

DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES NUEVOS PARA LA CIUDAD DE PASTO SEGÚN LA GUÍA
DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 2002 NIVEL 3 Y EL MANUAL DE DISEÑO DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DEL INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS.

WILSON JAVIER URBANO VARGAS.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2012.

DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES NUEVOS PARA LA CIUDAD DE PASTO SEGÚN LA GUÍA
DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 2002 NIVEL 3 Y EL MANUAL DE DISEÑO DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DEL INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS.

WILSON JAVIER URBANO VARGAS.

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil.

Director:
Ing. Esp. WILLIAM ESTEVAN RODRÍGUEZ GRANJA.
Especialista en Ingeniería de Carreteras.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2012.

NOTA DE RESPONSABILIDAD.

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN.

COMENTARIOS.

Esp. Ing. WILLIAM ESTEVAN RODRÍGUEZ GRANJA..
Director de Tesis.

ING. M.Sc. JORGE LUIS ARGOTY BURBANO.
Jurado.

ING. CARLOS ALBERTO CAICEDO EGAS.
Jurado.

San Juan de Pasto, Mayo 30 de 2012.

DEDICATORIA

A Dios...

A mis padres Manuel María Urbano y Belcia María Vargas, por todo el amor y entrega con el que me educaron y me apoyaron.

A mi esposa Yineth Benavides, a mis hijos Hamilton Andrés, Manuel Alejandro y Leidy Marcela Urbano Benavides.

A todas las personas que me apoyaron en esta etapa, en especial a mi suegra Astheria Cerón por estar siempre dispuesta a colaborarme

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo de grado se hizo posible gracias a la colaboración y apoyo de:

Reconocimiento especial al ING. WILLIAM ESTEVAN RODRÍGUEZ GRANJA. Especialista en Ingeniería de Carreteras, docente del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño y Director del trabajo de grado, por brindarme sus conocimientos y experiencia, por su valiosa asesoría académica y personal, para lograr una correcta ejecución del proyecto.

Al ING. JORGE LUIS ARGOTY BURBANO y al ING. CARLOS ALBERTO CAICEDO EGAS, Docentes del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño, por compartir sus conocimientos y asesorar con su gran experiencia.

A la Universidad de Nariño especialmente al Departamento de Ingeniería Civil, docentes y personal administrativo, por mi formación profesional.

A mis compañeros del programa de Ingeniería Civil, quienes brindaron su aporte y valiosa amistad para conseguir una de las tantas metas que deseo alcanzar en la vida.

TABLA DE CONTENIDO.

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	14
1. MARCO TEÓRICO.	19
1.1. MÉTODOS DE DISEÑO.	19
1.1.1. Métodos empíricos.	19
1.1.2. Métodos mecanicistas, analíticos o racionales.	21
1.1.3. Métodos basados en elementos finitos y en modelos no elásticos.	23
1.2 MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.	24
1.2.1. Método Shell- 78.	25
1.2.2. Método AASHTO 1993.	29
1.2.3. Método Racional de Diseño de Pavimentos Flexibles.	30
1.2.4. Método del Instituto Nacional de Vías.	34
2. VARIABLES EMPLEADAS EN EL DISEÑO.	40
2.1. VARIABLE TRÁNSITO.	40
2.1.1. Tránsito promedio diario anual (TPDA).	40
2.1.2. Periodo de análisis y periodo de diseño estructural.	40
2.1.3. Selección del período de análisis y del período de diseño estructural.	41
2.1.4. Estimación de la tasa de crecimiento de los vehículos comerciales (r).	42
2.1.5. Factor de distribución por Carril (FC).	43
2.1.6. Factor de distribución por sentido (FS).	43

2.1.7.	Tránsito normal acumulado (TNAn).	43
2.1.8.	Cargas máximas por eje.	44
2.2.	VARIABLE SUBRASANTE.	46
2.3.	VARIABLE CLIMA.	49
3.	DISEÑO DE ESTRUCTURAS MEDIANTE LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO – MECANÍSTICA ME – PDG 2002.	51
3.1	FUNDAMENTO DEL DISEÑO.	51
3.2.	VARIABLES DE ENTRADA.	53
3.2.1	Subrasante / Fundación.	54
3.2.2	Caracterización de materiales.	56
3.2.3	Efectos Ambientales.	57
3.2.4	Cargas del tránsito.	58
3.2.5	SOFTWARE DE DISEÑO.	59
3.3.1.	Pantallas de entrada del software de AASHTO 2002.	61
3.3.2.	Reportes del software de AASHTO 2002.	63
3.4.	DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO.	67
3.4.1.	Información general.	67
3.4.2.	Variable tránsito.	67
3.4.3.	Variable clima.	68
3.4.4.	Materiales de la estructura.	69
3.5.	ESTRUCTURAS OBTENIDAS PARA LA CIUDAD DE PASTO.	72
	CONCLUSIONES.	72
	RECOMENDACIONES	75

BIBLIOGRAFÍA.	76
---------------	----

ANEXOS	77
--------	----

LISTA DE TABLAS.

	Pág.
Tabla N° 1. Coeficiente de Poisson para diferentes materiales.	32
Tabla N° 2. Valores de coeficientes estructurales (a/pulg) .	36
Tabla N° 3. Valores de coeficientes de drenaje (m_i).	37
Tabla N° 4. Rangos de tránsito considerados en la norma.	37
Tabla N° 5. Regiones climáticas según la temperatura y precipitación.	38
Tabla N° 6. Categorías de la Subrasante.	39
Tabla N° 7. Rangos contemplados en las cartas de diseño.	39
Tabla N° 8. Categorías de las vías.	41
Tabla N° 9. Período de análisis recomendado.	41
Tabla N° 10. Período de diseño estructural recomendado.	42
Tabla N° 11. Tasas de crecimiento obtenidas en un muestreo de la red vial nacional.	42
Tabla N° 12. Resumen de composición vehicular obtenida de la red vial nacional	43
Tabla N° 13. Carga máxima de Vehículos Comerciales en Colombia.	44
Tabla N° 14. Carga máxima por eje de Vehículos Comerciales en Colombia.	46
Tabla N° 15. Correlación entre la clasificación AASHTO y SUCS.	47
Tabla N° 16. Clasificación de suelos mediante el método AASHTO.	47
Tabla N° 17. Relación CBR – Módulos resiliente.	71

LISTA DE FIGURAS.

	Pág.
Figura N° 1. Sistema estructural multicapa empleado por la Shell .	26
Figura N° 2. Nomograma de Diseño Simplificado.	28
Figura N° 3. Clasificación de los suelos en relación a su esfuerzo.	48
Figura N° 4. Procedimiento general de Diseño para Pavimentos Asfálticos.	52
Figura N° 5. Cumplimiento de los criterios de diseño.	52
Figura N° 6. Pantalla de inicio del Software.	61
Figura N° 7. Pantalla de entrada de datos.	61
Figura N° 8. Variación del módulo del concreto asfáltico con el tiempo.	64
Figura N° 9. Variación del módulo de subrasante con el tiempo.	64
Figura N° 10. Profundidad prevista del ahuellamiento en el tiempo.	65
Figura N° 11. Comportamiento del IRI en el tiempo.	65
Figura N° 12. Pantalla de Resultados de Diseño de ME –PDG.	66
Figura N° 13. Fisuras longitudinales en el tiempo.	66
Figura N° 14. Latitud y Longitud en el planeta.	69

RESUMEN.

En este trabajo se presenta una comparación de diseños de pavimentos flexibles nuevos según el método de diseño empleado en el Manual del Instituto Nacional de Vías y la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecánica AASHTO 2002 MEPDG en el NIVEL 3 para la ciudad de Pasto.

En la guía de diseño del proyecto AASHTO 2002 MEPDG en el NIVEL 3 se introduce un nuevo concepto en cuanto a los datos de tránsito se refiere: el espectro normalizado de carga por eje en reemplazo de los ejes equivalentes. Para obtener esta variable se utilizara el número de repeticiones de carga. La variable asociada al clima se incorpora al diseño mediante la utilización de una estación climática que se ajusta a la región en estudio, creada a partir de datos de temperatura, velocidad del viento, nubosidad, precipitación y humedad relativa. Con respecto a la estructuración del pavimento se escogen diseños que cumplen con las especificaciones nacionales. Para la caracterización de éstas se emplea el ligante asfáltico CA 60 - 70 producido en la principal industria asfaltera del país que es Barrancabermeja.

A partir de los resultados obtenidos por los dos métodos se efectúa un análisis comparativo de las estructuras obtenidas. Cabe destacar que en el empleo del procedimiento empírico-mecanicista los modelos de deterioro no han sido calibrados para la realidad nacional.

Palabras clave: diseño de pavimentos, AASHTO 2002, pavimento, diseño.

ABSTRACT

In this work it is presents a new flexible pavement designs comparison between the design method presented in the Institute National of Highway Guide and the Empirical-Mechanistic Pavements Design Guide AASHTO 2002. MEPDG LEVEL 3 for the city of Pasto (Nariño)

In the guide of the project design the AASHTO 2002 MEPDG Level 3 is introduced a new concept about traffic data referring: The load normalized spectrum by axle in replacement of the equivalent axles. To obtain this new variable is used the number of load repetitions. The variable associated to climate is incorporated into the design weather by use of a weather station that meets in the region in study, created from temperature data from, wind speed, cloudiness, rainfall and relative humidity. Regarding to the pavement structure are chosen designs that comply with national specifications. For the characterization of these is employed asphalt mixtures AC 60-70 made in the asphalt industry in the country's main located in Barrancabermeja.

From the results obtained by the two methods is effected a comparative analysis of the structures obtained. It is important to emphasize that in using the Empirical – Mechanistic, the deterioration models have not been calibrated for the national reality.

Keywords: pavements design, AASHTO 2002 , pavement, design.

INTRODUCCIÓN.

En el diseño de pavimentos flexibles se requiere variables de diseño tales como el tránsito, las características geotécnicas de la subrasante, la caracterización dinámica de los materiales empleados, un método de diseño y la aproximación práctica e iterativa de parte del diseñador, el cual debe seleccionar una estructura preliminar para luego analizarla y determinar si ésta se ajusta a los criterios de desempeño establecidos por cada uno de los métodos.

Los pavimentos se diseñan para que las cargas impuestas por el tránsito no generen deformaciones permanentes excesivas, las cuales se producen en cada una de las capas, interviniendo además de las cargas del tránsito las condiciones climáticas y ambientales representadas principalmente por la precipitación y temperatura a las cuales se encuentra sometida la estructura y la subrasante

En los pavimentos flexibles la deformación permanente total es la suma de la deformación producida en cada una de las capas de la estructura, pero los métodos empíricos y racionales empleados hoy en día suponen que dicha deformación se produce solo en la capa de subrasante siendo este el principal inconveniente de los métodos empleados en la actualidad. Por lo tanto, las metodologías de diseño deben comenzar a tener en cuenta las deformaciones que se producen en estas capas, y los modelos para predecir dichas deformaciones, deben ser capaces de reproducir el comportamiento de estos materiales bajo diversas trayectorias de carga cíclica y condiciones del medio ambiente.

En este trabajo se presenta una comparación de las estructuras de pavimentos flexibles nuevos diseñados para la ciudad de Pasto aplicando la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanística ME-PDG 2002 (Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide) AASHTO 2002 – Nivel 3 y el Manual de diseño de pavimentos asfálticos con medios y altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías.

Para diseñar pavimentos mediante el software de la guía norteamericana se deben ingresar ciertos parámetros de entrada que agrupan variables y parámetros de diseño, siendo éstos los siguientes: tránsito, clima, estructuración del pavimento y propiedades de los materiales.

Estos datos de entrada se tomarán de los materiales empleados en el Manual de diseño de pavimentos asfálticos con medios y altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías los cuales se describirán a lo largo de este documento, los cuales, siendo ingresados al software permiten la aplicabilidad de modelos de deterioro y la obtención de la progresión del desempeño en el tiempo. Para pavimentos flexibles, los deterioros posibles de analizar son los siguientes: deformación permanente, grietas por fatiga (de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo), grietas térmicas y verificación de la regularidad superficial (IRI).

El procedimiento de diseño contempla la propuesta de un diseño inicial y si el diseño inicial no satisface los criterios de desempeño éste se modifica y se analiza nuevamente hasta que satisfaga

todos los criterios. El diseño que se ajuste a los criterios planteados es considerado confiable desde el punto de vista estructural y funcional.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

Efectuar el diseño de estructuras de pavimentos asfálticos nuevos para la ciudad de Pasto, empleando la guía de diseño de pavimentos Empírico-Mecanística ME-PDG 2002 (Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide) AASHTO 2002 – Nivel 3 y el Manual de diseño de pavimentos asfálticos del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Definir las variables de entrada empleadas en el diseño de pavimentos flexibles.
- Efectuar el diseño de estructuras nuevas de pavimentos flexibles mediante la guía de diseño de pavimentos mecánico empírico ME – PDG para el NIVEL 3.
- Determinar si con las mismas variables de entrada como son clima, tránsito y condiciones de materiales, las estructuras obtenidas por el método del INVIAS y guía de diseño de pavimentos mecánico empírico ME – PDG para el NIVEL 3, presentan variabilidad de espesores y de desempeño a lo largo del periodo de diseño.

JUSTIFICACIÓN.

La red vial tanto Nacional, departamental como regional son un factor esencial para el crecimiento económico y social en Colombia, un país debe disponer de una infraestructura de transporte capaz de llegar a todos los rincones de su territorio; sin embargo el sostenido crecimiento del parque automotor tanto en volumen como en cargas y el deterioro sufrido por las diferentes redes viales constituyen un problema crónico cuya solución no es sencilla.

Las inversiones de capital que significa para cualquier país la rehabilitación y/o reconstrucción de sus estructuras de pavimento obliga a los responsables de administrarlas a estar permanentemente explorando la necesidad de incorporar metodologías cada vez más racionales a la hora de planificar la construcción y conservación de las carreteras para poder hacer uso eficiente de los recursos.

Las metodologías de diseño de pavimentos flexibles, a través de una adecuada predicción del comportamiento en servicio de las estructuras, buscan aumentar su vida útil y analizar con un importante grado de confiabilidad múltiples alternativas de mantenimiento técnicamente viables y conseguir una importante reducción de los costos de mantenimiento asociados.

No obstante esto, dada la aleatoriedad del fenómeno de deterioro de caminos y la distinta naturaleza de los procedimientos utilizados, son de esperar diferencias entre las soluciones proporcionadas por

cada uno de ellos. En Colombia se emplean métodos empíricos y racionales para el diseño y conservación de las estructuras de pavimentos flexibles; entre estos se destaca el método de diseño de pavimentos flexibles del Instituto Nacional de Vías el cual es un método empírico.

