



**GUÍA PARA EL USO DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD) EN EL
DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE”.**

PABLO ANDRÉS FORERO ARÉVALO

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Cundinamarca

Sede Girardot (Cundinamarca)

Programa Ingeniería Civil

noviembre de 2021

**GUÍA PARA EL USO DEL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO (FWD) EN EL
DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE”.**

PABLO ANDRÉS FORERO ARÉVALO

Monografía presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor(a)

**JAIME MORENO LOAIZA
Ingeniero Civil
Especialista en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas**

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Cundinamarca

Sede Girardot (Cundinamarca)

Programa Ingeniería Civil

noviembre de 2021

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Girardot, 06 de diciembre de 2021

Dedicatoria

Dedico este proyecto de monografía de grado a Dios, a nuestros padres y demás familiares que contribuyeron con nuestra formación personal y académica. A la institución universitaria UNIMINUTO que permite a los jóvenes de la región alcanzar el proceso de formación como profesionales en aras de contribuir en el desarrollo regional. Al grupo de docentes y demás comunidad académica que hicieron parte en el proceso de formación integral como profesionales.

Agradecimientos

Agradezco a la institución universitaria UNIMINUTO que permite a los jóvenes de la región alcanzar el proceso de formación como profesionales en aras de contribuir en el desarrollo regional. Al grupo de docentes y demás comunidad académica que hicieron parte en el proceso de formación integral como profesional

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| Dedicatoria | IV |
| Agradecimientos | V |
| Resumen | XI |
| Abstract | XIII |
| Introducción | 15 |
| 1. Planteamiento del problema | 17 |
| 2. Objetivos | 18 |
| 2.1 Objetivo General | 18 |
| 2.2 Objetivos Especificos | 18 |
| 3. Justificación | 19 |
| 4. Marco Legal | 20 |
| 5. Metodología | 22 |
| 5.1 Definicion del ensayo de deflectometria (FWD) | 22 |
| 5.2 Numero estructural de pavimentos asfalticos en servicio | 23 |
| 5.3 Módulo resiliente de la subrasante (MR) | 24 |
| 5.3.1 Módulo efectivo del pavimento (Ep). | 26 |
| 5.3.2 Número estructural efectivo (SNeff). | 27 |
| 6. Aforos | 30 |
| 7. Analisis y discusión de resultados | 44 |
| 7.1 Análisis de costos | 44 |
| 8. Conclusiones | 45 |

LISTA DE CUADROS

| | Pág. |
|--|------|
| Cuadro 1. Conteos manuales de tránsito vehicular. | 30 |
| Cuadro 2. Factores de equivalencia de carga. | 32 |
| Cuadro 3. Límite para selecciona la resistencia. | 32 |
| Cuadro 4. Entornos de la resistencia. | 33 |
| Cuadro 5. Características de drenaje de material de base y/o sub-base granular. | 36 |
| Cuadro 6. Valor recomendado del coeficiente de ajuste (m) para los coeficientes estructurales de las capas de base y/o sub base no-tratadas. | 37 |
| Cuadro 7. Espesores mínimos para capas de concreto asfáltico y base, en función del tráfico esperado. | 42 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Coeficiente estructural a partir del CBR de la subbase granular se emplea bajo en siguiente grafico. | 38 |
| Figura 2. Coeficiente estructural a partir del CBR de la base granular. | 39 |
| Figura 3. Cálculo del número estructural (SN) de la Subrasante mediante la ecuación de la AASHTO Excel 93 | 40 |
| Figura 4. Cálculo del número estructural (SN2) de la base granular | 41 |
| Figura 5. Coeficiente estructural a partir del módulo elástico del concreto asfáltico. | 42 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | Pág. |
|--|------|
| Gráfica 1. Resistencias de CBR organizados de menor a mayor. | 33 |

Resumen

Se describen los principales equipos para medir deflexiones en pavimentos existentes, enfatizando en los deflectómetros de impacto por ser los de uso común en campo. Así mismo, se presentan métodos para estimar un módulo elástico y las consideraciones que cada uno de ellos establece en sus metodologías; con especial atención en las destinadas a pavimentos asfálticos y, en algunos casos, para pavimentos rígidos; sin embargo, el marco de trabajo es la teoría elástica multicapa como método de análisis. Debe destacarse de varios de los programas de cómputo disponibles utilizan diversas consideraciones, por lo que pueden tener discrepancias considerables en sus resultados. Es posible utilizar otros procedimientos de análisis, tal como el elemento finito; no obstante, resulta necesario realizar adecuaciones para su uso. Como complemento, se describen los parámetros de un método para estimar los módulos elásticos de capa a partir de mediciones de deflexión, que pueden utilizarse en la evaluación de pavimentos, o de diseño de sobrecarpetas. A fin de caracterizar los materiales en las capas de los pavimentos, el módulo resiliente obtenido en laboratorio constituye un insumo para algunos procedimientos de diseño de sobrecarpetas. El análisis de deflexión proporciona una técnica capaz de utilizar el módulo elástico equivalente de una estructura de pavimento en lugar de obtener el módulo resiliente en laboratorio de muestras pequeñas, y en algunas ocasiones de muestras alteradas. Para muchos procedimientos de diseño de sobrecarpetas que se basan en la teoría elástica multicapa, el módulo resiliente se constituye por uno elástico de capa equivalente, debido a que el módulo equivalente se determina como un promedio del total de las superposiciones en las condiciones de esfuerzo en campo de un pavimento actual. También se destacan algunos de los factores que afectan los resultados de los ensayos no destructivos para la determinación de deflexiones, los cuales deben analizarse con el propósito de eliminar o de minimizar sus efectos, o tomarlos en

consideración en la interpretación de los resultados. Dichos factores son entre otros, la magnitud y duración de la carga; las propiedades no lineales de los materiales que conforman los pavimentos; la temperatura y la humedad; y las condiciones en que se encuentra el pavimento. Por último, se describen algunas experiencias importantes que puedan llevarse a cabo para entender mejor las metodologías de evaluación de pavimentos en diferentes niveles de auscultación, y los estudios que establecen relaciones entre las temperaturas y las variaciones del contenido de agua en las capas de los pavimentos, en las diferentes épocas del año. Se presentan y discuten los principales aspectos de la evaluación estructural de los pavimentos de concreto asfáltico con ensayos no destructivos; particularmente, el método desarrollado a partir de los refractómetros de impacto, FWD por sus siglas en inglés. Así mismo, se describen metodologías para estimar los módulos elásticos de las capas de pavimento evaluadas con esta técnica, y las ventajas y limitaciones de tales herramientas; además de los cuidados que se deben tener al utilizar los resultados de la evaluación en el diseño de refuerzo de los pavimentos. Finalmente, se hacen recomendaciones para estudios futuros.

