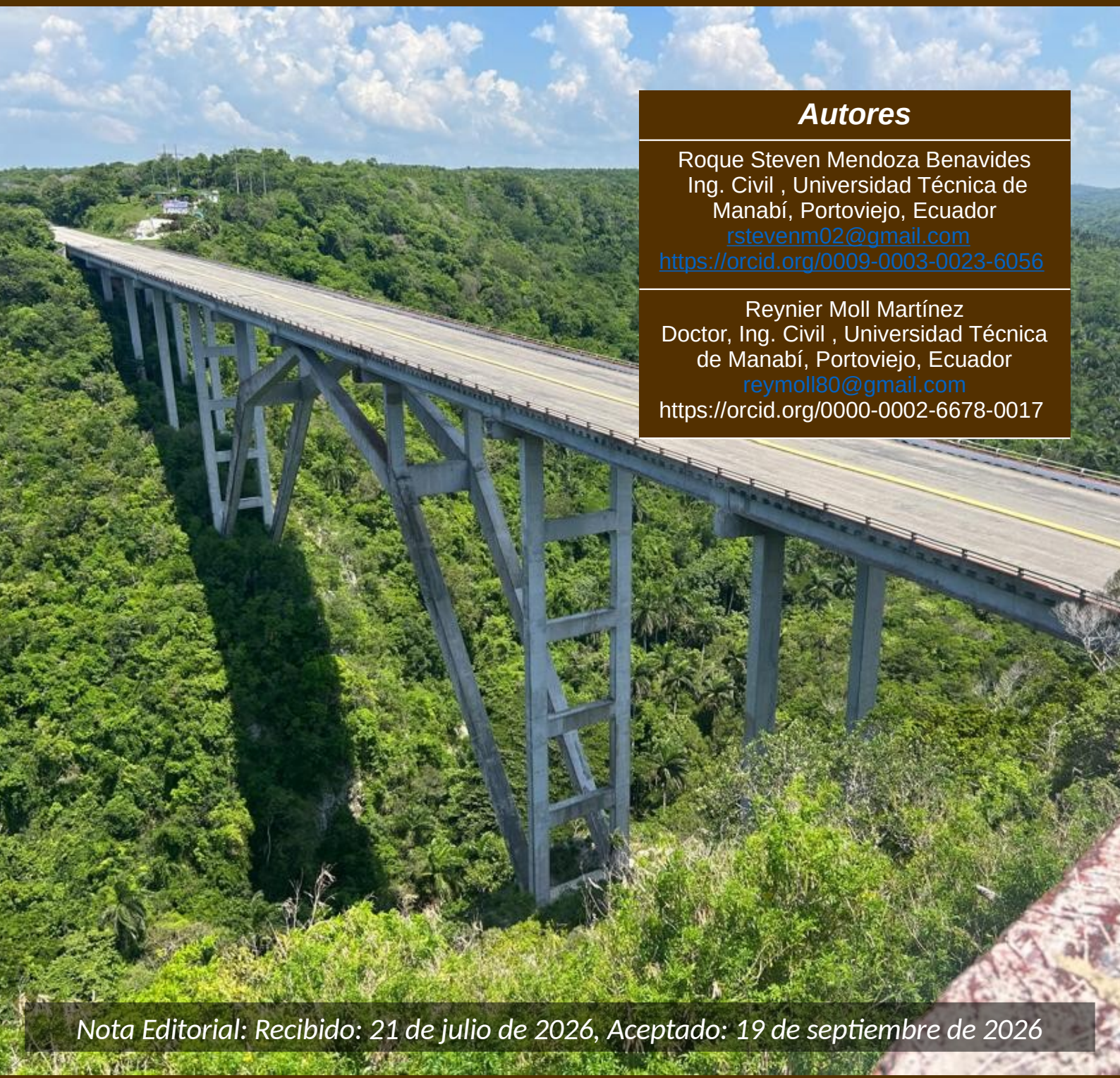
2

Influencia De La Temperatura En El Comportamiento Mecanicista De Pavimentos Flexibles En Dos Regiones Geográficas De Ecuador

Influence Of Temperature On The Mechanistic Behavior Of Flexible Pavements In Two Geographic Regions Of Ecuador



Autores

Roque Steven Mendoza Benavides
Ing. Civil , Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador
rstevenm02@gmail.com
https://orcid.org/0009-0003-0023-6056

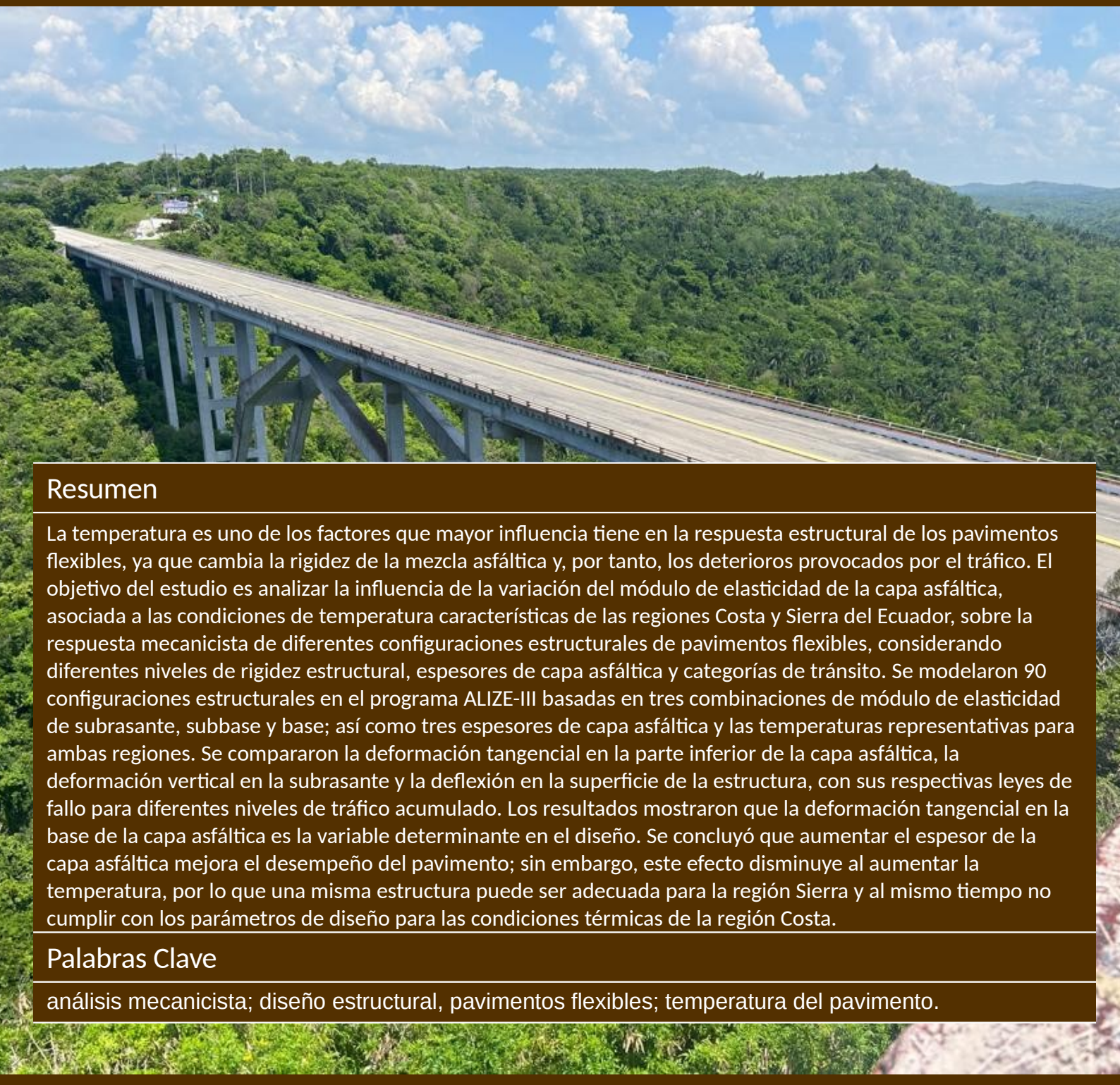
Reynier Moll Martínez
Doctor, Ing. Civil , Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador
reymoll80@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-6678-0017

Nota Editorial: Recibido: 21 de julio de 2026, Aceptado: 19 de septiembre de 2026

Trabajo de Investigación

2

Influencia De La Temperatura En El Comportamiento Mecanicista De Pavimentos Flexibles En Dos Regiones Geográficas De Ecuador



