

Comportamiento De Las Estructuras De Pavimento Flexible Con Bases Tratadas Con Cemento

Behavior Of Flexible Pavement Structures With Cement-treated Bases

Autores

Ana Valeria Palacios Mendoza

Ing. Civil. Universidad Técnica de Manabí(UTM),Ecuador

valekz716@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-5031-708X>

Eduardo Tejeda Piusseaut

Dr. Ciencias Universidad Técnica de Manabí(UTM),Ecuador

eduardo.tejeda@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0589-9989>

Comportamiento De Las Estructuras De Pavimento Flexible Con Bases Tratadas Con Cemento

Behavior Of Flexible Pavement Structures With Cement-treated Bases

RESUMEN

En ingeniería de pavimentos, el tratamiento de las capas de base con cemento mejora la cohesión y resistencia de los agregados, generando pavimentos semirrígidos. Para evaluar el impacto del módulo de elasticidad de la base tratada, se diseñaron secciones con contenidos de cemento variables y espesores de base de 15 y 20 cm. Con un enfoque empírico-mecanicista, usando ALIZE LCPC bajo el eje AASHTO, se simularon esfuerzos y deformaciones en la carpeta asfáltica, la base y la subrasante. Para cada configuración, se calcularon esfuerzos de tracción y deformaciones tangenciales mediante modelos ICAFIR adaptados al clima de Manabí y a los materiales disponibles. Los resultados mostraron que los esfuerzos de tracción en la base son casi independientes de su resistencia y espesor. Sin embargo, al aumentar el módulo de elasticidad de la base, fue necesario engrosar la carpeta asfáltica para mantener las tensiones admisibles. Con una base de 15 cm, elevar el módulo implicó aumentar la carpeta de 13 a 20 cm, reduciendo ligeramente la deformación tangencial y aumentando la rigidez en tracción compresión. En contraste, con base de 20 cm, el aumento de rigidez permitió reducir el espesor de la carpeta de 14 a 7 cm sin exceder la tensión permisible, además de disminuir las deformaciones superficiales. Estos hallazgos sugieren que, en bases delgadas, conviene reforzar la carpeta asfáltica al mejorar la rigidez de la base tratada. En bases más gruesas, es posible optimizar el espesor de la superficie, logrando economías de material sin comprometer el desempeño estructural.

ABSTRACT

In pavement engineering, treating base layers with cement improves aggregate cohesion and strength, generating semi-rigid pavements. To evaluate the impact of the elastic modulus of the treated base, sections with varying cement contents and base thicknesses of 15 and 20 cm were designed. Using an empirical mechanistic approach, using ALIZE LCPC under the AASHTO axis, stresses and strains in the asphalt layer, base, and subgrade were simulated. For each configuration, tensile stresses and tangential strains were calculated using ICAFIR models adapted to the Manabí climate and available materials. The results showed that tensile stresses in the base are almost independent of its strength and thickness. However, as the elastic modulus of the base increased, it was necessary to thicken the asphalt layer to maintain allowable stresses. With a 15 cm base, increasing the modulus involved increasing the asphalt layer from 13 to 20 cm, slightly reducing tangential deformation and increasing tensile and compressive stiffness. In contrast, with a 20 cm base, the increased stiffness allowed the layer thickness to be reduced from 14 to 7 cm without exceeding the allowable stress, in addition to reducing surface deformations. These findings suggest that, on thin bases, reinforcing the asphalt layer is advantageous by improving the stiffness of the treated base. On thicker bases, surface thickness can be optimized, achieving material savings without compromising structural performance.

Palabras clave: diseño de pavimentos, pavimentos semirrígidos, Grava-cemento, método empírico-mecanicista.

Keywords: pavement design, semi-rigid pavements, gravel-cement, empirical-mechanistic method.

Nota Editorial: Recibido: 7 de Junio 2025 Aceptado: 17 de Septiembre 2025

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los deterioros más frecuentes en las estructuras de pavimento es la deformación progresiva de las distintas capas que conforman el paquete estructural. Si bien estas deformaciones suelen ser inicialmente de baja magnitud, el efecto acumulativo del tráfico, —específicamente, la repetición cíclica de cargas sobre un mismo punto a lo largo del tiempo— puede provocar que las tensiones superen los valores admisibles de los materiales, lo que conlleva a la aparición de fenómenos como la fatiga y las deformaciones permanentes [1, 2].

La estabilidad de los materiales empleados en las capas del pavimento es una propiedad que se refiere a su capacidad para resistir los esfuerzos de compresión inducidos por el tránsito vehicular sin experimentar deformaciones perjudiciales para su funcionamiento estructural. Esta propiedad depende en gran medida del rozamiento interno entre los agregados y se alcanza mediante la conformación de un esqueleto mineral resistente y una adecuada compactación, que permita minimizar las deformaciones inducidas por las cargas de tráfico [3].

Las capas de base y subbase en la estructura del pavimento suelen estar constituidas por áridos no ligados, debido a la menor influencia de las cargas horizontales. Diversos estudios han evidenciado que factores como el contenido de finos, la densidad máxima y el tipo de agregado influyen significativamente en las propiedades mecánicas de estos materiales. Asimismo, otras variables como la forma y resistencia de las partículas individuales, así como la energía de compactación, también afectan de manera importante su comportamiento mecánico [4].