Palabras clave: Asfalto, capa de rodadura, pavimento, Bases granulares, deflexiones, vías

Abstract

The main equipment for measuring deflections in existing pavements is described, emphasizing impact deflectometers as they are commonly used in the field. Likewise, methods are presented to estimate an elastic modulus and the considerations that each one of them establishes in their methodologies; with special attention in those destined to asphalt pavements and, in some cases, for rigid pavements; however, the framework is multilayer elastic theory as a method of analysis. It should stand out from several of the available computer programs that use various considerations, so you can have considerable discrepancies in your results. It is possible to use other analysis procedures, such as the finite element; however, it is necessary to make adjustments for its use. As a complement, the parameters of a method to estimate the elastic modulus of the layer from deflection measurements are described, which can be used in the evaluation of pavements, or of overlay design. In order to characterize the materials in the pavement layers, the resilient modulus obtained in the laboratory constitutes an input for some overlay design procedures. Deflection analysis provides a technique capable of using the equivalent elastic modulus of a pavement structure instead of obtaining the resilient modulus in the laboratory from small samples, and sometimes from disturbed samples. For many overlay design procedures that are based on multilayer elastic theory, the resilient modulus is constituted by an equivalent layer elastic modulus, because the equivalent modulus is determined as an average of the total overlaps under stress conditions in field of a current pavement. Some of the factors that affect the results of non-destructive tests for the determination of deflections are also highlighted, which must be analyzed with the purpose of eliminating or minimizing their effects, or taking them into consideration in the interpretation of the results. Said factors are, among others, the magnitude and duration of the load; the non-linear properties of the materials that

make up the pavements; temperature and humidity; and the condition of the pavement. Finally, some important experiences that can be carried out to better understand pavement evaluation methodologies are described at different auscultation levels, and the studies that establish relationships between temperatures and variations in water content in pavement layers, at different times of the year.

The main aspects of the structural evaluation of asphalt concrete pavements with non-destructive tests are presented and discussed; particularly, the method developed from impact refractometers, FWD for its acronym in English. Likewise, methodologies are described to estimate the elastic moduli of the pavement layers evaluated with this technique, and the advantages and limitations of such tools; in addition to the care that must be taken when using the results of the evaluation in the design of reinforcement of the pavements. Finally, recommendations are made for future studies.

Keywords: Asphalt, wearing course, pavement, Granular bases, deflections, roads

Introducción

Existen diferentes métodos para evaluar la capacidad estructural de los pavimentos, lo anterior con la finalidad de definir su aptitud para resistir las cargas que circulan por diversos tramos carreteros. La evaluación de la capacidad estructural en pavimentos se realiza utilizando predominantemente métodos no destructivos, los cuales consisten en aplicar una carga bajo condiciones dinámicas, estáticas, por impacto, etc., cuyos resultados ayudan a determinar en cada estructura del pavimento, las deformaciones o deflexiones asociadas a la sollicitación inducida, y así poder definir su capacidad para soportar las cargas vehiculares. A nivel mundial se cuenta con una gran cantidad de equipos para determinar deflexiones en campo, sin embargo, los de mayor uso son los refractómetros de impacto. Estos equipos aplican una sollicitación al pavimento por impacto y determinan una cuenca de deformaciones a partir de datos de desplazamiento, obtenidos por un arreglo de sensores de desplazamiento. Dicho arreglo se establece en función del tipo de pavimento que se intenta evaluar y del fin que se persiga con la evaluación. Existen metodologías muy bien definidas para obtener las llamadas cuencas de deformación conforme cada necesidad de información; en el presente reporte se hará énfasis a los pavimentos de concreto asfáltico, a la vez que se incluyen recomendaciones para diferentes tipos de pavimento. En la literatura se reportan también las características que deben cumplir los equipos que se emplean en los ensayos no destructivos, particularmente en las aproximaciones y dispersiones de los instrumentos de medición. Es importante destacar que, así como hay diversos equipos para medir deflexiones, es aún mayor el número de procedimientos para el análisis y procesamiento de los datos provenientes de tales equipos. Dichos programas calculan los módulos en cada una de las diferentes capas del pavimento evaluado mediante herramientas matemáticas diversas, y consideraciones en sus modelos igualmente variados. Debido a lo anterior es difícil hacer una

elección adecuada entre las diferentes metodologías de diseño; no obstante, en el presente trabajo se ha procurado incluir algunas consideraciones bajo las cuales se desarrolla algunos de estos métodos de análisis. Es necesario conocer lo anterior para poder realizar una interpretación adecuada de los resultados que de dichos modelos resulte, ya que es sabido que la elección de los módulos de capa, contiene en sí misma una gran cantidad de criterio ingenieril. Uso y calibración de Refractómetros de Impacto en la evaluación de pavimentos 2 Por otro lado, es necesario tomar en cuenta los factores que en mayor medida influyen a los resultados obtenidos y la manera en que se deben considerar; un ejemplo lo constituye el clima, caracterizado como la temperatura y la humedad; en este caso, la magnitud de la carga, la posición o distancia de la capa rígida.

1. Planteamiento del problema

En la provincia del Alto Magdalena que está conformada por los municipios de Agua de Dios, Nilo, Ricaurte, Jerusalén, Nariño, Tocaima, Guataquí y Girardot, se ha hecho notable en los últimos años el deficiente estado de la malla vial. Esto se debe al poco mantenimiento que se les realiza a dichas obras por parte de los gobiernos municipales, a las condiciones climáticas ya que sus temperaturas y su humedad son altas, y por el aumento del tránsito en el transcurso de los años. Como la región es zona turística permite que el nivel de tránsito aumente considerablemente cada semana por la cantidad de visitantes que viajan a pasar el fin de semana en sus casas de descanso, hoteles, zonas turísticas, entre otros.

Es por tal motivo que se implementa la metodología propuesta por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para estimar el S_{Neff} de una estructura de pavimento flexible después de construido. Este S_{Neff} , se puede obtener mediante el retro-cálculo de las deflexiones obtenidas del ensayo de refractómetro de impacto (FWD). Adicional a lo anterior se compendia información de la metodología mecanicista y con la modelación en programas computacionales se puede obtener un posible tránsito que soportara el pavimento durante su periodo de diseño. Además, a esto con los resultados del ensayo FWD y utilizando la metodología de YONAPAVE se logra considerar el S_{Neff} , en servicio.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Elaboración guía para el análisis y diagnóstico del número estructural efectivo y la metodología de deflectometría para la evaluación de un pavimento después de construido.

2.2 Objetivos Específicos

- ❖ Establecer una guía práctica en la utilización del ensayo FWD que determina el S_{Neff} (Numero estructural en servicio)
- ❖ Revisar los procesos de retro-calculo en las deflexiones que se obtienen del ensayo de deflectometro de impacto (FWD).
- ❖ Suministrar todos los procesos y ensayos que se requieren para para la construcción de la guía práctica.
- ❖ Elaborar un análisis comparativo en los procesos constructivos, cuando se realiza toda la reposición de estructura sin saber el estado de los S_{Neff} de las capas granulares y de rodadura.

