo del 25%.

Tabla 2. Evaluación de agrietamiento de abajo hacia arriba (%) en estructuras diseñadas por los métodos AASHTO-93 y AASHTO 2004

| Tráfico de diseño (ESALs) | | 5×10^5 | | 1×10^6 | | $2,5 \times 10^6$ | |
|--|-----|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------|
| Guía de Diseño | | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 |
| Límite máximo de agrietamiento (%) | | 25% | | | | | |
| Agrietamiento máximo según Confiabilidad | 50% | 1,38% | 7,84% | 1,65% | 6,47% | 1,7% | 7,35% |
| | 90% | 6,4% | 20,5% | 7% | 17,7% | 7,11% | 18,8% |

Los resultados muestran que el agrietamiento máximo en cada uno de los tráficos es inferior al límite establecido en los diseños, para ambos procedimientos, con el 90% de confiabilidad, por lo que se pueden aceptar los diseños de todas las estructuras. Sin embargo, las estructuras que fueron calculadas utilizando el procedimiento de la AASHTO 2004, tienen menores espesores, especialmente en la carpeta asfáltica, donde se observó una reducción considerable.

La figura 3 representa el comportamiento del agrietamiento en el período de diseño para las estructuras calculadas con el mayor tráfico, de $2,5 \times 10^6$ ejes equivalentes. En la figura se representa el agrietamiento tanto para el 50%, como para el 90% de confiabilidad.

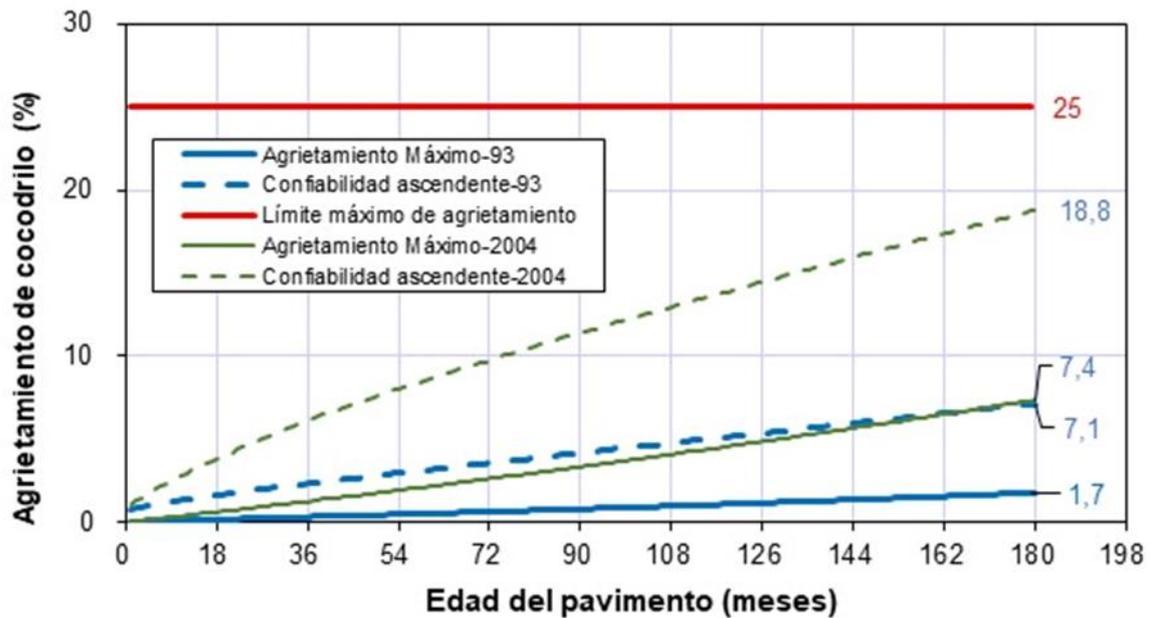


Figura 3. Falla piel de cocodrilo entre AASHTO-93 y AASHTO 2004 para tráfico $2,5 \times 10^6$ ESALs.

En la figura se puede observar una diferencia significativa entre la estructura calculada por la AASHTO 93 y por la del 2004. La razón de estas diferencias se debe a que la estructura diseñada por la AASHTO 93 tiene un espesor de carpeta asfáltica de 23 cm, mientras que el cálculo por el programa MEPDG ha permitido asumir un espesor de carpeta con una reducción de 8 cm.