Resumen

La temperatura es uno de los factores que mayor influencia tiene en la respuesta estructural de los pavimentos flexibles, ya que cambia la rigidez de la mezcla asfáltica y, por tanto, los deterioros provocados por el tráfico. El objetivo del estudio es analizar la influencia de la variación del módulo de elasticidad de la capa asfáltica, asociada a las condiciones de temperatura características de las regiones Costa y Sierra del Ecuador, sobre la respuesta mecanicista de diferentes configuraciones estructurales de pavimentos flexibles, considerando diferentes niveles de rigidez estructural, espesores de capa asfáltica y categorías de tránsito. Se modelaron 90 configuraciones estructurales en el programa ALIZE-III basadas en tres combinaciones de módulo de elasticidad de subrasante, subbase y base; así como tres espesores de capa asfáltica y las temperaturas representativas para ambas regiones. Se compararon la deformación tangencial en la parte inferior de la capa asfáltica, la deformación vertical en la subrasante y la deflexión en la superficie de la estructura, con sus respectivas leyes de fallo para diferentes niveles de tráfico acumulado. Los resultados mostraron que la deformación tangencial en la base de la capa asfáltica es la variable determinante en el diseño. Se concluyó que aumentar el espesor de la capa asfáltica mejora el desempeño del pavimento; sin embargo, este efecto disminuye al aumentar la temperatura, por lo que una misma estructura puede ser adecuada para la región Sierra y al mismo tiempo no cumplir con los parámetros de diseño para las condiciones térmicas de la región Costa.

Palabras Clave

análisis mecanicista; diseño estructural, pavimentos flexibles; temperatura del pavimento.

Research Paper

2

Influence Of Temperature On The Mechanistic Behavior Of Flexible Pavements In Two Geographic Regions Of Ecuador



Abstract

Temperature is one of the factors that most significantly influences the structural response of flexible pavements, as it alters the stiffness of the asphalt mixture and, consequently, the deformations caused by traffic. The objective of the study is to analyze the influence of variations in the asphalt layer's modulus of elasticity—associated with the temperature conditions characteristic of Ecuador's Coastal and Highland regions—on the mechanistic response of various flexible pavement structural configurations, considering different levels of structural stiffness, asphalt layer thicknesses, and traffic categories. Ninety structural configurations were modeled using the ALIZE-III program, based on three combinations of elastic moduli for the subgrade, subbase, and base, as well as three asphalt layer thicknesses and representative temperatures for both regions. Tangential strain at the bottom of the asphalt layer, vertical strain in the subgrade, and surface deflection were compared against their respective failure criteria for different levels of cumulative traffic. The results showed that the tangential strain at the base of the asphalt layer is the determining variable in the design. It was concluded that increasing the thickness of the asphalt layer improves pavement performance; however, this effect diminishes as the temperature rises, meaning that the same structure may be suitable for the Sierra region while failing to meet design parameters for the thermal conditions of the Coast region.

Keywords

mechanistic analysis; structural design; flexible pavements; pavement temperature.

1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras son infraestructuras imprescindibles para el desarrollo de las sociedades; por lo que es necesario que estén en óptimas condiciones para garantizar el funcionamiento eficiente y seguro del sistema de transporte. Sin embargo, las infraestructuras viales, especialmente en las zonas con altos niveles de tráfico vehicular, ven reducida su vida útil y funcionalidad por el deterioro que causan en los pavimentos las condiciones climáticas adversas y el escaso mantenimiento, ya que estos factores aceleran su degradación [1]; además de incrementar los riesgos de accidente, elevar los costos de reparación y generar inconvenientes para los conductores y peatones [2].

Un pavimento diseñado y construido de manera óptima debe poseer la capacidad de resistir las variaciones estacionales del clima. Se ha demostrado que las variables climáticas, como los cambios de temperatura y las precipitaciones intensas, son factores ambientales que impactan en el comportamiento estructural de las carreteras, siendo la temperatura uno de los más críticos: ya que al aumentar estas, la rigidez de las capas del pavimento asfáltico disminuye, incrementando la susceptibilidad a la degradación bajo carga repetida y deformaciones como el ahuellamiento o rodera. En caso contrario, cuando las temperaturas disminuyen, la rigidez aumenta, afectando la respuesta estructural del pavimento a cargas de tráfico [2, 3]. Está comprobado que la temperatura no actúa solo sobre el material, sino sobre toda la estructura del pavimento, porque altera cómo se transmiten los esfuerzos hacia las capas inferiores y cambia la respuesta con la estación, el gradiente térmico y la profundidad [4, 5].

1.1. TENSIONES Y DEFORMACIONES EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS ANTE CAMBIOS DE TEMPERATURA

La respuesta mecánica de los pavimentos asfálticos a las variaciones de temperatura influye directamente en las propiedades viscoelásticas de los materiales, en la distribución de tensiones y deformaciones internas, y en la evolución de daños estructurales bajo cargas repetidas. La temperatura de superficie de un pavimento puede exceder la del aire ambiente en decenas de grados Celsius, debido a la absorción de radiación solar y la conductividad térmica de los materiales, lo cual provoca que la mezcla asfáltica llegue a temperaturas internas elevadas. Los pavimentos en condiciones de calma pueden ser entre 3 y 10 °C más calientes que aquellos expuestos al viento, dependiendo de la hora del día y la estación del año. Otros factores externos, como el paso de vehículos, también influyen en la temperatura de la superficie del pavimento en un grado de 1 a 3 °C [6]. Se ha estudiado que las tendencias de cambio de temperatura del pavimento y del aire son similares, que la temperatura disminuye con el aumento de la profundidad de la estructura; y que los factores más significativos que afectan la temperatura del pavimento asfáltico son la temperatura del aire y la radiación solar [7].

La relación entre la temperatura y la viscosidad de los pavimentos asfálticos tiene dos enfoques; primero cuando se está fabricando la mezcla y luego cuando ya está construido el pavimento asfáltico. La evidencia coincide en que el asfalto y las mezclas asfálticas cambian su rigidez, viscosidad, módulo dinámico y capacidad de relajación cuando cambia la temperatura, y que esos cambios modifican directamente la distribución de esfuerzos, deformaciones y modos de falla del pavimento [8, 9]. En la etapa de explotación del pavimento, a bajas temperaturas, la mezcla se vuelve más rígida y el riesgo principal pasa a ser la fisuración térmica y la fatiga. Por otra parte, al elevarse la temperatura, la viscosidad del aglomerante asfáltico disminuye, incrementando la plasticidad y aumentando la deformación permanente y el riesgo de ahuellamiento bajo cargas de tráfico, sobre todo a bajas velocidades [10].

1.2. RESPUESTA DE TENSIONES Y DEFORMACIONES EN CLIMAS CÁLIDOS

A medida que las temperaturas ambientales o de superficie en el pavimento aumentan, el módulo de rigidez (stiffness) de la mezcla asfáltica disminuye significativamente, lo que se traduce en una reducción de su capacidad para resistir y distribuir cargas; por lo que se incrementan las deformaciones plásticas y permanentes bajo la acción del tráfico, especialmente en regiones con clima cálido o durante la temporada de verano en climas templados. Además, la disminución de rigidez a altas temperaturas también está relacionada con una mayor susceptibilidad a la deformación permanente superficial (rutting), fenómeno que se incrementa con la combinación de cargas de tráfico repetitivas y temperaturas elevadas. Esto provoca que las tensiones y las deformaciones verticales sean más pronunciadas, lo que afecta no solo el comportamiento superficial, sino también en las capas subyacentes, ya que el sistema de tensiones se altera con la pérdida de rigidez del material asfáltico en condiciones cálidas [5].

Estudios recientes han reportado que las temperaturas superficiales pueden alcanzar entre 65 °C y 75 °C cuando las temperaturas ambientales superan los 40 °C [11], lo que provoca que se reduzca el módulo dinámico del asfalto, causando la aparición de deflexiones, deformaciones verticales permanentes (incrementos del 18 al 37 % con +1,5 – 2 °C de calentamiento [12]), reducción de la resistencia a esfuerzos de corte y tensiones de tracción, favoreciendo progresivamente la ocurrencia de fisuras por fatiga [13, 14], el desarrollo de roderas se acelera por encima de ~50 °C [15], el envejecimiento prematuro del asfalto y mayor acumulación de tensiones internas y asentamientos permanentes (sesión elástico-plásticos) en las capas no ligadas bajo la mezcla asfáltica (capas de base y subbase) [5, 12, 16].
En [17] se refiere a la relación de las altas temperaturas y las cargas vehiculares con la deformación del pavimento asfáltico; obteniendo que cuando la temperatura local se incrementó a 45 °C, en la superficie asfáltica se redujo hasta 3 veces el número de repeticiones de carga para generar una deformación.