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas técnicas orientadas a mejorar las propiedades mecánicas de las capas de base, mediante la incorporación de materiales estabilizantes que, al ser homogéneamente mezclados con los agregados, permiten alcanzar los niveles de resistencia requeridos. Entre estos aditivos destaca el cemento, ampliamente utilizado como agente estabilizante desde su primera aplicación en pavimentos en Carolina del Sur, Estados Unidos, en 1953 [5], [6].

En la actualidad, el uso de cemento en pavimentos flexibles de alto volumen de tránsito se ha incrementado notablemente, debido a la escasez de materiales granulares que cumplen con las especificaciones técnicas requeridas. Al combinarse con agregados de materiales granulares de base, el cemento actúa como aglomerante, aportando cohesión y mayor resistencia, transformando la estructura en un pavimento semirrígido. Esta mezcla es conocida comúnmente como grava-cemento [7], [8].

La estabilización con cemento es un proceso mediante el cual se incrementan significativamente las propiedades mecánicas del suelo, especialmente la resistencia a la compresión y la cohesión interna. Además, la hidratación del cemento contribuye a la formación de una matriz menos permeable, al llenar los espacios intergranulares con productos de hidratación [9].

La referencia [10] presenta una revisión bibliográfica sobre la importancia de las capas de base y subbase en pavimentos, destacando el enfoque predominante en materiales tratados con cemento frente a los tradicionales no aglomerados. Este interés responde a los aumentos significativos en resistencia mecánica y capacidad de carga que ofrecen. Además, se analiza su impacto en la optimización de costos, al permitir la reducción de espesores estructurales. Sin embargo, se señala la falta de estudios sobre su comportamiento a largo plazo bajo condiciones reales de tráfico.

Algunos materiales no cumplen inicialmente con las especificaciones para su uso en capas de pavimento; no obstante, pueden corregirse mediante ajustes en su granulometría o plasticidad antes de aplicar el cemento. La investigación [11] expone un caso en el que un material destinado a subbase no cumplía con los requisitos de plasticidad, pero fue mejorado mediante la incorporación de arena de mar. Esta corrección permitió adecuar la granulometría, reducir la plasticidad y, tras el tratamiento con cemento, multiplicar por cuatro su resistencia (CBR) respecto al material original.

De forma similar, la mezcla de un material granular con arena de playa permitió corregir su granulometría. Al incorporar cemento, se observó un aumento en la densidad máxima y en la resistencia CBR. La adición de arena redujo la plasticidad del material al disminuir el contenido de finos (tamiz No. 40), lo que mejoró su desempeño bajo condiciones de saturación por inmersión [12].

Con el fin de evaluar si un material plástico inerte puede mejorar las propiedades mecánicas de una base granular, se estudió en laboratorio la resistencia a la compresión de mezclas con cemento y fibras recicladas de PET. Se emplearon dos materiales granulares: uno conforme a las especificaciones para base y otro fuera de norma por su granulometría. Los resultados indicaron que pequeñas cantidades de PET mejoran la densidad, pero su exceso genera desplazamiento de agregados y reduce la compactación. En general, el cemento tuvo un efecto más significativo en la resistencia que la adición de fibras plásticas [13].

El uso de emulsiones asfálticas para estabilizar materiales granulares en capas de base o subbase es una alternativa técnicamente viable. Sin embargo, al comparar su desempeño con el del cemento en un material granular de baja resistencia, ambos métodos mejoraron significativamente la capacidad estructural, pero el cemento mostró una mayor efectividad, incluso con dosificaciones bajas. En ambos casos se redujo el espesor requerido de las capas, aunque la estabilización con cemento resultó más eficiente y rentable frente a la opción sin tratamiento [14].

En Ecuador, la normativa MOP 2022 clasifica cuatro tipos de bases según el nivel de tránsito de la vía [15]. En las canteras del suroeste de Manabí, donde se explotan entre 7 000 y 9 000 m³ mensuales a cielo abierto, se obtiene material apto para producir Bases Clase 1A, destinadas a vías de alto tránsito [16]. Con base en su granulometría y desempeño, se propone su tratamiento con cemento, respaldada por estudios de Holcim que demuestran su eficacia [17]. Según esta empresa, dosificaciones de entre 4% y 8% permiten cumplir con las resistencias normativas, reducir la plasticidad, reducir la humedad óptima y mejorar la rigidez del material.

El presente artículo tiene como objetivo evaluar el comportamiento estructural del pavimento con capas de base tratadas con cemento. Para ello, se realizaron modelaciones computacionales en el software ALIZE, considerando diferentes resistencias posibles y espesores, con el propósito de identificar configuraciones que aseguren un adecuado desempeño estructural y deformaciones mínimas bajo cargas repetidas.

2. VARIABLES DE DISEÑO DE PAVIMENTO

Con el fin de evaluar la influencia del módulo de elasticidad de la capa tratada con cemento en una estructura semirrígida, se han desarrollado diversos diseños en los que se varía la resistencia de la base tratada mediante el incremento del porcentaje de cemento incorporado en las mezclas. El propósito consiste en generar diferentes combinaciones de espesores en las estructuras, considerando dos valores de espesor de base (15 y 20 cm), que permitan analizar las variaciones en las tensiones y deformaciones provocadas por la carga en la carpeta asfáltica, la base tratada y la subrasante. En estos diseños se han mantenido constantes el tráfico de diseño, la resistencia de la subrasante y la del material de subbase, mientras que la resistencia de la capa tratada se modifica en función del contenido de cemento añadido.