– **Deformación Permanente.**

La deformación permanente es el principal contribuyente a la pérdida de rugosidad en el pavimento flexible. En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para la máxima deformación permanente experimentada en las estructuras calculadas por ambos procedimientos, evaluados mediante los modelos empíricos de la Guía AASHTO 2004. Los resultados que se muestran de la deformación son para el 50% y 90% de confiabilidad en el diseño, estableciéndose como límite total de deformación un valor de 1,9 cm para toda la estructura.

Tabla 3. Evaluación de deformación permanente (cm) en estructuras diseñadas por los métodos AASHTO-93 y AASHTO 2004.

| Tráfico de diseño (ESALs) | | 5×10^5 | | 1×10^6 | | $2,5 \times 10^6$ | |
|---|------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 | AASHTO 1993 | AASHTO 2004 |
| Límite total de deformación (cm) | | 1,91 | | | | | |
| Deformación permanente de las capas (cm) | Superficie | 0,12 | 0,23 | 0,15 | 0,24 | 0,20 | 0,30 |
| | Base | 0,12 | 0,17 | 0,13 | 0,16 | 0,13 | 0,16 |
| | Subbase | 0,51 | 0,60 | 0,53 | 0,61 | 0,55 | 0,63 |
| Deformación total según confiabilidad de diseño | 50% | 0,75 | 1,00 | 0,84 | 1,01 | 0,88 | 1,09 |
| | 90% | 1,03 | 1,33 | 1,10 | 1,34 | 1,19 | 1,43 |

Los resultados muestran que la deformación permanente en cada uno de los tráficos es inferior al límite establecido en los diseños, para ambos procedimientos, con el 90% de confiabilidad, por lo que se pueden aceptar los diseños, respecto a este deterioro, de todas las estructuras. Pero las estructuras calculadas con el procedimiento de la AASHTO 2004, tienen menores espesores.

En la figura 4 y 5 se muestran los resultados de la deformación permanente para el mayor tráfico, en cada una de las capas de la estructura, para el diseño de la AASHTO 93 y para el diseño de la AASHTO 2004, respectivamente.

En la figura 4, calculada por la norma AASHTO-93, se observa una deformación total de 0,88 cm para el 50% y 1,19 cm para el 90% de confiabilidad. En la superficie la deformación esperada es de 0,20 cm, en la base 0,13 cm y en la subbase 0,55 cm. En la figura 5, calculada por la norma AASHTO 2004, la deformación total de 1,09 cm para el 50% y 1,43 cm para el 90% de confiabilidad. En la superficie la deformación esperada es de 0,30 cm, en la base 0,16 cm y en la subbase 0,63 cm. Por tanto, se observan valores superiores en la estructura calculada por la AASHTO 2004 que por la AASHTO 93, aunque ambas estructuras cumplen con el valor límite de 1,90 cm establecido en los diseños, aunque de igual forma, en estos valores influye la reducción de espesor de carpeta.

