

**Pavimentos Perpetuos y su Factibilidad Técnica en Colombia**

**Oscar Javier Lozano Pineda**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
2015**

**Pavimentos Perpetuos y su Factibilidad Técnica en Colombia**

**Oscar Javier Lozano Pineda**

**Monografía de grado como requisito para optar al título de ingeniero civil**

**Director (a):  
Norma Cristina Solarte Vanegas**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
2015**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

**Presidente del jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Bucaramanga, Febrero 1 de 2016**

## **Dedicatoria**

*Agradezco a nuestro Señor el todo poderoso por permitir desarrollar mis habilidades a lo largo del tiempo y hacer de ellas propuestas de soluciones útiles para nuestra comunidad; a los amigos que me han acompañado en este camino y mi familia que siempre está apoyando los ideales de aquellos que piensan en transformar y cambiar el mundo.*

## **Agradecimientos**

*A la Universidad Pontificia Bolivariana, por brindarme un segundo hogar en el cual compartí momentos agradables y nuevas experiencias que han dejado huella en mi educación como un profesional íntegro y con sentido humano.*

*A la Directora del Proyecto, Ing. Norma Cristina Solarte Vanegas por su tiempo apoyo y dedicación durante el desarrollo el desarrollo de tesis de grado, así como su gran aporte cognitivo, humano además es una persona con un espíritu valioso y honorable.*

*A mis padres por los años de educación y amor, por su constante apoyo durante todo el proceso de mi vida. Por todas las oportunidades brindadas y toda la fe en mí.*

## Tabla de Contenido

Introducción.....	11
1. Generalidades.....	13
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos .....	14
1.3.1 Objetivo General.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos .....	14
2. Marco de referencia .....	15
2.1 Concepto de pavimento perpetuo .....	15
2.2 Estructura de Pavimentos perpetuos .....	15
2.2.1 Capa superficial.....	16
2.2.2 Capa intermedia .....	16
2.2.3 Capa Superficial .....	17
2.2.4 Material de Fundación .....	17
3. Metodologías.....	18
3.1 Metodología utilizada en Costa Rica.....	18
3.1.1 Propiedades de los materiales.....	18
3.1.2 Procedimiento de diseño .....	20
3.2 Metodología utilizada en China .....	26
3.2.1 Resumen .....	26
3.2.2 Introducción .....	27
3.2.3 Objetivos.....	29
3.2.4 Ubicación del proyecto y condiciones generales del sitio .....	29
3.2.5 Secciones de Control.....	30
3.2.6 Diseño de Secciones Experimentales .....	31
3.2.7 Caracterización de tráfico .....	31
3.2.8 Caracterización de Materiales .....	33
3.2.9 Criterio de desempeño .....	35
3.2.10 Diseño en PerRoad y selección de las subcapas de HMA.....	35
3.3 Metodología utilizada en Estados Unidos .....	37
3.3.1 Resumen .....	37
3.3.2 Criterio de diseño.....	37
3.3.3 Tráfico, espesor, y la vida útil del proyecto .....	37
3.3.4 Propiedades de los materiales.....	38

3.4	Metodologías utilizadas en Colombia.....	42
3.4.1	Metodología INVIAS .....	42
3.4.2	Metodología AASHTO .....	45
4.	Vías de cuarta generación (4G) en Colombia .....	51
5.	Matriz de factibilidad Técnica .....	53
5.1	Introducción.....	53
5.2	Matriz de factibilidad técnica .....	55
6.	Recomendaciones y Conclusiones .....	56
7.	Referencias Bibliográficas.....	58

## Lista de Tablas

Tabla 1. Resumen de propiedades de materiales para diseño .....	19
Tabla 2. Valores de la subrasante en los diferentes tramos.....	20
Tabla 3. Distribución de la flota vehicular .....	21
Tabla 4. Factor camión.....	21
Tabla 5. Proyecciones de tránsito para el periodo de diseño.....	22
Tabla 6. Espesores calculados de la estructura de pavimento de los diferentes tramos del diseño. ....	23
Tabla 7. Niveles de esfuerzo y deformaciones unitarias. ....	25
Tabla 8. Espesores calibrados de la estructura de pavimento en los diferentes tramos del diseño. ....	26
Tabla 9. Propiedades de las secciones de pavimento perpetuos de la US-70 secciones a y b.....	39
Tabla 10. Propiedades de las secciones de pavimento perpetuos de la US-70 secciones c y d.....	40
Tabla 11. Propiedades de las secciones de pavimento perpetuos de la US-70 sección e. ....	41
Tabla 12. Categoría de la vía. ....	42
Tabla 13. Periodo de diseño estructural recomendado. ....	42
Tabla 14. Rangos de transito contemplados en el método de diseño. ....	43
Tabla 15. Regiones climáticas de Colombia según la temperatura y precipitación. ....	44
Tabla 16. Valores de resistencia de la subrasante.....	44
Tabla 17. Niveles de confiabilidad sugeridos para diferentes carreteras. ....	46
Tabla 18. Valores de ZR en la curva normal para diversos grados de confiabilidad. ....	47
Tabla 19. Índice de serviciabilidad en función de la calidad de vida. ....	47
Tabla 20. Valores Recomendados para la Desviación Estándar (So).....	48
Tabla 21. Coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje.....	49

## Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de un pavimento perpetuo.....	16
Figura 2. a) Estructura de un pavimento perpetuo con base granular, b) Estructura de un pavimento perpetuo con base estabilizada. ....	18
Figura 3. Configuración del eje estándar.....	25
Figura 4. Peso bruto de los vehículos en la autopista Bin-Bo. ....	28
Figura 5. Ubicación del proyecto. ....	30
Figura 6. Secciones de Control. ....	31
Figura 7. Espectros de ejes cargas. ....	33
Figura 8. Rigidez del suelo terraplén.....	34
Figura 9. Secciones de prueba del pavimento perpetuo. ....	36
Figura 10. Ejemplo de carta de diseño del manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. ....	45
Figura 11. Esquema de distribución de espesores del análisis por capas de la metodología AASHTO.....	50

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** Pavimentos Perpetuos y su Factibilidad Técnica en Colombia

**AUTOR(ES):** Oscar Javier Lozano Pineda

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Norma Cristina Solarte Vanegas

### RESUMEN

El presente proyecto de grado tuvo como propósito estudiar la factibilidad técnica en Colombia a la hora de implementar una metodología de diseño de pavimentos, llamada pavimentos perpetuos, por medio de una matriz preliminar de comparación, tomando como base tres metodologías empleadas en diferentes países. Siguiendo el orden establecido para la ejecución del presente proyecto de grado, el primer paso fue buscar información bibliográfica en las diferentes bases de datos para poder tener una base de diferentes documentos y así escoger las metodologías con las que se iban a trabajar, después se estudiaron cada una de las 3 metodologías y se obtuvieron los datos de estudio más relevantes, con estos datos se procedió a realizar la matriz técnica preliminar y así poder ofrecer unos valores y unas recomendaciones de tránsito, capa asfáltica, subrasante y método de diseño que se debe tener en cuenta en el momento en el que se vaya a realizar este tipo de metodologías de pavimentos perpetuos en el país.

### PALABRAS CLAVES:

Pavimentos perpetuos, tránsito, subrasante, capa asfáltica, métodos de diseño.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** Perpetual pavements and Technical Feasibility in Colombia.

**AUTHOR(S):** Oscar Javier Lozano Pineda

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Norma Cristina Solarte Vanegas

### **ABSTRACT**

This graduation project was aimed to study the technical feasibility in Colombia at the time of implementing a pavement design methodology called perpetual pavement, through a preliminary comparison matrix, based on three methodologies used in different countries. Following the order established for the implementation of this graduation project, the first step was to find bibliographic information in different databases in order to have a basis of various documents and thus to choose the methods with which they were going to work, then they were studied each of the three methods and the most relevant study data were obtained with these data we proceeded to perform the technique parent preliminary and offer you certain values and recommendations transit, asphalt surface, subgrade and design method to be consider the moment which is to perform such methodologies perpetual pavements in the country.

### **KEYWORDS:**

Perpetual pavements, traffic, subgrade, asphalt layer, design methods.

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## Introducción

En Colombia el estado de la infraestructura vial es de vital importancia para el desarrollo y el crecimiento económico del país, debido a que por medio de este se mueve la mayor parte de la carga que se comercializa en el país, pero actualmente el país no cuenta con una buena infraestructura vial, ya que lo afectan factores que influyen directamente en la integridad y en la vida útil del pavimento, estos factores como por ejemplo el aumento progresivo del tráfico, el exceso de carga permitida en las carreteras del país y el clima cambiante, influyen drásticamente en los pavimentos trayendo como consecuencias que estas estructuras no puedan cumplir con los requerimientos y con la vida útil para la que fueron diseñados, generando así problemas como sobre costos y demoras en la carga transportada.

Actualmente el gobierno adelanta una serie de proyectos de infraestructura vial, llamadas vías de cuarta generación o 4G, el gobierno busca con esta inversión sacar al país del atraso que tiene en el tema de infraestructura vial, con esto aumentar la competitividad del país y mejorar el crecimiento económico, pero hoy en día, el país no cuenta con metodologías de alta calidad en el ámbito de pavimentos, que permitan dar confiabilidad al momento de diseñar el pavimento y que estas puedan cumplir con los requerimientos y la vida útil con la que fueron diseñados.

La metodología de pavimentos perpetuos consiste en, diseñar una estructura de pavimentos con una vida útil de 50 años sin necesidad de un gran mantenimiento, ya que este tipo de estructura de pavimento limita al desgaste solo de la capa superior y cuando esta alcanza su nivel crítico solo se remueve y se reemplaza dicha capa, este tipo de pavimentos sirve para autopistas que tengan un gran volumen de tránsito y se deseen minimizar los costos de rehabilitación de la vía.

El objetivo de este proyecto consiste en analizar las diferentes metodologías sobre pavimentos perpetuos que se han desarrollado a lo largo del mundo, para luego con la información obtenida realizar una matriz de análisis preliminar, que permita comparar las metodologías de pavimentos perpetuos y así poder determinar los factores más influyentes en las metodologías que se tomaron como base para realizar el estudio, y así dar una serie de parámetros que se deben tener en cuenta al momento de diseñar este tipo de estructuras de pavimentos.

## **1. Generalidades**

### **1.1 Planteamiento del problema**

En nuestro país y en la mayoría del mundo las vías ocupan un importante papel en el desarrollo económico del país, ya que por estas se movilizan personas, materia prima, productos, etc. Y para que este tipo de transporte sea influyente depende de la sostenibilidad de su infraestructura y del beneficio-costeo que brinde al país.

“Según un estudio que realizó Fedesarrollo, Colombia es uno de los países de Latinoamérica más atrasados en infraestructura de transporte y más del 87 % de los países del mundo están mejor en este ámbito, según el estudio Colombia tendría que invertir alrededor de 20 billones de pesos para poder reducir este atraso, construyendo más vías y solucionando los problemas que tiene actualmente la red vial del país”(artículo del Espectador 22 de noviembre de 2012), Esto genera que en Colombia el mal estado de las vías le genera un sobre costo del 35 % a las empresas transportadoras del país.(Espectador, 2012)

Sumado a esto, está la intrincada geografía del país y el factor climático; estos dos elementos dificultan la construcción de vías y su mantenimiento, por estas razones las metodologías de construcción que tiene el país no son eficientes y rara vez cumplen con su tiempo de vida útil, se terminan deteriorando antes de lo previsto por el constructor.

Por eso es de gran importancia para el país, conocer de metodologías de pavimentos perpetuos que le den una mayor rentabilidad a sus inversiones y mayor tiempo de vida útil de sus pavimentos, con esto se optimicen los recursos invertidos en infraestructura vial, y que esto genere una economía competitiva a nivel global.

### **1.2 Justificación**

“La Ministra de transporte Natalia Abelló Vives señaló que con los 4 billones de pesos aprobados recientemente para el INVÍAS se adelantarán 55 proyectos en 25 departamentos del país, donde se intervendrán 825 kilómetros, dentro de los que se destacan la doble calzada Loboguerrero-Buenaventura (Valle del Cauca), la circunvalar de San Andrés y Providencia, la vía Curos-Málaga (Santander), Salamina –Fundación (Magdalena) y la transversal Medellín-Quibdó” ([www.mintransporte.gov.co](http://www.mintransporte.gov.co) noticia publicada el 28 de mayo de 2015).

Actualmente el gobierno nacional a través del ministerio de transporte ha dicho que anualmente se invertirá en el sector transporte 18 billones de pesos, para así poder aumentar y fortalecer la productividad del país. (Proyecto de ley de presupuesto general de la nación, 2013)

La demanda de una red de carreteras bien conservada y eficiente es esencial para el desarrollo de un país, este interés en particular a dicha temática ha resultado en un aumento en los recursos designados al mejoramiento de las carreteras, demandando mayor énfasis en conocer y estudiar nuevas metodologías de diseño de pavimentos perpetuos, esto va a permitir una mejora significativa en el tema de pavimentos en Colombia y se va a poder optimizar los recursos designados para la infraestructura vial.