1.3. LA RESPUESTA DEL PAVIMENTO EN CLIMAS FRÍOS O TEMPLADOS Y ANTE LAS VARIACIONES ESTACIONALES.

Por su parte, las bajas temperaturas o el frío extremo provocan que el asfalto se vuelva más rígido y frágil, aumentando el riesgo de agrietamiento y fisuración térmica del pavimento por retracción, sobre todo en zonas de grandes diferencias día/noche o invierno/verano [18, 19].
En climas templados con ciclos de temperatura notables entre día y noche, los gradientes térmicos generan expansiones y contracciones repetitivas que producen fatiga térmica en la mezcla asfáltica, con consecuencias mecánicas que se evidencian en la acumulación de deformaciones y la aparición de grietas. Se ha demostrado que las rigideces de las mezclas asfálticas pueden variar varias veces entre estaciones frías y cálidas, lo que deriva en cambios marcados en las tensiones verticales y su distribución hacia las capas inferiores indican que, en zonas con temperaturas elevadas, el módulo de rigidez puede reducirse comparado con condiciones más frías, provocando que las tensiones inducidas por tráfico se transfieran con mayor intensidad a las capas inferiores del pavimento, aumentando el riesgo de deformaciones acumuladas y asentamientos permanentes (sesión elástico-plásticos) en las capas no ligadas bajo la mezcla asfáltica. En climas templados, se ha observado que la rigidez del asfalto en verano puede ser aproximadamente 3.7 veces menor que en invierno, y aunque la diferencia disminuye con la profundidad, el efecto aún influye en las tensiones en el subsuelo hasta 1 metro de profundidad. Estos cambios estacionales generan tensiones más altas bajo condiciones de verano, lo que puede traducirse en mayores deformaciones acumulativas y aceleración de fallas por ahuellamiento o rodera y asentamiento [5].
Tanto para las altas temperaturas, como para las bajas, el efecto más crítico ocurre en los primeros centímetros del pavimento (0 - 5 cm), pues es donde se concentran los cambios térmicos y las tensiones [14, 20]. Como estrategias eficaces para mitigar los efectos negativos de la temperatura sobre los pavimentos se incluyen: mayor espesor de capa asfáltica o bases compuestas en zonas de elevados gradientes de temperaturas; mejores estrategias de control de temperatura, mezclas modificadas (SBS): Estireno-Butadieno-Estireno, caucho, sílice, “cool pavements”) para reducir temperatura y gradientes y mejorar la resistencia a deformación y fisuración por fatiga térmica [11, 13, 16, 21-23].

1.4. MODELOS MECANICISTAS Y SIMULACIÓN DE RESPUESTA TÉRMICA-MECÁNICA

El uso de modelos mecanicistas que integran campos térmicos y tensiones inducidas permite comprender mejor cómo los pavimentos responden ante variaciones de temperatura y cargas de tráfico. Estos modelos típicamente combinan análisis térmicos (transferencia de calor por conducción, convección y radiación) con modelos de comportamiento viscoelástico para predecir la distribución de tensiones y deformaciones en diferentes condiciones ambientales. La incorporación de datos climáticos reales en los modelos y la adaptación de parámetros mecánicos, tales como módulos de rigidez dependientes de la temperatura, es esencial para la validez del diseño y la predicción precisa del comportamiento de los pavimentos flexibles en condiciones reales de servicio [5].
Las variaciones estacionales y su efecto sobre las tensiones inducidas por las cargas de tráfico tienen implicaciones directas para el análisis mecanicista de los pavimentos. Específicamente en lo que se refiere a la temperatura que se introducen en las condiciones de diseño del modelo, se deberían considerar no solo valores promedio, sino las extremas y sus efectos sobre la rigidez y la transferencia de tensiones, ya que la respuesta del pavimento bajo carga es fuertemente modulada por la rigidez de sus materiales en el momento de la carga [5]. Ya se ha visto que bajas temperaturas aumentan la rigidez del pavimento; pero elevan las tensiones térmicas de tracción, con mayor riesgo de agrietamiento por frío, y que altas temperaturas, disminuyen la rigidez de la mezcla aumentando la probabilidad de ocurrencia de deformaciones.
Resultados de simulaciones numéricas muestran que las tensiones internas pueden alcanzar niveles críticos no solo por cargas de tráfico, sino debido a gradientes térmicos diarios o estacionales, que inducen tensiones térmicas de tracción y compresión en las capas asfálticas. Estas tensiones térmicas actúan de manera sinérgica con las tensiones por tráfico, pudiendo superar la resistencia de la mezcla y generar fisuras térmicas o daño acumulado con el tiempo [13].

1.5. LA TEMPERATURA EN EL DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS EN ECUADOR

En el contexto de Ecuador, las condiciones térmicas representativas de las regiones Costa y Sierra implican que las estrategias de diseño de pavimentos no sean directamente transferibles de una región a otra. En la Costa y Amazonía prevalecen problemas de alta temperatura que provocan el ahuellamiento; por lo que los diseños deben enfocarse en contrarrestar las reducciones de rigidez a altas temperaturas, lo cual puede incluir materiales con mayor resistencia térmica o modificadores que mejoren la estabilidad de la mezcla a altas temperaturas. En investigaciones precedentes, en climas tropicales con altos niveles de radiación, similares a los de la Costa y Amazonía ecuatoriana, se ha obtenido que la superficie asfáltica puede llegar a alcanzar temperaturas entre 54 y 60 °C [24]; superando con regularidad los 50 °C donde aumenta significativamente la probabilidad de aparición del ahuellamiento y la deformación plástica [16, 25]

En tanto, en la Sierra se combina calentamiento solar diurno, amplitud térmica y fenómeno de isla de calor urbana, lo que exige un diseño adecuado de la estructura del pavimento. En ciudades de la Sierra andina ecuatoriana con altitudes superior a los 2500 m, como Riobamba, ocurren ciclos día/noche con gradientes térmicos grandes que modifican la densidad, estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica, generando pérdida de resistencia por ciclos térmicos repetidos aunque no se alcancen temperaturas extremas, similar al comportamiento en la ciudad de Tunja en Colombia [26]. En ciudades con clima templado andino pero más húmedo como Cuenca, se simularon pavimentos asfálticos que alcanzaron temperaturas altas, y al reemplazarlos por pavimentos de hormigón se redujo la temperatura superficial hasta 8 °C [27].

2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El estudio se sustentó en un análisis con enfoque empírico - mecanicista orientado a evaluar la influencia de la variación de la temperatura sobre el comportamiento estructural de los pavimentos flexibles en las regiones Costa y Sierra del Ecuador. La temperatura se consideró como la variable que modifica el módulo de elasticidad de la capa asfáltica, mientras que las características de las capas granulares y de la subrasante se mantuvieron constantes para cada configuración estructural. De esta manera, fue posible analizar de forma diferenciada el efecto térmico sobre la respuesta del pavimento y, posteriormente, verificar la admisibilidad de dicha respuesta para diferentes niveles de tránsito

La metodología empleada en este estudio consiste en determinar los espesores mínimos de diseño de la capa de rodadura asfáltica para pavimentos flexibles en las regiones Costa y Sierra del Ecuador. Se aplicó un enfoque de diseño empírico-mecanicista utilizando el software ALIZE-III como herramienta para simular la respuesta del pavimento bajo condiciones de carga específicas. Considerando que el desempeño de la capa asfáltica está condicionado no solo por las cargas repetidas del tránsito, sino también por la influencia de la temperatura ambiental sobre la rigidez de la mezcla asfáltica, se evaluó el efecto de las condiciones térmicas características de ambas regiones sobre la respuesta estructural y los espesores de diseño requeridos. En este procedimiento, el nivel de tránsito acumulado no constituye una variable que modifique directamente la respuesta obtenida en cada simulación, sino que define el nivel de deformación o deflexión admisible con el cual se comparan los resultados obtenidos para cada configuración estructural.