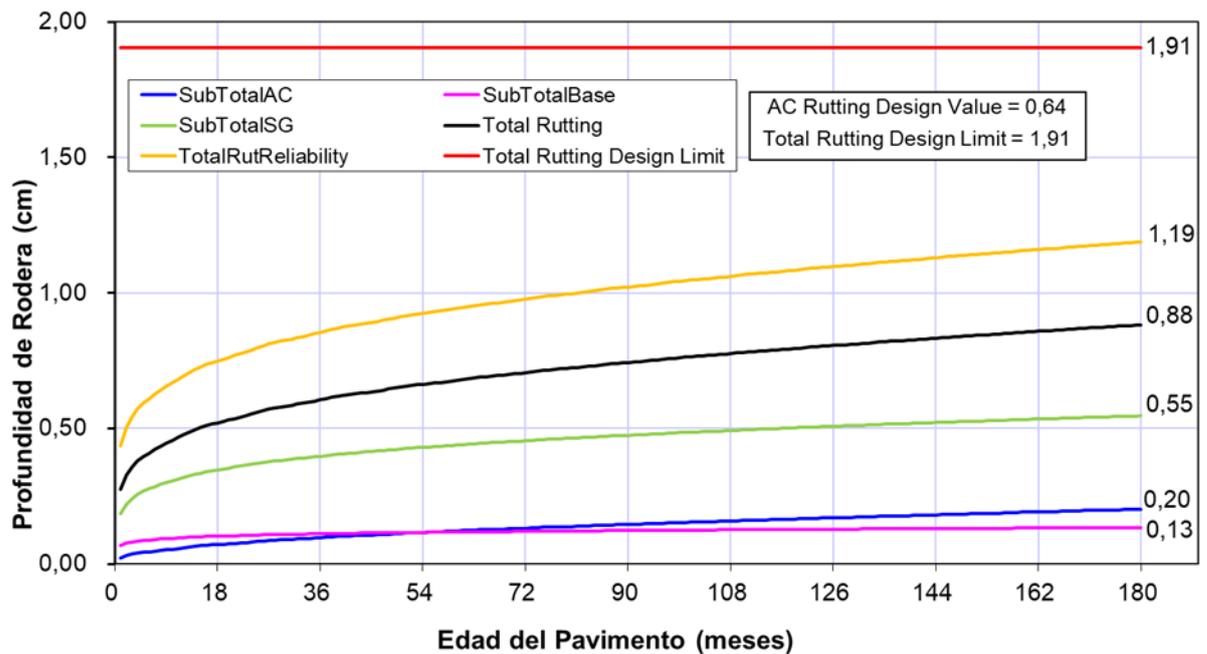


Figura 4. Deformación permanente en el transcurso del periodo de diseño de la estructura para el tráfico $2,5 \times 10^6$ ESALs, método AASHTO-93.

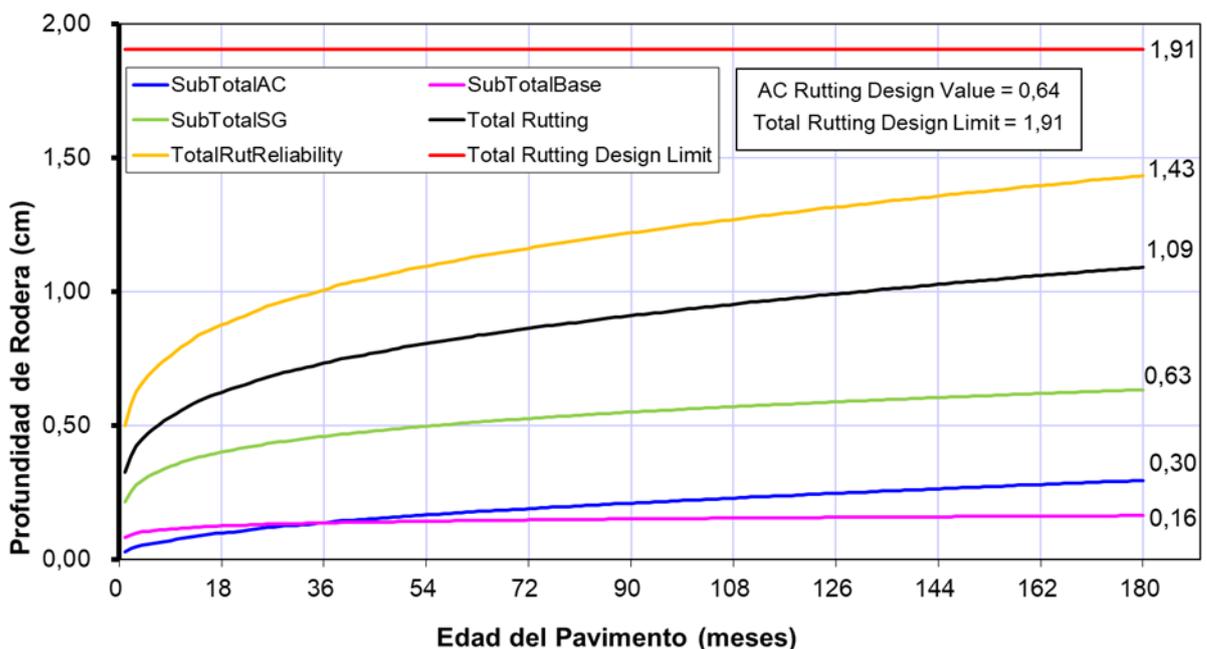


Figura 5. Deformación permanente en el transcurso del periodo de diseño de la estructura para el tráfico $2,5 \times 10^6$ ESALs, Guía AASHTO 2004.