Los beneficios de tener una red vial eficiente y en buen estado representa un importante progreso para el estado y para las personas del país, por ejemplo las personas se beneficiarían con: reducción en los tiempos de desplazamiento, aumentaría la seguridad vial, el costo de operación vehicular y el consumo de combustible disminuiría, estos factores representarían un gran beneficio en cuestión de economía. Para el gobierno los beneficios de contar con una red vial en buen estado serían: permitiría a la nación el ahorro de divisas al disminuir las necesidades de reconstrucción y/o rehabilitación, se lograría conectar adecuadamente la red troncal con los municipios y estos entre sí, también aumentaría el desarrollo de la economía agrícola: insumos a menor costo, mayor productividad, aumentaría el desarrollo del turismo en el ámbito nacional, generaría mayor inversión extranjera y local y mejoraría los rendimientos de la Inversión Pública: permanente, planificada, programada.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Proponer una metodología de pavimentos perpetuos que pueda ser usada en Colombia, de acuerdo al estado del arte investigado.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar una investigación bibliográfica prospectiva del estado del conocimiento con relación al uso de los pavimentos perpetuos en el mundo.
- Analizar metodologías usadas en otros países con relación a los pavimentos perpetuos.
- Desarrollar una matriz técnica preliminar para evaluar el uso de pavimentos perpetuos en Colombia.

## **2. Marco de referencia**

### **2.1 Concepto de pavimento perpetuo**

El concepto de pavimento perpetuo se define como un pavimento de asfalto diseñado y construido para durar 50 años o más, sin necesidad de gran rehabilitación estructural o reconstrucción. Con pavimentos perpetuos, el potencial de agrietamiento por fatiga se reduce, y el deterioro del pavimento se limita a la capa superior de la estructura. Así, cuando el deterioro de la superficie alcanza un nivel crítico, es una solución económica remover y reemplazar solo la capa superior. El concepto de pavimento perpetuo puede ser utilizado para cualquier estructura de pavimento donde se desea minimizar los costos de rehabilitación y reconstrucción. Estas consideraciones son especialmente importantes en las autopistas de volumen de alto tráfico donde los costos de retraso son muy altos.

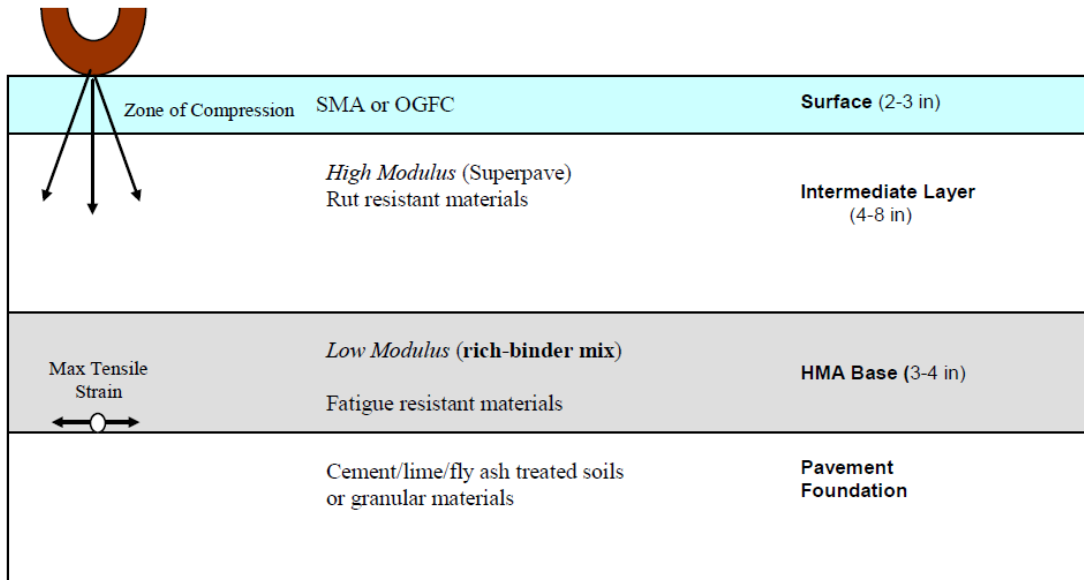
Tradicionalmente, los pavimentos de asfalto se han diseñado para una vida útil de 20 años, mientras que se espera que los pavimentos perpetuos puedan tener una vida útil de 50 años o más. Si bien hay algunos éxitos con pavimentos perpetuos, hay una gran brecha en nuestra comprensión del diseño de este tipo de pavimentos. La principal deficiencia con el método de diseño del pavimento perpetuo actual es que no asegura la estructura y / o capas que aún tienen que satisfacer los períodos de diseño óptimo de 50 años. Sin embargo, a través de una metodología de diseño de pavimentos, es posible obtener estructuras óptimas de pavimento de asfalto que van a durar 50 años o más, y solamente se tiene sustituir la superficie superior periódicamente cada vez que necesite mantenimiento. Tal metodología de diseño debe incluir el diseño del pavimento mecanicista, selección de materiales, innovación para mejorar la durabilidad y la resistencia a la fatiga, la predicción del rendimiento de campo, análisis de costo restante de vida útil y ciclo de vida. Con el fin de determinar la combinación de capa, rigidez y espesor para poder producir pavimentos perpetuos óptimos.

### **2.2 Estructura de Pavimentos perpetuos**

El Pavimento perpetuo ha existido desde 1960. Por ejemplo, dos secciones de la carretera interestatal 40 en el centro de la ciudad de Oklahoma tienen ahora más de 33 años de edad (construidas en 1967) y todavía están en excelentes condiciones. Estas secciones, que soportan de 3 a 3,5 millones ESALs por año, se han superpuesto, pero la base y capas intermedias han durado desde la construcción sin ningún trabajo adicional. (13)

Los pavimentos perpetuos han estado conectados a los pavimentos de asfalto, estos pavimento consisten de tres capas, que incluye, una capa resistente al desgaste con una parte superior renovable, una capa intermedia resistente al rodamiento, y una capa base resistente a la fatiga y que sea durable. La figura 1

es una estructura típica de un pavimento perpetuo que consta de tres capas de HMA construido sobre una sub-base o una base estabilizada. Estas capas se describen a continuación: (13)



**Figura 1. Esquema de un pavimento perpetuo.**

(Fuente: University of New Mexico, Future Design of Perpetual Pavements for New Mexico, December de 2009.)

### 2.2.1 Capa superficial

La capa que sirve de base para esta configuración debe resistir la tendencia al agrietamiento por fatiga bajo las cargas de tránsito. La principal característica de este tipo de mezcla es su alto contenido de ligante. El uso de agregado más fino puede hacer a la mezcla más resistente a la fatiga. Estas características en combinación con un apropiado espesor, proveerá la suficiente resistencia al agrietamiento proveniente del fondo de la capa.

El diseño de mezcla puede realizarse con la Guía Superpave para capas inferiores. El grado de desempeño usado en esta capa debe ser lo suficientemente alto para proveer protección contra las roderas. Los ensayos de desempeño para los materiales de esta capa deben incluir ensayos de fatiga, ensayos de rigidez y ensayos de durabilidad.

### 2.2.2 Capa intermedia

La capa intermedia debe combinar las cualidades de estabilidad y durabilidad. La estabilidad se obtiene alcanzando el contacto piedra sobre piedra en el agregado grueso aplicando un ligante de alto grado de desempeño. La fricción interna se

logra usando agregado bastante cúbico o asegurando un esqueleto rígido por medio del ensayo de vacíos en el agregado grueso.

El grado de desempeño del ligante puede ser tan alto como el utilizado en la capa de superficie para resistir la deformación permanente. El diseño de mezcla puede ser el Superpave estándar con el óptimo contenido de ligante. Los ensayos de desempeño deben incluir: deformación permanente y susceptibilidad al daño por humedad.

### **2.2.3 Capa Superficial**

Los requerimientos de la capa de superficie de la experiencia local y de factores económicos. En la mayoría de los casos esta capa debe ser resistente a la deformación, debe ser durable y debe proveer impermeabilidad. Dentro de los Estados Unidos estos requerimientos son satisfechos por mezclas SMA. Esta mezcla provee un esqueleto de piedra rígido y la matriz (combinación ligante y relleno mineral) una rigidez adicional, además de la suficiente impermeabilidad.

Para los materiales constituyentes de la capa superficial se requieren ensayos de resistencia a la deformación permanente, permeabilidad y durabilidad.

### **2.2.4 Material de Fundación**

Este material es de suma importancia durante el proceso de construcción y el desempeño de un pavimento perpetuo. Durante el proceso de construcción, la fundación provee de una plataforma de trabajo y soporte de las cargas impuestas por los camiones y compactadores.

Durante el periodo de desempeño, la fundación soporta las cargas de tránsito, además de reducir la variabilidad de soporte por el cambio de estaciones climáticas. La fundación debe estar compuesta por material de subrasante compactado o estabilizado, material granular de base o subbase. Dependiendo de las condiciones del sitio, condiciones climáticas y de diseño se requerirá una estabilización química o mecánica de suelos o material granular. Por otro lado, el clima puede indicar el protagonismo del drenaje y subdrenaje para mantener la estabilidad de la fundación.

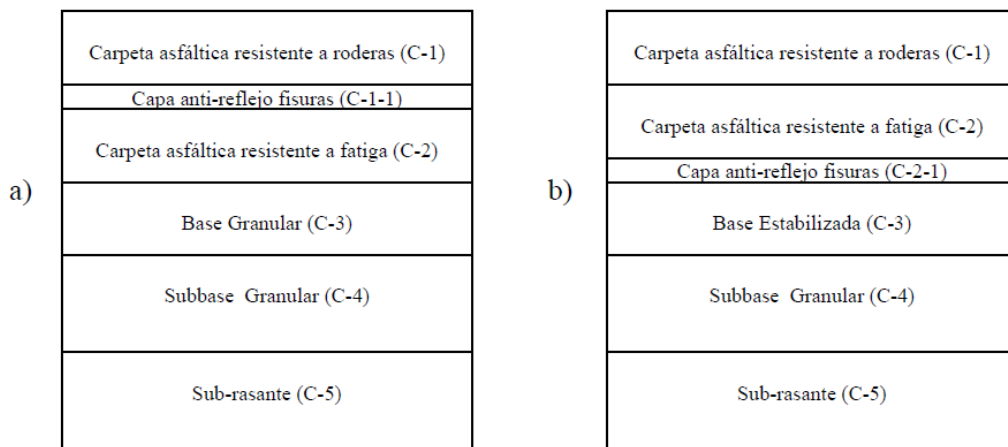
El Departamento de Transportes de Illinois ha puesto gran énfasis en los suelos de fundación y ha establecido una capacidad de soporte (CBR) de al menos 6% para evitar la excesiva deformación durante el proceso de construcción. El método de estabilización de suelos más común en Illinois es aplicando cal, aunque en la actualidad se está implementando el uso de geosintéticos.

### 3. Metodologías

#### 3.1 Metodología utilizada en Costa Rica

El concepto de pavimento perpetuo hace referencia a aquel pavimento cuyas características estructurales le permiten una vida útil mayor a 50 años con el mínimo de mantenimiento en su superficie de rodamiento y ningún mantenimiento en las capas inferiores.

La forma la estructura de un pavimento perpetuo por aplicar en este caso es la que se presenta en la siguiente figura.



**Figura 2. a) Estructura de un pavimento perpetuo con base granular, b) Estructura de un pavimento perpetuo con base estabilizada.**

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

#### 3.1.1 Propiedades de los materiales

##### 3.1.1.1 Carpeta asfáltica

Se considera, concreto asfáltico procesado en caliente con un módulo resiliente de 3000 Mpa (aproximadamente 400000 psi), para mezcla densa y 7000 Mpa para mezclas de alto módulo.

##### 3.1.1.2 Capas de material granular y subrasante

Se considera la utilización de bases granulares con CBR de 80% (módulo resiliente aproximado de 250 Mpa) y subbases granulares con CBR de 30% (módulo resiliente aproximado de 145 Mpa).

### 3.1.1.3 Capa estabilizada (bases estabilizadas con cemento)

Para bases estabilizadas con cemento se considera una de resistencia a la compresión no confinada 40 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días (módulos resiliente aproximado de 7000 Mpa).

**Tabla 1. Resumen de propiedades de materiales para diseño**

Capa	Modulo resiliente (Psi)	Modulo de Poissón
Capa Asfáltica 1	3000	0.35
Capa Asfáltica 2	7000	0.35
Base Granular	250	0.40
Base Estabilizada	7000	0.20
Sub-Base Granular	145	0.45
Sub-Rasante	Variable	0.45

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

En este proyecto se planteó un diseño de una estructura de pavimentos perpetuos para la reconstrucción de una ruta nacional de Costa Rica. Para poder seleccionar los tramos homogéneos se realizaron una serie de estudios de deflectometria de impacto mediante el cual se calculó los módulos resiliente de la subrasante de dichos tramos.

El primer paso de fue utilizar la ayuda de la guía de diseño AASHTO 93 para poder determinar los espesores iniciales de las diferentes capas del pavimento, después por medio de una revisión mecanística – empírica se calibraron todos los espesores para que pudieran resistir los diferentes esfuerzos de fatiga como también de deformación plástica en todas las capas del diseño. Para esto se aplicaron modelos de evaluación del desempeño (ecuaciones de fatiga) desarrolladas por el instituto del asfalto y modelos desarrollados en África del sur.