Para el diseño se partió del modelo multicapas (figura 1), con un modelo constitutivo lineal elástico; con el contacto entre las capas en condiciones de adherencia total. La configuración de la carga se basó en un eje simple con rueda dual por el que se trasmite una carga total de 8,2 toneladas, con una presión equivalente de 7 kg/cm2 (0,7 MPa) por neumático. Para las propiedades de los materiales, se utilizó un coeficiente de Poisson (μ) igual a 0,40 para las capas de subrasante, subbase y base; mientras que para la capa asfálticas se tomó 0,35. El espesor (h) de subbase se fijó en 35 cm y el de la base en 25 cm. Para la variable módulo de elasticidad (E) se consideraron 70 y 100 MPa para la subrasante, 100, 150 y 300 MPa para la subbase y 350, 500 y 600 MPa para la base. Para la superficie asfáltica se consideraron tres espesores de capa: 10, 15 y 20 Cm; mientras que el módulo de elasticidad dependió de los valores de temperatura ambiente fijados en la investigación considerando las características climáticas de cada región geográfica; ya que el programa ALIZE-III tiene como particularidad que a medida que se varía la temperatura ambiente, la propia herramienta modifica el módulo de elasticidad de la capa asfáltica.

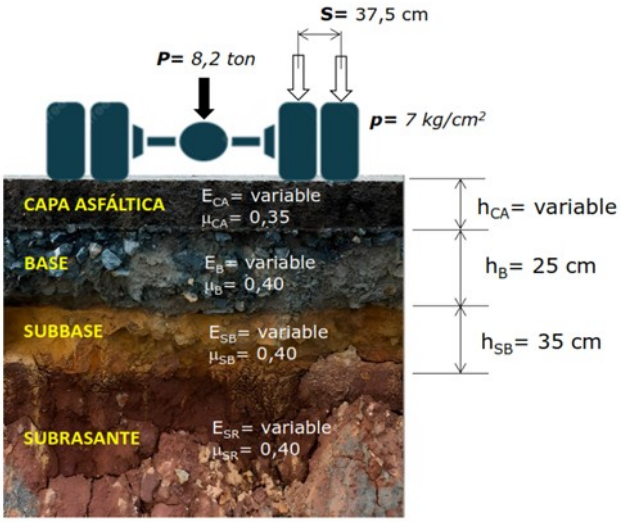


Fig. 1. Esquema del modelo general para estudiar la respuesta estructural del pavimento.

Los valores máximo y mínimo de temperatura de trabajo del pavimento asfáltico a introducir en el modelo para cada región (Sierra y Costa) se calcularon a partir de la temperatura del aire utilizando las ecuaciones del Strategic Highway Research Program (SHRP), específicamente del programa SUPERPAVE y que aparecen en el Standard practice for grading or verifying the performance grade (PG) of an asphalt binder [28].

$$T_{20\,mm} = (T_{aire} - 0{,}00618\,Lat^2 + 0{,}22890\,Lat + 42{,}2)(0{,}9545) - 17{,}78 + Z_\sigma \quad (1)$$

Esta ecuación (1) permite calcular la temperatura máxima del pavimento a 20 mm de profundidad (T_{20mm}); considerada como la temperatura de diseño para evitar ahuellamiento. Siendo "T_{aire}" la temperatura máxima del aire en °C, promedio de los 7 días más calientes del año; "Lat" es la latitud del sitio en grados decimales corregida por radiación solar según ubicación; y "σ_Z" es la desviación estándar de las temperaturas máximas de 7 días en °C para un nivel de confiabilidad "Z". Para el estudio se consideró una confiabilidad del 98 % (Z=2,055).

$$T_{pav} = T_{aire} + 0{,}051\,H - 0{,}000063H^2 - Z_\sigma \quad (2)$$

Por su parte, la ecuación 2 es la temperatura mínima en °C, que soporta el pavimento en la superficie sin fisuras térmicas; donde "T_{aire}" es la temperatura mínima del aire en °C del año, "H" la profundidad en mm considerando H= 0 para superficie y para otra profundidad se especificaría; y similar a la ecuación 1, "σ_Z" es la desviación estándar de las temperaturas mínimas del aire de 7 días en °C para un nivel de confiabilidad "Z"

Para el cálculo de las temperaturas máximas y mínimas mensual de cada región se utilizaron como ciudades patrón o modelo, los datos correspondientes a esta variable de las ciudades de Portoviejo (región Costa) y Quito (región Sierra). Con los registros mensuales de temperatura de Portoviejo y Quito, sus ubicaciones geográficas (latitud) y para un nivel de confianza del 90 %, se calcularon la temperatura mínima y máxima del año a la que están sometidos los pavimentos en ambas ciudades. Se calculó que en Portoviejo la temperatura mínima del pavimento (T_{pav}) es 20,92 °C y la máxima 45 °C, aunque para el modelo se consideró 43°C, valor máximo permitido en el programa ALIZE-III; y esta diferencia no representa un cambio significativo en el módulo de la mezcla asfáltica. Para la ciudad de Quito, la temperatura mínima del pavimento se determinó en 8,37 °C y la máxima en 33,3 °C.

En total se estudiaron 90 modelos, considerando tres capacidades estructurales diferentes del pavimento, determinadas por la combinación de los módulos de elasticidad de la subrasante, la subbase y la base, siendo:

Estructura de baja rigidez (1): E_{SR} = 70 MPa; E_{SB} = 100 MPa; E_B = 350 MPa

Estructura de rigidez intermedia (2): E_{SR} = 70 MPa; E_{SB} = 150 MPa; E_B = 500 MPa

Estructura de alta rigidez (3): E_{SR} = 100 MPa; E_{SB} = 300 MPa; E_B = 600 MPa

Con el propósito de evaluar comparativamente la respuesta estructural de los pavimentos bajo diferentes condiciones térmicas, para la región Sierra se analizaron temperaturas del pavimento entre 8 y 20 °C, con incrementos de 4 °C, mientras que para la región Costa se consideraron temperaturas de 35, 39 y 43 °C. Adicionalmente, se incorporaron temperaturas comunes a ambas regiones (24, 27 y 31 °C), con el fin de establecer un rango térmico continuo que permitiera analizar la variación del comportamiento estructural de las diferentes configuraciones de pavimento.

El diseño experimental contempla 90 modelos de análisis, obtenidos mediante la combinación de las variables estructurales y térmicas consideradas. En todos los modelos se mantienen tres niveles de espesor de la carpeta asfáltica (10, 15 y 20 cm), mientras que se combinan diferentes módulos de las capas de subrasante, subbase y base. La subrasante se caracteriza por módulos de 70 y 100 MPa, la subbase por 100 y 150 MPa, y la base por 300, 350, 500 y 600 MPa, generando diferentes configuraciones estructurales. Asimismo, el módulo de la carpeta asfáltica varía en función de la temperatura de análisis, considerando valores de 8, 12, 16, 20, 24, 27, 31, 35, 39 y 43 °C, a los cuales corresponden diferentes valores de módulo de rigidez, desde 8160 hasta 910 MPa. De esta manera, la combinación de las propiedades mecánicas de las capas, el espesor de la carpeta asfáltica y la variación del módulo de esta última en función de la temperatura permite representar diferentes condiciones estructurales y térmicas, proporcionando una base para el análisis comparativo del comportamiento de los pavimentos en las regiones Costa y Sierra del Ecuador.

Como resultado de la modelación se determinó el estado tenso – deformacional de cada estructura de donde se seleccionaron las variables de interés para el estudio, como se muestra en figura 2.

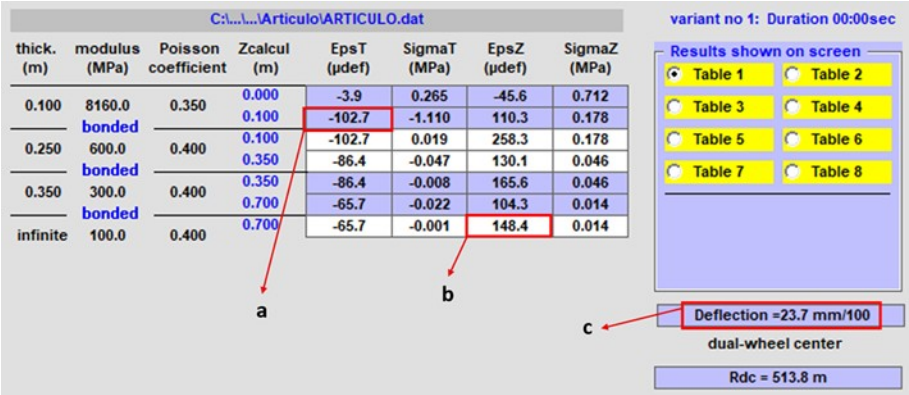


Fig. 2. Variables extraídas de la modelación en ALIZE – III utilizadas en el estudio- a) Deformación tangencial en la fibra inferior de la capa asfáltica, b) Deformación vertical a nivel de subrasante, c) Deflexión en la superficie del pavimento.