3. Justificación

El presente documento Como se evidencia, la infraestructura vial del municipio de Girardot y la región se ve cada día más deteriorada y los entes que realizan las mejoras de la infraestructura vial se limitan a rehabilitar un porcentaje mínimo ya que las inversiones para estos arreglos son de alto costo. Teniendo en cuenta esto, nace la idea de buscar metodologías y alternativas técnicas, económicas y ambientalmente sostenibles, siendo eficaces para mitigar las fallas que se generan por mal material, mala ejecución y aumento en el flujo vehicular. Una de estas soluciones planteadas es el empleo de una guía práctica que permita conocer los procesos en la utilización del ensayo FWD que determina el S_{Neff} (Numero estructural en servicio).

4. Marco Legal

Dando cumplimiento al andamiaje jurídico e institucional que regula los derechos y deberes reglamentados en Colombia por la constitución, la ley, los decretos, las ordenanzas, los acuerdos, los reglamentos y las resoluciones que se expresan en forma prohibitiva o permisiva, se enumeran a continuación, junto con las entidades creadas por el estado para reglamentarlas, todas aquellas relacionadas con el objeto de la presente investigación.

- Constitución Política de Colombia 1991: ARTÍCULO 8 sobre la obligación del estado y de las personas de proteger las riquezas culturales y naturales de la nación. 57 ARTÍCULO 65 sobre la protección del estado a la producción de alimentos y al desarrollo integral de actividades agroindustriales y a la construcción de obras de infraestructura física. ARTÍCULO 79: sobre el derecho de las personas de gozar de un ambiente sano y el deber del estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente. ARTÍCULO 80: de la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales por parte del estado para garantizar su desarrollo sostenible y el control de los factores de deterioro ambiental. ARTÍCULO 333: Sobre la libertad de la actividad económica y la iniciativa privada, sobre la libre competencia económica y la función social de la empresa como base de desarrollo.
- Ley 105 DE 1993 Diario Oficial No. 41.158, de 30 de diciembre de 1993 "Por la cual se dictan disposiciones básicas sobre el transporte, se redistribuyen competencias y recursos entre la Nación y las Entidades Territoriales, se reglamenta la planeación en el sector transporte y se dictan otras disposiciones." ARTÍCULO 24. FONDO DE COFINANCIACIÓN DE VIAS. Para garantizar a los departamentos los recursos para la construcción, rehabilitación y mantenimiento de las vías, créase el Fondo de Cofinanciación de Vías, el cual actuará como un sistema especial de cuentas dependiente de FINDETER y cuya función será la de administrar los recursos que se destinen para este propósito en virtud de la presente Ley. Este Fondo será

administrado por un comité que estará conformado por: 1. El Ministro de Transporte o su delegado, quien lo presidirá; 2. El Director del Departamento Nacional de Planeación o su delegado; 3. El Director del Instituto Nacional de Vías o su delegado, quien actuará con voz pero sin voto. • Ministerio de Transporte De acuerdo la Constitución Política Nacional, la Ley 489 de 1998, la Ley 790 de 2002 y demás normas vigentes, los Ministerios son, junto con la Presidencia de la República y los Departamentos Administrativos, los organismos principales de la 58 Administración Pública Nacional y hacen parte del Sector Central de la Rama Ejecutiva del Poder Público. Los Ministerios tienen como objetivos primordiales la formulación y adopción de las políticas, planes generales, programas y proyectos del Sector Administrativo que dirigen. Así las cosas, el Ministerio de Transporte, como lo establece el Decreto 087 de 2011, es el organismo del Gobierno Nacional encargado de formular y adoptar las políticas, planes, programas, proyectos y regulación económica del transporte, el tránsito y la infraestructura, en los modos carretero, marítimo, fluvial, férreo y aéreo del país. El Ministerio de Transporte es la cabeza del Sector Transporte, el cual está constituido por el Ministerio, El Instituto Nacional de Vías (INVIAS), la Agencia Nacional de Infraestructuras (ANI), la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (AEROCIVIL) y la Superintendencia de Puertos y Transporte (SUPERTRANSPORTE).

5. Metodología

En la estructuración de la guía se analiza la factibilidad y eficiencia de la deflectometría de impacto para ser implementada y conocer los parámetros de cálculo de la capacidad portante de la estructura de un pavimento flexible en vías urbanas del municipio de Girardot Cundinamarca. Mediante el equipo no destructivo conocido como refractómetro de impacto se generan deflexiones en el pavimento, las que son interpretadas a través de técnicas basadas en análisis inverso como AASHTO 93, LUKANEN, YONAPAVE y ROHDE. Dichas técnicas permiten la cuantificación y cualificación del nivel de deterioro estructural del sistema pavimento-subrasante a través de dos parámetros:

1. El primer parámetro se define mediante el módulo resiliente, el cual es comparado con los softwares EVERCALC y ANSYS, que sustentan su desarrollo en análisis inverso y elementos finitos respectivamente.

2. El segundo parámetro se define mediante la capacidad estructural del sistema pavimento-subrasante, el cual es analizado a través del concepto de deflexión característica propuesto por la guía de diseño AASHTO 93. El estudio da a conocer que el mejor método para caracterizar el estado del pavimento es la técnica propuesta por YONAPAVE. El documento no solo presenta resultados de la condición actual de la vía bajo estudio sino también proporciona recomendaciones con respecto al manejo del pavimento de la vía, que permitan transformar la ingeniería de pavimentos a una ingeniería de gestión de los pavimentos.

5.1 Definición del ensayo de deflectometría (FWD)

Se trata de un ensayo no destructivo, que simula el comportamiento del pavimento ante el paso de los vehículos pesados. Puede ser utilizado en pavimentos de asfalto, hormigón o una composición de ambos, o bien, sobre cualquier capa de un pavimento en construcción.

El Falling Weight Deflectometer (FWD) o Refractómetro de Impacto es un equipo que utiliza una técnica No Destructiva para evaluar la condición estructural del pavimento. El equipo de ensayo puede ser montado en un vehículo o en un sistema de remolque tirado por un vehículo.

La medida de las deflexiones se realiza mediante siete sensores (geófonos) que se sitúan uno debajo de la placa de carga y los otros seis a distancias variables de hasta 2,5 m. ... El uso de geófonos en la medida de las deflexiones elimina la necesidad de un sistema de referencia, obteniéndose valores de hasta 10-3 mm.

El retrocálculo como el proceso matemático mediante el cual, las medidas de deflexiones tomadas en campo por un equipo deflectométrico son transformadas a módulos elásticos de la estructura evaluada

Deflexión máxima normalizada a una carga de 50 KN a una temperatura de 20 C en caso de los pavimentos asfálticos representa la deflexión vertical de la superficie del pavimento bajo el punto donde se aplica la carga este parámetro es un indicador de la condición estructural de los pavimentos cuyo principal uso es definir tramos que presenten diferentes características estructurales.