### 3.1.2 Procedimiento de diseño

#### 3.1.2.1 Capacidad de soporte de la subrasante

Se tomó una serie de estudios de deflectometría de impacto realizados por el laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales (LANAMME) en el año 2002, el pavimento se separó en segmentos homogéneos con la ayuda del programa SPEC.

Los parámetros utilizados para la separación fueron las deflexiones medidas debajo de los geófonos D7 y D9. Para cada segmento homogéneo se determinaron los módulos de rigidez (Tabla 2) para la subrasante del futuro paquete estructural, aplicando la técnica de retrocálculo de módulos (utilizando el programa Evercalc 5.0) y usando el escenario de curva deformada que proporciona el percentil 85.

**Tabla 2. Valores de la subrasante en los diferentes tramos.**

<b>Segmento Homogeneo</b>	<b>Percentil 85 de deflexiones Mpa (PSI)</b>
1	33 (4800)
2	24 (3500)
3	28 (4100)
4	38 (5600)
5	22 (3250)

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

#### 3.1.2.2 Proyecciones de Transito

Se obtuvieron los conteos de tránsito y se calculó la distribución de la flota vehicular para los distintos escenarios de diseño gracias a la información suministrada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de la República de Costa Rica. Esta información se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Distribución de la flota vehicular**

TPD = 67329 Año 2003		
Tipo de Vehiculo	Distribucion Porcentual	Cantidad de Vehiculos
Livianos	73.59 %	49547
Buses	4.17 %	2807
Carga Liviana	13.54 %	9116
2 Ejes (C2)	6.23 %	4194
3 Ejes (C3)	0.95 %	639
5 Ejes (T3-S2)	1.52 %	1023

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

### 3.1.2.3 Factor camión

El factor camión que se utilizara en el diseño es el escenario con mayor probabilidad de ocurrencia y con este mismo se hará el cálculo de ejes equivalentes.

**Tabla 4. Factor camión.**

Factores Camion (EEQ)			
Tipo de Vehiculo	Bajo	Medio	Alto
Livianos	0,0001	0,0005	0,001
Buses	0,65	0,85	1,05
Carga Liviana	0,1	0,2	0,3
2 Ejes (C2)	0,8	1	1,15
3 Ejes (C3)	1,4	1,6	1,75
5 Ejes (T3-S2)	2,2	2,5	2,75

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

En la tabla 5 se presentan las proyecciones de carga de tránsito a partir de los sondeos disponibles, también se muestra los ejes equivalentes para el periodo de diseño de 50 años (2006 – 2056), y por último se presentan las magnitudes de carga para los diferentes escenarios (Alto, Medio y Bajo).

**Tabla 5. Proyecciones de tránsito para el periodo de diseño.**

Escenario	TPD	Ejes equivalentes	Ejes equivalentes para carril de diseño (D)
A= bajo	99189	250239449	75000000
B= medio		325137742	97000000
C= alto		392241880	110000000

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

#### **3.1.2.4 Determinación de espesores de capas de acuerdo a la metodología de diseño AASHTO**

Haciendo uso de la guía de diseño de la AASHTO (1993) se aplicaron los siguientes parámetros de diseño:

- Nivel de confianza del  $Z = 95\%$ .
- Una desviación estándar de  $S_o = 0.45$ .
- Un índice terminal de habilidad de servicio:  $P_t = 2$ .
- Módulos resilientes de la subrasante (Tabla 2).

En la tabla 7 se muestra los diferentes espesores de cada capa para las dos opciones de pavimentos perpetuos, una con base granular y la otra con base estabilizada.

**Tabla 6. Espesores calculados de la estructura de pavimento de los diferentes tramos del diseño.**

Tramo	Capa	Espesores calculados (cm)		Espesores utilizados (cm)	
		Base Granular	Base Estabilizada	Base Granular	Base Estabilizada
1	Asfalto	24	8	20	15
	Base	17	50	20	50
	Subbase	54	54	55	60
2	Asfalto	24	8	20	15
	Base	17	50	20	50
	Subbase	72	72	65	65
3	Asfalto	24	8	20	15
	Base	17	50	20	50
	Subbase	63	63	60	65
4	Asfalto	24	8	20	15
	Base	17	50	20	50
	Subbase	46	46	55	55
5	Asfalto	24	8	20	15
	Base	17	50	20	50
	Subbase	76	76	65	65

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

### 3.1.2.5 Verificación mecánica de la capacidad a fatiga y deformación plástica de la estructura propuesta

Se hizo la revisión por teorías de fatiga para cada una de las capas utilizando las siguientes formulas:

- **Carpeta asfáltica**

$$Nf = 0.0796(\varepsilon_t)^{-3.291}[E]^{-0.854}$$

Dónde:

Nf = Número de cargas aplicadas para la falla.

$\varepsilon_t$  = Deformación unitaria de tensión en la parte inferior de la capa.

E = Módulo resiliente (psi)

- **Base Granular**

$$Na = 10^{2,605122 * F + 4,480098} \quad F = \frac{\sigma_3 * \phi + c}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Dónde:

Na = número de repeticiones.

F = factor de seguridad.  
 $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  = esfuerzos principales.  
 $\varphi$  = ángulo de fricción interna.  
C = cohesividad.

- **Base estabilizada con cemento**

$$\log N_f = \frac{\left[ \left( \frac{0.972\beta c_1 - \sigma_t}{Mr} \right) \right]}{0.0825\beta c_2}$$

Dónde:

Nf: número de repeticiones para la falla.

$\sigma_t$ : esfuerzo de tensión en la fibra inferior de la capa (psi).

Mr: módulo de ruptura (esfuerzo a flexotracción) del material, a los 28 días.

$\beta c_1$  y  $\beta c_2$ : factores de calibración iguales a 1 en este caso.

- **Subrasante**

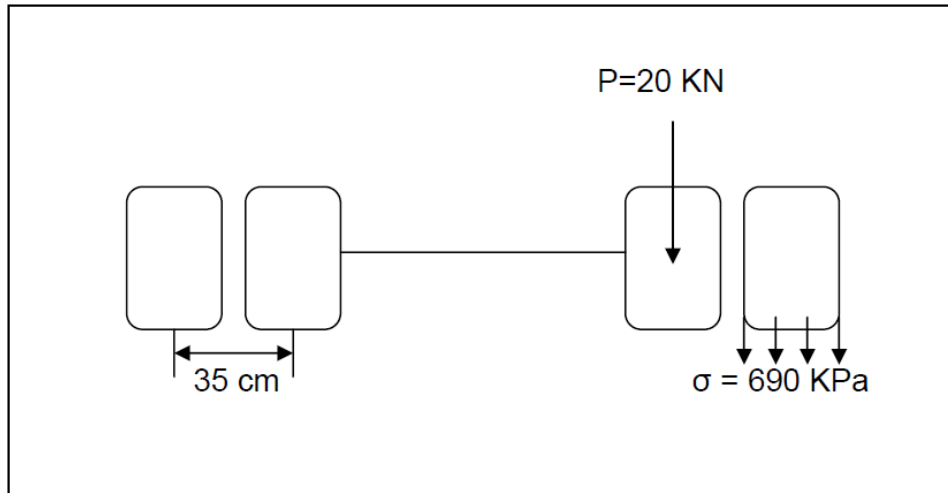
$$N_r = 1.365 \times 10^{-9} (\varepsilon_{vs})^{-4.477}$$

Dónde:

Nr: es el número de repeticiones.

$\varepsilon_{vs}$ : deformación unitaria a la compresión en la fibra superior de la subrasante.

En la siguiente Tabla se muestran los niveles de esfuerzo y deformación unitarios para una cantidad de pasadas de 11E7 de Ejes equivalentes de diseño, a partir de una modelación multicapa elástica, con una configuración de carga como se muestra en la Figura 3:



**Figura 3. Configuración del eje estándar.**

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

**Tabla 7. Niveles de esfuerzo y deformaciones unitarias.**

Capa	Nivel esperado
CA1	$\epsilon_t = 46E-6$
CA2	$\epsilon_t = 46E-6$
BG	$F = 1.36$
BE	$\sigma_t = 277 \text{ kPa}$
SBG	$F = 1.36$
SR	$\epsilon_v = 167E-6$

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

### 3.1.2.6 Calibración de espesores

Por último, se calibran los espesores por medio de las ecuaciones de fatigas hasta que el nivel de carga de diseño se iguale al nivel de carga resistido (Tabla 8).

**Tabla 8. Espesores calibrados de la estructura de pavimento en los diferentes tramos del diseño.**

Tramo	Capa	Espesores calibrados (cm)	
		Base Granular	Base Estabilizada
1	CA1	7,5	5
	CA2	25	10
	Base	20	27,5
	Subbase	30	30
2	CA1	7,5	5
	CA2	25	10
	Base	25	30
	Subbase	30	30
3	CA1	7,5	5
	CA2	25	10
	Base	20	30
	Subbase	30	30
4	CA1	7,5	5
	CA2	25	10
	Base	20	27,5
	Subbase	30	30
5	CA1	7,5	5
	CA2	25	10
	Base	25	30
	Subbase	30	30

(Fuente: Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.)

## **3.2 Metodología utilizada en China**

### **3.2.1 Resumen**

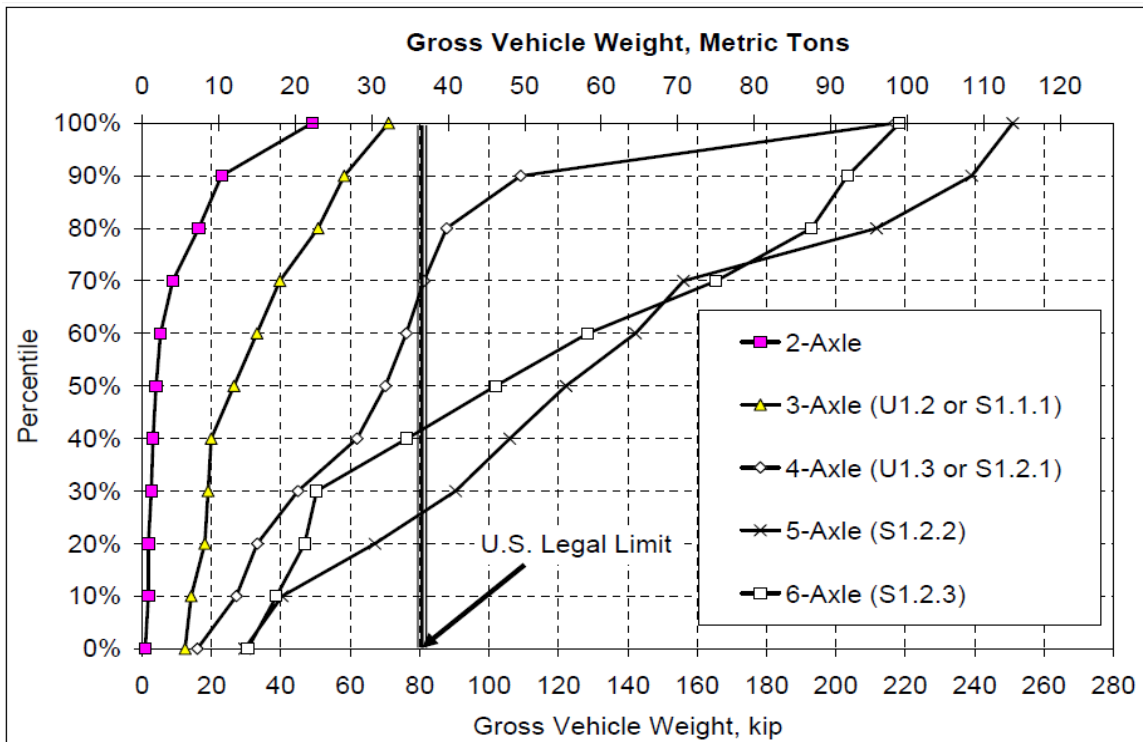
Los pavimentos perpetuos han demostrado ser una opción viable en los Estados Unidos, para las agencias que necesitan alto rendimiento, bajo mantenimiento y estructuras de pavimentos para toda la vida. Más recientemente, tres secciones de prueba de pavimentos perpetuos, junto con dos secciones de control, fueron construidas en el 2005 en la provincia de Shandong en China, como parte de un experimento de pavimentos perpetuos en la construcción de una nueva vía. Una característica única del experimento es las cargas de tráfico pesado de China (por ejemplo, cargas por eje individuales medias superiores a 20 kip (9 toneladas)), esto no se encuentra comúnmente en los Estados Unidos. En este trabajo se

documenta el proceso de diseño utilizado para desarrollar las secciones de pavimentos perpetuos utilizando el software de diseño, PerRoad. Se utilizaron datos de propiedades de materiales y datos de los espectros de carga proporcionados por la oficina de carretera de Shandong y el instituto de investigación de Shandong en el software PerRoad para desarrollar tres secciones transversales de pavimento perpetuo. Un conservador umbral de fatiga de 70  $\mu\epsilon$  dio lugar a la primera sección de prueba de 20 in (500 mm) de profundidad total del asfalto, la segunda sección de prueba de 15 in (380 mm) de profundidad total del pavimento, utilizando un umbral menos conservador de 125  $\mu\epsilon$ . La tercera sección de prueba duplicó la segunda, pero con un mayor rendimiento en el grado del aglutinante en la parte inferior de 3 pulgadas (75 mm) de espesor. Las dos secciones restantes son representativos diseños de las autopistas en China: capas delgadas de HMA en una base de puzolánicos tratados. Una sección tiene 13 pulgadas (330 mm) de HMA sobre 16 pulgadas (400 mm) de un base tratada con cal y cenizas volantes, y la otra sección, más típica de pavimentos en la provincia de Shandong, tiene 6 pulgadas (150 mm) de HMA sobre 21,5 pulgadas (560 mm) de base tratada con cal y cenizas volantes. La autopista se abrió al tráfico en diciembre de 2005 y los experimentos con vehículos de control y tráfico en tiempo real están actualmente en curso.