Con los valores obtenidos de deformación tangencial en la capa asfáltica, deformación vertical en la subrasante y de deflexión en la superficie se construyeron los gráficos de comportamiento para cada valor de temperatura de la capa asfáltica entre 8 y 43 ºC. Estas variables se analizaron respecto a las leyes de fallo específicas de cada una para diferentes niveles de tráfico acumulado (ΣN). Estos valores admisibles se seleccionaron a partir de un estudio bibliográfico previo considerando como los más adecuados los reportados por Higuera [29] y por Orobio y Gil [30].

3. RESULTADOS

3.1. DEFORMACIÓN TANGENCIAL EN LA CAPA ASFÁLTICA (ET C.A)

Las figuras 3, 4 y 5 muestran la variación de la deformación tangencial en la fibra inferior de la capa asfáltica para las estructuras de baja, intermedia y alta rigidez, respectivamente.

3.1.1. ESTRUCTURA DE BAJA RIGIDEZ (ESR = 70 MPA; ESB = 100 MPA; EB = 350 MPA)

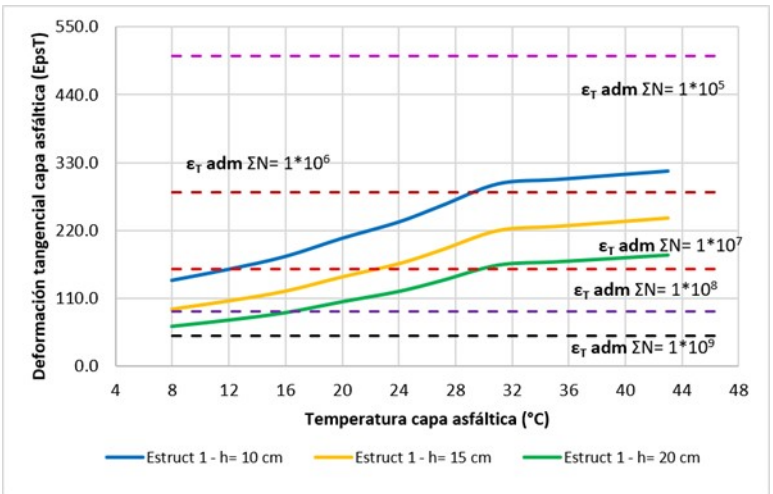


Fig. 3. Deformación tangencial en la fibra inferior de la capa asfáltica para la estructura de baja rigidez.

En esta estructura se observa una marcada sensibilidad de la deformación tangencial al incremento de la temperatura. Para un espesor de 10 cm, la respuesta se encuentra dentro de los límites admisibles para los niveles de tránsito más bajos en todo el intervalo térmico analizado; sin embargo, conforme aumenta la exigencia asociada al tránsito, el intervalo térmico admisible se reduce. Para un nivel de tránsito de ΣN = $1x10^6$, el cumplimiento se mantiene hasta aproximadamente 29 °C, mientras que para ΣN = $1x10^7$ se limita a temperaturas cercanas a 12 °C. El incremento del espesor de la capa asfáltica modifica favorablemente este comportamiento. Cuando el espesor de la capa asfáltica se aumenta hasta 15 cm, la estructura mantiene la deformación dentro del límite correspondiente a ΣN = 1 x 10^6 durante todo el intervalo de temperaturas y extiende el cumplimiento para ΣN = $1x10^7$ hasta aproximadamente 23 °C. Si el espesor de la capa asfáltica es de 20 cm, aumenta el intervalo de cumplimiento para ΣN = $1x10^7$ próximo a los 30 °C y para ΣN = $1x10^8$ alcanza aproximadamente 17 °C. Para ΣN = $1x10^9$ ninguna de las configuraciones analizadas satisface el límite admisible de deformación tangencial en el intervalo de temperatura considerado para la superficie.

3.1.2. ESTRUCTURA DE RIGIDEZ INTERMEDIA (ESR = 70 MPA; ESB = 150 MPA; EB = 500 MPA))

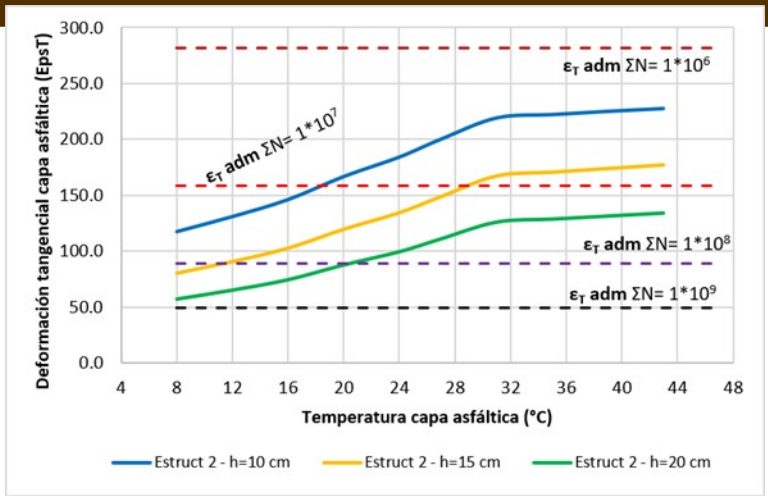


Fig. 4. Deformación tangencial en la fibra inferior de la capa asfáltica para la estructura de rigidez intermedia.

En esta estructura, para 10 cm de capa asfáltica, la deformación se mantiene dentro del límite correspondiente a ΣN = $1x10^6$ en todo el intervalo térmico, mientras que para ΣN = $1x10^7$ el cumplimiento se reduce a temperaturas de hasta aproximadamente 17 °C. Al incrementar el espesor a 15 cm, el límite correspondiente a ΣN = $1x10^7$ se mantiene hasta aproximadamente 28 °C y, para ΣN = $1x10^8$, hasta cerca de los 12 °C. Con 20 cm de espesor de capa asfáltica se obtiene el comportamiento más favorable; ya que los valores permanecen dentro de los límites para niveles de tránsito inferiores a ΣN = $1x10^7$ en todo el intervalo térmico, mientras que para ΣN = $1x10^8$ se mantiene hasta aproximadamente 20 °C. Ninguna de las configuraciones satisface el criterio de deformación correspondiente a ΣN = $1x10^9$ en todo el intervalo de temperatura analizado.

3.1.3. ESTRUCTURA DE ALTA RIGIDEZ (ESR = 100 MPA; ESB = 300 MPA; EB = 600 MPA)

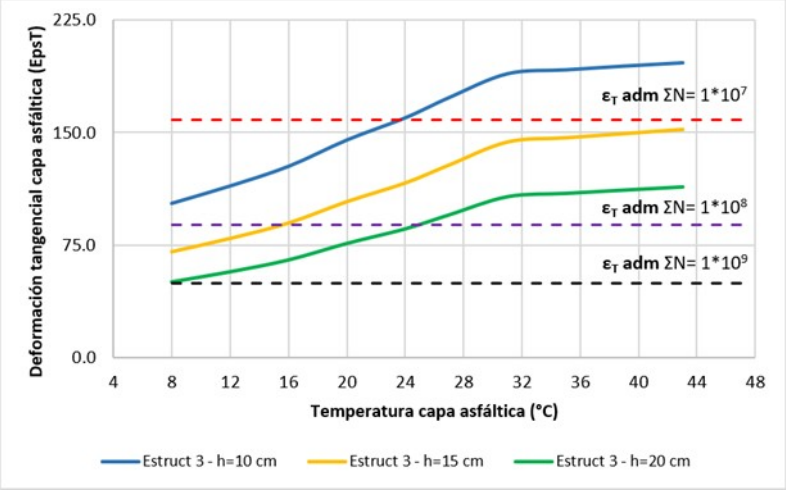


Fig. 5. Deformación tangencial en la fibra inferior de la capa asfáltica para la estructura de alta rigidez.

Con un espesor de 10 cm, el límite de deformación para ΣN = 1×10^7 se cumple hasta aproximadamente 24 °C, mientras que para ΣN = 1×10^8 ninguna temperatura del intervalo analizado resulta admisible. Al aumentar el espesor a 15 cm, la deformación permanece dentro del límite admisible para ΣN = 1×10^7 en todo el intervalo y para ΣN = 1×10^8 hasta aproximadamente 16 °C. Para un espesor de capa asfáltica de 20 cm se presenta la condición más favorable, cumpliéndose el criterio de deformación para ΣN = 1×10^7 durante todo el intervalo térmico y para ΣN = 1×10^8 hasta aproximadamente 25 °C. Al igual que en las estructuras anteriores, No se cumplen los criterios de deformación admisible para ninguna temperatura para ΣN = 1×10^9.