En este trabajo, con el empleo de la Guía MEPDG 2002 (Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide) Nivel 3, se pretende obtener los diseños para pavimentos flexibles nuevos para con ellos efectuar un análisis comparativo con las estructuras de pavimentos flexibles planteadas en el Manual de diseño de pavimentos asfálticos del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y dar inicio a la implementación de una metodología de diseño que predice en forma más acertada el comportamiento de las estructuras de pavimento.

1. MARCO TEÓRICO.

1.1 MÉTODOS DE DISEÑO.

Valentín José Boussinesq en el año de 1885 formulo las ecuaciones para el cálculo de esfuerzos y deformaciones inducidos por la acción del tránsito en un pavimento flexible, partiendo del estudio del equilibrio y movimiento de los sólidos elásticos.

La mayoría de los materiales utilizados en pavimentos son no lineales y el uso de los modelos lineales es válido para estados de tensión bajos. Las mezclas asfálticas a elevadas temperaturas de servicio y los suelos muy cohesivos, no siguen ninguno de los casos ideales y como consecuencia se han desarrollado varias combinaciones para simular el comportamiento de la respuesta.

Los materiales granulares responden de acuerdo al nivel de esfuerzos aplicados, a su densidad, humedad y en general su comportamiento no es lineal y dependen del material de la capa subyacente.

En general, los métodos de diseño utilizados para dimensionar estructuras de pavimento flexibles se pueden dividir en dos grandes grupos a saber en métodos empíricos y métodos mecanicistas.

1.1.1. Métodos empíricos. Dada la gran dificultad de involucrar todos los factores que inducen esfuerzo mediante ecuaciones matemáticas de fácil solución, hubo necesidad de utilizar métodos empíricos con ensayos a escala natural y modelos tales como Arlington Test ejecutado por la BPR Bates Experimental Road.

Los métodos empíricos, se basan en experiencias relativamente cortas con respecto a las vidas de diseño de los pavimentos, ya que son demasiado onerosos, caso de estos es el ensayo vial AASHO, además que han tenido que reconsiderarse muchos parámetros debido a su no representatividad.

En el año de 1956 se comienza a construir la pista de ensayo AASHO Road Test con la finalidad de estudiar los efectos de las distintas cargas de ejes y desarrollar métodos de diseño tanto para pavimentos flexibles como rígidos. Sin lugar a dudas este ha sido uno de los experimentos más importantes, pues de sus resultados, se han derivado los distintos métodos de diseño.

En los métodos empíricos se correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras. Los factores más importantes son las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones ambientales a las cuales se encuentra sometida la estructura, el tipo de suelo o terreno de subrasante, la calidad de los materiales empleados y deficiencias durante el proceso constructivo. Todos estos factores son controlados y medidos durante las fases de estudio para correlacionarlos con los mecanismos de degradación y crear así el método de diseño.

Los mecanismos principales de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas y también en las mecanicistas son dos: fatiga y exceso de deformación permanente.

La fatiga ocurre en las capas ligadas, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores altos de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica. Este tipo de deformación es asociado a la respuesta resiliente que presenta la estructura cuando se mueven las cargas vehiculares. La deformación permanente es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos la cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento.

En el caso de las estructuras flexibles, la deformación permanente total es la suma de la deformación producida en cada una de las capas del pavimento, pero actualmente los métodos empíricos suponen que tal deformación se genera solo en la capa subrasante y esto crea una de sus principales limitaciones. La anterior suposición se basa en que la subrasante es la capa más susceptible a la deformación debido a su baja rigidez, en comparación con las otras capas del pavimento y a una mayor probabilidad de presentar altos contenidos de agua, lo cual disminuiría su capacidad portante.

1.1.2. Métodos Mecanicistas, analíticos o racionales. A diferencia de los métodos empíricos, los analíticos tienen en cuenta cómo el estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura del pavimento influyen en el comportamiento del mismo. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones, emplean programas de computador disponibles desde la década de los 60's ¹. En estos programas se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (módulo elástico y la relación de Poisson), los espesores de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación.

Una vez calculados los estados, se comparan con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada, y en un procedimiento de ensayo y error, aumentando o disminuyendo por lo general los espesores de capas, se dimensionan las capas que conformarán la estructura de pavimento.

Esta metodología fue posible gracias a la gran evolución de las matemáticas y en especial a la ciencia de los elementos finitos, al gran desarrollo de los computadores de alta velocidad y a la instrumentación computarizada, con lo cual es posible monitorear los pavimentos, seguir su comportamiento y determinar su valor residual en un momento determinado

Se han desarrollado métodos intermedios entre los analíticos y los empíricos, métodos denominados Mecanicistas que consisten en modelar racionalmente la estructura de un pavimento (multicapa), caracterizar los materiales de dichas capas por sus propiedades mecánicas, dinámicas y hacer rectificaciones o aproximaciones mediante el análisis de mediciones del comportamiento de pavimentos en servicio.

Pese a ser una metodología diferente a las empíricas, presentan connotaciones similares. Por ejemplo, el criterio de diseño en métodos analíticos es el mismo ya que el pavimento falla por acumulación de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica debido a ciclos de

¹ GOMES CORREIA, A. (2000). Modelling Unbound Granular Materials. En: Recommendations for Pavement Design. Technical University of Lisbon – IST.

carga y por exceso de deformación vertical en la superficie de la capa de subrasante, es decir, no tienen en cuenta el efecto que puede tener la acumulación de la deformación en las capas de base y sub-base granulares no tratadas.

Pero la principal desventaja de esta metodología radica en que el cálculo de los estados de esfuerzo y deformación se realiza por lo general suponiendo que el pavimento flexible es un sistema multicapa elástico lineal, compuesto por tres capas: la subrasante, la capa granular no tratada y la capa asfáltica. Este comportamiento elástico se supone de manera simplista justificando que bajo algún ciclo individual de carga la deformación permanente es muy baja comparada con la deformación resiliente. Los parámetros elásticos pueden ser calculados por medio de ensayos de laboratorio o por medio de retrocálculos de ensayos in situ, empleando por ejemplo Falling Weight Deflectometers – FWD.

Por un lado las ecuaciones elásticas lineales no tienen en cuenta que el comportamiento de las mezclas asfálticas es viscoso ya que estas son dependiente de la velocidad de aplicación de carga y de la temperatura y en el caso de los materiales granulares no tratados de base y sub-base su comportamiento es inelástico, con deformaciones resilientes y permanentes, no lineal ya que la rigidez es dependiente del nivel de esfuerzo aplicado; para los niveles de esfuerzos a los cuales se encuentran sometidos en un pavimento flexible ². Además, dependiendo del tipo de material de subrasante, el comportamiento del suelo puede ser dependiente de la velocidad de carga como en el caso de muchas arcillas.

1.1.3. Métodos basados en elementos finitos y en modelos no elásticos. En la actualidad está en desarrollo una nueva metodología para el estudio y análisis de pavimentos la cual emplea programas de elementos finitos para la determinación de esfuerzos y deformaciones. Estos programas emplean ecuaciones constitutivas para el cálculo de esfuerzos y deformaciones las cuales suponen que el material es un continuo.

Para el caso de los pavimentos, algunas de las ventajas del empleo de programas de elementos finitos radica en que pueden llegar a tener en cuenta que los materiales granulares no tratados que conforman pavimentos exhiben un comportamiento no lineal, dependiente de la condición de esfuerzos, y comportamiento viscoso en las capas asfálticas y en la subrasante.

Estos métodos son capaces de modelar diferentes geometrías, condiciones de frontera, criterios de falla y carga cíclica. Algunos modelos de comportamiento empleados en programas de elementos finitos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en materiales granulares no tratados son:

- El modelo de acumulación de Bochum
- Elastoplásticos
- Hiperelásticos
- Elásticos lineales y no lineales

² BARKSDALE, R. D. (1972). Laboratory Evaluation of Rutting in Basecoarse Materials. En: Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1. pp. 161-174.

- Hipoplásticos ³

Para el caso de las capas asfálticas por lo general los modelos empleados son los elásticos lineales y los viscoelásticos.

En el mercado existen diversos programas de elementos finitos como el Abaqus, Plaxys y Ansys, pero algunos que se especializan en pavimentos son el SENOL (University of Nottingham), FENLAP (University of Nottingham), ILLI-PAVE (University of Illinois), GT-PAVE (Georgia Institute of Technology) y el NOEL (Université de Nantes), y códigos como el DIANA (Delft University of technology) y el CESAR (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

En general, los programas de elementos finitos reproducen de mejor manera comportamiento de los materiales que conforman un pavimento. Solo es necesario el desarrollo de ecuaciones constitutivas que predigan lo más cercano posible el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman estas estructuras.

1.2 MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

En primer lugar se debe conocer la definición de Pavimento, el cual se considera como una estructura, constituida por varias capas de materiales seleccionados, diseñada y construida técnicamente con el objeto de brindar el tránsito de los vehículos de una manera rápida, cómoda, segura, eficiente y económica. Una estructura de pavimento se puede considerar como adecuada cuando llega a la falla funcional después de haber resistido el tránsito de diseño hasta llegar a una calificación de rechazo, con el menor costo posible.

Una forma de clasificar los pavimentos es de acuerdo a las capas que los constituyen y muy a fin al presente trabajo se presenta la clasificación de pavimentos de acuerdo al criterio si se genera o no una estructura clasificando estas como:

- Capas estructurales
- Capas de protección.

Las capas estructurales son aquellas que por sus condiciones de materiales y espesores, forman una estructura resistente computable en el diseño del espesor total de una estructura de pavimento y aportan con un valor de capacidad de carga y resistencia considerable a la estructura de pavimento

Las capas de protección, se refiere a los tratamientos asfálticos que por sus condiciones de mezcla o espesor, no aporta estructura al pavimento y solo lo protege, otorgando gran resistencia a la acción abrasiva del tránsito e impermeabilidad superficial.

Pavimentos Flexibles: Los pavimentos flexibles se definen como una estructura construida con productos bituminosos y materiales granulares. Se caracterizan por ser elementos continuos con la particularidad de que al aplicar una carga se deforman de manera considerable en un área relativamente pequeña. Están constituido generalmente por una carpeta asfáltica construida sobre

³ WICHTMANN, T. (2005). Explicit Accumulation Model for Non-cohesive Soils under Cyclic Loading. Ph. D. Thesis, Des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr - Universität Bochum.

dos capas casi siempre granulares: la base y la subbase, en algunas ocasiones dependiendo de las condiciones particulares del diseño están capas granulares pueden ser estabilizadas con cemento, cal, asfalto o productos químicos, estas capas tienen una resistencia a la deformación decreciente con la profundidad, de manera análoga a la disminución de las presiones transmitidas desde la superficie por las cargas del tránsito.

Las metodologías existentes y comúnmente empleadas para el diseño de pavimentos flexibles en Colombia en forma condensada se presentan a continuación:

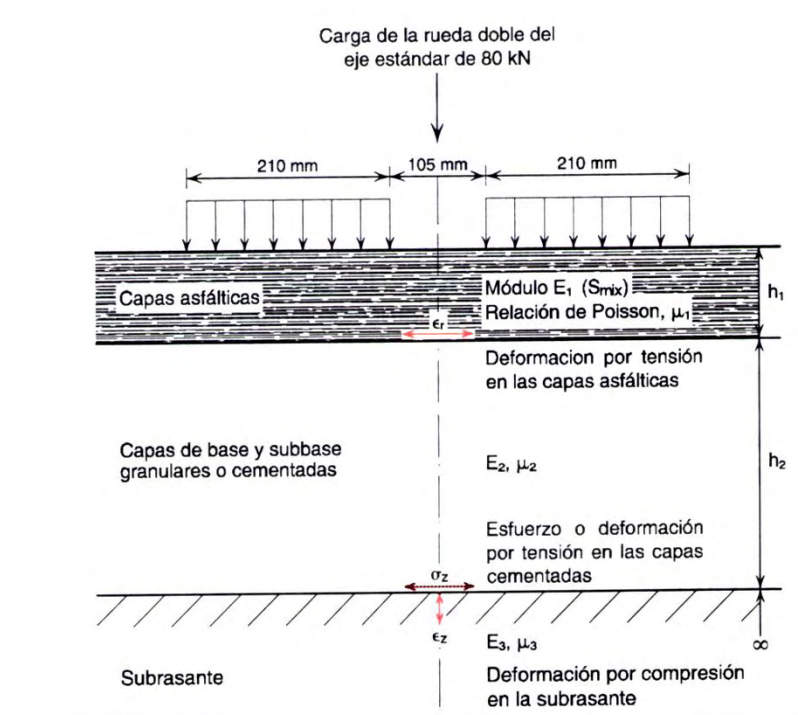
1.2.1 Método Shell- 784. El método Shell de 1978 considera la estructura del pavimento como un sistema multicapa linealmente elástico sometido a la acción de las repeticiones de cargas producidas por el **tránsito. Los materiales que conforman las distintas capas de la estructura de pavimento se** caracterizan por el módulo de elasticidad de Young (E) y su relación de Poisson (μ). Los materiales se consideran homogéneos e isotrópicos y las capas tienen dimensiones horizontales infinitas. Por su parte el tránsito se expresa como cargas de diseño normalizadas que actúan normal sobre la superficie, distribuidas uniformemente sobre un área circular y se representa por N .

En la figura 1, se muestra el sistema tricapas en que se basa el método de diseño, en donde la capa inferior se considera infinita en la dirección vertical y corresponde a la subrasante, la capa intermedia representa las capas granulares de subbase, base y/o capas estabilizadas con cemento, cal, asfalto o productos químicos, la capa superior representa las capas asfálticas. Todas las capas se consideran con fricción completa entre las interfaces.

El diseño consiste en elegir espesores de las capas asfálticas y granulares, así como las características de sus materiales (E , μ), de manera que se cumpla un determinado criterio de deformaciones, los esfuerzos y deformaciones máximos en cualquier punto de la estructura se determinan con el programa computacional BISAR.

⁴ HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2010. p.17.

Figura 1. Sistema estructural multicapa empleado por la Shell



Fuente: SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. Shell pavement design manual - asphalt pavements and overlays for road traffic. Londres., 1978. p.2

Criterios de Diseño⁵

El método considera dos criterios principales para el diseño estructural:

- La deformación horizontal de tracción en la capa asfáltica, generalmente en la parte inferior, si esta es excesiva se producirá agrietamiento de la capa (ϵ_t)
- La deformación vertical de compresión en la subrasante, si esta es excesiva se producirá una deformación permanente en la subrasante, y esto causará la deformación en la superficie del pavimento (ϵ_r)

Otro criterio incluye los esfuerzos y las deformaciones de tracción permisibles en cualquier capa de base cementada y la deformación permanente acumulada en la superficie de pavimento debido a las deformaciones en cada una de las capas.