### **3.2.2 Introducción**

El rápido crecimiento económico de China en los últimos años ha facilitado un énfasis en el desarrollo de la infraestructura nacional. Con este crecimiento, la construcción de carreteras ha sido un componente importante, una red de transporte interprovincial confiable es vital para el continuo crecimiento de China. De 2005 a 2010, el Ministerio de Comunicaciones de China tiene previsto aumentar la red de autopistas por 108.000 millas (173.809 km) para completar un sistema de carreteras de 1.400.000 millas (2.300.000 kilómetros), que conecta la mayoría de las principales ciudades. (14)

Mientras que la construcción de estas carreteras es un compromiso importante, hay un reto añadido de diseño de los pavimentos para poder soportar el peso de los vehículos que prevalecen en China. En comparación con los EE.UU., las cargas de tráfico en las autopistas chinas son significativamente más grandes. La Figura 4 ilustra los pesos de vehículos brutos obtenidos de un (WIM) instalación de pesaje en movimiento en la autopista Bin-Bo, que es una carretera en la provincia de Shandong, que es el lugar donde se va a realizar este experimento. Como se muestra en la figura 4, el peso promedio de los camiones más grandes (4 o más ejes) exceden las 70.000 libras (32 toneladas). Es de particular interés el vehículo S1.2.2 (un semi-remolque de 5 ejes estándar), comparable a la Clase 9 de vehículos en los EE.UU., ya que representan el 33% del volumen de tráfico pesado y tener un peso bruto vehicular promedio de 122.000 libras (55 toneladas). Esto es casi el doble del límite legal bruto vehicular en los EE.UU. Es evidente que las demandas de tráfico en China son extremas, y las estructuras de pavimento debe ser cuidadosamente diseñado para satisfacer la demanda. (14)



**Figura 4. Peso bruto de los vehículos en la autopista Bin-Bo.**

(Fuente: Yang, Yongshun. Gao, Xuechi. Lin, Wang. Perpetual pavement design in China. International Conference on Perpetual Pavement Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, July 25, 2006.)

El diseño típico en una autopista en la provincia de Shandong se compone de 6 a 8 pulgadas (150 a 200 mm) de mezcla de asfalto en caliente (HMA) arriba de 14 a 24 pulgadas (355 a 610 mm) de cemento ligado al material granular estabilizado, y en la parte inferior de 8 a 12 pulgadas (200 a 305 mm) de suelo estabilizado en el terraplén. Una característica única de la mayoría de las autopistas chinas es que se construyen terraplenes de 10 pies (3 m) de altura que sirven como base del pavimento. La estructura del pavimento resultante tiene barandas a cada lado y en el separador, y el acceso es controlado a través de barreras de peaje. Aunque este diseño se ha utilizado para las rutas de autopistas en China, se han dado casos de deterioro temprano del pavimento.

Dada la necesidad de alto rendimiento, el concepto de pavimento perpetuo fue presentado como el mejor enfoque. El centro de diseño de pavimento perpetuo está calculando la respuesta mecánica de la estructura del pavimento bajo el tráfico esperado y el diseño de las capas para mantener tensiones y deformaciones debajo de los límites prescritos.

Este enfoque de diseño evita los problemas estructurales profundos, tales como grietas de fatiga y ahuellamiento en la base o sub-base. Para investigar este enfoque, y su impacto en el rendimiento a largo plazo, se decidió en forma

conjunta construir una serie de secciones de prueba de pavimentos perpetuos en la autopista Bin-Bo actualmente en construcción en la provincia de Shandong.

### **3.2.3 Objetivos**

El objetivo general del proyecto de investigación en Shandong es desarrollar un conjunto de recomendaciones en relación con el diseño del pavimento perpetuo en condiciones de tráfico extremas. Debido a que el proyecto está todavía en sus primeras etapas, solamente después de haber sido sometida a los 7 meses de tráfico, los objetivos de este trabajo son necesariamente limitados a lo siguiente:

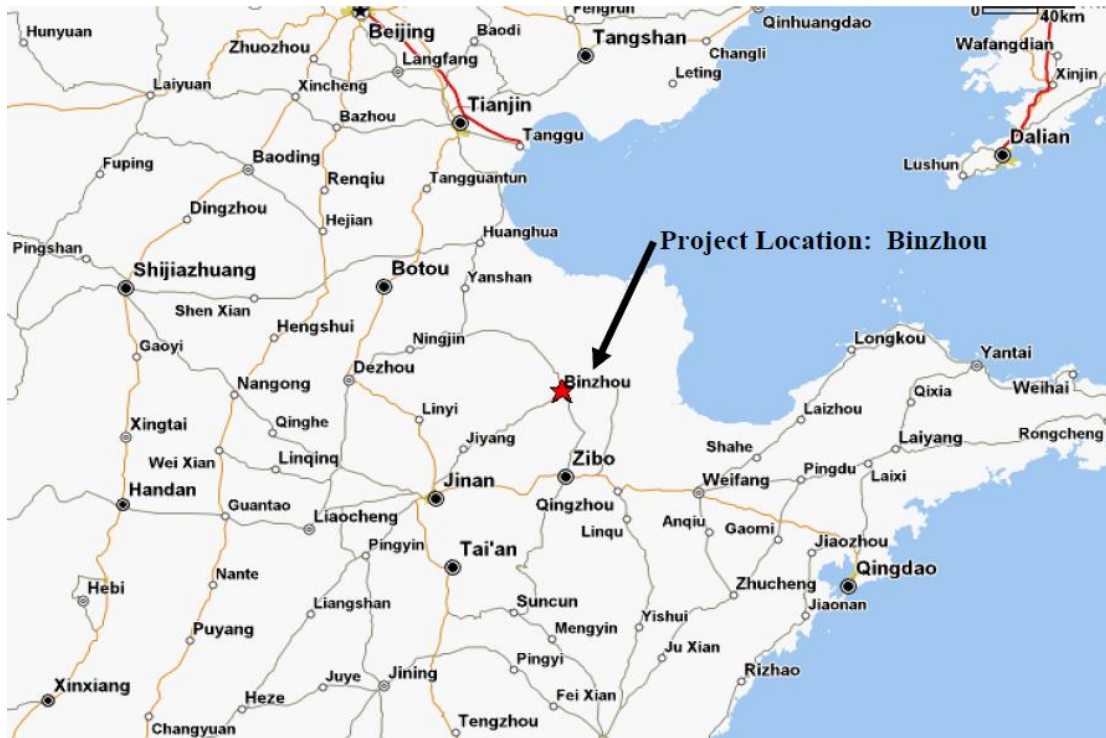
1. Documentación del proceso de diseño estructural.
2. Presentación de las secciones de pavimento.
3. Presentación de pruebas y la recogida de datos sobre plano.

### **3.2.4 Ubicación del proyecto y condiciones generales del sitio**

La Provincia de Shandong, se encuentra en la parte central del este de China. Beijing está al norte de Jinan, la capital de la provincia de Shandong cerca de 250 millas (400 km). En su mayor parte, Shandong está en zonas bajas con una elevación de menos de 330 pies (100 metros) sobre el nivel del mar. Una autopista en el lado oeste de Binzhou (Figura 5) está a unos 5 km al oeste de la ciudad. Cuando se haya completado, esta nueva autopista conectará Shanghái y Tianjin, un importante puerto al este de Beijing. Parte de esta autopista en la ciudad de Binzhou fue dedicado al proyecto de investigación documentado aquí.

Las secciones de pavimento de prueba se encuentran a pocos kilómetros al norte del río Huang-He. El terreno es plano, y el suelo se compone de sedimentos fluviales depositados. El limo tiene un índice de plasticidad de aproximadamente 8 a 10 y CBR de 8. El nivel freático en la zona es muy alto.

Las zanjas a lo largo de las carreteras locales de la zona muestran una mesa de agua alrededor de 5 a 6,5 pies (1,5 a 2,0 m) por debajo de la superficie del suelo. El alto nivel freático en combinación con el suelo limoso causa de consolidación que se produzca bajo el peso de los 10 a 20 pies (3 a 6 m) de relleno terraplén. La consolidación es típicamente de 4 a 8 in. (10 a 20 cm). Especificaciones densidad de corriente para la llamada sub-base para 95 % de la densidad proctor estándar en la parte superior de 31 pulgadas. (80 cm), 93 % en el 20 pulgadas. (50 cm) por debajo de 90 % y que en las capas inferiores. (14)



**Figura 5. Ubicación del proyecto.**

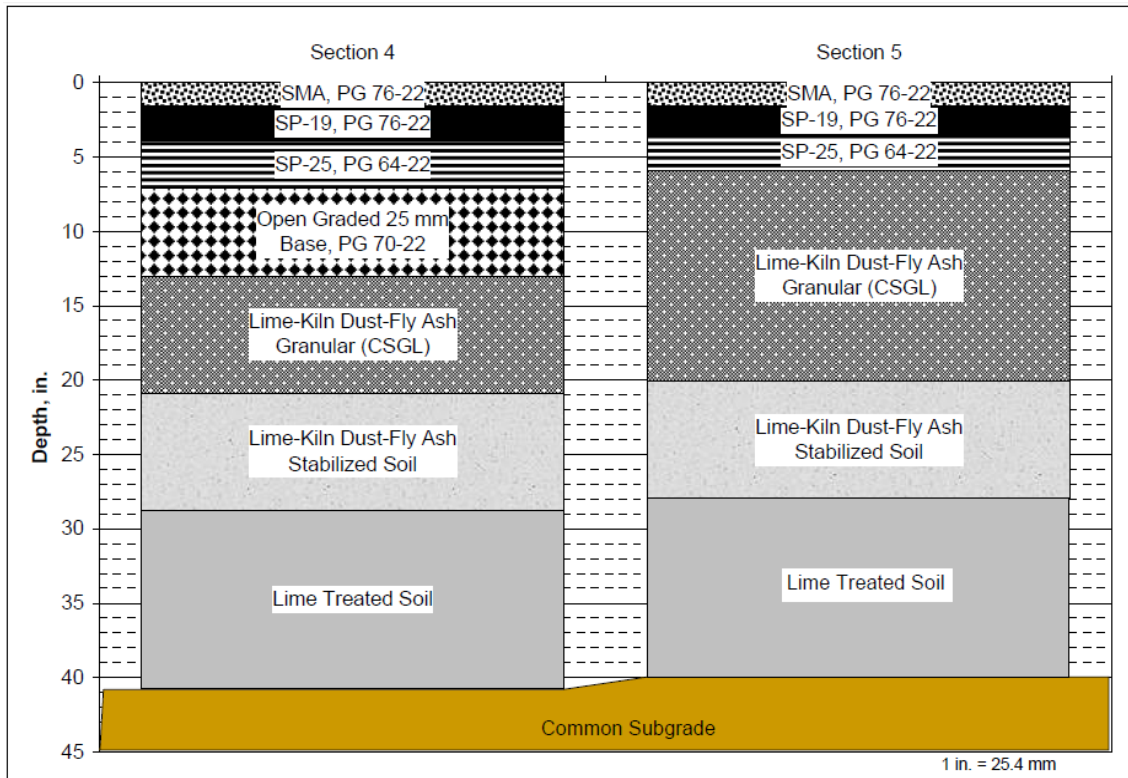
(Fuente: Yang, Yongshun. Gao, Xuechi. Lin, Wang. Perpetual pavement design in China. International Conference on Perpetual Pavement Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, July 25, 2006.)

### 3.2.5 Secciones de Control

Dos secciones estructurales de uso común en China en las autopistas se propusieron como secciones de control en el experimento y se muestran en la Figura 6. Ambas secciones tienen una superficie de piedra de matriz (SMA) con el grado de rendimiento (PG) 76-22 del aglutinante. Las mezclas asfálticas en caliente (HMA) y las capas subyacentes fueron diseñadas de acuerdo a las normas Superpave con 19 y 25 mm de tamaños nominales máximos de los agregados (NMAS) en capas de dos y tres, respectivamente. Ambas secciones utilizan una capa de base granular estabilizada con cemento de horno de cal de cenizas de polvo de exclusión aérea (CSGL), pero la sección 4 contiene una gran mezcla de piedra (25 mm NMAS) entre el HMA y CSGL.

Con base en la investigación y el debate, se planteó la hipótesis de que la causa principal del deterioro temprano del pavimento en las secciones de este tipo es que se sobrecarga el CSGL causando grietas que se propagan a través de las capas de HMA a la superficie. Una vez que las grietas estaban presentes, la infiltración del agua aceleró aún más el deterioro del pavimento. De ello se desprende, entonces, que la sección 4 se deberá realizar mejor que la Sección 5 ya que el CSGL es 7 pulgadas. (175 mm) más profundo en la estructura. Ambas

secciones de control también utilizan capas de suelo estabilizado como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6. Secciones de Control.**

(Fuente: Yang, Yongshun. Gao, Xuechi. Lin, Wang. Perpetual pavement design in China. International Conference on Perpetual Pavement Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, July 25, 2006.)