3.2. DEFORMACIÓN VERTICAL EN LA SUBRASANTE (EZ SR)

La variación de la deformación vertical en la subrasante en función de la temperatura del pavimento y la rigidez de las estructuras se presentan en las figuras 6, 7 y 8. A diferencia de la deformación tangencial en la capa asfáltica, esta variable muestra menor sensibilidad a la variación de la temperatura superficial, aunque el incremento térmico también modifica progresivamente las condiciones de respuesta de las estructuras

3.2.1. ESTRUCTURA DE BAJA RIGIDEZ (ESR = 70 MPA; ESB = 100 MPA; EB = 350 MPA)

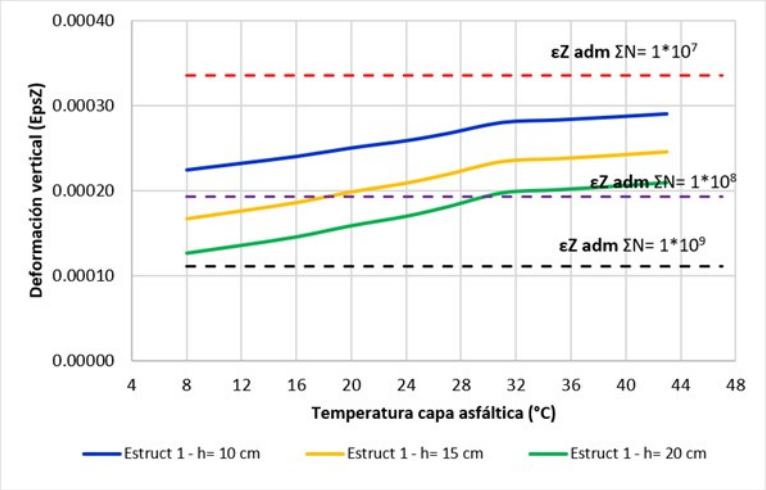


Fig. 6. Deformación vertical a nivel de subrasante para la estructura de baja rigidez.

En esta estructura, para 10 cm de espesor se satisface el criterio de deformación vertical para niveles de tránsito hasta ΣN = 1x10^7 en todo el intervalo térmico, mientras que para niveles superiores a ΣN = 1x10^8 la respuesta estructural supera el límite admisible independientemente de la temperatura. Al aumentar el espesor de la capa asfáltica a 15 cm, se mantiene el cumplimiento para ΣN = 1x10^7 en todo el intervalo y para ΣN = 1x10^8 hasta aproximadamente 20 °C. Con 20 cm, el criterio correspondiente a ΣN = 1x10^8 se satisface hasta aproximadamente los 30 °C. Para ΣN = 1x10^9, ninguna de las combinaciones de espesor y temperatura cumple con la deformación vertical admisible.

3.2.2. ESTRUCTURA DE RIGIDEZ INTERMEDIA (ESR = 70 MPA; ESB = 150 MPA; EB = 500 MPA)

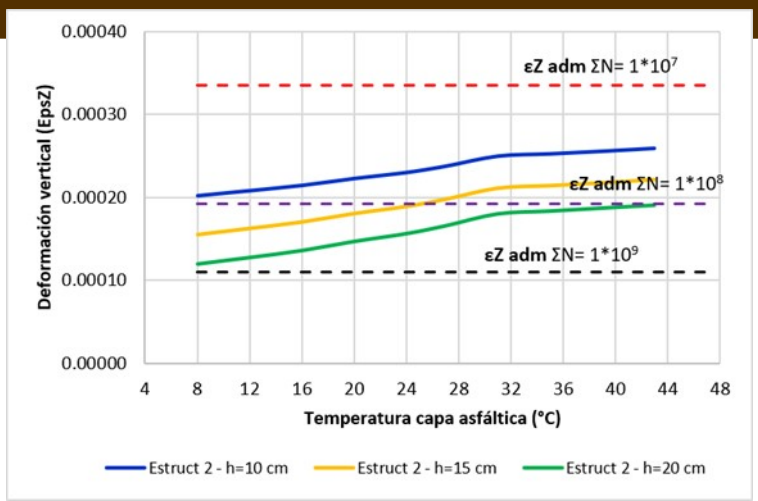


Fig. 7. Deformación vertical a nivel de subrasante para la estructura de rigidez intermedia.

El espesor de 10 cm se satisface el criterio de deformación admisible para ΣN = 1x10^7 y todas las temperaturas. En caso contrario, para tráficos superiores a este valor no cumple el criterio de fallo para ninguna temperatura. Si se utilizan espesores de capa asfáltica de 15 cm, la deformación admisible se satisface en todas las temperaturas evaluadas para un tráfico de ΣN = 1x10^7 y para ΣN = 1x10^8 hasta aproximadamente 26 °C. El espesor de 20 cm mantiene deformaciones inferiores al límite admisible durante todo el intervalo de temperaturas para tráficos menores o iguales a ΣN = 1x10^8. Para ΣN = 1x10^9, no se satisface la deformación vertical admisible, independientemente del espesor de la capa asfáltica o de la temperatura del pavimento.

3.2.3. ESTRUCTURA DE ALTA RIGIDEZ (ESR = 100 MPA; ESB = 300 MPA; EB = 600 MPA)

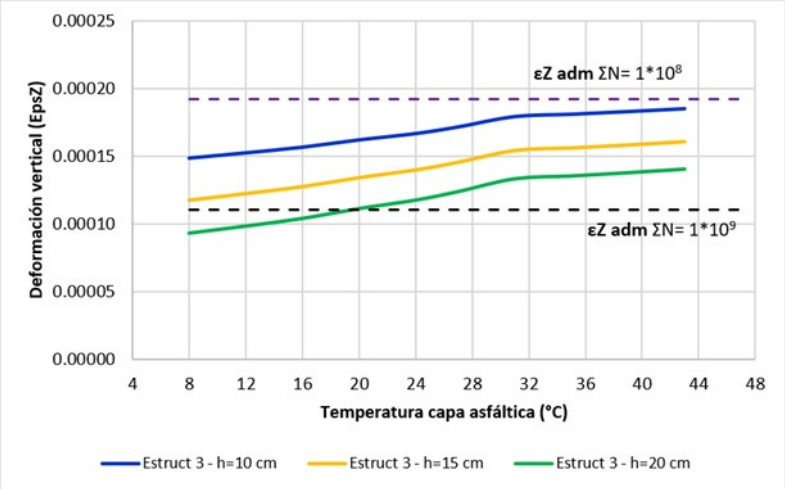


Fig. 8. Deformación vertical a nivel de subrasante para la estructura de alta rigidez.

Esta estructura presenta el comportamiento más favorable. Los espesores de 10 y 15 cm mantienen valores inferiores a los límites admisibles para niveles de tránsito inferiores a ΣN = 1x10^9 durante todo el intervalo de temperaturas analizado. Para tráficos superiores, únicamente la configuración con 20 cm de espesor de capa asfáltica cumple el criterio de admisibilidad cuando la temperatura superficial es inferior a aproximadamente 20 °C.

3.3. DEFLEXIÓN SUPERFICIAL (ΔZSUPERF)

Al estudiar el comportamiento de la deflexión superficial en cada estructura (figuras 9, 10, 11) cuando se varían los espesores de la capa asfáltica y las temperaturas se obtuvo el siguiente análisis:

3.3.1. ESTRUCTURA DE BAJA RIGIDEZ (ESR = 70 MPA; ESB = 100 MPA; EB = 350 MPA)

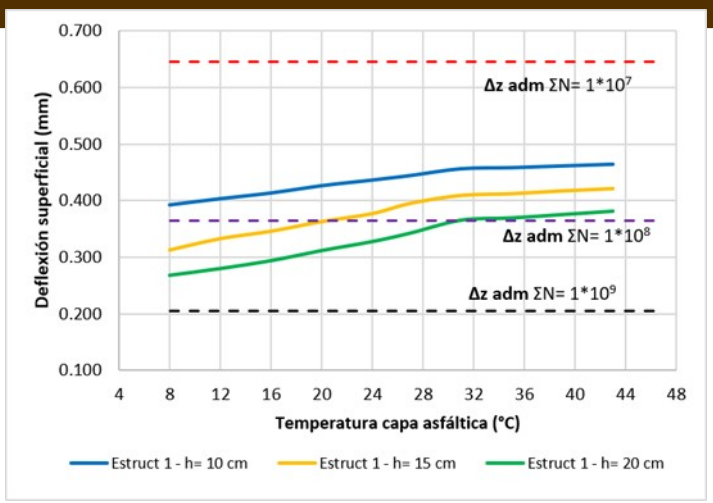


Fig. 9. Deflexión superficial en la estructura de baja rigidez.