4. CONCLUSIONES

La temperatura ambiente característica de la ciudad de Portoviejo, para una probabilidad del 75%, es de 26,7 grados Centígrados, obtenida a partir de los registros de temperaturas del año 2022. Por lo tanto, la temperatura de cálculo del pavimento en las condiciones ambientales de esta región, dan como resultados una máxima en el pavimento durante el año de 47,8°C y una mínima de 26,7°C, por lo cual la temperatura promedio del pavimento en el año es de 36,9°C. Para esta temperatura se ha considerado para la mezcla asfáltica un módulo resiliente de 1150 MPa, teniendo en cuenta los modelos del Laboratorio Central de Carreteras y Puentes de Francia (ALIZE).

Se comprobó que existen diferencias significativas entre el comportamiento de las estructuras calculadas por la AASHTO 93 y por la Guía del 2004, tanto en el fallo por deformación permanente como en el agrietamiento por fatiga, no obstante, las estructuras calculadas para los diferentes tráficos de diseño, cumplen con los valores límites establecidos. Estas diferencias se deben a que las estructuras diseñadas por la AASHTO 93 resultan con mayores espesores de carpeta asfáltica que los calculados por el programa MEPDG, donde se ha podido considerar espesores significativamente menores para todos los tráficos, cumpliendo con los límites de fallos considerados.

La guía de diseño empírico mecanicista MEPDG, integra en el diseño el comportamiento de los materiales, el clima y las cargas del tránsito, lo que permite estimar los deterioros en cada capa de la estructura producidas durante el período de diseño. El empleo de los modelos de comportamiento de la Guía del 2004 da la posibilidad de verificar las estructuras calculadas por la AASHTO 93, y, por consiguiente, resultan en estructuras con menores espesores que a su vez favorecen la economía del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Caspa, N. (2022). Historia de las carreteras del Ecuador, 1930-1960: Infraestructura y políticas de transportes. *Revista Uruguaya de Historia Económica*, 22(XXII), 10-32.
2. Plúas Morán, M. J., & Vargas Vargas, E. M. (2018). Análisis y diseño de la vía de ingreso al proyecto de vivienda fiscal de la armada del Ecuador ubicada en el km 22 de la vía a Chongón, presentando dos alternativas estructurales con pavimento flexible y rígido (Bachelor's thesis, Guayaquil: ULVR, 2018.).
3. Fernández Ruiz, M. A. (2020). Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Celendín-Balsas, tramo Chaquilpampa-Santa Rosa de Chaquil, mediante el análisis deflectométrico.
4. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 - MTOP. Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 - MTOP. Quito, Pichincha, Ecuador: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
5. Amaya Alfonso, O. F. (2019). Diseño de la estructura de un Pavimento Flexible Aplicando el Método AASHTO-93, para el corredor Vial comprendido entre la Diagonal 65–Cai Boston–Cruce vía Yuma en Barrancabermeja, Santander.
6. Morales, M. C. S., Marrero, D. M. P., & Piusseaut, E. T. (2020). Propuesta de espesores mínimos de superficie y coeficientes de equivalencia de espesores para el diseño de pavimentos flexibles. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 14(1), 1-10.
7. Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, 1993 (Vol. 1). AASHTO.
8. AASHTO (2004) Una política sobre diseño geométrico de carreteras y calles. Quinta edición, Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte, Washington DC.
9. Salamanca-Niño, M. A., & Zuluaga-Bautista, S. A. (2014). Diseño de la estructura de pavimento flexible por medio de los métodos INVIAS, AASHTO 93 e Instituto del Asfalto para la vía La Ye-Santa Lucía Barranca Lebrija entre las abscisas K19+ 250 A K25+ 750 ubicada en el departamento del Cesar.
10. Gómez, J. A. F. (2005). Guía para el uso del método de diseño de estructuras de pavimentos nuevos según método AASHTO 2002.
11. Transportation Officials. (2008). *Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice*. AASHTO.
12. Alonso Aenlle, A., Morales Fournier, J., Garrido Acosta, C., Abreu Hernández, D. O., & Martínez Rojo, T. E. (2020). Determinación y zonificación del grado de desempeño de los asfaltos para Cuba según la metodología Superpave. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 400-419.