### 3.2.6 Diseño de Secciones Experimentales

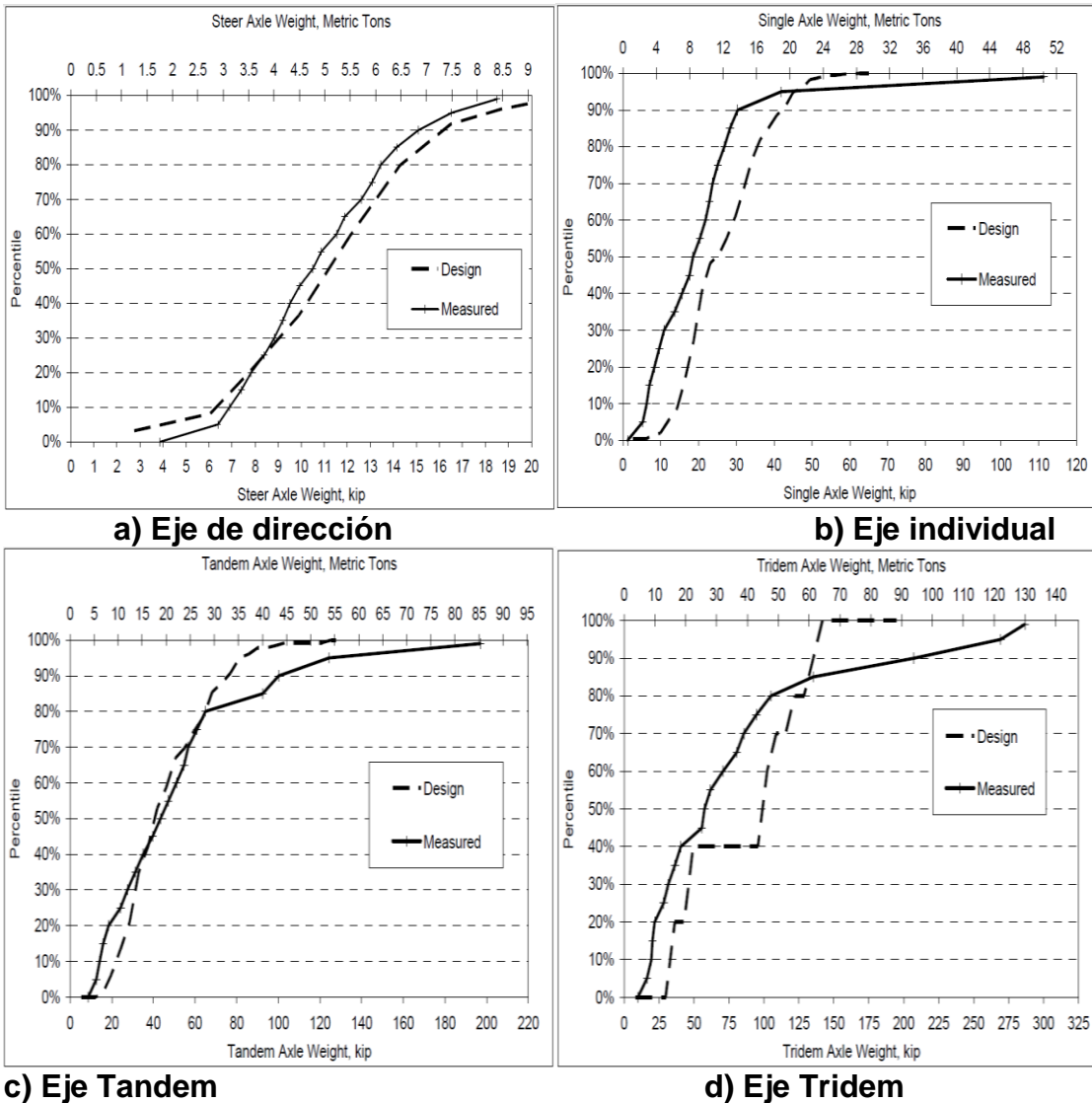
Como se mencionó anteriormente, no había consenso entre los miembros del equipo para desarrollar diseños de pavimentos perpetuos para satisfacer las altas demandas de tráfico de este proyecto. Además, se decidió eliminar la CSGL y el suelo tratado con cal de cenizas volantes como componentes estructurales, ya que se cree que es la causa fundamental del deterioro temprano del pavimento. Las siguientes secciones detallan cómo se desarrollaron los diseños utilizando el software de diseño, PerRoad.

### 3.2.7 Caracterización de tráfico

Independientemente del enfoque de diseño de los pavimentos, el tráfico se debe representar con precisión para lograr un diseño exitoso. Como se trataba de una nueva autopista, los datos de tráfico específicos del lugar no estaban disponibles.

Por esa razón se tomaron datos de un (WIM) instalación de pesaje en movimiento de la autopista de Bin-Bo, se utilizaron estos datos para desarrollar la información de espectros de carga necesaria para el diseño. Ahora que el proyecto se ha abierto al tráfico, los datos del WIM se han recogido y se han hecho comparaciones entre el diseño y los espectros de carga medidos en la autopista de Bin-Bo las cuales se presentan en la Figura 7. Debe tenerse en cuenta que los datos de medición de peso por eje representan sólo un periodo de 24 horas, se deberán recoger más datos para juzgar completamente la exactitud de la distribución de la carga de diseño. Sin embargo, los datos indican una buena concordancia entre los espectros de carga medidos y los utilizados para el diseño. Los espectros de carga por eje de dirección e individuales utilizados en el diseño parecen ser muy conservadores en el percentil 90. Sin embargo, los espectros de carga de diseño de los ejes tándem y tridem parecen poco conservadores en el percentil 90. Se tendrían que evaluar más datos para determinar el efecto de estas pesadas cargas por eje.

Como se mencionó anteriormente en relación al peso bruto vehicular, sin duda es importante para comprender la magnitud de las cargas aplicadas al pavimento. Por ejemplo, el promedio de carga por eje único es de aproximadamente 19.000 libras (8 toneladas), lo cual es casi el límite legal para los Estados Unidos en sus rutas federales. Aún más significativo es el promedio de carga del eje tándem de 43.000 libras (19,5 toneladas), que es de 9.000 libras (4 toneladas) más pesado que el límite legal de Estados Unidos. Traducido a daño usando la regla generalizada de la cuarta potencia, el eje tándem promedio en China causaría 2,7 veces más daño que el eje tándem máximo legal en los EE.UU. Mirándolo de otra manera, considerar el promedio del percentil 90 de peso del eje tándem (100.000 libras (45 toneladas)) que se muestra en la Figura 7c. Este valor se compara con un percentil 90 en los EE.UU. de aproximadamente 36.000 libras (16 toneladas). Una vez más el cálculo de daños mediante la regla de la potencia cuarta, esto se traduce en aproximadamente 60 veces más daño para el mismo peso por eje percentil. Los espectros de carga chinos es uno de los aspectos únicos de este proyecto, empujando el diseño del pavimento occidental tradicional y que permite la evaluación del desempeño bajo carga extrema. (14)



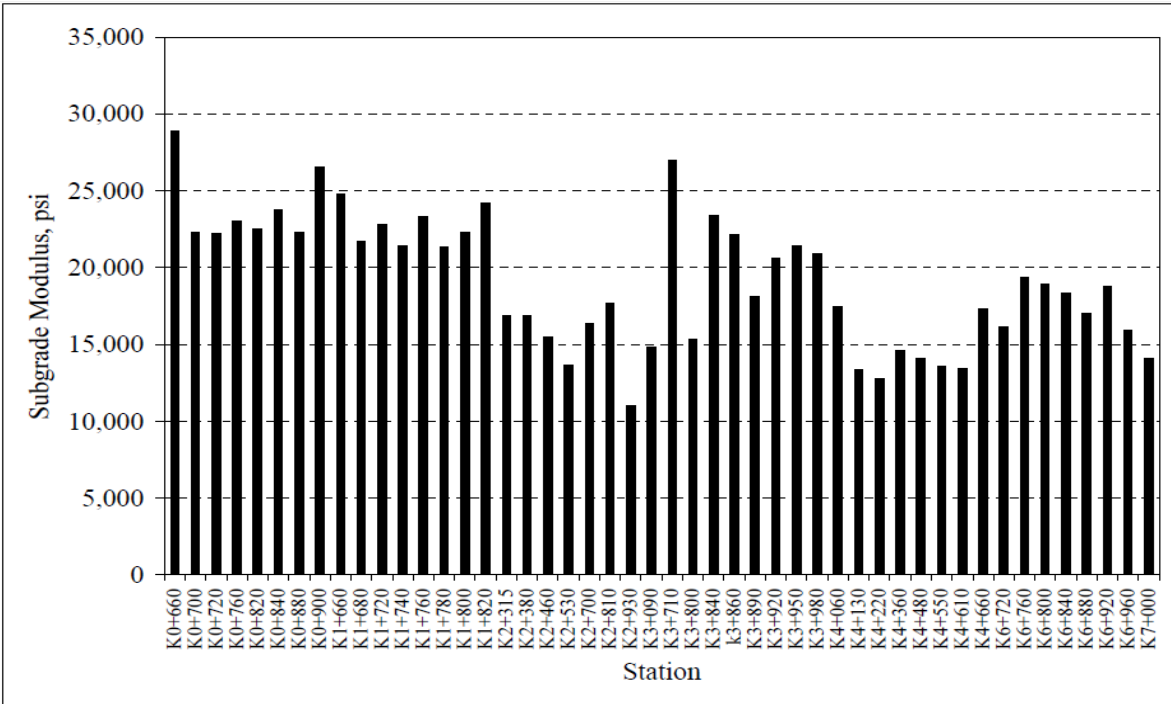
**Figura 7. Espectros de ejes cargas.**

(Fuente: Yang, Yongshun. Gao, Xuechi. Lin, Wang. Perpetual pavement design in China. International Conference on Perpetual Pavement Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, July 25, 2006.)

### 3.2.8 Caracterización de Materiales

La caracterización de materiales se comenzó examinando una cantidad limitada de datos de ensayos de deflectometría por impacto (FWD), los datos fueron facilitados por el Instituto de Investigación de Shandong. Las pruebas se realizaron directamente en el terraplén preparado con cargas que van desde 2.000 a 8.000 libras (8,8 a 35,6 Kn).

Se empleó el método estándar AASHTO utilizando la deflexión más externa para estimar la rigidez del suelo ( $M_r$ ), y los resultados se resumen en la Figura 8. Los datos siguieron una distribución aproximadamente normal con una media de 19.179 psi (132 Mpa). Dado que los datos eran de una fecha de la prueba y no hay información sobre los cambios de estación estaba disponible, se desarrollaron una serie de diseños posibles utilizando diversas rigideces del suelo. En concreto, los diseños fueron desarrollados para 7000, y 15.000 psi (48 Mpa y 103 Mpa) del suelo.



**Figura 8. Rigidez del suelo terraplén.**

(Fuente: Yang, Yongshun. Gao, Xuechi. Lin, Wang. Perpetual pavement design in China. International Conference on Perpetual Pavement Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, July 25, 2006.)

Aunque un plan de pruebas de laboratorio integral está actualmente en curso para los materiales asfálticos utilizados en el proyecto, muy poca información con respecto a la rigidez estaba disponible durante la fase de diseño. Por lo tanto, las hipótesis eran necesarias. A través de las discusiones del equipo y la revisión de los conjuntos de datos pertinentes, tales como los del Centro Nacional de Tecnología de Asfalto (NCAT), la rigidez del diseño para HMA se fijó en 700.000 psi (4826 Mpa). Este valor es razonable dado que materiales similares fueron probados la pista de pruebas en el NCAT que produjeron rigideces promedio, desde el retrocálculo, de aproximadamente 850.000 psi (5.860 Mpa) a 68F (20C). Teniendo en cuenta que la temperatura media anual en la ubicación del proyecto es 58.6F (14.8C), el valor de diseño puede ser considerado conservador pero razonable. (14)

### 3.2.9 Criterio de desempeño

El concepto central del diseño del pavimento perpetuo es el establecimiento de las respuestas del umbral por debajo del cual no van a ocurrir daños estructurales en el pavimento. Tradicionalmente, agrietamiento por fatiga se ha controlado a través de la limitación de la tensión horizontal en la parte inferior de la capa de HMA, mientras que la formación de surcos estructurales ha sido controlada por la limitación de la tensión vertical en la parte superior de la sub-base. Los laboratorios y la investigación de campo han estimado conservadoramente los umbrales de fatiga y ahuellamiento de 70 y 200  $\mu\epsilon$ , respectivamente. Otros estudios han sugerido que el umbral de fatiga puede ser significativamente mayor, a la tracción horizontal en microstrain superior a 150  $\mu\epsilon$ . En base a estos esfuerzos previos, se decidió desarrollar diseños en dos umbrales de tensión fatiga teóricas, 70  $\mu\epsilon$  y 125  $\mu\epsilon$ , y utilizar los resultados de la experiencia para ayudar a guiar los futuros diseños de pavimentos perpetuos. El criterio de la tensión vertical, se fijó en 200  $\mu\epsilon$ ; consistente con un estudio de campo anterior.