El espesor de 10 cm de capa asfáltica satisface la deflexión superficial admisible para todas las temperaturas con tráficos inferiores a ΣN = 1x10^8. Con 15 cm, el criterio de fallo se cumple para ΣN = 1x10^8 hasta aproximadamente los 21 °C; mientras que con 20 cm llega a cumplirse hasta cerca de los 29 °C. Ninguna configuración de espesores de capas satisface el límite de fallo correspondiente a ΣN = 1x10^9 durante todo el intervalo de temperatura analizado.

3.3.2. ESTRUCTURA DE RIGIDEZ INTERMEDIA (ESR = 70 MPA; ESB = 150 MPA; EB = 500 MPA))

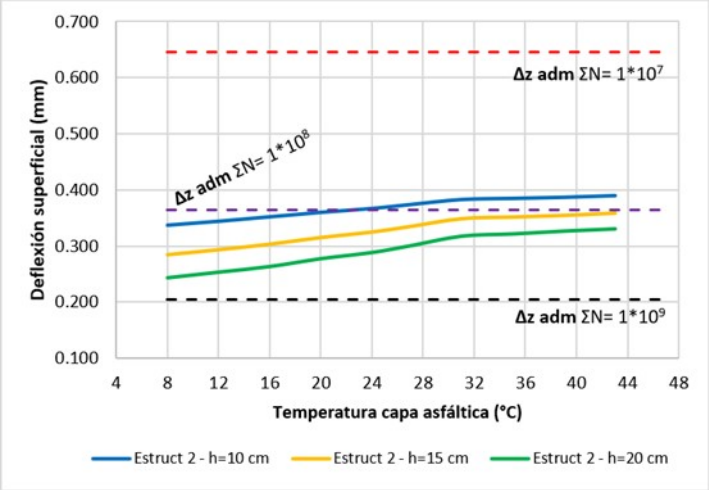


Fig. 10. Deflexión superficial en la estructura de rigidez intermedia.

Al estudiar para un espesor de capa asfáltica de 10 cm se satisface la deformación admisible para $\Sigma N = 1x10^7$ durante todo el intervalo y el de $\Sigma N = 1x10^8$ hasta aproximadamente 23 °C. Con 15 y 20 cm, la deflexión permanece dentro de los límites admisibles para niveles inferiores a $\Sigma N = 1x10^8$ durante todo el intervalo térmico. Para $\Sigma N = 1x10^9$, ninguna de las combinaciones de espesor de capa asfáltica y temperatura satisfacen el criterio de fallo.

3.3.3. ESTRUCTURA DE ALTA RIGIDEZ (ESR = 100 MPA; ESB = 300 MPA; EB = 600 MPA)

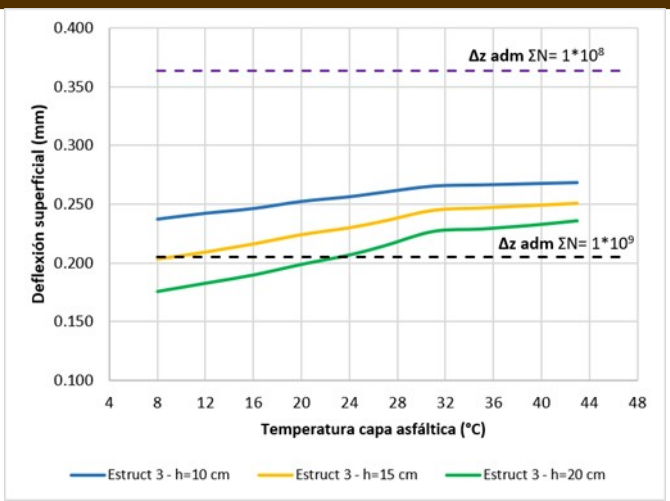


Fig. 11. Deflexión superficial en la estructura de alta rigidez.

Esta estructura presenta el comportamiento más favorable respecto a la deflexión superficial. Con espesores de 10 y 15 cm de capa asfáltica las deflexiones para todas las temperaturas son inferiores a las admisibles para tráficos menores a $1x10^9$; sin embargo, cuando se coloca un espesor de superficie de 20 cm la deflexión admisible se satisface hasta aproximadamente los 23 °C.

3.4. EVALUACIÓN DE LAS CONFIGURACIONES ESTRUCTURALES PARA LAS TEMPERATURAS CRÍTICAS DE LAS REGIONES ESTUDIADAS

Para facilitar el análisis para cada región geográfica (Sierra y Costa), los resultados de deformación y desplazamiento se sintetizaron por rigidez de la estructura, espesor de capa asfáltica y tráfico (tabla 1).

Tabla 1. Síntesis del cumplimiento de los criterios mecanicistas según la rigidez estructural, el espesor de la capa asfáltica, el nivel de tránsito y la temperatura.

Estruct.	Espesor capa asfáltica	ΣN = 1x10⁶			ΣN = 1x10⁷			ΣN = 1x10⁸			ΣN = 1x10⁹		
		εt C.A	εZ SR	ΔZ superf.	εt C.A	εZ SR	ΔZ superf.	εt C.A	εZ SR	ΔZ Sup.	εt C.A	εZ SR	ΔZ superf.
Rigidez Baja	10 cm	Cumple hasta ≈29 °C	C	C	Cumple hasta ≈12 °C	C	C	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	15 cm	C	C	C	Cumple hasta ≈23 °C	C	C	NC	Cumple hasta ≈20 °C	Cumple hasta ≈21 °C	NC	NC	NC
	20 cm	C	C	C	Cumple hasta ≈30 °C	C	C	Cumple hasta ≈17 °C	Cumple hasta ≈30 °C	Cumple hasta ≈29 °C	NC	NC	NC
Rigidez intermedia	10 cm	C	C	C	Cumple hasta ≈17 °C	C	C	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	15 cm	C	C	C	Cumple hasta ≈28 °C	C	C	Cumple hasta ≈12 °C	Cumple hasta ≈26 °C	C	NC	NC	NC
	20 cm	C	C	C	C	C	C	Cumple hasta ≈20 °C	C	C	NC	NC	NC
Rigidez Alta	10 cm	C	C	C	Cumple hasta ≈24 °C	C	C	NC	C	C	NC	NC	NC
	15 cm	C	C	C	C	C	C	Cumple hasta ≈16 °C	C	C	NC	NC	NC
	20 cm	C	C	C	C	C	C	Cumple hasta ≈25 °C	C	C	NC	Cumple hasta ≈20 °C	Cumple hasta ≈23 °C

** "C": El diseño cumple la deformación correspondiente o la deflexión para todas las temperaturas; y "NC" cuando no cumple para ninguna temperatura.*

Los resultados permiten afirmar que en la región Sierra, para un nivel de tránsito acumulado de ΣN = 1x10⁶, la mayoría de las configuraciones evaluadas mantienen el cumplimiento de los tres criterios de respuesta hasta la temperatura máxima considerada. La excepción corresponde a la estructura de baja rigidez con 10 cm de capa asfáltica, cuya deformación tangencial admisible se satisface únicamente hasta aproximadamente 29 °C. Para ΣN = 1×10⁷, el cumplimiento simultáneo de los criterios en todo el intervalo térmico se restringe a la estructura de rigidez intermedia con 20 cm de capa asfáltica y a la estructura de alta rigidez con espesores de 15 y 20 cm. Cuando el tránsito alcanza ΣN = 1×10⁸ o valores superiores, ninguna de las configuraciones permite satisfacer simultáneamente los tres criterios hasta la temperatura máxima regional, debido principalmente al comportamiento de la deformación tangencial en la base de la capa asfáltica.

4. CONCLUSIONES

Los resultados reflejan que el incremento de la temperatura del pavimento produce una modificación desfavorable de la respuesta estructural, asociada a la reducción progresiva del módulo de elasticidad de la capa asfáltica. Este efecto se manifiesta principalmente mediante el incremento de la deformación tangencial en la base de la capa asfáltica, mientras que la deformación vertical en la subrasante y la deflexión superficial presentan una menor sensibilidad relativa a la variación térmica.