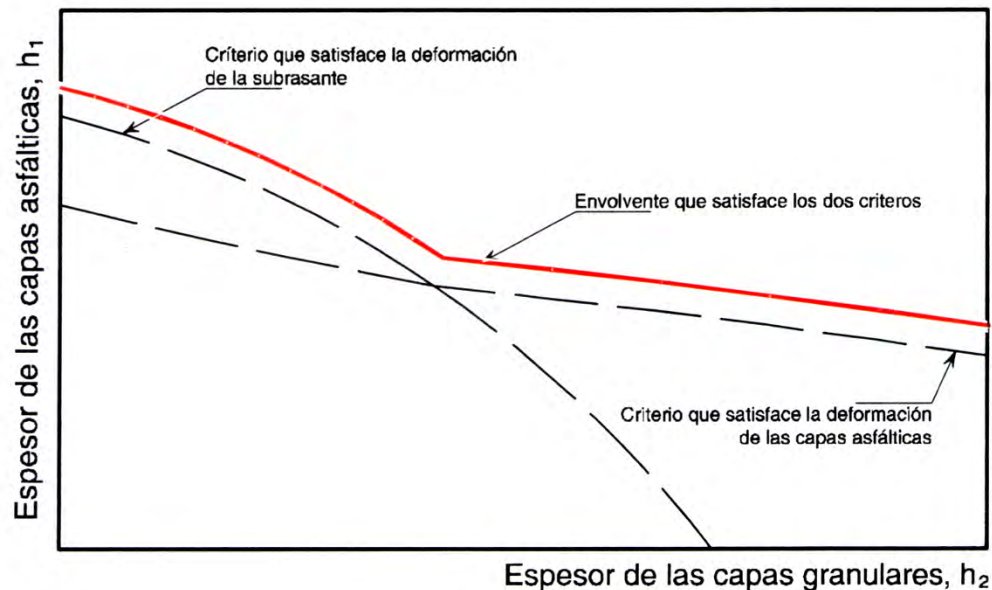
⁵ ARENAS LOZANO, Hugo León. Teoría de los Pavimentos. Universidad del Cauca. Popayán, 2000. p.394.

Con base en estos criterios la Shell elaboró las cartas de diseño, seleccionando combinaciones de espesores de capas asfálticas y capas de base, teniendo en cuenta módulos de la subrasante, tipo de mezcla asfáltica, temperatura media anual ponderada del aire y el número de aplicaciones de carga de ejes estándar de diseño esperados durante la vida de diseño del pavimento, para que las deformaciones críticas no excedan los valores permisibles para los diferentes materiales.

El método Shell permite elegir una combinación de espesores y características de los materiales (E , μ) de las diversas capas de pavimento, de tal forma que las deformaciones permanezcan dentro de los límites admisibles durante el periodo de diseño del pavimento.

Una curva de diseño especial esta generalmente formada por dos curvas de manera que asocian los dos criterios de diseño (ϵ_z , ϵ_r), como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Nomograma de Diseño Simplificado



Fuente: SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. Shell pavement design manual - asphalt pavements and overlays for road traffic. Londres., 1978. p.2

Deformación unitaria vertical por compresión (ϵ_z) en la parte superior de la subrasante: Mediante el programa de computadora BISTRO y la información obtenida en el Ensayo Vial AASHO se produjeron las siguientes expresiones para determinar la deformación unitaria por compresión en la parte superior de la subrasante.

Confiability del 50%.	$\epsilon_z = 2.8 * 10^{-2} * N^{-0.25}$
Confiability del 85%.	$\epsilon_z = 2.1 * 10^{-2} * N^{-0.25}$
Confiability del 95%.	$\epsilon_z = 1.8 * 10^{-2} * N^{-0.25}$

Donde:

ϵ_z : Deformación unitaria vertical por compresión en la parte superior de la subrasante.
N: Número de aplicaciones de carga.

Deformación unitaria por tensión (ϵ_r) en la parte inferior de las capas asfálticas: La determinación de la ley de fatiga de una mezcla bituminosa es una cuestión compleja que requiere muchos ensayos de laboratorio y calibraciones posteriores del modelo in situ. Por ello se suele recurrir a los estudios genéricos realizados por laboratorios nacionales o por organizaciones con grandes recursos. La expresión simplificada que establece la SHELL para definir una ley de fatiga de una mezcla bituminosa es:

$$\epsilon_r = (0.856 * V_b + 1.8) * E^{-0.36} * N^{-0.2}$$

Donde:

ϵ_r : Deformación unitaria por tensión en la parte inferior de las capas asfálticas
 V_b : Porcentaje de betún en volumen
E: Módulo de la mezcla en Mega pascales.
N: Número de aplicaciones de carga.

1.2.2 Método AASHTO 19936. La metodología AASHTO supone una estructura multicapa, en donde las estructuras son obtenidas evaluando los números estructurales (SN) requeridos, de acuerdo con las condiciones de tránsito, resistencia de la subrasante y niveles de confianza seleccionados. El procedimiento de diseño consiste en determinar el número estructural necesario para soportar un determinado tránsito N esperado durante el período de Diseño, dada la resistencia de la subrasante, los índices de servicio inicial y final y los valores de desviación y probabilidad de error en la obtención de las variables de diseño, siguiendo en método establecido en el manual de diseño de la AASHTO

En el diseño de pavimentos flexibles se utiliza la expresión general o fórmula básica de la AASHTO, con el cual se determina el número estructural (SN). El número estructural es un valor que expresa la resistencia que requiere un pavimento construido sobre una subrasante con un módulo M_r , para poder soportar el tránsito N, bajo unas condiciones ambientales específicas y un determinado nivel de servicio terminal.

Mediante coeficientes de equivalencias que representan la resistencia relativa de cada capa es posible conocer los espesores de cada una de ellas en la estructura de pavimento, el valor de SN se calcula mediante la siguiente expresión:

$$SN = a_1 * e_1 + a_2 * e_2 * m_2 + a_3 * e_3 * m_3$$

Donde:

a_1 = Coeficiente estructural de la capa de concreto asfáltico.

⁶ ARENAS LOZANO, Hugo León. Teoría de los Pavimentos. Universidad del Cauca. Popayán, 2000. p.394.

- e_1 = Espesor en pulgadas de la capa de mezcla asfáltica
- a_2 = Coeficiente estructural de la capa de base granular
- e_2 = Espesor en pulgadas de la capa de base granular
- m_2 = Coeficiente de drenaje de la capa de base granular
- a_3 = Coeficiente estructural de la capa de subbase granular
- e_3 = Espesor en pulgadas de la capa de mezcla asfáltica
- m_3 = Coeficiente de drenaje de la capa de subbase granular

1.2.3 Método racional de Diseño de Pavimentos Flexibles⁷.

La metodología racional de pavimentos flexibles abarca los siguientes pasos:

- a. **Estimación del tránsito de diseño:**⁸ La variable tránsito se cuantifica con fines de diseño, expresándola en ejes equivalentes de una carga de referencia, normalmente 8.2 toneladas para Colombia, que circula por una vía en el carril de diseño, durante el período de diseño.

Se trabaja con información de las series históricas del tránsito y de su correspondiente análisis de tendencias o mediante tasas de crecimiento del tránsito, con el objeto de hacer la proyección del tránsito durante el periodo de diseño y posteriormente teniendo en cuenta la composición del tránsito comercial, los factores de equivalencia por tipo de vehículo, el factor de distribución por sentido, el factor de distribución por carril y el factor de proyección, se determina el numero de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

Para la determinación y el estudio de la variable tránsito se sugiere tener en cuenta lo establecido en el “Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito” del Instituto Nacional de Vías de Colombia – INVIAS.

- b. **Velocidad de operación y tiempo de aplicación de cargas:** Es necesario considerar las variables referentes a la velocidad de operación de los vehículos que circulan por la vía proyectada y el tiempo de aplicación de las cargas, porque con ellas se puede determinar la incidencia de las cargas sobre la estructura de pavimento en lo referente a esfuerzos, deformaciones y deflexiones.
- c. **Condiciones climáticas y regionales:** Se debe determinar las condiciones de humedad y densidad de la subrasante, para estimar su capacidad estructural y conocer además la información climática relativa de las condiciones de la temperatura ambiente, para determinar posteriormente el comportamiento de las mezclas asfálticas.

⁷ HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2010. p.17

⁸ BENAVIDES BASTIDAS, Carlos Alberto y CHAVARRO BARRETO, Eugenio. Caracterización dinámica de materiales viales y su aplicación al diseño racional de pavimentos flexibles. Universidad del Cauca. Popayán , 1993, p.3

- d. **Caracterización de los materiales:** En esta actividad el principal objetivo es la obtención del módulo resiliente de los suelos y materiales granulares no tratados, los cuales se pueden estimar de la siguiente manera:
- Ensayos triaxiales dinámicos a nivel de laboratorio
 - Determinación insitu por medio de ensayo de placa, propagación de ondas –impacto, medición de deflexiones
 - Relación empíricas de uso general
- e. **Determinación de módulos resilientes:** En caso de no disponer de equipos triaxiales que permitan determinar los módulos resilientes de los suelos en el laboratorio, dichos módulos pueden obtenerse mediante correlaciones que han sido desarrollados por organismos internacionales que gozan de reconocida aceptación en el campo de los pavimentos. La metodologías más conocidas son la de la Shell, la de Barker
- f. **Capas asfálticas:** Se debe determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica, este módulo establece una relación funcional que vincula los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes para cada condición particular de temperatura y tiempo o frecuencia de aplicación de la carga. El módulo de rigidez de una mezcla es función de los siguientes parámetros.
- Características y concentración volumétrica de los áridos y del ligante
 - Grado de densificación adoptado en el proyecto
 - Temperatura de la capa asfáltica
 - Acción de las cargas y del tránsito en cuanto a intensidad, frecuencia y velocidad media de circulación.
- g. **Asignación de las relaciones de Poisson:** Las relaciones de Poisson de los materiales se asumen de la siguiente manera: mezclas asfálticas con un valor de $\mu = 0.35$, para suelos granulares con un valor de $\mu = 0.40$ y para suelos finos de subrasante con un valor de $\mu = 0.50$

Tabla N° 1. Coeficiente de Poisson para diferentes materiales

MATERIAL	RANGO	VALOR TÍPICO
Concreto asfáltico	0.35 – 0.40	0.35
Base granular o subbase	0.30 – 0.40	0.40
Material granular tratado con cemento	0.10 – 0.20	0.15
Suelos finos con granulares	0.30 – 0.50	0.40
Arcilla normal	0.42	0.42
Material estabilizado con cal	0.10 – 0.25	0.20
Hormigón, cemento Portland	0.12 – 0.20	0.15

Fuente: BENAVIDES BASTIDAS, Carlos y CHAVARRO BARRETO, Eugenio. Eugenio. Caracterización dinámica de materiales viales y su aplicación al diseño racional de pavimentos flexibles. Universidad del Cauca. Popayán , 1993, p.12

- h. **Modelos de falla de los materiales:** El comportamiento de los pavimentos flexible está definido por tres criterios de falla: fisuramiento por fatiga de la carpeta asfáltica, deformaciones

permanentes y deflexión de la estructura, es importante controlar estos deterioros por medio de la limitación de los valores de deformaciones admisibles de acuerdo con la intensidad del tránsito previsto en el periodo de diseño. Eso se logra por medio de los estudios de leyes de fatiga o de comportamiento de los materiales viales en condiciones de servicio. Se establece para los diferentes niveles de tránsito expresados en ejes equivalentes de 8.2 toneladas las magnitudes de las deformaciones admisibles propuestas por diferentes organismos internacionales de investigación, situación que se adopta así debido a que hasta el momento no se tienen expresiones propias en Colombia.

- i. **Modelación de la estructura:** Efectuada la caracterización dinámica de los materiales, obtenido los valores de módulos y relaciones de Poisson, se asume los espesores de las diferentes capas.
- j. **Cálculo de esfuerzos y deformaciones:** Una vez definido el modelo estructural, se calculan los valores de esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimento. Para facilitar estos cálculo se utilizan programas computacionales, en Colombia se utiliza el DEPAV basado en el ALIZE III, que permiten calcular esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimentos relacionados con el dimensionamiento y comportamiento futuro de la estructura.
- k. **Verificación de solicitaciones calculadas con las admisibles.** Después de realizar el cálculo de los esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento se hace la comparación de estos valores con los límites admisibles establecidos por las leyes de fatiga de los materiales.
- l. **Diseño definitivo de la estructura:** Una vez lograda la convergencia de los valores calculados con los admisibles, queda definida la estructura para las condiciones de carga, tránsito, clima y materiales considerados dentro del dimensionamiento.

1.2.4 Método del Instituto Nacional de Vías. El procedimiento de diseño desarrollado por el INVIAS es aplicable a pavimentos de carreteras interurbanas de dos o más carriles y abarca todas las gamas probables de tránsito. La normativa se fundó en una combinación de métodos existentes, en la experiencia, la teoría de comportamiento estructural y los materiales disponibles. Sin embargo, la normativa propuesta por este método no excluye otros métodos de diseño que podrían ser utilizados.

Para la calibración y validación se utilizó información sobre distintos tramos de estudio de pavimentos existentes de la red vial nacional, evaluados en las diferentes etapas de la Investigación Nacional de Pavimentos. A partir de los datos recopilados se asignaron campos de interés al diseño estructural, incluyendo: número de ejes equivalentes soportados por la estructura, valor soporte de la subrasante, espesores y tipos de materiales utilizados, edad del pavimento y estado en que se encontraba en el momento del análisis: Los otros datos complementarios fueron estimados a partir de los datos anteriores.

Teniendo en cuenta la historia del pavimento, las condiciones ambientales y las mediciones deflectométricas, se estimó la resistencia de la subrasante en su estado de equilibrio.

Se estableció el grado de deterioro teniendo presente que:

- Si hubiese habido intervenciones, se asumió que fueron realizadas cuando se alcanzó un índice de serviciabilidad de dos (2).
- Si hubiese habido reconstrucción, se asumió que fue realizada cuando se alcanzó un índice de serviciabilidad de uno (1).

Cuando el pavimento no alcanzó ninguno de los umbrales anteriores se procedió a estimar el índice de serviciabilidad aplicando el criterio del método AASHTO. Con ello se estableció la caída del índice y, consecuentemente, se estimó el número de repeticiones según ese método de diseño. Al menos dos estimaciones de número de ejes equivalentes se calcularon por cada sección de calibración. En la elaboración de este manual se utilizó los métodos AASHTO versión 1993 y racional (mecánico-empírico), basados en las curvas de fatiga desarrolladas por Finn, que involucran el nivel de fisuramiento en servicio.

La evaluación se realizó estadísticamente, asumiendo las variables de entrada de diseño como variables aleatorias independientes, y la diferencia entre el número de ejes equivalentes soportados por la estructura y el calculado por los métodos de diseño, como variable aleatoria dependiente. El establecimiento del o de los métodos que más se ajustaron a las condiciones particulares del país se realizó con base en la minimización del error en el número de ejes equivalentes, es decir, buscado que tienda a cero con una varianza mínima.