### 3.2.10 Diseño en PerRoad y selección de las subcapas de HMA

Los datos descritos anteriormente se usaron en el software de diseño de pavimento perpetuo, PerRoad 2.4. Este programa de diseño de pavimentos mecanicista empírico (ME) utiliza análisis elástico en capas y la simulación de Monte Carlo para desarrollar diseños de pavimento estocásticos. Los algoritmos computacionales dentro PerRoad están más allá del alcance de este documento, pero se pueden encontrar en otras publicaciones (14).

Usando PerRoad 2,4, múltiples diseños fueron desarrollados para mantener las respuestas de pavimento críticos por debajo de los umbrales respectivos en el 90% del tiempo. En otras palabras, un pequeño porcentaje de "sobrecargas" se permitió en el diseño. Cabe señalar que un estudio de fatiga de laboratorio realizada por Thompson y Carpenter (14) indicó que una pequeña proporción de las sobrecargas que superan el umbral cepa no alteró la existencia del umbral de tensión.

Se utilizaron dos conjuntos de propiedades y los criterios de falla de material en el desarrollo de los diseños. El primer set fue un diseño conservador utilizando una rigidez del suelo de 7000 psi (48 Mpa) con el umbral de fatiga a 70  $\mu\epsilon$ . El segundo set fue menos conservador considerando 15,000 psi (103 Mpa) del suelo y un umbral de fatiga de 125  $\mu\epsilon$ . Los espesores resultantes se ilustran en la figura 6, donde el diseño conservador está representado por "70  $\mu\epsilon$ " y los diseños menos conservadoras son designados por "125  $\mu\epsilon$ ." Los criterios en (ahuellamiento) celo de menos de 200  $\mu\epsilon$  se reunieron en cada caso, y no controlan el diseño de estas secciones. (14)

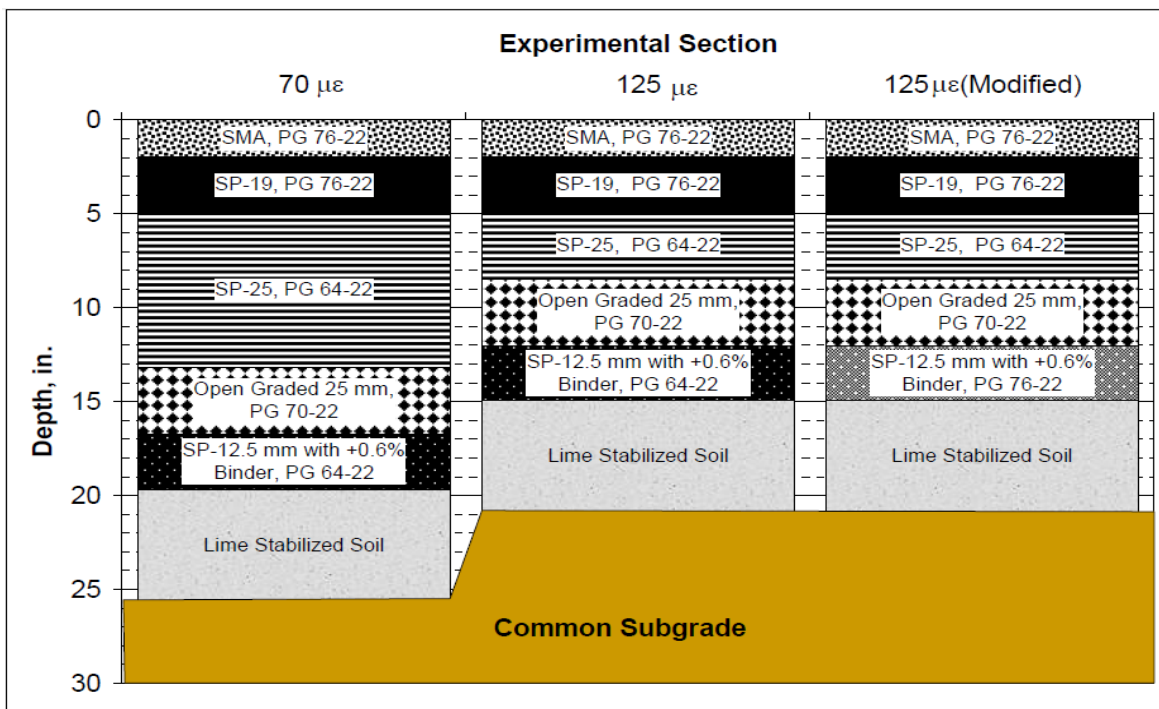
Como se muestra en la Figura 9, el diseño conservador dio lugar a aproximadamente 20 pulgadas. (508 mm) de espesor de los materiales de HMA

por encima del suelo estabilizado con cal, mientras que el diseño menos conservador consistió en 15 pulgadas. (380 mm) de espesor de HMA. En comparación, las secciones de control fueron considerablemente más delgadas; tuvieron espesores de HMA de 6-7 in. (150 a 180 mm).

Se seleccionaron las subcapas dentro de la HMA para lograr la resistencia al ahuellamiento en las porciones superiores del pavimento y resistencia a la fatiga en las porciones inferiores.

A tal fin, que se utilizaron SMA y capas graduadas densas de superpave se utilizaron en las subcapas superiores. Una capa de drenaje de gradación abierta fue utilizada dentro de cada sección para ayudar a eliminar la humedad y mitigar los problemas de desbroce. Daños por humedad se han observado en varias investigaciones de pavimentos que han fracasado en la provincia de Shandong que habían estado en servicio durante 5 a 8 años.

Cada sección experimental contó con una capa de HMA inferior como material clasificado denso resistente a la fatiga con un contenido de asfalto de 0,6% por encima del óptimo. En base a estudios previos, se cree que el contenido de asfalto añadido mejorará la resistencia a la fatiga y la densidad global de la acera, donde los esfuerzos de tracción son los más altos. El "125  $\mu\epsilon$  (Modificado)" sección que tiene un polímero aglutinante modificado se espera que mejore aún más la resistencia a la fatiga.



**Figura 9. Secciones de prueba del pavimento perpetuo.**

(Fuente: Yang, Yongshun. Gao, Xuechi. Lin, Wang. Perpetual pavement design in China. International Conference on Perpetual Pavement Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, July 25, 2006.)

### **3.3 Metodología utilizada en Estados Unidos**

#### **3.3.1 Resumen**

En esta investigación se recopilaron los datos de diseño, construcción y datos de rendimiento utilizados en la US-70, este pavimento fue diseñado y construido utilizando conceptos de pavimentos perpetuos.

Los datos de diseño, construcción y rendimiento disponibles del proyecto US-70 Hondo Valle se describen y se resumen a continuación (AMEC 2007).

#### **3.3.2 Criterio de diseño**

Según el informe de la AMEC en el Proyecto de Hondo Valle US-70, este pavimento perpetuo fue diseñado usando un diseño mecanicista (ME), este procedimiento que incluía modelos del Instituto de Asfalto (AMEC 2007). Estos modelos asumen un nivel de fatiga de:

- $\leq 10$  % de agrietamiento por fatiga al final de la vida útil del pavimento (fallo por fatiga); y
- $\leq 0,5$  pulgadas de deformación permanente en la subrasante (falla por ahuellamiento) al final de la vida útil del pavimento.

El proyecto de US-70 Hondo Valle es un proyecto de diseño y construcción, que fue diseñado y construido por Sierra Blanca Constructores (SBC). El diseño que utilizó SBC utiliza el concepto de usar una mezcla “rica en la parte inferior”, como una capa de base en la porción de HMA de la estructura del pavimento. SBC indicó al Departamento de Transporte de Nuevo México (NMDOT) y a la Administración Federal de Carreteras (FHWA) que el uso de este concepto debería aumentar la vida útil del pavimento a partir de 20 años a 30 años. (13)

#### **3.3.3 Tráfico, espesor, y la vida útil del proyecto**

En el proyecto de US-70 Hondo Valle, una carretera de dos carriles fue removida y reemplazada con una autopista de cuatro de una longitud de 37,7 millas. La estructura del pavimento fue construida durante el periodo de 2003 - 2004. El Pavimentos Asfáltico Poroso (OGFC) se colocó durante el verano de 2005. La estructura del pavimento de asfalto utilizado en el proyecto constaba de nueve pulgadas de planta de mezcla bituminosa de pavimento (PMBP) sobre una capa de base sin tratar de seis pulgadas sobre una subrasante compactada. La capa de PMBP consiste 2.5 pulgadas de SP-III sobre una capa de SP-III con 20 por ciento de pavimento asfáltico reciclado (esta capa variaba en espesor (4, 4,25 y 4,5 pulgadas), dependiendo de la fuerza de la sub-base en esa zona) y sobre una capa de 2,5 pulgadas de SP-III que fue diseñado con aglutinante de asfalto adicional para proporcionar una mejora en la capa inferior (para mejorar la resistencia a la fatiga del pavimento). La vida útil del proyecto se estimó de 30

años. El nivel de tráfico de diseño utilizado por SBC según lo dispuesto por el Departamento de Transporte de Nuevo México (NMDOT) fue de 8,8 millones de ESALs.

### **3.3.4 Propiedades de los materiales**

Las siguientes tablas muestran las propiedades de los materiales de las cinco secciones del proyecto US-70 Hondo Valley. Cada tabla muestra las tres capas principales de un pavimento perpetuo, la superficie de desgaste, la capa intermedia y la capa base. El espesor de cada capa se administra junto con sus propiedades, tales como grado y el contenido de aglutinante, contenido de vacíos de aire y el módulo. Estos datos pueden ser introducidos directamente al software mecanicista-empírica como MEPDG.

**Tabla 9. Propiedades de las secciones de pavimento perpetuos de la US-70 secciones a y b.**

Capa de pavimento	Composición del pavimento	Nuevo Mexico US 70(a)		Nuevo Mexico US 70(b)	
Superficie de Desgaste	Material y espesor	0.63 in OGFC	2.5 in HMA	0.63 in OGFC	2.5 in HMA
	Grado del Aglutinante	PG 70-22	PG 70-22	PG 70-22	PG 70-22
	(%) Contenido de Aglutinante	4.8	4.8	4.8	4.8
	(%) Vacios de Aire	4	4	4	4
	Modulo (psi)	650000		650000	
Capa Intermedia	Material y espesor	4.25 in HMA		4.5 in HMA	
	Grado del Aglutinante	PG 64-22		PG 64-22	
	(%) Contenido de Aglutinante	4.9		4.9	
	(%) Vacios de Aire	4.0		4.0	
	Modulo (psi)	868000		868000	
Base	Material y espesor	2.5 in HMA	6 in GB	2.5 in HMA	6 in GB
	Material AASHTO	NA	A-1-a	NA	A-1-a
	Grado del Aglutinante	PG 70-22	NA	PG 70-22	NA
	(%) Contenido de Aglutinante	5.2	NA	5.2	NA
	(%) Vacios de Aire	2.8	NA	2.8	NA
	Modulo (psi)	977000	23100	977000	27400
Subrasante	Material AASHTO	GM		GM	
	Modulo Resiliente (psi)	10100		8700	

(Fuente: University of New Mexico, Future Design of Perpetual Pavements for New Mexico, December de 2009.)

**Tabla 10. Propiedades de las secciones de pavimento perpetuos de la US-70 secciones c y d.**

Capa de pavimento	Composición del pavimento	Nuevo Mexico US 70(c)		Nuevo Mexico US 70(d)	
Superficie de Desgaste	Material y espesor	0.63 in OGFC	2.5 in HMA	0.63 in OGFC	2.5 in HMA
	Grado del Aglutinante	PG 70-22	PG 70-22	PG 70-22	PG 70-22
	(%) Contenido de Aglutinante	4.8	4.8	4.8	4.8
	(%) Vacios de Aire	4	4	4	4
	Modulo (psi)	650000		650000	
Capa Intermedia	Material y espesor	4.25 in HMA		4 in HMA	
	Grado del Aglutinante	PG 64-22		PG 64-22	
	(%) Contenido de Aglutinante	4.9		4.9	
	(%) Vacios de Aire	4.0		4.0	
	Modulo (psi)	868000		868000	
Base	Material y espesor	2.5 in HMA	6 in GB	2.5 in HMA	6 in GB
	Material AASHTO	NA	A-1-a	NA	A-1-a
	Grado del Aglutinante	PG 70-22	NA	PG 70-22	NA
	(%) Contenido de Aglutinante	5.2	NA	5.2	NA
	(%) Vacios de Aire	2.8	NA	2.8	NA
	Modulo (psi)	977000	25500	977000	25500
Subrasante	Material AASHTO	GM		GM	
	Modulo Resiliente (psi)	10300		11800	

(Fuente: University of New Mexico, Future Design of Perpetual Pavements for New Mexico, December de 2009.)