5.2 Numero estructural de pavimentos asfálticos en servicio

Este método sirve para determinar las deflexiones superficiales en un pavimento, por medio de la aplicación de una carga de impacto en la superficie del pavimento o estructura. Las deflexiones resultantes son medidas en el centro de la carga aplicada y a distintas distancias del lugar de aplicación de la carga. Las deflexiones pueden ser directamente correlacionadas con el comportamiento del pavimento, o utilizadas para medir in situ las propiedades de los materiales de las capas que conforman la estructura del pavimento.

Se transporta el dispositivo al sitio de la prueba y se coloca el plato de carga encima del punto de prueba deseado. El sitio de la prueba debe estar tan limpio como sea posible de piedras y escombros para asegurar el ajuste adecuado del plato de carga.

La superficie de grava o de suelo deberán estar tan lisas como sea posible y se debe retirar todo el material suelto.

Se bajan el plato de carga y los sensores hasta asegurar que ellos estén descansando en una superficie firme y estable.

Se levanta el generador de fuerza a la altura deseada y se deja caer el “el peso”. Se registran las deflexiones máximas resultantes de la superficie y la carga máxima. Nota 3.- Si se produce una deformación permanente significativa bajo el plato de carga, se debe mover el aparato y reducir la fuerza aplicada hasta que la deformación permanente no tenga ninguna importancia para la primera prueba en el sitio de prueba.

Se llevan a cabo por lo menos dos series de la carga (Sección 8.3) y se compararan los resultados. Si la diferencia es mayor que 3% para cualquiera sensor, se debe registrar la variación en el informe. Las pruebas adicionales se pueden ejecutar a las mismas o diferentes cargas.

5.3 Módulo resiliente de la subrasante (MR)

La Ecuación 5 según AASHTO (1993) “permite el cálculo del módulo resiliente de la subrasante por retrocálculo (M_{rr}) conociendo la magnitud de carga y una deflexión medida a cierta distancia del centro del plato de carga

$$M_{rr} = \frac{0.24 * P}{d_r * r} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

M_{rr} : Módulo resiliente de la subrasante obtenido por retro-cálculo (psi)

P : Carga aplicada (lb)

d_r : Deflexión a la distancia r medida desde el centro del plato de carga (in)

r : Distancia desde el centro del plato de carga (in)

Fuente: INV E -798-07

“Para la determinación del módulo M_{rr} se utiliza una deflexión medida a cierta distancia tal, la cual debe estar lo suficientemente lejos para que proporcione una buena estimación del valor de dicho parámetro, pero también lo suficientemente cerca para evitar una deflexión muy pequeña la cual no sería significativa”. (AASHTO, 1993, pág. 220)

Según la metodología de AASHTO la mínima distancia a la que se debe considerar la deflexión, se expresa como:

$$r \geq 0.7 * a_e \quad \text{Ecuación 6}$$

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(H_T \sqrt{\frac{E_p}{M_{rr}}} \right)^2 \right]} \quad \text{Ecuación 7}$$

Fuente: INV E -798-07

Dónde: “ a ” es radio de la placa de carga del equipo (in) dinámico “ H_T ” es el espesor de la estructura del pavimento (in); “ E_p ” es el módulo elástico de la estructura del pavimento (psi); y “ a ” es el radio del bulbo de tensión en la interface subrasante pavimento (in).

Los valores de “Mrr” son ajustados para ser consistentes con los obtenidos por ensayos de laboratorio. AASHTO 93 recomienda que los valores de “Mrr” deben ser multiplicados por un factor de ajuste (C) igual a 0.33 debido a que dichos valores son superiores a los obtenidos en laboratorio, obteniendo el Mr.

$$M_R = C * M_{rr} \quad \text{Ecuación 8}$$

Fuente: INV E

Una vez conocido el Módulo “MR”, y el espesor total de la estructura del pavimento (HT), la cual se asienta sobre la subrasante; se puede calcular el módulo efectivo del pavimento (Ep).

5.3.1 Módulo efectivo del pavimento (Ep).

Está determinado por el valor de la deflexión medida en el centro del plato de carga (do) mediante la siguiente ecuación:

$$d_o = 1.5Pa \left\{ \frac{1}{M_{rr} \sqrt{1 + \left(\frac{H_T}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_{rr}}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{H_T}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

do: Deflexión central corregida por carga y temperatura.

P: Presión del plato de carga igual a la carga dividida entre el área del plato circular del deflectómetro, psi.

a: Radio del plato de carga, pulgadas.

HT: espesor total de las capas del pavimento sobre la subrasante, pulgadas.

Fuente: INV E -798-07

- ❖ M_{rr} : Módulo resiliente de la subrasante por retrocálculo, psi
- ❖ E_p : Módulo efectivo de las capas que conforman el pavimento, psi

El módulo efectivo del pavimento (E_p), es calculado mediante iteraciones consecutivas de posibles valores, hasta la igualdad de la ecuación.

La variable más importante en la metodología AASHTO para el diseño de pavimentos es el número estructural efectivo (S_{Nef}), este valor junto con la proyección de tránsito en el periodo de diseño permite determinar espesores de la carpeta de rodadura o análisis de vida residual del pavimento.

5.3.2 *Número estructural efectivo (S_{Neff}).*

Para el cálculo de la capacidad estructural del pavimento existente, el método AASHTO-93 establece tres procedimientos, en términos del número estructural efectivo (S_{Neff}). Son ellos:

- i. Vida residual.
- ii. Condición de las capas estructurales.
- iii. Deflectometría.

De estos tres procedimientos, el más preciso suele ser el tercero, es decir, el que se basa en los resultados de la evaluación deflectométrica del pavimento. Sin embargo, AASHTO sugiere que se empleen al menos dos de estos procedimientos, para poder verificar la consistencia de los resultados. (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2008, pág. 364)

A continuación, se describen brevemente, dos de los procedimientos: (i) el de condición de las capas estructurales y (ii) el deflectométrico.

El método de condición de las capas estructurales debe ser usado, como herramienta de apoyo para analizar la consistencia de los resultados del análisis deflectométrico y su concordancia con la información que se tenga sobre la constitución y el estado de la estructura de

pavimento; además el método de condición establece los coeficientes estructurales de las capas que serán fresadas o recicladas, a considerar para ajustar el número estructural efectivo.

Determinación del número estructural efectivo a partir de la condición actual de las capas estructurales

Para la determinación “se determina la capacidad estructural del pavimento existente asignando los coeficientes estructurales de cada capa en función de los daños o deterioros que afecten su condición estructural” (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2008, pág. 365). Tal como lo muestra la Tabla 7 y definiendo los espesores de las diferentes capas del pavimento. La capacidad del conjunto de capas del pavimento se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S_{Neff} = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \text{ Ecuación 10}$$

Dónde: a_1 , a_2 , a_3 : Coeficientes estructurales de las capas asfálticas, base y subbase, respectivamente.