2.1. Tráfico de Diseño

La red vial de Ecuador se organiza en redes primarias, secundarias y locales, las cuales permiten la conectividad y movilidad dentro de cada cantón. La Tabla 1 presenta una jerarquización de las vías según su funcionalidad, donde cada tipo de vía se identifica con la letra "T" seguida de un número, asignado en orden decreciente según su categoría.

Tabla 1: Clasificación de la red vial de la ciudad de Portoviejo.

Jerarquía vial	Características
Primarias (T1)	Asume la movilidad principal de ingreso a la ciudad y la conectividad entre zonas.
Secundarias (T2)	Para la conectividad entre barrios con transporte multimodal.
Barrio (T3)	Asume la movilidad interna de los barrios con prioridad para el transporte no motorizado.

Los volúmenes de tráfico correspondientes a cada una de las categorías previamente definidas fueron obtenidos del Plan de Gestión de Pavimentos y Nomenclatura Vial de la Ciudad de Portoviejo. Dichos valores fueron proyectados al año de estudio (2022) mediante un análisis de crecimiento vehicular, empleando las tasas de incremento establecidas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Con base en esta proyección, se establecieron rangos posibles para el tráfico de diseño en cada categoría, para un periodo de servicio de 10 años, calculando el número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas conforme a la metodología establecida por la norma AASHTO-93 [18]. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Número de ejes equivalentes (8.2 ton) en función del tipo de vía de la ciudad de Portoviejo.

Jerarquía vial	Número de ejes equivalentes (8.2 ton) en el periodo de servicio en el carril de diseño
Primarias (T1)	5x10 ⁶ a 10 x10 ⁶
Secundarias (T2)	5x10 ⁵ a 5x10 ⁶
Barrio (T3)	< 5x10 ⁵

2.2. Resistencia De La Subrasante

La resistencia de los suelos de subrasante constituye un factor fundamental en el diseño de pavimentos. En el cantón Portoviejo predominan suelos limo-arcillosos de alta plasticidad, con valores del Índice de Soporte de California (CBR, por sus siglas en inglés) que varían entre el 2 % y el 10 %. A partir de estos valores, se han clasificado las subrasantes en distintas categorías según el CBR de diseño y su correspondiente módulo resiliente, calculado mediante la ecuación empírica de la AASHTO ($MR = 10 \times CBR$). Para este estudio se adoptó un CBR de 5 %, lo que corresponde a una subrasante tipo S2, con un módulo resiliente medio de 45 MPa.

Tabla 3: Niveles de Subrasante en función del CBR.

Tipo de Subrasante	CBR (%)	Módulo Resiliente (MPa)
Subrasante (S1)	2	20
Subrasante (S2)	3-6	45
Subrasante (S3)	7-10	85
Subrasante (S3)	10	100

2.3. Caracterización de la base estabilizada con cemento

Para considerar el aporte estructural de la capa de base tratada con cemento se adoptaron los criterios del método de la Portland Cement Association (PCA, 1992) [19], en el que se define el diseño de los materiales aglomerados con cemento mediante ensayos de laboratorio realizados en probetas elaboradas con la mezcla del material y diversos porcentajes de cemento. Este procedimiento se estructura en dos etapas. En la primera, se determina la humedad óptima utilizando la relación humedad-densidad conforme a la norma AASHTO-T134 [20], estableciendo para cada porcentaje de cemento la correspondencia entre el contenido de humedad y la densidad de las mezclas de material tratado con cemento compactadas previamente a la hidratación. En una segunda etapa, se preparan probetas con cada contenido de cemento y teniendo en cuenta el porcentaje óptimo de humedad para ese contenido, para someterlas al ensayo a compresión simple tras el curado. La norma del Ecuador MOP-2002 [15] establece una resistencia mínima de 25 kg/cm² a los 7 días de curado.

Según la Portland Cement Association (PCA), al aumentar el contenido de cemento en las bases tratadas, se incrementa significativamente su módulo de elasticidad. La normativa AASHTO-93 [21] establece coeficientes de equivalencia estructural aplicables al diseño de pavimentos con materiales mejorados con cemento, en función de la resistencia a la compresión obtenida a los 7 días de curado. Para una base estabilizada con cemento, dicho coeficiente estructural se sitúa en un rango de 0,20 a 0,25 (pulg⁻¹). El módulo resiliente del material puede estimarse a partir de su resistencia a la compresión y del porcentaje de cemento empleado, como se indica en la Tabla 4. Estos valores permiten aproximar de manera confiable la capacidad estructural de las capas tratadas, en función de la dosificación de cemento utilizada.

Tabla 4: Módulo resiliente de materiales mejorados con cemento en función de la resistencia a compresión.