El método de diseño seleccionado para la verificación de las alternativas propuestas en las cartas, fue el AASHTO 1993. Una vez establecido el método de diseño más confiable, se procedió a verificar las secciones estructurales seleccionadas para validación. Posteriormente, se propusieron estructuras para aquellas combinaciones de resistencia de subrasante y tránsito que no contaban con diseños probados.

La ecuación básica de diseño empleada para dimensionar las estructuras fue la recomendada por el método AASHTO.

El valor del error normal (S_o) se consideró igual a 0.44, correspondiente a la condición de diseño cuando solo se considera la variación en la predicción del comportamiento del pavimento, sin errores en la estimación del tránsito con un nivel de confianza determinado.

El valor de desviación estándar normal, Z_r , es el correspondiente a un nivel de confiabilidad de 90%.

La pérdida de serviciabilidad se consideró un valor de $\Delta PSI = 2.2$, correspondiente a una serviciabilidad inicial de 4.2 y un índice de serviciabilidad final de 2.0.

Para la determinación de espesores se establecieron los siguientes valores de coeficientes estructurales (a_i) para los diferentes materiales, teniendo en cuenta las características mecánicas de dichos materiales, obtenidas en diferentes investigaciones realizadas en el país, y las recomendaciones establecidas para estos parámetros por el método AASHTO.

Tabla N° 2. Valores de coeficientes estructurales (a_i /pulg).

MEZCLA DENSA EN CALIENTE	MDC $a_i = 0.44$	TMAP < 13 °C
	MDC $a_i = 0.37$	13 °C ≤ TMAP < 20 °C
	MDC $a_i = 0.30$	20 °C ≤ TMAP ≤ 30 °C
MEZCLA DENSA EN FRIO	MDF $a_i = 0.8 \times 0.44$	TMAP < 13 °C
	MDF $a_i = 0.8 \times 0.37$	13 °C ≤ TMAP < 20 °C
	MDF $a_i = 0.8 \times 0.30$	20 °C ≤ TMAP ≤ 30 °C
BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA	BEE - 1 $a_i = 0.20$	Agregado grueso
	BEE - 2 $a_i = 0.20$	Agregado medio
	BEE - 3 $a_i = 0.14$	Suelo
BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO	BEC - 1 $a_i = 0.16$	A-1-a; A-1-b
	BEC - 2 $a_i = 0.14$	A-3; A-2-4; A-2-5
	BEC - 3 $a_i = 0.13$	A-2-6; A-2-7; A-4
		A-5; A-6; A-7
BASE GRANULAR	BG-1, BG-2 $a_i = 0.14$	
SUBBASE GRANULAR	SBG-1, SBG-2 $a_i = 0.12$	

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.71

Los valores de los coeficientes de drenaje (m_i) utilizados para las capas granulares se determinaron de acuerdo con los niveles de precipitación y la 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.

Tabla N° 3. Valores de coeficientes de drenaje (m_i).

PRECIPITACIÓN (mm/año)	COEFICIENTE DE DRENAJE (m_i)
< 2000	1.00
2000 – 4000	0.90
> 4000	0.80

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.71

- **Rangos de tránsito considerados.**

Analizando la información del tránsito de la red vial nacional colombiana y las tendencias de crecimiento y desarrollo del país, se establecieron los siguientes rangos para fines del presente

Manual, expresados en número de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas que circularán en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

Tabla N° 4. Rangos de tránsito considerados en la norma.

DESIGNACIÓN	RANGOS DE TRÁNSITO ACUMULADO POR CARRIL DE DISEÑO
T1	$0.5 - 1 \times 10^6$
T2	$1 - 2 \times 10^6$
T3	$2 - 4 \times 10^6$
T4	$4 - 6 \times 10^6$
T5	$6 - 10 \times 10^6$
T6	$10 - 15 \times 10^6$
T7	$15 - 20 \times 10^6$
T8	$20 - 30 \times 10^6$
T9	$30 - 40 \times 10^6$

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.17.

Los tránsitos menores a 0.5×10^6 ejes equivalentes están contemplados en el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías de bajos volúmenes de tránsito, del Instituto Nacional de Vías (2007).

- **Regiones climáticas.**

Con base en las temperaturas y precipitaciones, el país se ha dividido en seis regiones climáticas, con el fin que la variable clima se involucre en forma apropiada en el diseño de estructuras de pavimento.

Tabla N° 5. Regiones climáticas según la temperatura y precipitación

N°	REGIÓN	TEMPERATURA TMAP (°C)	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)
R1	Fría seca y fría semihúmeda	< 13	< 2000
R2	Templado seco y templado semihúmedo	$1 - 2 \times 10^6$	< 2000
R3	Cálido seco y Cálido semihúmedo	$2 - 4 \times 10^6$	< 2000
R4	Templado húmedo	$4 - 6 \times 10^6$	2000 – 4000
R5	Cálido húmedo	$6 - 10 \times 10^6$	2000 -4000
R6	Cálido muy húmedo	$10 - 15 \times 10^6$	> 4000

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.33.

- **Categorías de subrasante.**

El módulo resiliente de la subrasante se clasifica de acuerdo con las categorías indicadas en el siguiente cuadro

Tabla N° 6. Categorías de la Subrasante

MÓDULO RESILIENTE (kg/cm²)	CATEGORÍA
$300 \leq Mr < 500$	S1
$500 \leq Mr < 700$	S2
$700 \leq Mr < 1000$	S3
$1000 \leq Mr < 1500$	S4
$Mr > 1500$	S5

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.52.

- **Cartas de diseño.**

Con base en las condiciones climáticas (R) , niveles de tránsito (T), condiciones de resiliencia de los suelos de subrasante (S) y características de los materiales definidos para cada una de las capas, se diseñaron las secciones estructurales para las diferentes combinaciones de las variables, indicándose para las alternativas de diseño los materiales y espesores correspondientes que garanticen una equivalencia estructural . La selección de la estructura obedecerá a condiciones particularidades de disponibilidad de materiales en la zona, se establecieron seis cartas de diseño, las cuales consideran los siguientes rangos:

Tabla N° 7. Rangos contemplados en las cartas de diseño.

CARTA N°	REGIÓN CLIMÁTICA (R)	RESISTENCIA SUBRASANTE (S)	RANGO DE TRÁNSITO (T)
1	R1	de S1 a S5	de T1 a T9
2	R2	de S1 a S5	de T1 a T9
3	R3	de S1 a S5	de T1 a T9
4	R4	de S1 a S5	de T1 a T9
5	R5	de S1 a S5	de T1 a T9
6	R6	de S1 a S5	de T1 a T9

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.72.

2. VARIABLES EMPLEADAS EN EL DISEÑO.

A continuación se presentan las variables que se requieren para efectuar el diseño de pavimentos flexibles nuevos

2.1 VARIABLE TRÁNSITO

El tránsito es la variable que representa en la realidad el período de vida útil de las estructuras de pavimento, por tanto la determinación del tránsito es función del periodo de diseño seleccionado y se convierte en una de las variables más importantes para el diseño de pavimentos, esta es una de las variables que más incertidumbre presenta al momento de calcularse debido a que la determinación del tránsito de diseño está conformada por varios tipos de tránsito y existen diversas condiciones que deben asumirse en el momento de su obtención.

2.1.1. Tránsito promedio diario anual (TPDA). La variable tránsito considerado en el diseño de capas de rodadura es el tránsito promedio diario anual (TPDA) o el tránsito promedio diario semanal (TPDS), el cual se puede expresar en términos de Ejes Equivalentes acumulados o como espectro de carga para el periodo de diseño.

2.1.2. Periodo de análisis y periodo de Diseño estructural . El período de análisis (PA) es un período convenientemente planeado durante el cual es indeseable una reconstrucción de la vía. El período de diseño estructural (PDE) está definido como el período durante el cual está previsto, con alto grado de confiabilidad, que no se requerirá ningún mantenimiento estructural. La manera en que la estrategia de diseño puede ser presentada dependerá, en gran medida, de la relación entre deterioro y tiempo y/o número de ejes equivalentes, la cual muestra una tendencia generalizada de la disminución en calidad de circulación con el tiempo y el número acumulado de ejes equivalentes.

2.1.3. Selección del período de análisis y del período de diseño estructural. Para la selección de los periodos de análisis y diseño, las vías se clasifican como se presenta en la siguiente tabla (Tabla N. 8).

Tabla N° 8. Categorías de las vías

CATEGORÍA DE LA VÍA				
	I	II	III	Especiales
Descripción	Autopistas interurbanas, caminos interurbanos principales.	Colectoras interurbanas, caminos rurales e industriales principales.	Caminos rurales con tránsito mediano, Caminos estratégicos.	Pavimentos especiales e innovaciones
Importancia	Muy importante	Importante	Poco importante	Importante a poco importante
Tránsito promedio diario	> 5000	1000 - 10000	< 1000	< 10000

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.7.

Los periodos de análisis recomendado se muestran en la siguiente tabla N. 9:

Tabla N° 9. Período de análisis recomendado

Categoría de la vía	Período de Análisis (P.A.) años		
	Rango	Período Recomendado	
		Geometría Fija	Condiciones inciertas
I	20 – 40	30	-
II	15 – 30	30	25
III	10 – 30	30	20
Especial	10 – 30	30	20 - 25

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.8.

Los periodos de diseño estructural pueden variar entre 10 y 20 años. Normalmente se usará un período de diseño de 10 años normalmente y como máximo 15 años, como se muestra en la siguiente tabla

Tabla N° 10. Período de diseño estructural recomendado.

Categoría de la vía	Período de diseño (P.D.E.) 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, 1998. p.9

2.1.4. Estimación de la tasa de crecimiento de los vehículos comerciales (r). Para la estimación de la tasa de crecimiento de los vehículos comerciales, se sugiere asumir la tasa de crecimiento del tránsito (r) con base en los parámetros macroeconómicos como crecimiento del producto interno bruto, crecimiento del parque automotor, etc. y analizando los parámetros de desarrollo de la región afectada por la vía. A nivel de referencia, en la siguiente tabla se indican los rangos de valores de crecimiento de tránsito obtenidos en diferentes tramos de la red vial nacional, dependiendo de los TPDS.

Tabla N° 11. Tasas de crecimiento obtenidas en un muestreo de la red vial nacional.

TPDS	TASA DE CRECIMIENTO (%)	
	Total vehículos	Vehículos Comerciales
< 500	6.0 - 6.5	5.5 - 6.0
500 - 1000	5.7 - 6.3	5.5 - 6.0
1000 - 2500	4.5 - 5.5	4.0 - 5.0
2500 - 5000	4.5 - 5.5	4.0 - 5.0
5000 - 10000	4.5 - 5.5	4.0 - 5.0
> 10000	4.0 - 6.0	3.0 - 5.0

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.22

En el caso de que no se conozca la composición vehicular, se puede tomar como referencia la siguiente tabla que presenta el rango de valores porcentuales de composiciones vehiculares y de camiones, obtenidos en la red vial nacional para diferentes niveles de tránsito promedio diario semanal, encontrado con la misma muestra utilizada para las tasas de crecimiento.

Tabla N° 12. Resumen de composición vehicular obtenida de la red vial nacional

Categoría	TPDS	COMPOSICIÓN			CAMIONES				
		A	B	C	C2-P	C2-G	C3-4	C-5	>C6
1	<500	50-55	10-15	30-35	40-45	50-55	2-5	0-2	0-2
2	500-1000	55-60	7-12	25-30	35-40	50-55	2-5	0-2	0-2
3	1000-2500	55-60	7-12	25-30	25-30	50-55	5-10	5-10	5-10
4	2500-5000	60-65	7-12	25-30	25-30	45-50	5-10	5-10	5-10
5	5000-10000	65-70	7-12	20-25	25-30	45-50	5-10	5-10	5-10
6	>10000	65-70	7-12	15-20	30-35	45-50	5-10	5-10	5-10

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998. p.22

2.1.5. Factor de distribución por Carril (FC). Este factor se determina a partir del número de carriles por dirección o por sentido que tiene la calzada, en el caso que la vía tenga un carril por dirección o sentido, el valor de este factor es de 1.

2.1.6. Factor de distribución por sentido (FS). Este factor se determina a partir del ancho de calzada y se recomienda que si el ancho de esta no supera 5.20 metros, se debe emplear un factor de distribución por sentido de 1, pero si el ancho de la calzada supera los 5.20 metros el factor a usar debe ser 0.5.

2.1.7. Tránsito normal acumulado (TNA_n). Para su cálculo se usara la expresión:

$$TNA_n = 365 * FC * FS * TPDA * \frac{((1 + r)^n - 1)}{r}$$

El diseñador establecerá si se presenta tránsito atraído y tránsito generado, así como el porcentaje de participación de estos en el valor del tránsito total acumulado, en caso de no tenerse estos en cuenta el tránsito total es igual al tránsito Normal acumulado.

2.1.8. Cargas máximas por eje. Estas cargas se encuentran establecidas en la resolución 004100 DE 2004(diciembre 28) por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional.

Tabla N° 13. Carga máxima de Vehículos Comerciales en Colombia

VEHÍCULO	DESIGNACIÓN [Ton]	MÁXIMO PBV [Kg]	Tolerancia positiva medición
Camiones	2	16.000	400
	3	28.000	700
	4	31.000 (1)	775
	4	36.000 (2)	900
	4	32.000 (3)	800
Tracto-camión con semirremolque	2S1	27.000	675
	2S2	32.000	800
	2S3	40.500	1.013
	3S1	29.000	725
	3S2	48.000	1.200
	3S3	52.000	1.300
Camiones con remolque	R2	16.000	400
	2R2	31.000	775
	2R3	47.000	1.175
	3R2	44.000	1.100
	3R3	48.000	1.200
	4R2	48.000	1.200
	4R3	48.000	1.200
	4R4	48.000	1.200
Camiones con remolque balanceado	2B1	25.000	625
	2B2	32.000	800
	2B3	32.000	800

	3B1	33.000	825
	3B2	40.000	1.000
	3B3	48.000	1.200
	B1	8.000	200
	B2	15.000	375
	B3	15.000	375

Fuente: Artículo 8 de la Resolución 004100 DE 2004 del Ministerio de Transportes de Colombia

El máximo peso por eje para los vehículos de transporte de carga a nivel nacional se encuentra establecido en el artículo 9 de la Resolución N° 004100 de 2004 emanada por el Ministerio de Transporte, los cuales se presentan en la Tabla 14:

Tabla N° 14. Carga máxima por eje de Vehículos Comerciales en Colombia

TIPO DE EJE	PESO MÁXIMO POR EJE, kg
Eje sencillo	
Dos llantas	6.000
Cuatro llantas	11.000
Eje tándem	
Cuatro llantas	1.000
Seis llantas	17.000
Ocho llantas	22.000
Eje trídem	
Seis llantas	16.500
Ocho llantas	19.000
Diez llantas	21.500
Doce llantas	24.000

Fuente: Artículo 9 de la Resolución 004100 DE 2004 del Ministerio de Transportes de Colombia

2.2 VARIABLE SUBRASANTE

La subrasante se define como la capa de terreno de una vía, que soporta la estructura de pavimento, que en las vías normalmente la componen suelos naturales, con excepciones donde se ha realizado

mejoramientos con rellenos y terraplenes de suelos transportados de otros lugares, su valoración se hacía teniendo en cuenta la granulometría, plasticidad, clasificación de suelos, resistencia al corte, susceptibilidad térmica, drenaje, luego se mejora la caracterización básica de la subrasante con el ensayo del CBR.