D_1 , D_2 y D_3 : Espesores de las capas asfálticas, base y subbase, respectivamente.

m_2 , m_3 : Coeficientes de drenaje de las capas granulares de base y subbase respectivamente.

Para poder aplicar directamente esta expresión, los espesores de las capas deben estar en pulgadas.

Para el adecuado uso de la Tabla 7, se debe tener en cuenta lo siguiente De acuerdo a INVIAS (2008):

La tabla debe servir solamente de guía; se deben desarrollar coeficientes propios a partir de la experiencia local

Todos los daños se relacionan con observaciones superficiales

Se recomienda que todo fisuramiento severo en piel de cocodrilo sea reparado (bacheo) previamente al refuerzo; en este caso, los coeficientes del concreto asfáltico y de la base estabilizada deben reflejar la condición de daños severos que quede después del bacheo.

Adicionalmente a las evidencias de bombeo durante la auscultación, se deben tomar muestras de la capa de base granular para detectar erosión, degradación, contaminación por finos, así como facilidad de drenaje; los coeficientes se deben escoger de acuerdo con los resultados de estas pruebas.

El porcentaje de fisuras transversales se calcula en pies lineales de fisuras por pie² de pavimento.

Se recomienda tomar núcleos para examinar todas las capas del pavimento; la toma de estos núcleos es indispensable para la evaluación de las capas estabilizadas.

Hay muchos otros tipos de daños que pueden influir en el comportamiento futuro del refuerzo; el ingeniero debe hacer la evaluación correspondiente y utilizar los factores que considere convenientes.

6. Aforos

Para el rediseño se tiene en cuenta los conteos y clasificación del tránsito para determinar el TPDS bajo el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Conteos manuales de tránsito vehicular.

| A= xxxxxx B= xxxxxx | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|---|--------------------|---|----------------|---|---------------|---|----|---|--------------|---|-------|
| Hora | Automóvil, campero, microbuses, taxis y camionetas. | | Busetas y buses | | C-2 Pequeño | | C-2 Grande | | C3 | | C5 - C- 6 | | Total |
| | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | |
| Día /mes /hora | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | |

Fuente. Edyconst.

Resumen total composición vehicular en porcentajes de vehículos en ambos sentidos tomar como referencia.

| Total composición vehicular en porcentajes | | | | | |
|--|-------|-------|--------|-------|-------|
| Auto | Buses | C2-P | C2G | C3 | C5 |
| 531 | 7 | 33 | 118 | 67 | 10 |
| 69.32% | 0.92% | 4.31% | 15.40% | 8.75% | 1.30% |
| | | TPD | | | 766 |

Fuente. Edyconst.

Se determina el factor camión o el factor daño empleando los factores de equivalencia. En el cuadro 4, se presentan los factores de equivalencia expuestos por el INVIAS en el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, tabla 3.5 Factores de equivalencia de carga de tipos de vehículos obtenidos a nivel nacional.

$$F.C. = \text{Factor camión. } FC = \frac{\sum C_i * F_i}{\sum C_i}$$

C_i = Es la cantidad de vehículos comerciales diarios de tipo (i) que circula por la ruta en el año de relevamiento y estudio del pavimento.

F_i = Es el factor de equivalencia que corresponde a cada pesada del vehículo comercial tipo (i).

Cuadro 2. Factores de equivalencia de carga.

| Tipo de vehículo | | Factor de equivalencia |
|------------------|-------------------|------------------------|
| Buses | Bus | 0.40 |
| | Bus metropolitano | 1.00 |
| C2P | C2P | 1.17 |
| C2G | C2G | 3.44 |
| C3 y C4 | C3 | 3.76 |
| | C2 C1 | 3.37 |
| | C4 | 6.73 |
| | C3 S1 | 2.22 |
| | C2 S2 | 3.42 |
| C5 | C3 S2 | 4.40 |
| >C5 | >C5 | 4.72 |

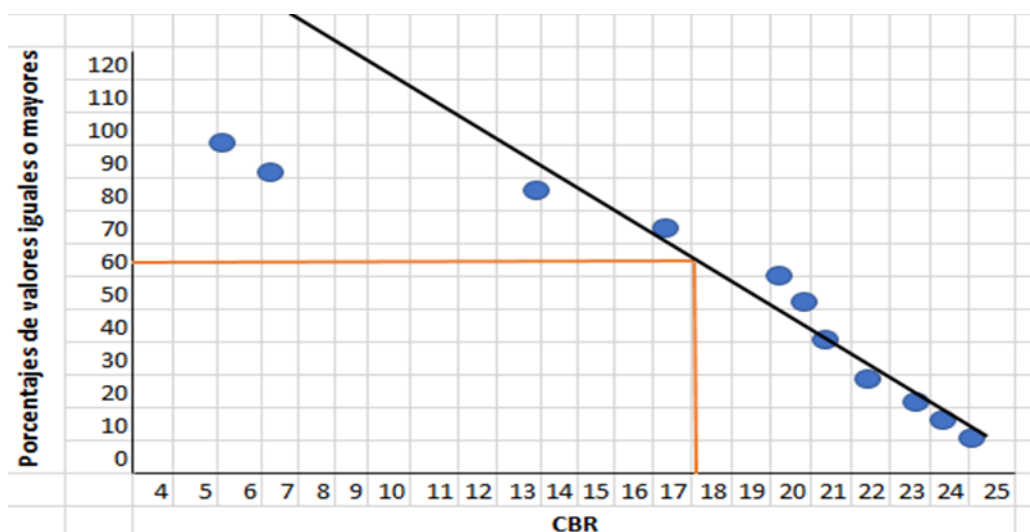
Fuente. Guía de diseño AASHTO - 93.

Cuadro 3. Límite para selecciona la resistencia.

| Número de ejes 8.2 toneladas en el carril de diseño (N) | Percentil a seleccionar para hallar la resistencia |
|---|--|
| $<10^4$ | 60 |
| $10^4 - 10^6$ | 75 |
| $>10^6$ | 87.5 |

Fuente. Guía de diseño AASHTO - 93.

Seleccionamos en percentil de acuerdo al tránsito y con este dato podemos determinar el CBR de diseño y resistencias de CBR organizados de menor a mayor los datos obtenidos es decir se ordenan los valores de resistencia de menor a mayor y se determina el número y el porcentaje de valores iguales o mayores a cada uno.



Gráfica 1. Resistencias de CBR organizados de menor a mayor.

Fuente: Autor

Entra con el percentil 60 por que el transito como ejemplo es menor de 10.000 En la gráfica se determina en CBR de diseño 17.61

El C.B.R. de diseño es de 17,61 % y se categoriza como un S5. donde se presenta las categorías expuestas por el INVIAS en el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.