% de cemento en la Base	Resistencia a compresión a los 7 días de curado		Módulo Resiliente (MPa)	
	kg/cm ²	MPa	psi	MPa
4	38,2	2,4	775867	5351
5	43,3	4,2	880186	6070
6	47,7	4,7	969665	6687
7	53,0	5,2	1077541	7431
8	59,1	5,8	1201409	8286

2.4. Mezcla Asfáltica, Materiales De Base Y Subbase

Para los materiales que conforman la estructura del pavimento se ha considerado como capa de superficie una compuesta de hormigón asfáltico en caliente. Para la carpeta asfáltica, se evaluaron tres espesores distintos (10, 7,5 y 5 cm), seleccionados con base en valores comúnmente utilizados en soluciones de pavimentación en Ecuador. El módulo resiliente adoptado para la mezcla asfáltica es de 2600 MPa, determinado a partir de un estudio previo para una temperatura promedio de operación de 45 °C, valor representativo de las condiciones térmicas máximas esperadas en la provincia de Manabí, con una probabilidad del 50 %. Para la subbase, se consideró un material clasificado como Clase III (SB3), con un valor mínimo de CBR del 30 %, conforme a las especificaciones técnicas nacionales, y un módulo resiliente de 105 MPa.

2.5. Condiciones Medioambientales

En los diseños se ha considerado el período del año en que las condiciones ambientales son más desfavorables, comprendido entre los meses de diciembre y mayo, cuando se registran las mayores precipitaciones. Durante este período, las humedades de los suelos de la explanación y de las capas no aglomeradas del pavimento alcanzan sus niveles más altos. Este factor se ha tenido en cuenta para considerar en el cálculo la resistencia de los suelos y de los materiales no aglomerados en la estructura.

3. DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS

La metodología empleada para el cálculo de los espesores del pavimento se basa en un enfoque empírico mecánico. Este procedimiento comienza con la determinación de la respuesta estructural ante la carga aplicada, para lo cual se utilizó el software ALIZE-LCPC, desarrollado por el Laboratorio de Carreteras y Puentes de Francia [22]. En cada estructura propuesta, se calcularon las tensiones y deformaciones generadas por la carga por eje de diseño de la AASHTO, para luego determinar, mediante un proceso iterativo y con los modelos empíricos de comportamiento, los espesores de cada capa para el tráfico de diseño correspondiente.

El modelo de referencia utilizado para obtener las respuestas estructurales se presenta en la Figura 1. Para el cálculo de la respuesta estructural, se definen un conjunto de condiciones iniciales comunes a todas las alternativas, tales como la carga, la presión de inflado, el radio circular equivalente y la relación de interacción entre capas.

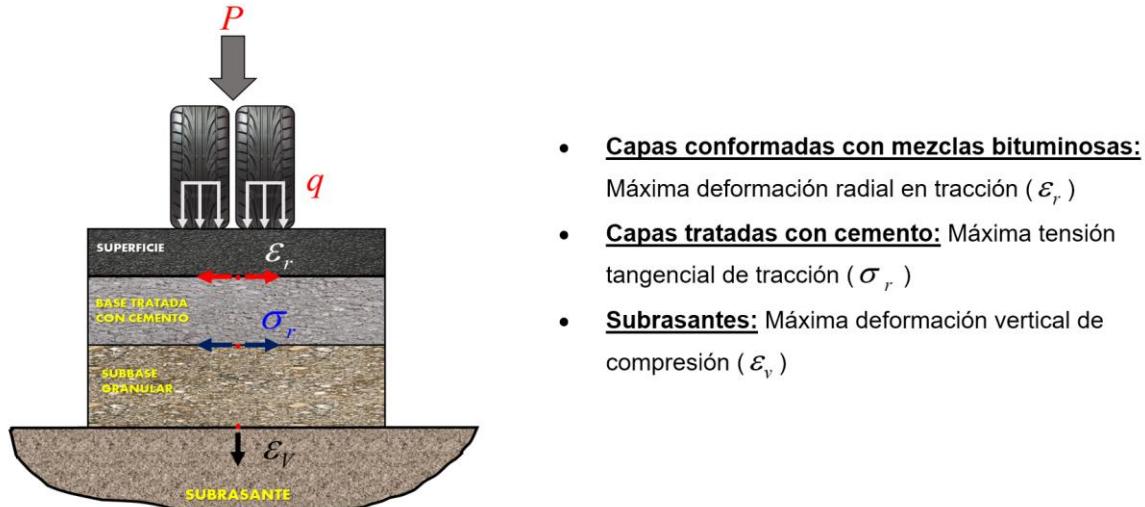


Figura 1: Esquema representativo del modelo de respuesta

El peso de los vehículos se transmite al pavimento a través del número de ruedas, distribuyéndose en un área que depende principalmente de la presión de contacto entre el neumático y la superficie del pavimento. En los métodos mecánicos, estas solicitudes se representan mediante el área de contacto y la presión ejercida [23] [24]. La norma de diseño considera como eje de cálculo un eje simple con ruedas duales, es decir, con cuatro ruedas, que soportan un peso total de 8200 kg. Para determinar la carga, se calcula un área circular equivalente formada por las ruedas duales, considerando una separación entre ruedas de 30,5 m. El radio de la carga transmitida por cada rueda puede determinarse a partir de la carga por rueda (2050 kg) y la presión de contacto entre el neumático y la superficie, tomada como la presión de inflado de 6.8 kg/cm² (0.68 MPa). La Figura 2 resume el cálculo del radio circular equivalente, el cual es aproximadamente de 10 cm.