La calidad de los suelos de subrasante se pueden relacionar con el modulo de resiliencia, modulo de elasticidad, valor de soporte de California (CBR) y el modulo de reacción del suelo, todo estas características son necesarias para el diseño de la estructura de pavimento. La Clasificación de los suelos permite determinar las características de los suelos, se podrá estimar con suficiente aproximación el comportamiento de los suelos, especialmente con el conocimiento de la granulometría, plasticidad e índice de grupo y luego clasificar los suelos.

Tabla N° 15. Correlación entre la clasificación AASHTO y SUCS

Clasificación de Suelos AASHTO	Clasificación de Suelos SUCS (ASTM)
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A-2	GM, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

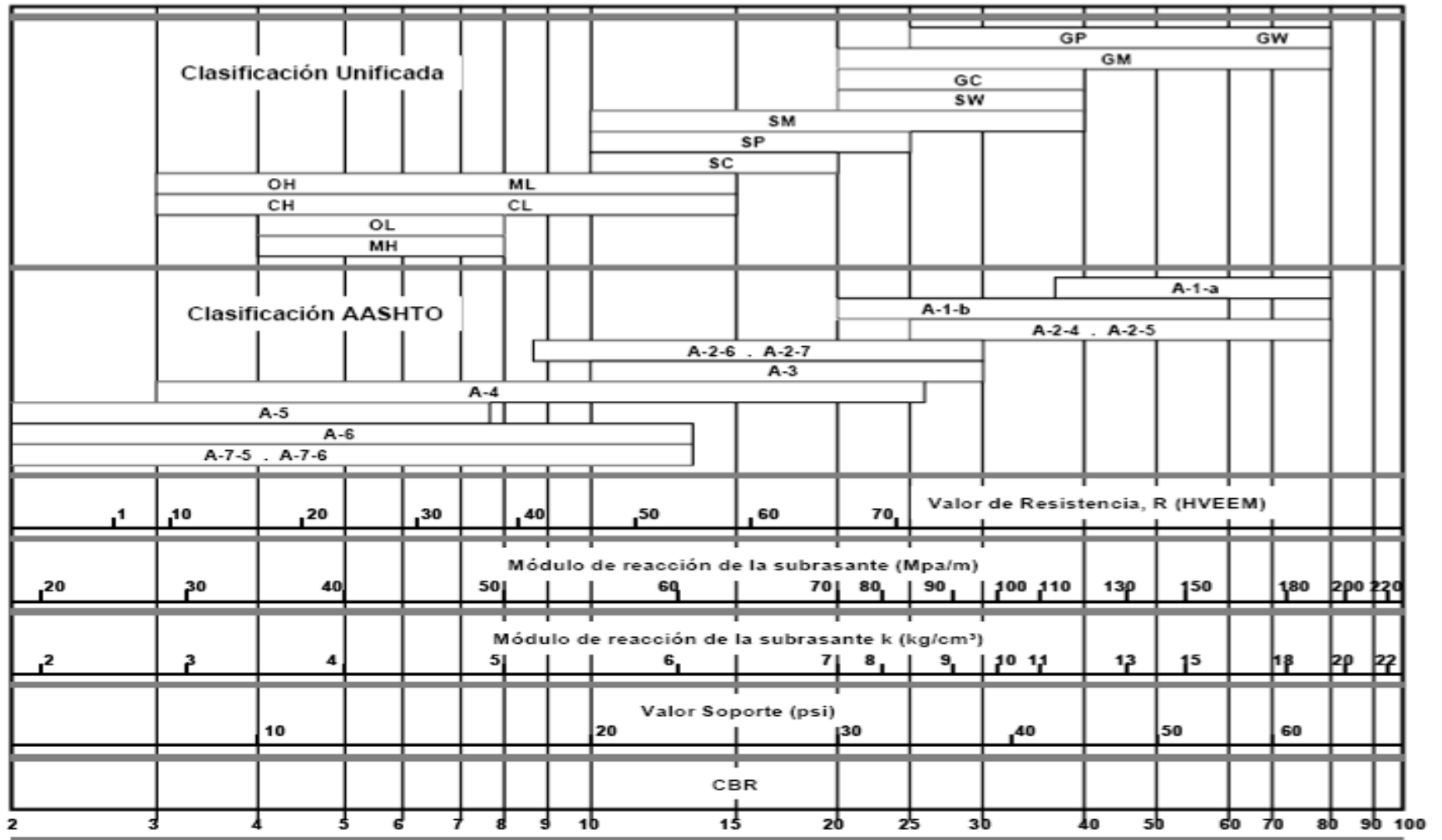
Fuente: U.S Army Corps of Engineers

Tabla N° 16. Clasificación de suelos mediante el método AASHTO

Clasificación general	Suelos granulosos 35% máximo que pasa por tamiz de 0,08 mm							Suelos finos más de 35% pasa por el tamiz de 0,08 mm				
Grupo	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
Símbolo	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6
Análisis granulométrico												
% que pasa por el tamiz de: 2 mm 0,5 mm 0,08 mm	máx. 50 máx. 30 máx. 15	máx. 50 máx. 25	mín. 50 máx.10	máx. 35	Máx.35	máx. 35	máx. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35
Límites Atterberg												
límite de liquidez de índice de plasticidad	máx. 6	máx. 6		máx. 40 máx. 10	mín. 40 máx. 10	máx. 40 mín. 10	mín.40 mín. 10	máx. 40 máx. 10	máx. 40 máx. 10	máx. 40 mín. 10	mín. 40 IP<LL-30	mín. 40 mín. 10 IP<LL-30
Índice de grupo	0	0	0	0	0	máx. 4	máx. 4	máx. 8	máx. 12	máx. 16	máx. 20	máx. 20
Tipo de material	Piedras, gravas y arena		Arena Fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Estimación general del suelo como subrasante	De excedente a bueno					De pasable a malo						

Fuente: Especificaciones estándar para los materiales de transporte y los métodos de muestreo y ensayo (Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and testing), 20ª. ed., Washington, D.C.

Figura N° 3. Clasificación de los suelos en relación a su esfuerzo



Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998.

2.3 VARIABLE CLIMA

El clima influye de manera significativa en la durabilidad de los materiales que conforman las capas de un pavimento, en el comportamiento mecánico que presentan los diferentes suelos, especialmente los más susceptibles al agua, dependiendo de las condiciones de drenaje, en el contenido de humedad de equilibrio y, también, en el comportamiento reológico y envejecimiento de las capas ligadas con asfalto.

Por lo anterior los diseñadores de pavimentos deben considerar en los estudios las condiciones climáticas y evitar el uso de materiales susceptibles al agua ó muy sensibles a la temperatura.

Debido a la ubicación de Colombia en una zona intertropical de bajas latitudes, por la altura y la complejidad del relieve, por la influencia de los mares, la extensión del territorio y los vientos locales, se presenta en el país una diversidad grande de climas, desde selva tropical con altas temperaturas y precipitaciones, hasta zonas desérticas y zonas con nieves perpetuas.

La posición del país en la zona tropical hace que en las partes bajas se presenten temperaturas altas y uniformes durante todo el año. El sistema montañoso hace que la temperatura descienda a valores bajos, en algunos casos inferiores a 0 °C.

Con relación a la hidrología el régimen de precipitaciones en el territorio colombiano se puede observar en el mapa de isohietas que se anexa. Este régimen es muy variado, observándose promedios anuales menores a 500 mm y valores superiores a los 8000 mm anuales.

Las corrientes de agua superficiales siguen la orientación sur-norte que presentan las tres grandes cordilleras colombianas y en la llanura oriental, el sistema hidrográfico tiene una orientación oeste - este.

Las diversas geomorfias existentes originan una red de drenaje muy densa, debido a la alta precipitación sobre la mayor parte del territorio: de ahí que Colombia sea uno de los países con mayor abundancia de recursos de agua superficial.

Colombia, por su posición geográfica, presenta temperaturas relativamente altas durante todo el año, pero existen zonas que, por su altitud, tienen temperaturas bajas que en épocas frías pueden llegar a los 0 °C.

3. DISEÑO DE ESTRUCTURAS MEDIANTE LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO – MECANICISTA ME –PDG 2002

3.1. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO.

Esta metodología de diseño de la guía norteamericana es del tipo empírico-mecanicista y requiere de una aproximación práctica e iterativa de parte del diseñador, el cual debe seleccionar un diseño preliminar para luego analizarlo en detalle para determinar si éste se ajusta a los criterios de desempeño establecidos, cuenta con un software para la aplicación de este método de diseño.

El desarrollo de este método se sustenta en los siguientes aspectos:

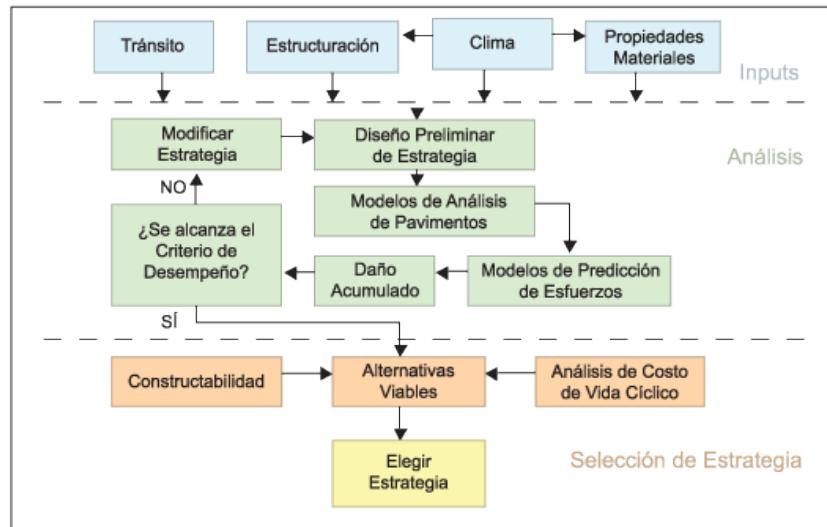
- El volumen de tránsito y los requerimientos de diseño han crecido más allá de los procedimientos empíricos desarrollados hace 40 años en AASHO Road Test
- En la actualidad existe una gran necesidad de caracterizar materiales nuevos o mejorados
- Existe deficiencia en los procesos de diseño de rehabilitación

La guía AASHTO 2002 tiene como beneficio el realizar diseños más eficientes y económicos, mejorar la confiabilidad del diseño, predecir modelos específicos de falla de manera que se puedan controlar en el periodo de diseño, extrapolar datos de campo y de laboratorio, mejorar la utilización de los materiales disponibles, minimizar las fallas prematuras, además permite la caracterización de los materiales en términos de espesores, módulos y relación de Poisson, la caracterización específica del clima y de las cargas mediante ejes simples, tandem y tridem. Incluye la predicción del deterioro basado en modelos mecánicos calibrados con datos de terreno y la variabilidad considerados.

La guía de diseño utiliza las variables: tránsito, clima, subrasante y materiales, para evaluar el comportamiento del pavimento con el tiempo o vida de diseño, a través de predicciones de deterioros considerados en el análisis, teniendo en cuenta leyes de comportamiento presentadas y soportadas en la guía.

A continuación se presenta los aspectos que considera este método

Figura N° 4. Procedimiento general de Diseño para Pavimentos Asfálticos



Fuente: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program 1-37A, Final Report, March 2004

El método de diseño AASHTO 2002 maneja el cumplimiento de los criterios de diseño los cuales se pueden analizar mediante las gráficas de salida obtenidas mediante el software que acompaña esta guía de diseño. A continuación se presenta una gráfica general de cumplimiento de criterios de diseño durante el periodo de diseño

Figura N° 5. Cumplimiento de los criterios de diseño



Fuente: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program 1-37A, Final Report, March 2004

Los deterioros predecibles por el Método de diseño ME –PDG son los siguientes:

- Agrietamiento por fatiga
- Agrietamiento longitudinal
- Agrietamiento térmico
- IRI
- Ahuellamiento

3.2. VARIABLES DE ENTRADA

El método usa un enfoque jerárquico para determinar los parámetros de diseño, se consideran niveles de esfuerzo en consonancia con la importancia de la vía, permitiendo el uso de los procedimientos actuales y facilita la inclusión de procedimientos mejorados en el futuro, el método contempla tres niveles de entrada organizados en forma jerárquicos pero independientes, el procedimiento de análisis y de los cálculos que efectúa el software son independientes del nivel de los datos de entrada, los niveles inferiores tienen mayor variabilidad, lo cual es considerado en el análisis de confiabilidad, los niveles considerados para las variables de entrada en la guía de diseño son :

- **Nivel 1. Alta confiabilidad.** Aplicable a problemas específicos, proyectos de elevado costo, los parámetros de entrada son obtenidos de ensayos especializados y datos medidos directamente en el sitio específico del proyecto.
- **Nivel 2. Mediana Confiabilidad.** Aplicable a diseños estándar, en proyectos de moderado costo, los parámetros de entrada son rigurosos, refleja la práctica actual y los datos disponibles hoy en día, los cuales se obtienen por correlaciones o modelos regionales.
- **Nivel 3. Baja Confiabilidad.** Aplicable a diseños de bajo impacto, los parámetros de entrada son valores por defecto, basados en la experiencia local.

3.2.1. Subrasante / Fundación. Con relación al soporte de la estructura de pavimento a proyectar los aspectos considerados por la guía AASHTO son:

- ✓ **Caracterización de la Subrasante :** se considera las siguientes opciones para efectuar la caracterización.
 - Ensayos de laboratorio.
 - Ensayos no destructivos de pavimentos existentes.
 - Ensayos de comprobación como el Penetrómetro
 - Dinámico de Cono (DCP).
 - Experiencia o confianza que se tenga con el tipo de subrasante
- ✓ **Exploración de la Subrasante:** los aspectos más relevantes para efectuar la exploración de la subrasante son :
 - Realizar una investigación topográfica.
 - Definir el número y profundidad de la investigación subterránea.
 - Clasificar los suelos por los sistemas AASHTO o SUCS.
 - Realizar ensayos de humedad / densidad para determinar las características de compactación de la subrasante.
 - Realizar el registro del sondeo, perfil de suelo, y clasificación de suelos.
 - Realizar el ensayo de módulo resiliente, norma AASHTO T 37.