Cuadro 4. Entornos de la resistencia.

| CATEGORÍA | INTERVALO MODULO RESILIENTE (E) kg/cm ² | INTERVALO C.B.R % |
|-----------|---|---------------------------|
| S1 | 300 – 500 | $3 \leq \text{CBR} < 5$ |
| S2 | 500 – 700 | $5 \leq \text{CBR} < 7$ |
| S3 | 700 – 1000 | $7 \leq \text{CBR} < 10$ |
| S4 | 1000 – 1500 | $10 \leq \text{CBR} < 15$ |
| S5 | > 1500 | $\text{CBR} \geq 15$ |

Fuente. Guía de diseño AASHTO - 93.

Se presenta la solución dentro del marco reglamentario, basado a las diferentes normas, ensayos pro-investigativos y estudios técnicos por medio de alternativas de diseño establecida “La metodología de AASHTO 93 para el análisis del espesor de un pavimento.

Para el diseño de la estructura del pavimento asfáltico se utilizará el Método AASHTO 1993. El diseño busca determinar un “Número Estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga esperado.

Para determinar el número estructural SN (flexible) requerido, se utiliza la hoja de cálculo de Excel de aplicación directa, Software para Camioneros, Diseño de pavimento flexible por el método ASSTHO 93, Ingeniero Luis Ricardo Vásquez, de Manizales, Colombia.

Ecuación AASHTO 93

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_O + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07$$

Fuente. Guía de diseño AASHTO - 93.

Parámetros

W: Número estimado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el período de diseño.

ZR: Desviación estándar normal

So: Error estándar combinado de la predicción del tráfico y de la predicción del comportamiento estructural

Δ PSI: Diferencia entre índice de servicio inicial y final

MR: Módulo resiliente (en libras/pulgada²)

SN: Número estructural

Ecuación 2

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

Fuente. Guía de diseño AASHTO - 93.

Dónde:

a_1 , a_2 y a_3 = Coeficiente de capa representativos de carpeta, base y subbase

respectivamente.

D_1 , D_2 y D_3 = Espesor de la carpeta, Base y Subbase respectivamente en pulgadas

m_2 m_3 = Coeficientes de drenaje para base y subbase respectivamente.

Ecuación 3

$$N = 365 \times TPD \times \frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times \frac{(1+r)^n - 1}{Ln(1+r)} \times F.C.$$

N = Número de ejes equivalentes.

TPD = Tránsito promedio diario inicial.

A = Porcentaje de vehículos pesados (buses y camiones) en el conteo.

B = Porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño.

r = Rata anual de crecimiento del tránsito.

n = Período de diseño estructural.

FC. = Factor camión.

En la metodología AASHTO-93 para diseño de estructuras de pavimento flexible, se presenta un modelo o ecuación a través de la cual se obtiene el parámetro llamado número estructural (SN) cuyo valor además de ser un indicativo del espesor

total, requerido del pavimento es función del tránsito y la confiabilidad.

Determinación de las características ambientales de los Materiales relacionados con la Calidad drenante. Se toman las características ambientales tales como humedad y temperatura sobre las propiedades de los materiales.

De acuerdo con el estudio de suelos que se realice el material de subrasante estará constituido por arenas arcillosas limosas de baja plasticidad alta plasticidad lo cual representa para la subbase y la base una calidad de drenaje regular que puede llegar a periodos de saturación importantes. Por consiguiente, para la seguridad del dimensionamiento de la estructura, se asume un coeficiente de drenaje $m=0.80$, que corresponde a una calidad de drenaje regular con periodos de tiempo de saturación entre 5% y 25% anual.

Cuadro 5. Características de drenaje de material de base y/o sub-base granular.

| Nivel de drenaje | Agua eliminada dentro de |
|------------------|--------------------------|
| Excelente | Dos (2) horas |
| Buena | Un (1) día |
| Regular | Una (1) semana |
| Pobre | Un (1) mes |
| Muy pobre | El agua no drena |

Fuente. Guía de diseño AASHTO - 93.

Cuadro 6. Valor recomendado del coeficiente de ajuste (m) para los coeficientes estructurales de las capas de base y/o sub base no-tratadas.

| Calidad de drenaje de la base o sub-base | Porcentaje del tiempo durante el cual la estructura del pavimento está sometido a condiciones de humedad cercanas a saturación | | | |
|--|--|------------------|------------------|-------------|
| | Menos del 1% | Entre el 1 y 5% | Entre el 5 y 25% | Más del 25% |
| Excelente | 1.40-1.35 | 1.35-1.30 | 1.30-1.20 | 1.20 |
| Buena | 1.35-1.25 | 1.25-1.15 | 1.15-1.00 | 1.00 |
| Regular | 1.25-1.15 | 1.15-1.05 | 1.05-0.80 | 0.80 |
| Pobre | 1.15-1.05 | 1.05-0.80 | 0.80-0.60 | 0.60 |
| Muy pobre | 1.05-0.95 | 0.95-0.75 | 0.75-0.40 | 0.40 |

Fuente. Guía de diseño AASHTO - 93.

Determinación de la pérdida de serviciabilidad. Se estiman los siguientes valores para pavimentos flexibles:

- ❖ Período de Serviciabilidad inicial $p_o = 4.2$
- ❖ Período de Serviciabilidad final $p_t = 2.0$

La serviciabilidad de un pavimento se define como la idoneidad que tiene el mismo para servir la clase de tránsito que lo va a utilizar la mejor forma de evaluar otra vez del índice de servicio presente (PSI) el cual varía de 0 (Carretera imposible) hasta 5 (Carretera perfecta)

En la AASHTO se obtuvo un valor de 4,2 para los pavimentos flexibles pero cada entidad podrá elegir un valor apropiado para condiciones de características constructivas. Una vez establecido el P_o y P_t se emplea la siguiente ecuación para definir el cambio total en el índice de servicio $PSI = P_o - P_t$