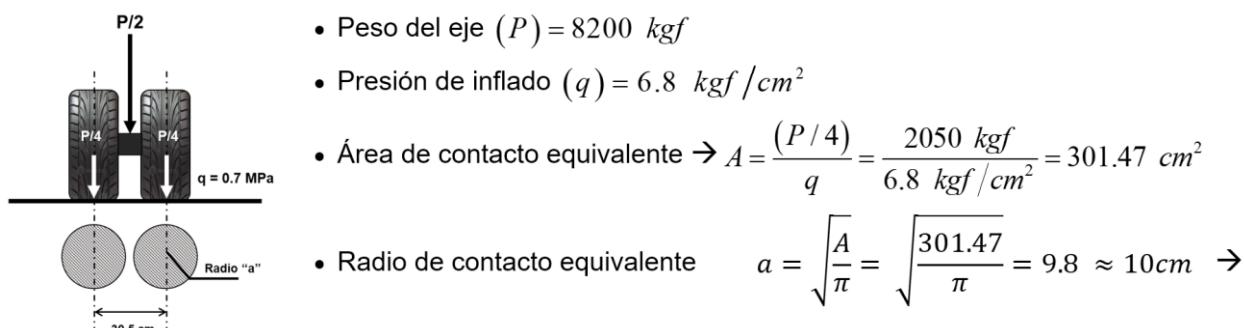


Figura 2: Determinación del área circular equivalente

En el modelo de ALIZE, es necesario establecer la relación de interacción entre las capas que componen la estructura del pavimento. En este contexto, se definió como "vinculadas" aquellas interacciones en las que las capas son no aglomeradas, como es el caso de la subbase-subrasante. En el caso de las capas estabilizadas con cemento, debido a la diferencia en rigideces, la distribución de esfuerzos varía, y por tanto no existe compatibilidad de desplazamientos en la interacción, por lo que esta relación se considera como "no vinculada".

Para el dimensionamiento, se aplica el principio del método empírico-mecanicista, comparando los valores admisibles con los valores esperados según cada ley de fallo del material en cada capa. Se determina, por tanto, el número admisible de aplicaciones de carga (N), el cual debe ser superior al tráfico equivalente esperado durante el periodo de diseño del proyecto.

En las estructuras flexibles, conformadas por una carpeta asfáltica (CA) y capas de base y subbase no aglomeradas, los valores admisibles que deben verificarse corresponden a la deformación tangencial en el fondo de la carpeta asfáltica y a la deformación vertical en la parte superior de la subrasante. Por su parte, en las estructuras semirrígidas, donde se emplea una base aglomerada con cemento (BC), además de revisar las deformaciones admisibles en la carpeta asfáltica y en la subrasante, se incorpora la evaluación de las tensiones de tracción por flexión en las fibras inferiores de la capa tratada.

En este estudio, se han utilizado los modelos de ICAFIR (Instrucción de Diseño de Firmes de la Comunidad de Andalucía) [25], los cuales se ajustan a las condiciones climáticas de los diseños y a los materiales disponibles en la región de Manabí. En la Tabla 5 se muestran las leyes de fallo o de comportamiento empleadas, las cuales se seleccionan en función del tipo de material utilizado en cada capa de la estructura y en la subrasante.

Tabla 5: Modelo de comportamiento de ICAFIR

Variable	Modelo
Acumulación de deformaciones permanentes en la subrasante	$\varepsilon_v = 2.16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.28}$
Acumulación de deformaciones permanentes en mezclas bituminosas	$\varepsilon_r = 6.920 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0.27243}$
Acumulación de tensiones tangenciales en materiales tratados con cemento (Fatiga)	$\sigma_r(MPa) = 0.72 \cdot (1 - 0.065 \cdot \log N)$

3.1. Diseño De La Estructura Flexible

En este estudio se comparan los espesores calculados para estructuras semirrígidas que incorporan capas aglomeradas con cemento, con el objetivo de analizar la influencia del uso de gravamento en los diseños. Para cuantificar mejor este efecto, se contrastan las estructuras semirrígidas con una estructura flexible, en la que las capas no están aglomeradas. Asimismo, se evalúa cómo el incremento en el contenido de cemento impacta en los espesores obtenidos.

Para el estudio, se seleccionó el tráfico estimado en las vías de mayor jerarquía vial (Primaria T1, con un rango de 5×10^6 a 10×10^6). En la subrasante, se consideró un Módulo Resiliente de 50 MPa, correspondiente a un CBR de 5%, valor que se considera como mínimo en varias normas de diseño.

La Tabla 6 presenta los resultados de los cálculos de los espesores de las capas en una estructura flexible, que cuenta con una base y subbase granular con módulos de resilientes de 600 MPa y 300 MPa, respectivamente. El valor admisible de deformación en la subrasante, según la ley de fallo y para el tráfico de diseño de 5×10^6 ejes equivalentes, es de $287,57 \times 10^{-6}$. Como se puede observar, el valor obtenido en la subrasante, para los espesores adoptados, es inferior, alcanzando un valor de $207,6 \times 10^{-6}$. La revisión de la carpeta asfáltica también muestra valores inferiores al valor admisible de la deformación tangencial para esos espesores de capa, obteniendo un valor de $100,4 \times 10^{-6}$, que es inferior al valor admisible de $103,54 \times 10^{-6}$.

Tabla 6: Resultados del cálculo de la estructura flexible, con base y subbase granular.