**Tabla 11. Propiedades de las secciones de pavimento perpetuos de la US-70 sección e.**

<b>Capa de pavimento</b>	<b>Composición del pavimento</b>	<b>Nuevo Mexico US 70(e)</b>	
<b>Superficie de Desgaste</b>	<b>Material y espesor</b>	0.63 in OGFC	2.5 in HMA
	<b>Grado del Aglutinante</b>	PG 70-22	PG 70-22
	<b>(%) Contenido de Aglutinante</b>	4.8	4.8
	<b>(%) Vacios de Aire</b>	4	4
	<b>Modulo (psi)</b>	650000	
<b>Capa Intermedia</b>	<b>Material y espesor</b>	4 in HMA	
	<b>Grado del Aglutinante</b>	PG 64-22	
	<b>(%) Contenido de Aglutinante</b>	4.9	
	<b>(%) Vacios de Aire</b>	4.0	
	<b>Modulo (psi)</b>	868000	
<b>Base</b>	<b>Material y espesor</b>	2.5 in HMA	6 in GB
	<b>Material AASHTO</b>	NA	A-1-a
	<b>Grado del Aglutinante</b>	PG 70-22	NA
	<b>(%) Contenido de Aglutinante</b>	5.2	NA
	<b>(%) Vacios de Aire</b>	2.8	NA
	<b>Modulo (psi)</b>	977000	29100
<b>Subrasante</b>	<b>Material AASHTO</b>	GM	
	<b>Modulo Resiliente (psi)</b>	13000	

(Fuente: University of New Mexico, Future Design of Perpetual Pavements for New Mexico, December de 2009.)

### 3.4 Metodologías utilizadas en Colombia

#### 3.4.1 Metodología INVIAS

El método de diseño de pavimentos INVIAS, consiste en determinar el tránsito en el periodo de diseño, los factores medio ambientales (temperatura y precipitación), y la capacidad de soporte de la subrasante. A partir de estas variables se clasifica cada parámetro en una categoría y por último se calcula la estructura de pavimento por medio de las cartas de diseño del manual.

El primer paso es determinar el tránsito promedio diario, a partir de este se establece la categoría de la vía por medio de la siguiente tabla.

**Tabla 12. Categoría de la vía.**

Categoría de la vía				
	I	II	III	Especial
<b>Descripción</b>	Autopistas interurbanas caminos interurbanos principales	Colectoras interurbanas caminos rurales e industriales principales	Caminos rurales con tránsito mediano caminos estratégicos	Pavimentos especiales e innovaciones
<b>Importancia</b>	Muy importante	Importante	Poco importante	Importante a poco importante
<b>Transito Promedio Diario</b>	> 5000	1000 – 10000	< 1000	< 10000

(Fuente: INVIAS. Manual de Diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, Bogotá, Colombia, 1997).

Lo siguiente es definir el periodo de diseño de la estructura mediante la categoría de la vía con la siguiente tabla.

**Tabla 13. Periodo de diseño estructural recomendado.**

Categoría de la vía	Periodo de diseño estructural (años)	
	Rango	Recomendado
I	10-30	20
II	10-20	15
III	10-20	10
Especial	7-20	10-15

(Fuente: INVIAS. Manual de Diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, Bogotá, Colombia, 1997).

El siguiente paso es definir el tráfico de diseño, se tiene que hallar el número de ejes equivalentes para el periodo de diseño los cuales se tienen que corregir para garantizar una confiabilidad del 90 % empleando la siguiente ecuación:

$$N' = 1.159 * N$$

Al aplicar la anterior ecuación se obtiene un número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, con estos valores se ingresa a la siguiente tabla y se determina el rango de tránsito que corresponde para la vía en estudio:

**Tabla 14. Rangos de tránsito contemplados en el método de diseño.**

Designacion	Rangos de tránsito acumulado por carril de diseño
T1	0.5 - 1 * 10 <sup>6</sup>
T2	1 - 2 * 10 <sup>6</sup>
T3	2 - 4 * 10 <sup>6</sup>
T4	4 - 6 * 10 <sup>6</sup>
T5	6 - 10 * 10 <sup>6</sup>
T6	10 - 15 * 10 <sup>6</sup>
T7	15 - 20 * 10 <sup>6</sup>
T8	20 - 30 * 10 <sup>6</sup>
T9	30 - 40 * 10 <sup>6</sup>

(Fuente: INVIAS. Manual de Diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, Bogotá, Colombia, 1997).

Lo siguiente es definir las condiciones medioambientales y determinar en que categoría se encuentra, Según el manual de diseño de pavimentos asfálticos de vías con medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS el país se divide en seis regiones climáticas determinadas por condiciones particulares de temperatura y precipitación de acuerdo con la siguiente tabla:

**Tabla 15. Regiones climáticas de Colombia según la temperatura y precipitación.**

No	Region	Temperatura TMAP (°C)	Precipitación media anual (mm)
R1	Fría seca y fría semihúmeda	< 13	< 2000
R2	Templado seco y templado semihúmedo	13 – 20	< 2000
R3	Cálido seco y cálido semihúmedo	20 – 30	< 2000
R4	Templado húmedo	13 – 20	2000 – 4000
R5	Cálido húmedo	20 – 30	2000 – 4000
R6	Cálido muy húmedo	20 - 30	> 4000

(Fuente: INVIAS. Manual de Diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, Bogotá, Colombia, 1997).

El siguiente paso es caracterizar la capacidad de soporte de la subrasante de acuerdo a los rangos establecidos en el manual del INVIAS que se muestran a continuación:

**Tabla 16. Valores de resistencia de la subrasante.**

Categoría	Intervalo de Módulo Resiliente (kg/cm <sup>2</sup> )	Intervalo de CBR (%)
S1	300 – 500	3 ≤ CBR < 5
S2	500 – 700	5 ≤ CBR < 7
S3	700 – 1000	7 ≤ CBR < 10
S4	1000 – 1500	10 ≤ CBR < 15
S5	> 1500	CBR ≥ 15

(Fuente: INVIAS. Manual de Diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, Bogotá, Colombia, 1997).

Por último con la anterior información y con las respectivas categorías de los aspectos que influyen en el diseño del pavimento se tiene que remitir a las cartas de diseño para poder hallar los diferentes espesores de la estructura a diseñar. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de las cartas de diseños que emplea el manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito.

**Carta No. 1**  
**Región 1 (R1)**  
**Frío seco y frío semihúmedo**

TMAP < 13°C  
Precipitación < 2000 mm/año



1. Cuando el espesor MDC sea > 12 cm se podrá dividir la capa de base y de concreto de rodadura poniendo 5 cm como mínimo de rodadura.
2. Cuando el espesor MDC sea importante el tamaño máximo del agregado podrá aumentarse utilizando MDC-1.

**Figura 10. Ejemplo de carta de diseño del manu manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito.**

(Fuente: INVIAS. Manual de Diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, Bogotá, Colombia, 1997).

### 3.4.2 Metodología AASHTO

Esta metodología consiste en el análisis de diferentes variables como, el número de ejes equivalentes con el que se va a diseñar la estructura, los niveles de confiabilidad de la vía en estudio, el coeficiente de serviciabilidad que se espera obtener de esta vía y el módulo resiliente del suelo, mediante estos factores se halla el número estructural y con esto se puede diseñar el dimensionamiento de las diferentes capas del pavimento.

- Tránsito de diseño (W18): El número de ejes equivalentes de 8.2 Ton en el carril de diseño para el periodo de diseño

- Nivel de Confianza (R): Permite incluir un grado de seguridad en el proceso de diseño para que las alternativas de estructuras propuestas se comporten satisfactoriamente bajo las condiciones de tránsito y ambientales que se generen en el periodo de diseño. La guía AASHTO-93 recomienda unos valores de confiabilidad, de acuerdo al tipo de vía que se esté analizando en el diseño del pavimento.

**Tabla 17. Niveles de confiabilidad sugeridos para diferentes carreteras.**

Clasificación	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbana	Rural
Autopistas interestatales y otras	85-99,9	80-99,9
Arterias Principales	80-99	75-95
Colectoras de transitos	80-95	75-95
Carreteras locales	50-80	50-80

(Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993. Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials. 44N Capital Street. E.E., Suite 249 Washington, D.C., 2001).

En el momento que se conozca la confiabilidad (R) que vamos a utilizar tenemos que hallar la desviación estándar (ZR) con respecto a la siguiente tabla:

**Tabla 18. Valores de ZR en la curva normal para diversos grados de confiabilidad.**

Confiabilidad (R)	Valor de ZR
50	0
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,34
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751
97	-1,881
98	-2,054
99	-2,327
99,9	-3,09
99,99	-3,75

(Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993)

- **Serviciabilidad ( $\Delta$ PSI):** La Guía AASHTO establece que “La serviciabilidad es la habilidad específica de una sección de pavimento para servir al tráfico”. Se deben elegir, la serviciabilidad inicial y final. La inicial es función del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción, y la final está relacionada a la falla funcional del pavimento.

**Tabla 19. Índice de serviciabilidad en función de la calidad de vida.**

Índice de serviciabilidad	Calificación
0-1	Muy mala
1-2	Mala
2-3	Regular
3-4	Buena
4-5	Muy buena

(Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.)

- **Error normal combinado ( $S_o$ ).** Este parámetro tiene en cuenta el error o desviación del diseño, la variación de las propiedades de los materiales y de la subrasante, y la estimación del tránsito; para pavimentos flexibles, la AASTHO remienda un  $S_o$  entre 0.40 y 0.50

**Tabla 20. Valores Recomendados para la Desviación Estándar (So).**

Condición de Diseño	Desviación Estándar
Variación de la predicción en el comportamiento del pavimento (sin error de tráfico)	0,25
Variación total en la predicción del comportamiento del pavimento y en la estimación del tráfico	0,35-0,50 <b>(0,45 Valor recomendado)</b>

(Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.)

- Módulo resiliente de la subrasante. Es la propiedad que caracteriza los materiales de la subrasante y las propiedades elásticas del suelo. El módulo resiliente de la subrasante se obtuvo mediante la ecuación de la metodología AASHTO 2002:

$$Mr \left( \frac{kg}{cm^2} \right) = 100 * CBR$$

Con los parámetros mencionados anteriormente se determina el número estructural del pavimento (SN), el cual representa la resistencia total de un pavimento para unas condiciones de subrasante, tránsito, índices de servicio y características ambientales. Según la AASTHO, el SN de la estructura de pavimento se determina bajo la siguiente relación

$$\log W_{18} = ZR * So + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40\left(\frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}\right)} + 2.32 \log Mr - 8.07$$

- W18= Número estimado de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas.
- ZR= desviación estándar normal.
- So= error estándar combinado de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento.
- ΔPSI= Diferencia entre el índice de servicio inicial (Po) y el final (Pt).
- Mr= Módulo resiliente.

### 3.4.2.1 Análisis del diseño general

El método general se basa en determinar el número estructural efectivo (SN) aplicando la metodología de coeficientes establecida en la AASHTO 93 que está relacionada con la siguiente ecuación:

$$SN = a1 * D1 + a2 * D2 * m2 + a3 * D3 * m3$$

Dónde:

- **a1, a2, a3:** Coeficientes estructurales de la capa asfáltica, base granular y subbase granular (pulgadas), los cuales se determinan con base en las características mecánicas de los materiales, según la tabla 21. Valores de coeficientes estructurales  $a_i$ , del Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito.
- **D1, D2, D3:** Espesores de la capa asfáltica, base granular y subbase granular (pulgadas).
- **m2, m3:** Coeficientes de drenaje para base granular y subbase granular, los cuales se determinan de acuerdo con los niveles de precipitación, calidad de drenaje y considerando que el pavimento estará a niveles de humedad próximos a la saturación por lapsos cercanos al 15% del tiempo de exposición, los valores a utilizar en este diseño se referencian en la tabla 21. Valores del coeficiente de drenaje  $m_i$ , del Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito.

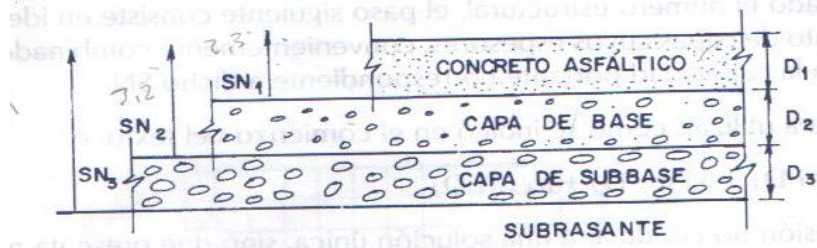
**Tabla 21. Coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje.**

Capa	Coeficientes Estructurales ( $a_i$ )	Coeficientes de Drenaje ( $m_i$ )
Carpeta Asfáltica	0,3	
Base Granular	0,14	0,9
Subbase Granular	0,12	0,9

(Fuente: INVIAS. Manual de Diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, Bogotá, Colombia, 1997).

### 3.4.2.2 Análisis del diseño por capas

Siendo la estructura de pavimento un sistema con diferentes capas, la distribución de los espesores de cada capa debe hacerse de acuerdo con los principios de la siguiente figura:



**Figura 11. Esquema de distribución de espesores del análisis por capas de la metodología AASHTO.**

(Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.)

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1^* \geq SN_1$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

- a, D, m y SN se definen como los valores mínimos requeridos.
- El asterisco en D o SN indica que representa el valor realmente usado, el cual debe ser mayor o igual al requerido.