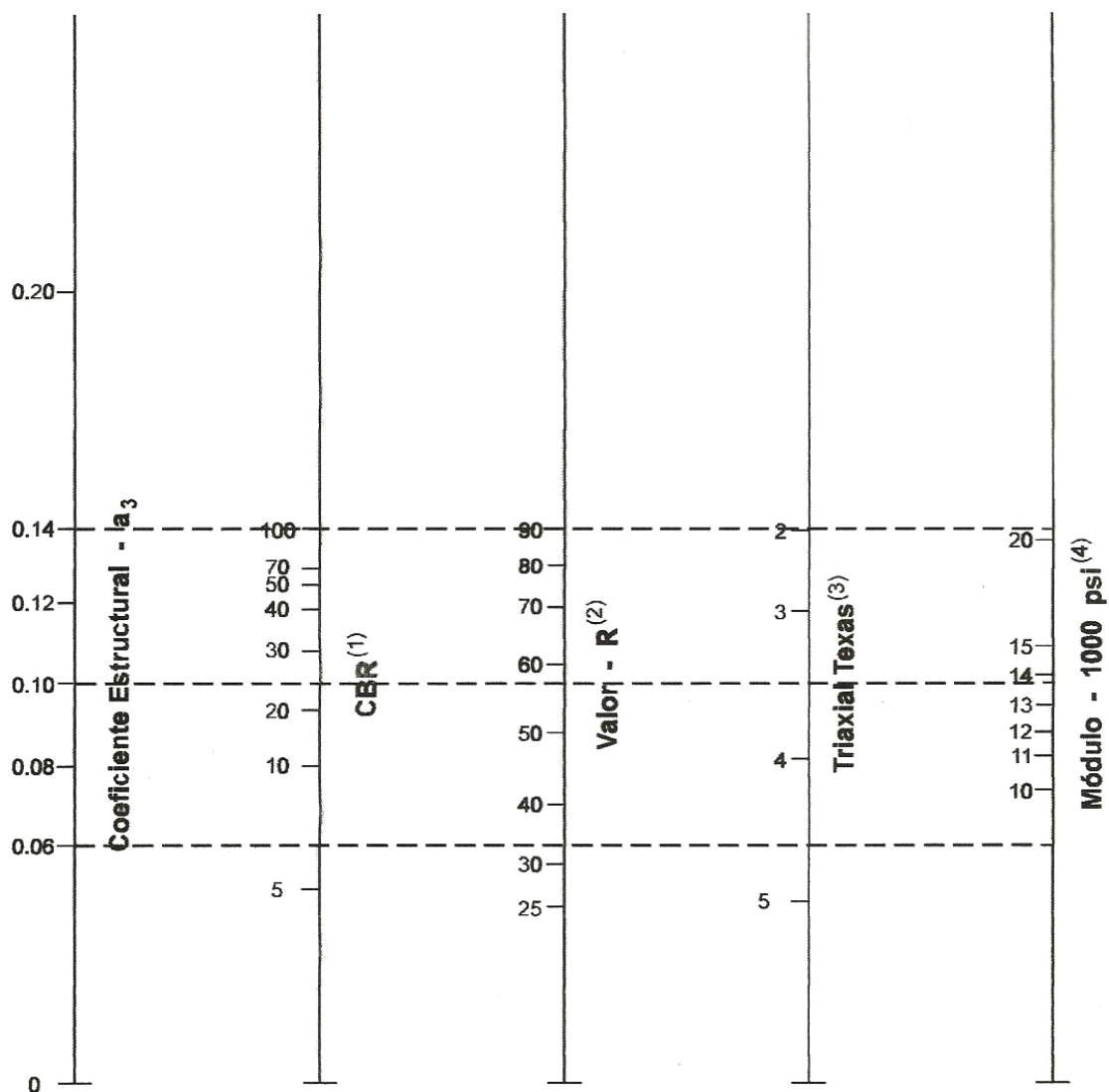


Figura 1. Coeficiente estructural a partir del CBR de la subbase granular se emplea bajo en siguiente gráfico.

Fuente. Figura 8 AASTHO -93.

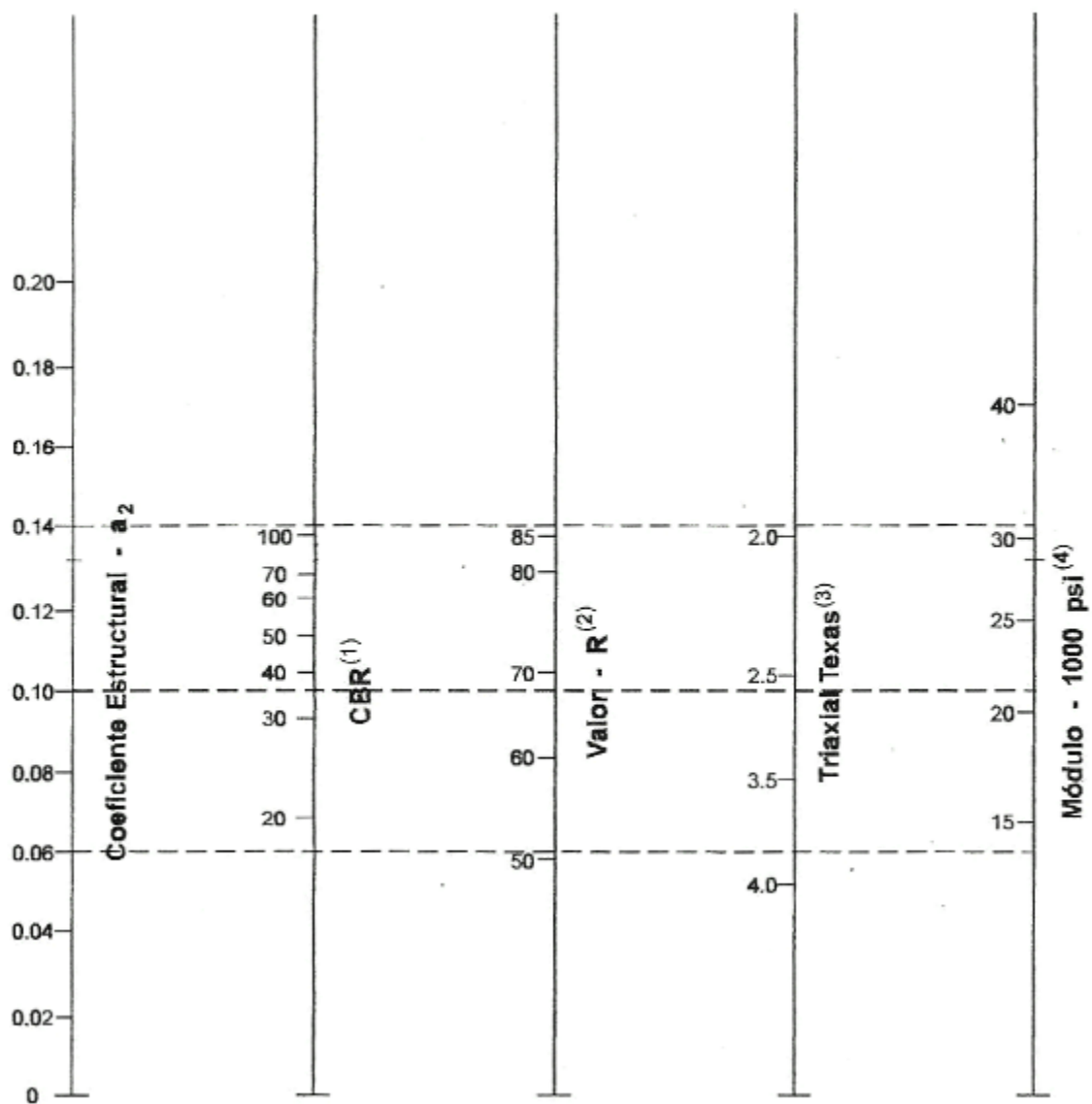


Figura 2. Coeficiente estructural a partir del CBR de la base granular.

Fuente. Figura 8 AASTHO -93.