Paquete estructural	Espesores (cm)	Módulo (MPa)	Coeficiente de Poisson	Parámetros	Valores permisibles	Valores calculados (Alize)
Superficie	17	2600	0,33	Deformación tangencial	$103,54 \times 10^{-6}$	$100,4 \times 10^{-6}$
Base	20	600	0,35			
Subbase	35	300	0,35			
Subrasante		50	0,35	Deformación vertical	$287,57 \times 10^{-6}$	$207,6 \times 10^{-6}$

3.2. Análisis De Los Diseños De Las Estructuras Semirrígidas

En cuanto a la resistencia de las bases tratadas, se ha tenido en cuenta la influencia del porcentaje de cemento añadido a las mezclas, lo que afecta directamente los valores de resistencia de la capa aglomerada. El incremento en el contenido de cemento provoca un aumento en la resistencia de la capa tratada. Así, para porcentajes de cemento añadidos a la mezcla del 4, 5, 6, 7 y 8%, los valores del módulo resiliente de la capa tratada son respectivamente: 5351 MPa, 6070 MPa, 6687 MPa, 7481 MPa y 8286 MPa.

Se han evaluado un total de 11 estructuras diferentes, en las que se mantiene constante el espesor de la capa de Subbase Clase III (40 cm), mientras que el espesor de la capa tratada varía según el cumplimiento de los valores admisibles establecidos por la ley de fallo en relación con el tráfico de diseño.

En la tabla 7 se muestran los cálculos para las estructuras semirrígidas, empleando espesores de capas tratadas de 15 y 20 cm. En el dimensionamiento del pavimento es esencial confirmar que la deformación vertical en la subrasante, derivada de la carga aplicada, se mantenga por debajo del límite admisible establecido según la ley de fallo utilizada y el tráfico de diseño. En este caso, el valor máximo permitido es de $287,6 \times 10^{-6}$. Se ha observado que el aumento en la resistencia de la base tratada, sin modificar el espesor de la base, resulta en una reducción de la deformación vertical en la subrasante. Esto se explica porque cada incremento en el módulo de elasticidad exige el correspondiente aumento del espesor requerido de la carpeta asfáltica, lo que reduce progresivamente las tensiones transmitidas a la subrasante, independientemente del espesor de la base empleada. En la figura 5 se pueden ver las variaciones experimentadas en la deformación vertical de la subrasante con los diseños.

Tabla 7: Resultados del cálculo de estructuras semirrígidas con tratada y subbase granular.

BASE TRATADA CON CEMENTO DE ESPESOR 15 cm					
% Cemento	Espesor de superficie (cm)	Módulo de base tratada (MPa)	Deformación tangencial en superficie	Tensión tangencial en la base	Deformación vertical en subrasante
4	13	5351	-0,8	-0,396	184,9
5	14	6070	0,8	-0,4	174,9
6	16	6687	1	-0,4	160,1
7	18	7431	1,5	-0,4	144,6
8	20	8286	1,9	-0,398	132,3
BASE TRATADA CON CEMENTO DE ESPESOR 20 cm					
% Cemento	Espesor de superficie (cm)	Módulo de base tratada (MPa)	Deformación tangencial en superficie	Tensión tangencial en la base	Deformación vertical en subrasante
4	7	5351	12,4	-0,402	184,9
5	9	6070	7,4	-0,4	167,3
6	10	6687	6,7	-0,4	158,3
7	12	7431	5,4	-0,4	144,6
8	14	8286	5,1	-0,398	134,7

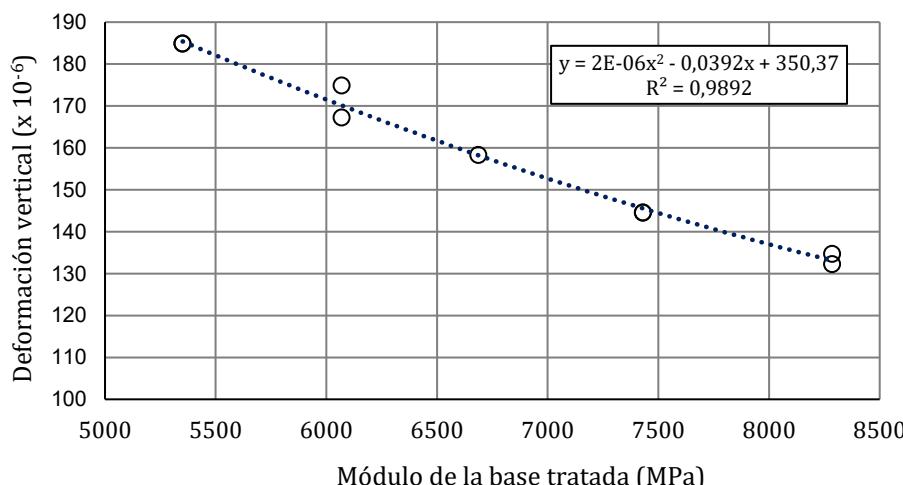


Figura 3. Variación de la deformación vertical en la subrasante con los incrementos de la resistencia de las bases aglomeradas, considerando los espesores de 15 y 20cm.