- Seleccionar el módulo resiliente representativo para el diseño para cada tipo de suelo y profundidad.
- ✓ **Ensayos de Laboratorio:** estos dependerán del nivel jerárquico que se considere
- ✓ **Mejoramiento de la Subrasante:** las consideraciones que realiza el método AASHTO 2002 son:
 - Estabilización de subrasantes débiles.
 - Espesores grandes de capas granulares.
 - Drenajes en la subrasante.
 - Geosintéticos
- ✓ **Caracterización Dinámica** , está encaminado a la determinación de módulos resilientes y la relación de Poisson, el módulo resiliente se a jerarquizado en tres niveles los cuales son:
 - **Nivel 1:** Este es el nivel de mayor exactitud y el de mejor aceptación, por lo general se trata de obtener datos por medio de ensayos de laboratorio. Ensayo de laboratorio de Módulo Resiliente , Norma AASHTO T-307.
 - **Nivel 2:** Este es el nivel más usado, por lo general se trata de obtener datos por medio de correlaciones con propiedades que son medidas en laboratorio o in situ. El módulo resiliente de la subrasante en este nivel esta dado por las siguientes correlaciones o modelos matemáticos

PARAMETRO	MODELO	ENSAYO
CBR	$M_r = 2555(\text{CBR})^{0.64} \text{ (PSI)}$	AASHTO T 493
R - valor	$M_r = 1155 + 555R \text{ (PSI)}$	AASHTO T 190
Gradación y IP	$\text{CBR} = 75 / (1 + (0.728 \times P_{200} \times \text{IP}))$	AASHTO T 27 y T 90
PDC	$\text{CBR} = 292 / \text{PDC}^{1.12}$	ASTM D 6951

Fuente: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program 1-37A, Final Report, March 2004

- **Nivel 3:** Este es el nivel de menor exactitud, por lo general los datos son suministrado por defecto, de experiencias o datos históricos. A continuación se presentan las propiedades Mecánicas de los materiales de subrasante del Nivel 3

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	RANGOS DE M_R (PSI)	VALOR TÍPICO M_R (PSI)
A-7-5	8,000 - 17,500	12,000
A-7-6	5,000 - 13,500	8,000

CLASIFIC. DEL MATERIAL	RANGOS DE M_R (PSI)	VALOR TÍPICO M_R (PSI)
CH	5,000 - 13,500	8,000
MH	8,000 - 17,500	11,500
CL	13,500 - 24,000	17,000
ML	17,000 - 25,500	20,000

Fuente: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program 1-37A, Final, March 2004

3.2.2 Caracterización materiales. La predicción correcta del desempeño de los pavimentos asfálticos es reconocida como una de las más importantes, compleja y difícil de estudiar. La metodología para predecir el desempeño se puede optimizar a partir de la selección adecuada de los materiales y los espesores de capas de la estructura del pavimento.

Los datos de los ligantes asfálticos se ingresan a partir de ensayos convencionales, empleándose un asfalto tradicional producida por el complejo petrolero de Barrancabermeja y se presentan tres niveles de ingreso de la información, los cuales se pueden describir así:

Nivel 1. Datos específicos de la mezcla, se requiere para la mezcla E^* y para el ligante G^*

Nivel 2. Datos de ensayos del ligante y ecuación de módulo dinámico de Witczak, se requiere para el ligante el valor del modulo complejo G^* (se obtiene con el reómetro de corte dinámico) o puede ser deducida a partir de relaciones volumétricas

Nivel 3. Grado del ligante y Ecuación de Witczak, se requiere el grado del ligante o se puede deducir a partir de relaciones volumétricas

3.2.3 Efectos ambientales. Las condiciones medioambientales son importantes en el desempeño de los pavimentos flexibles, siendo compleja la interacción de los factores climáticos con los materiales y las cargas. Factores como la precipitación, temperatura, ciclos hielo-deshielo y profundidad de la capa afectan el contenido de humedad del pavimento y de la subrasante, incidiendo directamente en la capacidad de soporte de las capas del pavimento y finalmente en el desempeño del mismo.

Es necesario recordar que los aspectos climáticos no fueron una variable de importancia durante el procesamiento de datos obtenidos de la prueba de rodadura AASHTO (AASHTO Road Test), hecho que dificultó la evaluación de aspectos tales como la influencia del clima en las características mecánicas intrínsecas del material, su relación con las cargas provenientes del tránsito y la interpolación del método hacia otras realidades climáticas.

El Modelo Climático Integrado Mejorado (Enhanced Integrated Climatic Model, EICM) que trae consigo el software de la guía se encarga de elaborar perfiles de humedad y de temperatura. Para ello se debe especificar la ubicación del lugar en que se desarrolle el proyecto a través de un archivo de tipo climático con extensión .icm (input climate model).

Para incorporar una estación climática al software se debe crear un archivo con extensión .hcd (hourly climatic database). Este tipo de archivos debe poseer sus datos estructurados de la siguiente forma:

```
2001010100,60,1,100,0,94  
2001010101,60,5,100,0,91  
2001010102,60,1,100,0,92
```

Los primeros cuatro dígitos de este esquema corresponden al año de medición; los cuatro dígitos siguientes corresponden al mes, día y hora de medición. Posterior a éstos se separan con coma los datos de temperatura [°F] y velocidad del viento [mph], el porcentaje de nubosidad, la precipitación [in] y el porcentaje de humedad relativa.

Como puede apreciarse del párrafo anterior, la creación de una estación climática requiere de la recolección de datos cada una hora, por un periodo de tiempo no inferior a dos años, de los siguientes datos: temperatura, velocidad del viento, nubosidad, precipitación y humedad relativa.

A través del software se escoge entre las dos opciones que existen para especificar este tipo de archivos: importar un archivo de tipo climático previamente generado (.icm) o a través de la formación de un archivo con extensión .icm, el cual emplea los datos de tiempo disponibles en el EICM para varias estaciones climáticas de Estados Unidos.

3.2.4 Cargas del tránsito. La variable tránsito se expresa como el número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño. En esta variable de entrada se consideran tres niveles jerárquicos del tránsito, los cuales se definen así:

Nivel 1. Es el Nivel en el cual se tiene un buen conocimiento de las características del tránsito pasado, presente y futuro. Los datos de volúmenes y pesajes pueden considerarse de cualquier

punto dentro del sitio específico del tramo vial en estudio. Se considera la clasificación específica de vehículos para el sitio y datos de peso por eje

Nivel 2. Es el Nivel en el cual se tiene un conocimiento moderado de las características del tránsito pasado, presente y futuro. Se cuenta con los datos de volúmenes y pesajes de la Zona, Región o Departamento del proyecto.(Vol, Variaciones diarias y tendencia de cargas). Se considera la clasificación típica de vehículos para el sitio y datos de peso por regiones

Nivel 3. En el cual hay un pobre conocimiento de las características del tránsito. Se cuenta con los datos de volúmenes y pesajes globales a nivel nacional. Requiere que el diseñador recolecte datos de TPD, % de camiones y cargas, se puede usar datos promedios de las regiones o departamento, o valores obtenidos de las experiencias locales.

Los espectros normalizados de cargas generados se obtienen a partir de datos del pesaje, la información de tránsito requerida por el software es la siguiente:

- Volumen de tránsito – Año base.
 - ✓ Tránsito promedio diario anual de camiones, en los dos sentidos (AADTT).
 - ✓ Número de carriles en la dirección de diseño.
 - ✓ Porcentaje de camiones en el sentido de diseño (DDF).
 - ✓ Porcentaje de camiones en el carril de diseño.(LDF)
 - ✓ Velocidad de operación de camiones.
- Factores de ajuste del volumen del tránsito.
 - ✓ Factor de Ajuste mensual
 - ✓ Factor de Distribución de clase de vehículo
 - ✓ Factor de Distribución horaria de camiones
 - ✓ Factor de Crecimiento
- Factor de distribución de carga por eje.
- Generales.
 - ✓ Número de ejes/camiones
 - ✓ Configuración del eje
 - ✓ Factores de las llantas:

3.3. SOFTWARE DE DISEÑO

El software se fundamenta en solución elástica multicapa, donde la rutina principal es realizada por el programa JULEA y se complementa con el “D FEM Desai” para condiciones especiales de carga y material no lineal, se predicen cambios en el tiempo en la resistencia y rigidez de los materiales , en la temperatura, humedad , predice cambios en e l tiempo de las variaciones estacionales y en el tiempo del tránsito, el software contiene los siguientes módulos :

- Tránsito
- Ambiental
- Materiales (PCC, CA, CG)
- Modelo Rígido

- Modelo flexible: abarca las
 - ✓ Deformación Permanente o “ Rutting”, en el concreto asfáltico y en los materiales no ligados
 - ✓ Agrietamiento por Fatiga , en el concreto asfáltico desde la superficie y de abajo hacia arriba y en bases estabilizadas
 - ✓ Fractura o Fisuración térmica
 - ✓ Simulación Confiabilidad

A continuación se presenta un resumen de los pasos del Diseño que se desarrollan en el software desarrollado por el método AASHTO 2002

- a. Recopilación datos Entrada
 - Tránsito
 - Ambientales
 - Caracterización materiales
 - Definir Sección Tentativa
- b. Cálculo Tensiones y Deformaciones
- c. Análisis Modo de Falla
 - Fatiga
 - Ahuellamiento
- d. Decisión Respecto Sección Tentativa
 - Satisfactoria
 - Insatisfactoria

3.3.1. Pantallas de entrada del software de AASHTO 2002

- Pantalla de inicio del software

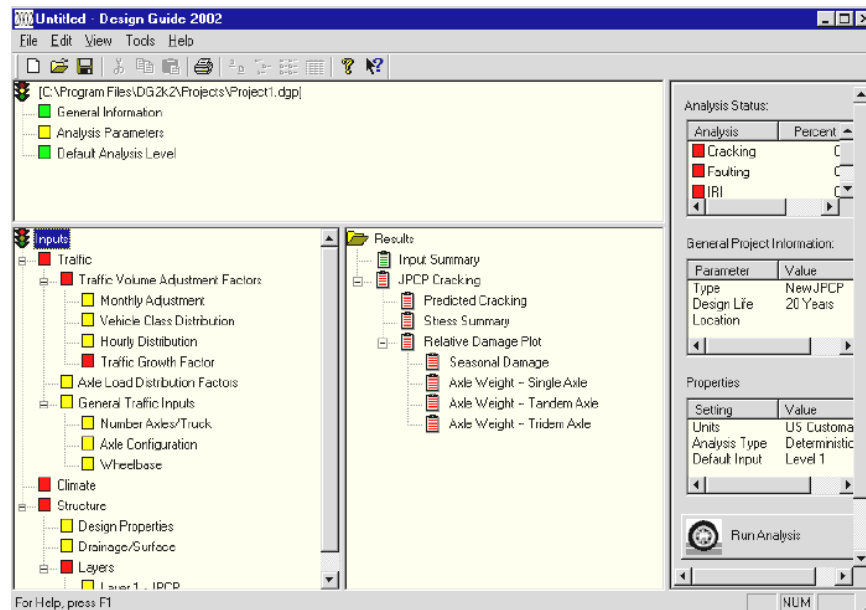
Figura N° 6. Pantalla de inicio del Software



Fuente: Software Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures

- **Pantalla de Entrada**

Figura N° 7. Pantalla de entrada de datos



Fuente: Software Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures

Entradas de Diseño: Se describe el ingreso de los datos de entrada, los que permiten iniciar el procedimiento de diseño para pavimentos flexibles mediante el software Design Guide, Pavement Analysis & Design System

- ✓ **Información General:** Los siguientes datos de entrada definen el período y tipo de análisis: vida de diseño, mes de construcción de la base y de la subrasante, mes de construcción del pavimento (MAC), mes de apertura al tránsito y tipo de pavimento (flexible).
- ✓ **Identificación del sitio/proyecto:** Este grupo de datos de entrada incluye lo siguiente: ubicación del proyecto, identificación del proyecto y clase funcional del pavimento a diseñar.
- ✓ **Parámetros de Análisis:** El diseñador debe seleccionar el nivel de confiabilidad y el límite admisible para cada deterioro en el período de diseño seleccionado, además del valor inicial para el IRI.
 - **IRI Inicial:** se define como la regularidad del pavimento recién construido. Este parámetro es altamente dependiente de las especificaciones de regularidad del proyecto y tiene un impacto significativo en la calidad del pavimento. Los rangos típicos van desde 0.8 a 1.6 metros por kilómetro (50 a 100 pulgadas por milla).
 - **Criterio de Desempeño:** el diseño de pavimentos flexibles considera los siguientes modelos de deterioro:
 - ✓ Deformación permanente para todas las capas (asfáltica, granulares y subrasante)

$$\log\left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r}\right) = -3.74938 + 0.4262 \log(N) + 2.02755 \log(T)$$

$$R^2 = 0.73$$

$$S_e = 0.309$$

$$S_e/S_y = 0.522$$

$$N_{\text{ensayos}} = 3476$$

- ✓ Agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo en la mezcla asfáltica
- ✓ Agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba en la mezcla asfáltica
- ✓ Agrietamiento térmico de la mezcla asfáltica y
- ✓ Regularidad (IRI) del pavimento.
- ✓ **Tránsito**
- ✓ **Clima**
- ✓ **Propiedades de la superficie y drenaje.**
- ✓ **Estructura del pavimento**

El software provee la entrada de las variables de diseño, los cálculos computacionales para la predicción de daños y Resultados y salidas de los análisis en formatos para uso como documentos electrónicos o copias de impresiones, el software desarrolla el modelo de envejecimiento de los ligantes asfálticos y es posible determinar las curvas maestras del módulo dinámico de las mezclas asfálticas.

Sistema de Envejecimiento Global.

La caracterización del ligante asfáltico y su relación con el comportamiento del pavimento son una de las mayores preocupaciones en el desarrollo del sistema de envejecimiento de los pavimentos asfálticos

Entre los diferentes factores usados en la caracterización del ligante, las propiedades de durabilidad y endurecimiento son factores claves en el desarrollo del sistema de envejecimiento global se emplean mediciones de consistencia para estudiar el comportamiento del asfalto en función del tiempo.