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
 Pavimento flexible Pavimento rígido

Confianza (R) y Desviación estándar (So)
 Reliability (R) So

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial PSI final

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr psi

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)

Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis
 Calcular SN **W18 =**
 Calcular W18

Número Estructural
SN =

Calcular Salir

Figura 3. Cálculo del número estructural (SN) de la Subrasante mediante la ecuación de la AASHTO Excel 93

Fuente. Ecuación AASHTO Excel 93

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
 Pavimento flexible Pavimento rígido

Confianza (R) y Desviación estándar (So)
 Reliability (R) So

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial PSI final

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr psi

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)

Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis
 Calcular SN **W18 =**

Calcular W18

Número Estructural
SN =

Figura 4. Cálculo del número estructural (SN2) de la base granular

Fuente. Figura 8 AASTHO -93.

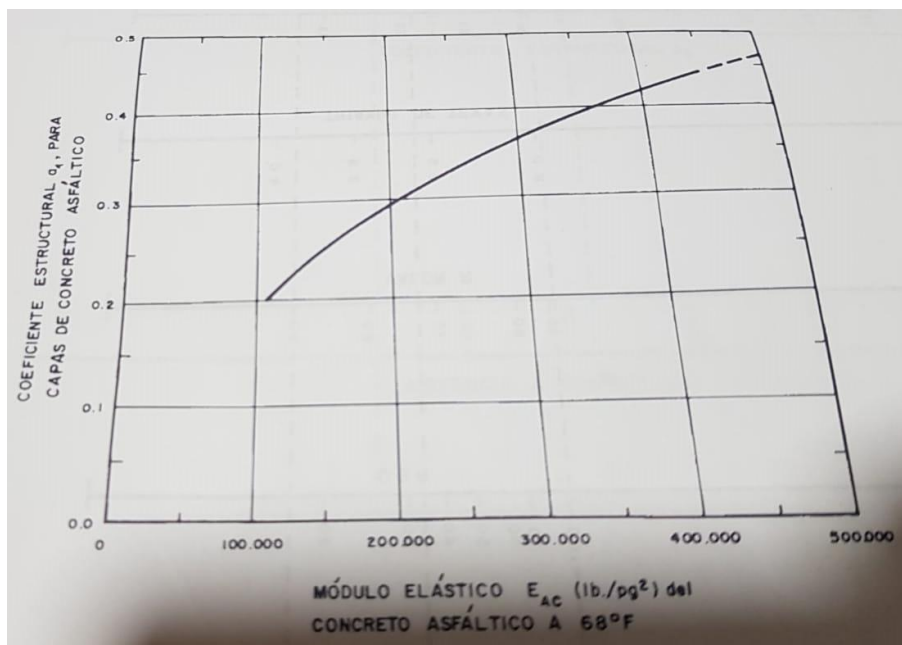


Figura 5. Coeficiente estructural a partir del módulo elástico del concreto asfáltico.

Fuente. Ecuación AASHTO Excel 93

Cuadro 7. Espesores mínimos para capas de concreto asfáltico y base, en función del tráfico esperado.

| Cargas equivalentes (período diseño) | Espesor mínimo (cm) | |
|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | Mezcla asfáltica (todas las capas) | Base y/o sub-base granular |
| <50.000 | 2.5(*) | 10.0 |
| 50.000-150.000 | 5.0 | 10.0 |
| 150.000-500.000 | 6.25 | 10.0 |
| 500.000-2.000.000 | 7.5 | 15.0 |
| 2.000.000-7.000.000 | 8.75 | 15.0 |
| >7.000.000 | 10.0 | 15.0 |

Fuente. Ecuación AASHTO 93.

El N calculado para el presente diseño es de 1.900.000 E.E. que corresponde al rango entre 500.000 y 2.000.000 E.E que sugiere un espesor de mezcla asfáltica de 7.5 cm y un espesor

de base granular de 15 cm como mínimo. Se estima un espesor de mezcla asfáltica de 7.5 cm y una capa de 15 cm de espesor de base granular.

Con estos valores y sin alterar el valor del número estructural calculado para la subrasante, calculamos el nuevo espesor del pavimento, así:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \text{ (Se despeja } D_3 \text{.)}$$

7. Análisis y discusión de resultados

En la optimización de recurso referente a la intervención de pavimentos existentes para evaluar su estado esta metodología es de gran importancia para el desarrollo y recuperación de la malla vial de los municipios en todo el territorio nacional.

No es ético profesionalmente realizar la reposición de la estructura de un pavimento sin antes conocer su estado estructural de las capas granulares.

Se evidencia que mediante esta guía es viable evaluar y diagnosticar las condiciones físicas mecánicas en la estructura de un pavimento.

7.1 Análisis de costos

El análisis de costos está en función de elaboración del ensayo de deflectometría y los costos de diseño en la nueva estructura del pavimento por Km.

| ANALISIS DE COSTOS | | | | |
|--------------------------------|--------|----------|----------------|---------------------|
| DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | V/UNITARIO | V/TOTAL |
| Ensayo de deflectometría (FWD) | UND | 1 | \$ 4.500.000 | \$ 4.500.000 |
| Diseños y retrocalculos | UND | 1 | \$ 2.300.000 | \$ 2.300.000 |
| | | | V/TOTAL | \$ 6.800.000 |

Fuente: Autor

8. Conclusiones

- ❖ Se pudo concluir que para el diagnóstico y evaluación de un pavimento después de construido la metodología de deflectometría es vital para optimizar los flujos de inversión toda vez que podemos determinar los números estructurales en servicio de las capas de la estructura.
- ❖ En el ejercicio de la rehabilitación de pavimentos esta guía permite desarrollar secuencialmente los parámetros de diseño de un pavimento flexible por la metodología AASHTO.
- ❖ Es importante que se utilice y se adopte esta metodología para maximizar el alcance y los presupuestos en el mejoramiento de pavimento flexibles.
- ❖ En el buen uso de esta guía se podrá contribuir con el desarrollo de la infraestructura vial de la región y del país.

Referencias Bibliográficas

Montejo Fonseca Alfonso. (2006) Ingeniería de pavimentos, Bogotá: Universidad Católica de Colombia

Recuenco Emilio. (2014) Firmes y pavimentos de carreteras y otras infraestructuras, España: Ibergarceta.

Reyes Fredy Alberto. (2009) Diseño racional de pavimentos, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería-CEJA.

Rondón Hugo Alexander. (2015) Pavimentos, Bogotá: Ecoe Ediciones.

Valdés Gonzalo. (2012) Mecanismos de fisuración en pavimentos bituminosos, Alemania: Editorial Académica española.

Santander N. (1984) Pavimentos de concreto, Medellín: Instituto Colombiano de Productores de Cemento.

Sánchez Sabogal Fernando. (1984) Pavimentos Asfálticos de Carreteras, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Yang H. Huang (2003) Pavement Analysis and Design, USA: Pearson Rajib B. Mallick, (2017) Pavement Engineering, USA: CRC Press