De acuerdo con la ley de fallo aplicada en el diseño para bases tratadas con cemento y considerando un tráfico de 5×10^6 ejes equivalentes, la tensión de tracción admisible es de 0,406 MPa. En los diseños realizados, los esfuerzos a tracción se han observado como independientes de la resistencia y el espesor de la base tratada, presentando un valor promedio de 0,4 MPa, inferior al límite permitido. Es preciso señalar que, para mantener constante dicho esfuerzo, independientemente de las variaciones en las resistencias del material de base, ha sido necesario incrementar el espesor de la carpeta asfáltica.

Con el incremento del módulo de elasticidad de la base, originado por el mayor porcentaje de cemento, se requiere, en un espesor de base de 15 cm, aumentar el espesor de la capa superficial (de 13 a 20 cm) para garantizar que el esfuerzo permisible de tracción en la base sea adecuado. Este ajuste provoca una leve variación en la deformación tangencial de la superficie, modificando el comportamiento de tracción a compresión conforme incrementa la resistencia de la base tratada.

Por otro lado, al emplear una base de 20 cm de espesor y aplicar los mismos incrementos en la resistencia del material tratado, se observa una reducción significativa en el espesor de la capa superficial, alcanzando valores entre 7 y 14 cm.

Este mayor espesor de superficie resulta determinante para asegurar que el esfuerzo permisible de tracción en la base se cumpla, produciendo en este caso una reducción de las deformaciones tangenciales en la superficie asfáltica. En la Figura 6 se muestran estas variaciones para los espesores utilizados en la base tratada, de 15 y 20 cm.

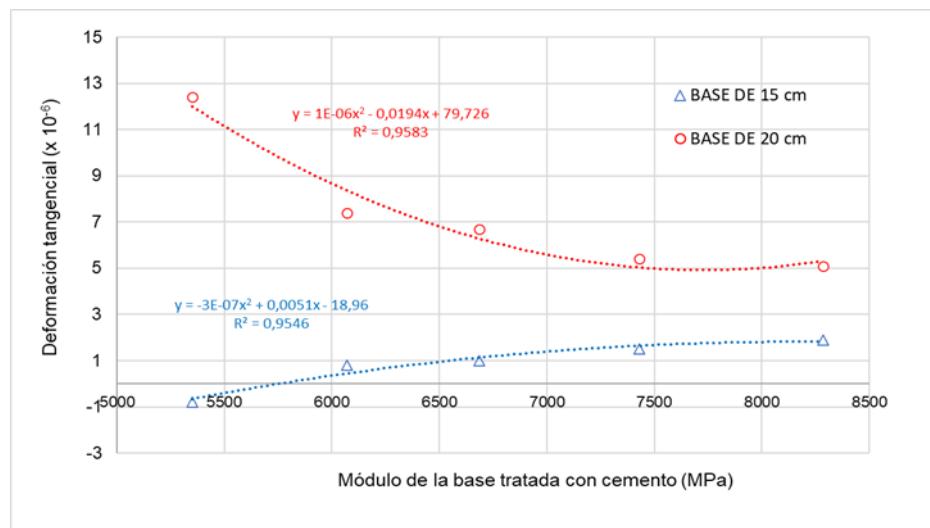


Figura 4. Variación de la deformación tangencial en la carpeta asfáltica con el incremento de la resistencia de la base aglomerada

El aumento en el porcentaje de cemento en la mezcla mejora significativamente la resistencia de la base tratada, reflejándose en valores crecientes del módulo resiliente. Esta mejora estructural permite diseñar pavimentos más eficientes frente a cargas pesadas.

A mayor módulo resiliente de la base tratada, menor es la deformación vertical inducida en la subrasante, lo que se traduce en una mayor durabilidad de la estructura, ya que se reduce el riesgo de fallos por deformación excesiva.

Para mantener las tensiones dentro de los límites permisibles (especialmente la tracción en la base tratada), es necesario modificar el espesor de la carpeta asfáltica. A medida que aumenta la rigidez de la base, también debe incrementarse el espesor de la superficie para disipar adecuadamente las tensiones.

Con una base tratada de 15 cm, es necesario incrementar considerablemente el espesor de la carpeta asfáltica (de 13 a 20 cm) para cumplir con los criterios de diseño. Sin embargo, al aumentar el espesor de la base a 20 cm, se logra una reducción sustancial en el espesor requerido de la superficie (de 14 a 7 cm), lo que mejora la capacidad estructural del diseño.