3.3.2. Reportes del software de AASHTO 2002. A continuación se presentan los reportes del software ME –PDG, en las cuales se observa las variaciones de los parámetros de entrada:

Figura N° 8. Variación del módulo del concreto asfáltico con el tiempo

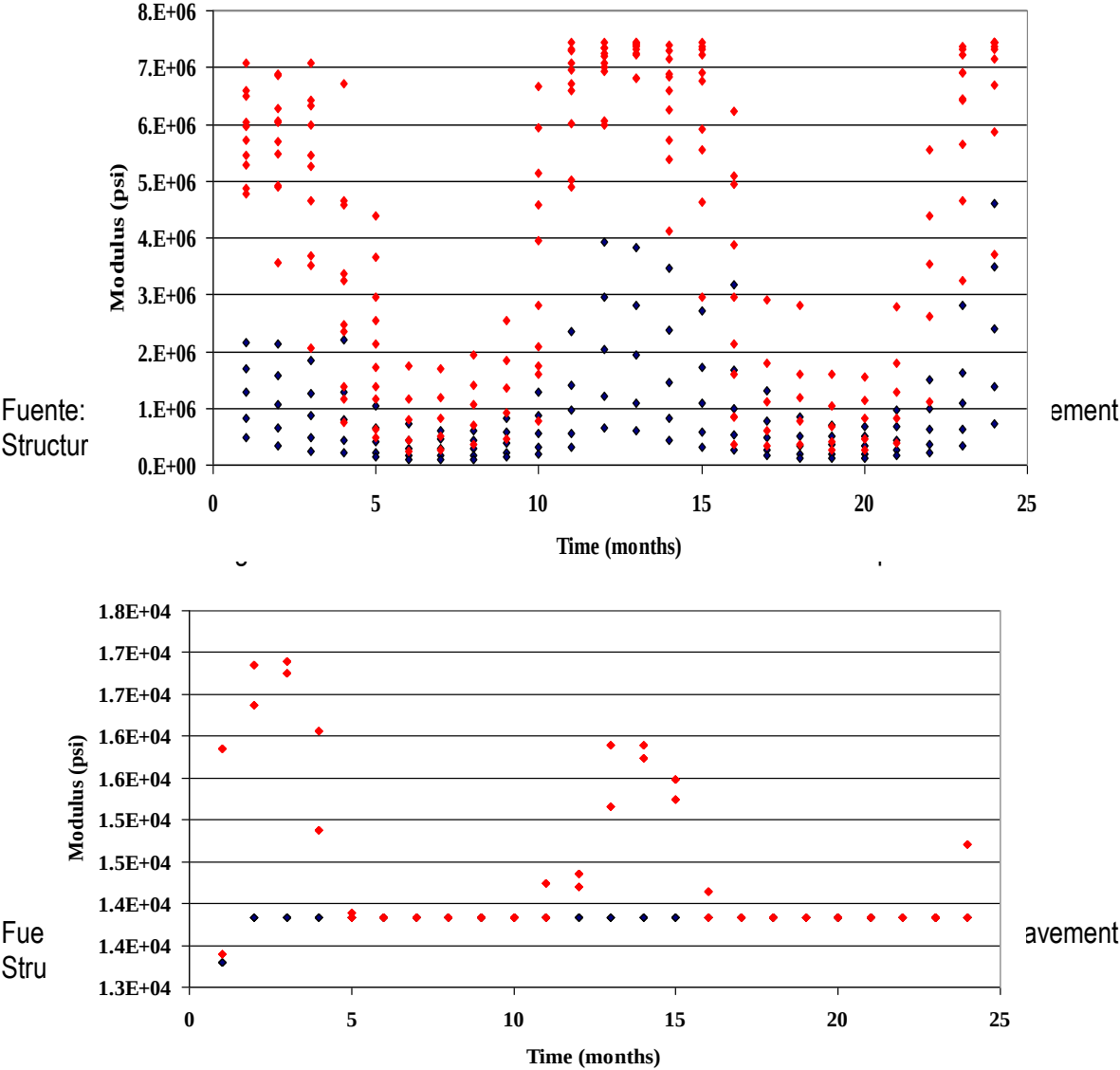
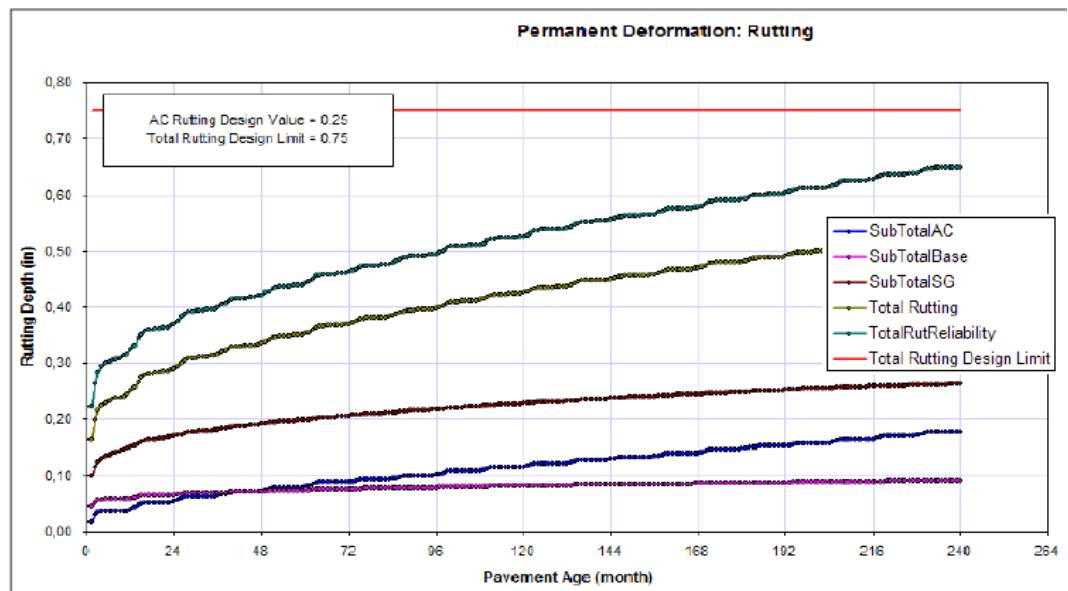
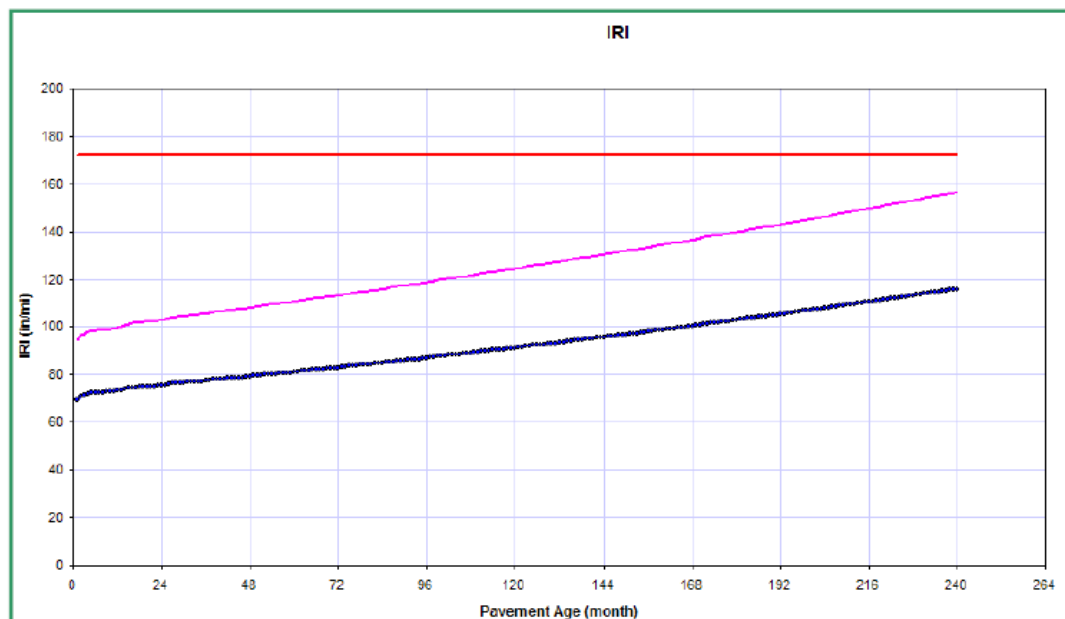


Figura N° 10. Profundidad prevista del ahuellamiento en el tiempo



Fuente: Software Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures

Figura N° 11. Comportamiento del IRI en el tiempo



Fuente: Software Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures

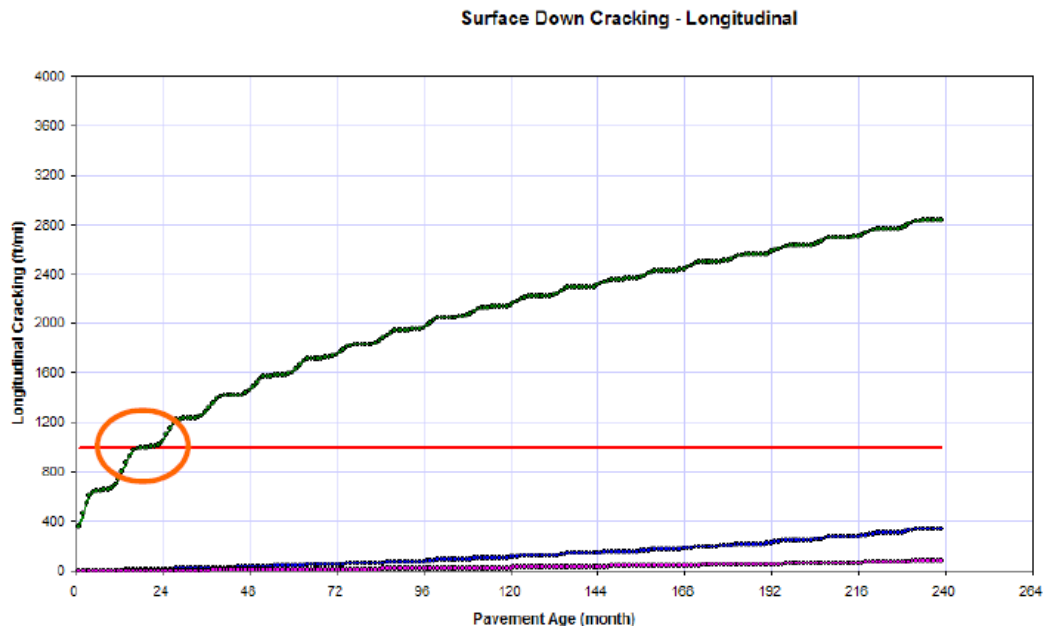
Figura N° 12. Pantalla de Resultados de Diseño de ME –PDG

Performance Criteria	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	222	90	126.2	99.69	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	2000	90	0	99.999	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	90	0.4	99.999	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	90	1	94.16	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	90			N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0.25	90	0.01	99.999	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0.5	90	0.42	85.58	Fail

Performance Criteria	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	222	90	122.1	99.82	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	2000	90	0	99.999	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	90	0.1	99.999	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	90	1	94.16	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	90			N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0.25	90	0.01	99.999	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0.5	90	0.32	99.6	Pass

Fuente: Software Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures

Figura N° 13. Fisuras longitudinales en el tiempo



Fuente: Software Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures

3.4. DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

A continuación se definen las variables de entrada del software del método AASHTO 2002 las cuales están definidas para el nivel jerárquico tres:

3.4.1. Información general.

- a. **Periodos de diseño estructural:** pueden variar entre 10 y 20 años. Normalmente se usará un período de diseño de 10 años normalmente y como máximo 15 años, para el diseño se tiene un período de diseño de 10 años.

b. **Parámetros de análisis:**

Analysis Parameters	Limit	Reliability (%)
Initial IRI (in/mi)	127 (2.0 m/km)	90
Terminal IRI (in/mi)	254 (4.0 m/km)	90
AC Bottom Up cracking Alligator Cracking (%)	25	90
Permanent Deformation – Total Pavement (in)	0.75 (19 mm)	90
Permanent Deformation – AC Only (in)	0.25 (6 mm)	90

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Variable tránsito.

- a. **Configuración de ejes:** se define como configuración especial de ejes (special axle configuration), con el fin de expresar el tránsito en ejes equivalentes de 8.2 toneladas.
- b. **Tire load (lb) :** 9000
- c. **Tire Pressure (psi):** 120
- d. **Standard deviation wheel wander (in):** 10
- e. **Monthly repetitions:** Para el nivel tres las estructuras de pavimento consideraran repeticiones mensuales de 3300, 5000, 6600, 8000 y 10000 CAMIONES (Buses y camiones).
- f. **Annual growth (%):** estos valores se consideraran de acuerdo a la tabla de crecimiento obtenidas de un muestreo de la red vial nacional que ya fue mencionada en la variable tránsito de entrada.

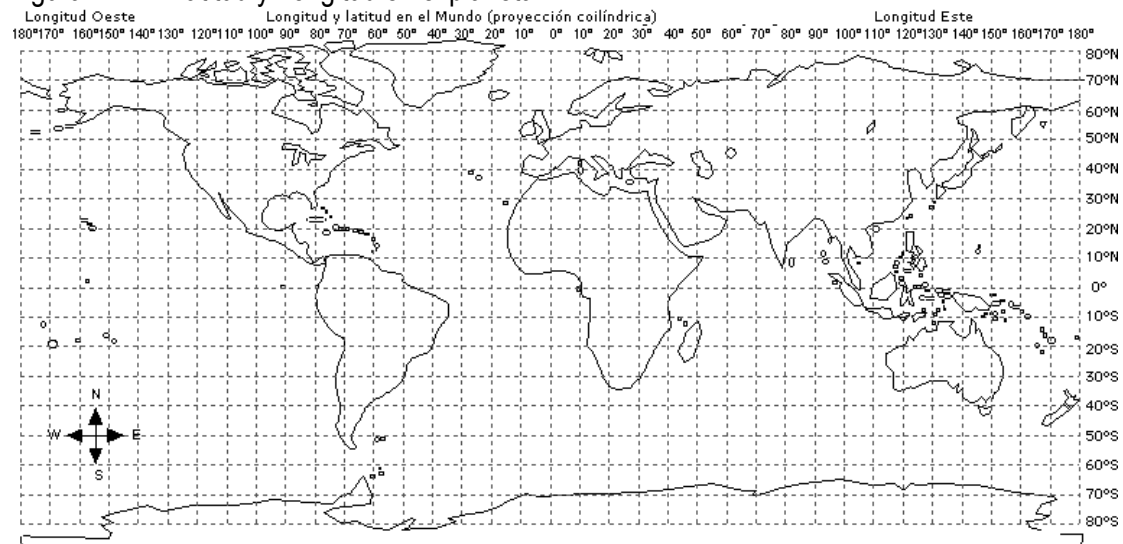
Se adopta una tasa de crecimiento del 5 % y un período de diseño de 10 años, obteniéndose los siguientes resultados de tránsito proyectado en el periodo de diseño.