#### 4. Vías de cuarta generación (4G) en Colombia

En el país actualmente se está adelantando un proyecto de infraestructura vial llamado autopistas de cuarta generación o 4G, con este proyecto el gobierno tiene presupuestado invertir alrededor de 47 billones de pesos, con esto el gobierno piensa construir más de 8,000 km de carreteras, incluyendo 1,370 km de doble calzadas, y 159 túneles, en todo el territorio colombiano. (Periódico el tiempo, 2015)

El objetivo principal de este proyecto es mejorar la competitividad del país, con estas nuevas vías se trata disminuir el costo y tiempo de transporte de personas y en especial el costo y el tiempo de transporte de la carga que se mueve actualmente en el país desde los puntos de manufacturación a los puertos de exportación. Según estudios de la (ANI) Agencia Nacional de Infraestructura, estas nuevas carreteras pueden ayudar a el PIB del país, por ejemplo en los años de construcción puede tener un efecto multiplicador de 1.5% sobre el PIB, y a largo plazo puede generar un crecimiento potencial de PIB que puede pasar de 4.6% a 5.3% esto si el proyecto se cumple con los plazos acordados. (Artículo revista dinero, 2015)

También es importante recalcar que con las Carreteras 4G se sacaría a Colombia del atraso en infraestructura vial que ha sufrido el país por décadas y que ha impactado directamente al crecimiento de este, haciendo cada vez más difícil el transporte de personas y bienes, e incluso, el acceso a regiones alejadas del país que no tienen una red vial adecuada y por eso el estado no tiene o se le muy dificulta hacer presencia en ellas y esto limita significativamente el crecimiento de la economía del país.

Si este proyecto se llegara a culminar con éxito esto sería un avance muy significativo para el país en cuestión de crecimiento y economía, pero no solo es construir las vías que necesita el país sino mantenerlas en un estado óptimo para que no hallen complicaciones a futuro. Pero actualmente el país no cuenta con una metodología confiable en el ámbito de estructuras de pavimentos, por ejemplo el método de diseño de pavimentos flexibles del Instituto Nacional de Vías, es empírico, el problema con estos métodos es que el cambio de las condiciones del tránsito o del clima en la zona de estudio hacen que este tipo de métodos pierda confiabilidad en la predicción del dimensionamiento de la estructura de pavimentos, y en Colombia las condiciones del clima y del tránsito son cambiantes.

En Colombia el sistema de carreteras es el más usado para el desplazamiento de carga y de pasajeros, y la tendencia a utilizar este tipo de vehículos en los últimos 30 años ha ido incrementando considerablemente, en general el incremento promedio anual del tránsito es del 4,6 %, el problema de transito se agrava cuando en el país por las diferentes carreteras los pesos máximos permitidos de carga se exceden. Y con respecto al clima los fenómenos ambientales como “El Niño” o

“La Niña”, hacen que la temperatura presente variabilidad interanual de 2°C en algunas zonas del territorio nacional y que la precipitación aumente provocando períodos de lluvia de hasta dos meses más de lo normal por año. (10)

Por otro lado la forma para caracterizar materiales granulares y cuantificar la calidad de los mismos solo se pueden realizar medidas indirectas de la calidad y en algunos casos la resistencia al corte, pero no pueden predecir la rigidez y la resistencia a la deformación permanente que tienen los materiales granulares bajo una carga rodante. (10)

Por esos motivos es que el país no solo tiene que invertir en construir más kilómetros de vías, sino que también tiene que invertir en el mejoramiento de las metodologías utilizadas en el país para la construcción de pavimentos, ya que actualmente en el país las estructuras de pavimentos rara vez cumplen con su vida útil o sufren daños serios en poco tiempo y esto genera problemas de gran magnitud para el país, la importancia de estas nuevas metodologías es que le va a permitir al país tener una confiabilidad en el aspecto de la duración de las carreteras ya que los pavimentos perpetuos tiene una vida útil muy larga y sin mayores costos de mantenimiento y rehabilitación, esto le va a permitir al gobierno optimizar sus inversiones y no tener que invertir tanto dinero en reconstrucción y mantenimiento de las vías existentes, sino que puede invertirlo en otras necesidades que tenga en esos momentos el país.

## **5. Matriz de factibilidad Tecnica**

### **5.1 Introduccion**

Al momento de analizar las metodologías que se habían utilizado a lo largo del mundo, se escogieron tres casos específicos de tres países distintos. La primera metodología estudiada fue la utilizada en Costa Rica, en esta metodología se utilizó como base y método de diseño la metodología AASHTO 1993 y luego se utilizó una serie de ecuaciones del Instituto del Asfalto para poder calibrar los espesores y así poder tener los resultados esperados en la estructura de pavimento. La segunda metodología estudiada fue la utilizada por China, esta metodología se usó para el diseño de la estructura un software llamado PerRoad 2.4, con los datos de los espectros de carga y los estudios realizados en la subrasante, pudieron calcular tres tipos de estructura de pavimentos perpetuos con diferentes especificaciones y por último la tercera metodología estudiada fue la utilizada en Estado Unidos en la ciudad de Nuevo Mexico, ésta tuvo como base modelos del Instituto del Asfalto para el diseño de 5 secciones de pavimentos perpetuos con distintas especificaciones en materiales y resistencias de la subrasantes.

Los valores que se adoptaron en la matriz para el caso de Colombia es una recomendación de que valores y aspectos se deben tener en cuenta al momento de aplicar una metodología de pavimentos perpetuos en el país, por ejemplo en la vida útil se espera que el diseño del pavimento perpetuos tenga una duración de 50 años pero hay casos como en el de Estados Unidos que se diseñó para 30 años, en las condiciones de tráfico se concluyó que preferiblemente se debería tener como mínimo el espectro de carga para así poder tener una información detallada del tráfico, pero en su defecto también se podría utilizar el número de ejes equivalentes que se obtuvieron del estudio realizado, en la capa asfáltica el rango de valores que se decidió tomar fue de 3000 Mpa para ser una mezcla densa y de 7000 Mpa para ser una mezcla de alto módulo que sería lo esencial para aplicar en la metodología con el fin de obtener mayor rigidez y mayor duración al desgaste. En el aspecto de la subrasante se recomendaron valores entre 27 y 103 Mpa, si la subrasante no alcanza estos valores se tendría que aplicar algún método de estabilización a la subrasante para poder mejorar su rigidez y así evitar que los espesores a diseñar sean muy elevados. Por último en el método de diseño se consideró que se deben tener conocimiento en metodologías mecano-empíricas para poder realizar este tipo de diseños de pavimentos perpetuos, también sería primordial el conocimiento y manejo de

software especializados en este tipo de diseños, se conoce que actualmente el INVIAS está preparando un software de diseño de pavimentos y la Universidad Pontificia Bolivariana adquirió un software de diseño de pavimentos que utiliza métodos mecano-empíricos llamado Pavement.

## 5.2 Matriz de factibilidad técnica

Pais	Ubicación	Vida Util (años)	Tráfico	Capa Asfáltica	Subrasante	Metodo de Diseño
Costa Rica	-	50	Entre 75 millones y 110 millones de ESALs	Rigidez de los materiales entre 3000 Mpa y 7000 Mpa	Módulo resiliente de 4250 psi (29 Mpa)	Utilizaron la guía de diseño AASHTO 93 y luego se calibraron los espesores con ecuaciones de fatiga desarrolladas por el instituto del asfalto y modelos desarrollados en África del sur
China	Shandong	50	Espectros de carga	Rigidez del diseño para HMA de 4826 MPa (700.000 psi)	Rigidez del suelo (Mr) de 7000, y 15.000 psi (48 MPa y 103 MPa)	Para el diseño se utilizó el software de diseño de pavimento perpetuo, PerRoad 2.4
EEUU	Nuevo Mexico	30	264 Millones de ESALs	Rigidez de los materiales de 4481,3 Mpa (650000 Psi)	Módulo resiliente 10780 psi (73,5 Mpa)	Se utilizaron modelos del instituto del Asfalto
Colombia	-	Vida util del diseño entre 30 a 50 años	Preferiblemente contar con el espectro de carga o en su defecto con el número de ejes equivalentes para el diseño de la estructura	La rigidez de los materiales tiene que ser de 3000 Mpa ( 400000 Psi) para ser una mezcla densa y 7000 Mpa (933333 Psi) para ser una mezcla de alto modulo	Los valores recomendados que tiene que tener la rigidez del suelo o módulo resiliente (Mr) tienen variar entre 27 Mpa 84000 Psi) y 103 Mpa (15000 Psi)	Para la metodología de diseño el país tiene que buscar un metodo Mecano-Empirico o el manejo de un software avanzado en el dimensionamiento de estructuras viales

Fuente: Elaboracion Propia.

## 6. Recomendaciones y Conclusiones

- Se observa que los países latinoamericanos poco o nada han iniciado el proceso de optimizar sus inversiones. La información obtenida es ofrecida en mayor cantidad por países con mayores desarrollos, por lo que es inminente que se debe lograr un salto tecnológico en el uso de metodologías de diseño que permitan el aumento de la vida útil de los proyectos viales.
- Colombia, puede al igual que Costa Rica, hacer el salto tecnológico de diseño y construcción de pavimentos perpetuos, puesto que va a tener una inversión macro de 47 billones de pesos en la construcción de las carreteras llamadas 4G.
- La tecnología usada en el diseño de dichas carreteras tomadas como ejemplo, son en la actualidad posibles de usar en el país, con algunas restricciones, por lo que el gobierno con una inversión de dicha magnitud como la que se informa por los medios de comunicación no debería ahorrar en la exigencia del uso de metodologías modernas que permitan un mayor periodo de vida útil.
- Las vías en Colombia se diseñan con un periodo de vida útil de aproximadamente 10 años, periodo que requieren mantenimiento y rehabilitaciones o reconstrucciones, inclusive antes de cumplir el periodo de vida útil. Se recomienda que el gobierno nacional utilice las nuevas tecnologías para lograr el cumplimiento de la vida útil con la que se diseñan los pavimentos o en el mejor de los casos poder aumentar la vida útil de los pavimentos en vías de gran importancia nacional para optimizar las inversiones financieras.
- De acuerdo al análisis realizado para diseñar en Colombia un proyecto vial de pavimento perpetuo debe considerar como mínimo lo siguiente:
  - Tránsito, preferiblemente se debe contar con el espectro de carga del tránsito de la vía de estudio, pero también se pueden utilizar número de ejes equivalentes a la hora del diseño.
  - Capa asfáltica, considerar siempre mezclas de alto módulo que permiten una mayor resistencia y mejor comportamiento ante las cargas de tránsito y condiciones climáticas variantes.
  - Subrasante, los valores de módulo resiliente deben ser como mínimo de 27 Mpa, en caso de no cumplir se tienen que tener en cuenta algún tipo de mejoramiento de la subrasante o estabilización del suelo.

- Metodología de diseño, para el diseño se tiene que utilizar un método mecano-empírico o se tiene que utilizar un software avanzado en el dimensionamiento de estructuras viales.
- Se debe profundizar el planteamiento de metodologías en Colombia que permitan obtener una mejor y más avanzada infraestructura vial como la de los pavimentos perpetuos.
- Invertir en nuevas tecnologías tanto en software como en equipos de laboratorio para la implementación de metodologías más avanzadas en el diseño y construcción de pavimentos perpetuos. Colombia debe considerar para diseño la oferta de software mecano-empírico en el cual confluyen el análisis científico de la mecánica de suelos y la experiencia de los ingenieros.
- Institucionalizar los métodos para que sean usados por la comunidad ingenieril.

## 7. Referencias Bibliográficas

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993. Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials. 44N Capital Street. E.E., Suite 249 Washington, D.C., 2001.
2. Asphalt Pavement Alliance (APA), Perpetual Pavement A Synthesis. 2010.
3. Basu, Chandan. Das, Atasi. Thirumalasetty, Pavanaram. Das, Tanmay. Perpetual Pavement A Boon for the Indian Roads, 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG), 2013.
4. Corredor, Gustavo. Experimento vial de la AASHTO y las guías de diseño AASHTO. Universidad Nacional de Ingeniería.
5. Díaz, Miguel Ángel. Pavimentos Perpetuos: Conceptos y Experiencias. Primer Congreso Salvadoreño de Asfalto, 7 de noviembre de 2014.
6. Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales para la construcción de carreteras. Bogotá D.C. 2014.
7. Leiva Villacorta, Fabricio. Diseño de una estructura de pavimento perpetuo (caso de estudio de una ruta nacional en costa rica, Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), 2010.
8. Martin, Nicholas. Cook, Aaron. Pericolosi, James. Perpetual Pavement Committee. Design Construction and Materials Pavement Enterprise, April 22, 2004.
9. Montejo Fonseca, Alfonso. Ingeniería de pavimentos: fundamentos, estudios básicos y diseño. Universidad Católica de Colombia. 2002.
10. Rondon, Hugo Alexander. Reyes, Fredy Alberto. Metodología de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. Universidad Católica de Colombia. Diciembre de 2007.
11. Salamanca, María Angélica. Zuluaga, Santiago Arturo. Diseño de la estructura de pavimento flexible por medio de los métodos INVIAS, AASHTO 93 e Instituto del Asfalto para la vía Ye-Santa Lucia Barranca Lebrija entre las abscisas K19+250 a K25+750 Ubicada en el departamento del Cesar. Universidad Católica de Colombia. Bogotá 2014.
12. Terezon Segura, Sughey Alejandrina. Programa de mantenimiento basado en la técnica de pavimentos perpetuos para la gestión municipal, con aplicación específica para ciudad de armenia. Universidad del Salvador, Octubre de 2007.
13. University of New Mexico, Future Design of Perpetual Pavements for New Mexico, December de 2009.
14. Yang, Yongshun. Gao, Xuechi. Lin, Wang. Perpetual pavement design in China. International Conference on Perpetual Pavement Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, July 25, 2006.