La correcta combinación de espesor y resistencia de la base tratada permite optimizar el diseño del pavimento, logrando un equilibrio entre durabilidad y economía. El aumento del espesor de la base permite disminuir la carpeta asfáltica sin comprometer el desempeño estructural, reduciendo deformaciones superficiales y cumpliendo con los esfuerzos admisibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. K. A. Mayorga-Ribero, M. K. Gambús-Ordaz, M. F. Palencia-Muñoz, and D. F. Suárez-Arias, "Numerical modeling to evaluate tensile mechanical and shear failure of cement in the casing-cement interface," *Dyna*, vol. 89, no. 221, pp. 41-49, 2022. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.98464>
2. H. Sharafi and M. Shekarbeigi, "Experimental evaluation of the behavior of Sandy Soil–Cement Mixture," *Revista Ingeniería UC*, vol. 26, no. 3, pp. 258-272, 2019. ISSN: 1316–6832, Online ISSN: 2610-8240.
3. G. S. Massenlli and C. E. de Paiva, "Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 27, no. 4, pp. 613-624, 2019. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000400613>
4. Thai, H. N., Kato, A., Nguyen, H. G., Nguyen, T. D., Tong, T. K., Nguyen, V. T., ... & Kawamoto, K. (2021). Effects of particle size and type of aggregate on mechanical properties and environmental safety of unbound road base and subbase materials: A literature review. *Geomaté Journal*, 20(78), 148-157. (4). DOI: <https://doi.org/10.21660/2021.78.GX281>
5. H. Ge, J. C. Quezada, V. Le Houerou, and C. Chazallon, "Multiscale analysis of tire and asphalt pavement interaction via coupling FEM–DEM simulation," *Engineering Structures*, vol. 256, p. 113925, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113925>
6. R. Visairo-Méndez, A. A. Torres-Acosta, and R. Alvarado-Cárdenas, "Specimen size effect on the durability indexes determination for cement-based materials," *Revista ALCONPAT*, vol. 9, no. 3, pp. 288-302, 2019. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i3.381>
7. E. H. Sánchez Cotte and G. Torres Chueco, "Desempeño de un material granular estabilizado con cemento cuando se aplica carga a compresión," *Tecnura*, vol. 23, no. 60, pp. 59-71, 2019. <https://doi.org/10.14483/22487638.14640>
8. D. R. Biswal, U. C. Sahoo, and S. R. Dash, "Mechanical characteristics of cement stabilised granular lateritic soils for use as structural layer of pavement," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, no. 5, pp. 1201-1223, 2020. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1545687>
9. F. D. Q. Pesántez, M. B. Á. Calle, and C. J. C. Castro, "Análisis de costos entre estabilización suelo cemento y el mantenimiento periódico de vías rurales en la Provincia del Cañar," *Dominio de las Ciencias*, vol. 7, no. 1, p. 14, 2021. <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i1.1678>
10. Suryawanshi, A. A., & Pale, P. (2022). A review on a study of importance in base and sub-base layers of road pavement. *International journal of advances in engineering and management (IJAEM)*, 4(1456). DOI: <https://doi.org/10.35629/5252-040514561458>
11. Morales-Hidalgo, J. P., Ortiz-Hernández, E. H., & Intriago-Álava, C. I. (2023). Mejoramiento de material granular con cemento tipo MH y agregados finos de arena de playa proveniente de la costa en la provincia Manabí. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*. ISSN: 2737-6249., 6(11 Ed. esp.), 2-15. <https://doi.org/10.46296/ig.v6i11edespfeb.0085>
12. Alexander, G. G. V., & Hernández, E. O. (2023). Combinación granulométrica de material granular con agregados finos de arena de playa proveniente de la costa en la Provincia de Manabí para el mejoramiento de subbases. *Polo del Conocimiento*, 8(6), 1399-1422. DOI: <https://doi.org/10.23857/pc.v8i6>
13. Carballo Rojas, M., Gallardo Mejía, M. D. C., & Murillo Chacón, M. (2023). Análisis de una base granular estabilizada con cemento y adición de fibras de PET reciclado. *Infraestructura Vial*, 25(44), 75-84. DOI: <https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.54855>
14. Surita Gil, L. E., Fernández Huamán, R. I., & Chahuares Paucar, L. (2023). Aporte estructural de capa base granular estabilizada con cemento Portland tipo I versus emulsión asfáltica catiónica para vías urbanas. *Gaceta Técnica*, 24(2), 4-22. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica242.2> (14)
15. MOP-2002, "Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes," 2002.(15)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

16. B. E. V. Hernández and W. E. R. Párraga, "Estudio de los agregados pétreos de las canteras de Manabí y la dosificación del hormigón en la construcción de viviendas de interés social," Polo del Conocimiento, vol. 7, no. 7, pp. 1506-1522, 2022. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i7> (16)
17. H. E. S.A., "Soluciones en cemento: HOLCIM Base Vial Ficha Técnica," 2016. <https://es.scribd.com/document/474650894/TIPO-MH> (17)
18. Quintana, H. A. R., & Lizcano, F. A. R. (2023). Pavimentos-2da edición: Materiales, construcción y diseño. ECOE ediciones (18). ISBN (electrónico): 978-958-5473-45-4
19. Soil-Cement Laboratory Handbook, 2001. <https://trid.trb.org/view/349961> (19)
20. ASHTO T 134. Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soil–Cement Mixtures
21. AASHTO, A. A. (1993). Guide for Design of Pavement Structures 1993. Washington, D.C: AASHTO.
22. IFSTTAR. (2016). Alizé-LCPC, Software for pavement structures analysis and design, Saint-Maurice, France. [Online]. Available. <https://www.alize-lcpc.com/>
23. F. M. H. López, "Procedimiento para el diseño por fatiga de pavimentos de hormigón simple para carreteras en Cuba," Phd Thesis, Universidad Técnica de La Habana CUJAE, La Habana, Cuba, 2016. <https://www.researchgate.net> › publication
24. R. M. Martínez, E. T. Piusseaut, and F. M. H. López, "Estimación del módulo de elasticidad equivalente en la superficie del conjunto de subbase y subrasante como cimiento para proyectos de reciclado en Cuba," Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, no. 215, pp. 74-81, 2017. ISSN 0212-6389
25. ICAFIR. Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, 2007. <https://www.juntadeandalucia.es>