El incremento de la rigidez de las capas inferiores y del espesor de la capa asfáltica permite reducir la magnitud de las deformaciones y ampliar el intervalo de temperaturas dentro del cual se cumplen los criterios de admisibilidad. Sin embargo, este efecto favorable no compensa completamente la pérdida de rigidez de la mezcla asfáltica a temperaturas elevadas, particularmente cuando aumenta el nivel de tránsito considerado para la verificación.

Los resultados permiten diferenciar dos aspectos del comportamiento analizado: por una parte, la variación de la temperatura modifica el módulo de la capa asfáltica y constituye el factor que determina la evolución de la respuesta estructural; mientras que, por otra, el nivel de tránsito establece la exigencia frente a la cual se verifica dicha respuesta mediante los límites admisibles. Bajo este enfoque, la deformación tangencial en la base de la capa asfáltica (εt) se convierte en el criterio más restrictivo del diseño entre los analizados ya que, para casi todas las estructuras y espesores deja de cumplirse a temperaturas menores que las correspondientes a la deformación vertical en la subrasante o la deflexión en la superficie del pavimento. Por su parte, la deflexión superficial (ΔZ) es el criterio menos exigente, ya que en mayores intervalos de temperatura cumple con la ley de fallo correspondiente para una misma configuración estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. L. You, N. Guo, Z. Long, F. Wang, C. Si, and A. Diab, "Appraising annual post-maintenance functional performance of asphalt roadway based on causal inference approach," in International Journal of Pavement Engineering, vol. 25, no. 1, pp. 2381060, 2024

2. L. Gao, Z. U. Din, K. Kim, and A. Senouci, "Time series transformer-based modeling of pavement skid and texture deterioration," in Construction Materials, vol. 5, no. 3, pp. 55, 2025

3. Y. Qiao, Y. Wang, S. Zhang, A. M. K. Stoner, and J. Santos, "Effects of 1.5°C global warming on pavement climatic factors and performance," in Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 136, no. 1, pp. 2024

4. Q. Fu, X. Chen, and X. Qiu, "Spatial distribution characterization of the Temperature-induced gradient viscoelasticity inside asphalt pavement," in Construction and Building Materials, vol. 346, no. 1, pp. 128454, 2022

5. M. J. Vámos and J. Szendefy, "Temperature effects on traffic load-induced accumulating strains in flexible pavement structures," in International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 19, no. 1, pp. 509-520, 2024

6. Y. Qin, X. Zhang, K. Tan, and J. Wang, "A review on the influencing factors of pavement surface temperature," in Environmental Science and Pollution Research, vol. 29, no. 45, pp. 67659-67674, 2022

7. S. Fan, H. Zhu, L. Lei, and Y. Pan, "Modeling temperature profile of asphalt mixture in semi-rigid pavement," in Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, vol. 84, no. 9, pp. 961-979, 2023

8. O. Ben Charhi and K. Baba, "Influence of temperature on the viscoelastic behavior and durability of flexible pavements," in Civil Engineering Journal, vol. 10, no. 7, pp. 2162-2176, 2024

9. A. Kumar, A. Gupta, K. Anupam, and W. A. A. S. Premarathna, "Analysis of nonlinear responses of asphalt pavements under overloading and tropical climate temperature conditions," in Construction Materials, vol. 22, no. 1, pp. e04760, 2025

10. O. Ben Charhi and K. Baba, "Influencia de la temperatura en el comportamiento viscoelástico y la durabilidad de los pavimentos flexibles," in Civil Engineering Journal, vol. 10, no. 7, pp. 2162–2176, 2024

11. J. Yang, G. Li, Y. Chen, Z. Yan, Y. Wang, S. Zhuang et al., "Temperature-dependent models for rutting performance of asphalt pavement surface layer materials under varying load conditions," in Materials, vol. 18, no. 20, pp. 4708, 2025

12. Y. Miao, J. Sheng, and J. Ye, "An assessment of the impact of temperature rise due to climate change on asphalt pavement in China," in Sustainability, vol. 14, no. 15, pp. 9044, 2022

13. G. Ren, A. Shen, H. Wu, H. Pan, S. Deng, and L. Wang, "Mechanical response of flexible asphalt pavement under large temperature difference and temperatures during four seasons," in Construction and Building Materials, vol. 437, no. 3, pp. 2024

14. J. Xu, N. Li, and T. Xu, "Temperature changes of interlaminar bonding layer in different seasons and effects on mechanical properties of asphalt pavement," in International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 15, no. 3, pp. 589-605, 2022

15. Y. Tan, Y. Jiang, C. Bai, H. Zhang, Y. Liang, W. Lou et al., "Rutting behavior of dual-layer asphalt pavements subjected to variable temperature," in Materials, vol. 18, no. 11, pp. 2603, 2025

16. P. Liu, X. Kong, C. Du, C. Wang, D. Wang, and M. Oeser, "Numerical investigation of the temperature field effect on the mechanical responses of conventional and cool pavements," in Materials, vol. 15, no. 19, pp. 6813, 2022

17. Z. A. Alkaissi, "Efecto de la alta temperatura y la carga de tráfico en el comportamiento de ahuellamiento de pavimentos flexibles," in Revista de la Universidad Rey Saud: Ciencias de la Ingeniería, vol. 32, no. 1, pp. 1-4, 2020

18. I. Adwan, A. Milad, Z. A. Memon, I. Widyatmoko, N. A. Zanuri, N. A. Memon et al., "Asphalt pavement temperature prediction models: A review," in Applied Sciences, vol. 11, no. 9, pp. 3794, 2021

19. M. T. Tiza, K. Jırgba, H. A. Sanı, and T. Sesugh, "Effect of thermal variances on flexible pavements," in en), Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, vol. 7, no. 3, pp. 220-230, September 2022

20. Z. Liu, L. Zhang, Y. Gao, Y. Dong, Y. Liu, and B. Li, "Mechanical response and fatigue life analysis of asphalt pavements under temperature-load coupling conditions," in Applied Sciences, vol. 15, no. 13, pp. 7441, 2025

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

21. M. Wang, H. Zhan, Y. Tan, and H. Xu, "Rheological properties and phase behaviour degradation of asphalt mastics under cyclic temperature variations," in International Journal of Pavement Engineering, vol. 24, no. 1, pp. 2224913, 2023

22. C. J. Obando, J. J. Karam, J. R. Medina, and K. E. Kaloush, "Thermal properties of asphalt pavements modified with a lightweight silica-based composite," in Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 35, no. 8, pp. 04023218, 2023

23. R. Ma, Y. Li, P. Cheng, X. Chen, and A. Cheng, "Low-temperature cracking and improvement methods for asphalt pavement in cold regions: A review," in Buildings, vol. 14, no. 12, pp. 3802, 2024

24. R. S. Benrazavi, K. Binti Dola, N. Ujang, and N. Sadat Benrazavi, "Effect of pavement materials on surface temperatures in tropical environment," in Sustainable Cities and Society, vol. 22, no. 1, pp. 94-103, 2016

25. P. Ilboudo, B. Soro, D. Dabilgou, B. Kaboré, J. M. Compaoré, S. Kam et al., "Experimental study of the evolution of temperatures in pavement structures and influence of traffic on the RN1 in Burkina Faso in a hot and dry climate," in Open Journal of Civil Engineering, vol. 13, no. pp. 303-316, 2023

26. C. R. Sanabria-Sanabria and C. H. Higuera-Sandoval, "Behavior of an asphalt mixture MDC-19 under the cycles of ambient temperature in the city of Tunja, Colombia," in Respuestas, vol. 24, no. 1, pp. 56–64, 2019

27. P. E. Vásquez-Álvarez, C. Flores-Vázquez, J.-C. Cobos-Torres, and S. L. Cobos-Mora, "Urban heat island mitigation through planned simulation," in Sustainability, vol. 14, no. 14, pp. 8612, 2022

28. Standard practice for grading or verifying the performance grade (PG) of an asphalt binder (AASHTO R 29-15), 2015

29. C. H. Higuera, "Leyes de comportamiento de la deflexión admisible en pavimentos flexibles," in Revista de la Facultad de Ingeniería, vol. 16, no. 22, pp. 7-14, 2007

30. A. Orobio and J. Gil, "Análisis de costos de construcción asociados al diseño racional de pavimentos con diferentes modelos de fatiga," in Revista ingeniería de construcción, vol. 30, no. 3, pp. 177-188, 2015