Tránsito Mensual	Período de diseño	Tasa de crecimiento	Tránsito futuro en ejes equivalentes
3.300	10 años	5 %	500.000
5.000	10 años	5 %	750.000
6.600	10 años	5 %	1.000.000
8.000	10 años	5 %	1.200.000
10.000	10 años	5 %	1.500.000

3.4.3. Variable clima. Se debe generar una estación climática de la base de datos ME - PDG y se selecciona una ciudad que tenga una longitud y altitud similares a las del proyecto

Ciudad:	San Juan de Pasto	
Latitud:	1° 12' N	1.2
Longitud:	77° 16' W	77.2667
Altitud:	2527 msnm	
Precipitación Media Anual	700 mm	
Temperatura Media Anual Promedio	14 °C 57.2 °F	

Figura N° 14. Latitud y Longitud en el planeta



Fuente : <http://iepbachillerato.wordpress.com/latitud-y-longitud/>

Estaciones de Estados Unidos con longitud y altura similar a la ciudad de San Juan Pasto:

Ciudad:	San Juan de Pasto	Estación U.S.A.	Johnstown, Pa
Longitud:	77.2667	Longitud:	78.50
Altitud:	2527 msnm	Altitud:	2280 msnm

3.4.4. Materiales de la estructura. Se debe definir los materiales de las capas que se van a emplear, en este caso se utilizaran las siguientes capas:

- **Capa de rodadura :** concreto asfáltico con una mezcla densa MDC2 de acuerdo al artículo 450-07 INVIAS , utilizando un asfalto convencional 60-70 con un espesor variable

Con la siguiente Granulometría:

- ✓ Retenido en el tamiz 3/4 " 0 %
- ✓ Retenido en el tamiz 3/8 " 25 %
- ✓ Retenido en el tamiz N° 4 45 %
- ✓ Pasa tamiz N° 200 5 %

El diseño volumétrico se obtiene 12 % de bitumen y 6 % de vacíos de aire. La mezcla tiene un peso específico de 143 lb/ft³.

Se asume por defecto una conductividad térmica de 0.67 BTU-hr-ft-°F y calor específico de 0.23 BTU/lb . °F.

El coeficiente de Poisson es de 0.35.

Para Pasto la temperatura promedio es 13 °C que equivale a 55.4 °F

- **Base y Subbase granular:** se asume el empleo de una base granular tipo BG2 art. 330 – 07 (A1-a) y una subbase granular tipo SBG-1 art. 320-07 (A2-4) del INVIAS

Tamiz	BG-2	SBG-1
2"		100
1 ½ "		70 – 95
1 "	100	60 – 90
½ "		45 – 75
¾ "	70 – 100	-
3/8 "	50 – 80	40 – 70
N° 4	35 – 65	25 – 55
N° 10	20 - 45	15 – 40
N° 40	10-30	6 – 25
N° 200	5 – 15	2 -15

El módulo de elasticidad inicial en condiciones de humedad y densidad óptima es de 40000 PSI para la BG-2 y de 20000 para la SBG-1

- **Subrasante:** con el fin de evaluar diferentes valores de subrasante se tomarán los rangos de Subrasante adoptados en el Manual de Medios y Altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías, es decir se obtendrán los módulos resilientes de la subrasante a partir de correlaciones o modelos matemáticos , lo que se convierte en el empleo del Nivel 2 de subrasante, se presenta a continuación la ecuación y los resultados obtenidos mediante esta correlación de CBR a Modulos resilientes

$$Mr = 2555(CBR)^{0.64} \text{ (PSI)}$$

Tabla N° 17. Relación CBR – Módulos resiliente

VALOR CBR DE SUBRASANTE (%)	MODULO RESILIENTE (PSI)	MODULO RESILIENTE (kg/cm ²)
3	5.161	360
4	6.204	430
5	7.157	500
6	8.042	560
7	8.876	620
8	9.669	680
9	10.425	730
10	11.153	780
11	11.854	830
12	12.533	870
13	13.192	920
13.5	13.500	950

Combinaciones de las estructuras propuestas

LUGAR	SUBRASANTE	MODULO RESILIENTE		TRÁNSITO Repeticiones Mensuales	TRÁNSITO ACUMULADO
	CBR (%)	(PSI)	CBR (%)		
Pasto	3 % - 13.5 %	5000 – 13500	3 – 13.5	3000 - 10000	500.000 – 1.500.000

Estas estructuras equivalen a las propuestas en el Manual de Diseño de Pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito

LUGAR	REGIÓN CLIMÁTICA	RESISTENCIA SUBRASANTE		RANGO DE TRÁNSITO	N° CARTA
		(PSI)	CBR (%)		
Pasto	R1 TMAP °C 13 Precipitación < 2000	5161 – 13500	3 – 13.5	T1 - T2	1

3.5. ESTRUCTURAS OBTENIDAS PARA LA CIUDAD DE PASTO.

	Método INVIAS	Método AASHTO ME- PDG					
Subrasante (CBR %) Tránsito $N_{8.2} \times 10^6$	$3 \leq \text{CBR} < 5$	CBR = 3 (5161 PSI)			CBR = 4 (6204 PSI)		
T1 $0.5 < N_{8.2} \leq 1$	10 20 25 MDC-2 BG -1 SBG -1						
Ta... $0.5 \times N_{8.2}$ 3300 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1	fall a	fall a	O.K ¹	fall a	fall a	O.K ²
		10	10	12.5	10	10	12.5
		20	25	20	20	25	20
		25	25	25	25	25	25
Tb... $0.75 \times N_{8.2}$ 5000 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1	fall a	fall a	fall a	O.K ³	fall a	O.K ⁴
		10	12.5	12.5	15	10	12.5
		20	20	25	20	20	20
		25	25	25	25	25	25
Tc... $1.0 \times N_{8.2}$ 6600 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1	fall a	fall a	O.K ⁵	fall a	fall a	O.K ⁶
		10	12.5	15	10	12.5	12.5
		20	20	20	20	20	25
		25	25	25	25	25	25
T2 $1.0 < N_{8.2} \leq 2$	10 20 MDC-2 BG -1						

	35	SBG - 1								
Td...1,2 x N _{8.2} 8000 Rep.Mensuales		MDC-2 BG-1 SBG-1	fall a	fall a	falla	O.K ⁷	fall a	fall a	O.K	O.K ⁸
			10	12.5	12.5	15	10	12.5	12.5	15
			20	20	25	20	20	20	25	20
			35	35	35	35	35	35	35	35
Te...1.50 x N _{8.2} 10000 Rep.Mensuales		MDC-2 BG - 1 SBG - 1	fall a	fall a	falla	O.K ⁹	fall a	fall a	O.K ¹⁰	
			10	12.5	15	15	10	12.5	15	
			20	20	20	25	20	20	20	
			35	35	35	35	35	35	35	

	Método INVIAS			Método AASHTO ME- PDG					
Subrasante (CBR %) Tránsito $N_{8.2} \times 10^6$	5≤CBR <7			CBR =5 (7157 PSI)			CBR =6 (8042 PSI)		
T1 0.5 < N _{8.2} ≤1	10	MDC-2							
	15	BG -1							
	20	SBG -1							
Ta...0.5 x N _{8.2} 3300 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1			fall a O.K O.K ¹¹			fall a O.K O.K ¹²		
Tb...0.75 x N _{8.2} 5000 Rep.Mensuales	MDC-2			fall a O.K O.K ¹³			fall a O.K O.K ¹⁴		

		BG - 1 SBG - 1	15	15	15	15	15	15
			20	20	20	20	20	20
Tc...1.0 x N _{8.2} 6600 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG - 1 SBG - 1	fall a	O.K	O.K	15	fall a	O.K O.K 16
			10	12. 5	15		10	12. 5 15
			15	15	15		15	15
			20	20	20		20	20
T2 1.0 < N _{8.2} ≤ 2	10 20 20	MDC- 2 BG -1 SBG - 1						
Td...1,2 x N _{8.2} 8000 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG-1 SBG- 1	fall a	O.K	O.K	17	fall a	O.K O.K 18
			10	12. 5	15		10	12. 5 15
			20	20	20		20	20
			20	20	20		20	20
Te...1.50 x N _{8.2} 10000 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG - 1 SBG - 1	fall a	fall a	O.K	19	fall a	fall a O.K 20
			10	12. 5	15		10	12. 5 15
			20	20	20		20	20
			20	20	20		20	20

	Método INVIAS		Método AASHTO ME- PDG		
Subrasante (CBR %) Tránsito $N_{8.2} \times 10^6$	$7 \leq \text{CBR} < 10$		CBR =7 (8876 PSI)	CBR =8 (9669 PSI)	
T1 $0.5 < N_{8.2} \leq 1$	7.5 15 20	MDC-2 BG -1 SBG -1			
Ta... $0.5 \times N_{8.2}$ 3300 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1		fall a O.K ²¹ 7.5 10 15 15 20 20	fall a O.K ²² 7.5 10 15 15 20 20	
Tb... $0.75 \times N_{8.2}$ 5000 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1		fall a fall a O.K ²⁴ 7.5 10 12.5 15 15 15 20 20 20	fall a fall a O.K ²⁵ 7.5 10 12.5 15 15 15 20 20 20	
Tc... $1.0 \times N_{8.2}$ 6600 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1		fall a fall a O.K ²⁷ 7.5 10 12.5 15 15 15 20 20 20	fall a fall a O.K ²⁸ 7.5 10 12.5 15 15 15 20 20 20	
T2 $1.0 < N_{8.2} \leq 2$	7.5 20 20	MDC-2 BG -1 SBG -1			

Td...1,2 x N _{8.2} 8000 Rep.Mensuales	MDC- 2 BG-1 SBG- 1	fall a	fall a	O.K	30	fall a	O.K	O.K	31
		7.5	10	15		7.5	10	15	
		20	20	20		20	20	20	
		20	20	20		20	20	20	
Te...1.50 x N _{8.2} 10000 Rep.Mensuales	MDC- 2 BG - 1 SBG - 1	fall a	fall a	O.K	33	fall a	fall a	O.K	34
		7.5	10	15		7.5	10	15	
		20	20	20		20	20	20	
		20	20	20		20	20	20	

	Método INVIAS		Método AASHTO ME- PDG	
Subrasante (CBR %) Tránsito N _{8.2} x 10 ⁶	7 ≤ CBR < 10		CBR = 9 (10425 PSI)	
T1 0.5 < N _{8.2} ≤ 1	7.5 15 20	MDC- 2 BG -1 SBG - 1		
Ta...0.5 x N _{8.2} 3300 Rep.Mensuales	MDC- 2 BG - 1 SBG - 1		fall a O.K 23	
Tb...0.75 x N _{8.2} 5000 Rep.Mensuales	MDC- 2 BG -		fall a fall a O.K 26	
	7.5 10 12.5 15 15 15			

		1 SBG - 1	20	20	20	
Tc...1.0 x N _{8.2} 6600 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG - 1 SBG - 1	fall a 7.5	fall a 10	O.K 12. 5	29
T2 1.0 < N _{8.2} ≤ 2	7.5 20 20	MDC- 2 BG -1 SBG - 1				
Td...1,2 x N _{8.2} 8000 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG-1 SBG- 1	fall a 7.5	fall a 10	O.K 15	32
Te...1.50 x N _{8.2} 10000 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG - 1 SBG - 1	fall a 7.5	fall a 10	O.K 15	35

	Método INVIAS	Método AASHTO ME- PDG	
Subrasante (CBR %) Tránsito N _{8.2} x 10 ⁶	10 ≤ CBR < 15	CBR = 10 (11153 PSI)	CBR = 11 (11854 PSI)
T1 0.5 < N _{8.2} ≤ 1	5 MDC-		

Rep.Mensuales	MDC-2	7.5	10	15	7.5	12.5	15
	BG -1	15	15	15	15	15	15
	SBG -1	20	20	20	20	20	20

	Método INVIAS			Método AASHTO ME- PDG		
Subrasante (CBR %) Tránsito $N_{8.2} \times 10^6$	$10 \leq \text{CBR} < 15$			CBR =12 (12533 PSI)	CBR =13 (13192 PSI)	
T1 $0.5 < N_{8.2} \leq 1$	5	MDC-2 BG -1 SBG -1				
	15					
	20					
Ta...0.5 x $N_{8.2}$ 3300 Rep.Mensuales		MDC-2 BG -1 SBG -1		fall a O.K ³⁸	fall a O.K ⁵¹	
				5 10 12.5	5 10 12.5	
				15 15 15	15 15 15	
Tb...0.75 x $N_{8.2}$ 5000 Rep.Mensuales		MDC-2 BG -1 SBG -1		fall a O.K ⁴¹	fall a O.K ⁵³	
				5 10 12.5	5 10 12.5	
				15 15 15	15 15 15	
Tc...1.0 x $N_{8.2}$ 6600 Rep.Mensuales		MDC-2 BG -1		fall a O.K ⁴⁴	fall a O.K ⁵⁵	
				5 12.5 15	5 10 15	
				15 15 15	15 15 15	

		SBG - 1	20	20	20		20	20	20
T2 $1.0 < N_{8.2} \leq 2$	7.5 15 20	MDC-2 BG -1 SBG - 1							
Td...1,2 x $N_{8.2}$ 8000 Rep.Mensuales		MDC-2 BG-1 SBG-1	fall a	fall a	O.K	⁴⁷	fall a	fall a	O.K ⁵⁷
			7.5	10	15		7.5	12.5	15
			15	15	15		15	15	15
			20	20	20		20	20	20
Te...1.50 x $N_{8.2}$ 10000 Rep.Mensuales		MDC-2 BG - 1 SBG - 1	fall a	fall a	O.K	⁵⁰	fall a	fall a	O.K ⁵⁹
			7.5	10	15		7.5	12.5	15
			15	15	15		15	15	15
			20	20	20		20	20	20

	Método INVIAS		Método AASHTO ME- PDG		
Subrasante (CBR %) Tránsito $N_{8.2} \times 10^6$	$10 \leq \text{CBR} < 15$		CBR =13.5 (13500 PSI)		
T1 $0.5 < N_{8.2} \leq 1$	5 15 20	MDC-2 BG -1 SBG - 1			
Ta...0.5 x $N_{8.2}$ 3300 Rep.Mensuales		MDC-2 BG -	fall a	fall a	O.K ⁵²
			5	10	12.5
			15	15	15

		1 SBG - 1				
Tb...0.75 x N _{8.2} 5000 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG - 1 SBG - 1	fall a	fall a	O.K	54
			5	10	12. 5	
			15	15	15	
			20	20	20	
Tc...1.0 x N _{8.2} 6600 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG - 1 SBG - 1	fall a	fall a	O.K	56
			5	12. 5	15	
			15	15	15	
			20	20	20	
T2 1.0 < N _{8.2} ≤ 2	7.5 15 20	MDC- 2 BG -1 SBG - 1				
Td...1,2 x N _{8.2} 8000 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG-1 SBG- 1	fall a	fall a	O.K	58
			7.5	12. 5	15	
			15	15	15	
			20	20	20	
Te...1.50 x N _{8.2} 10000 Rep.Mensuales		MDC- 2 BG - 1 SBG - 1	fall a	fall a	O.K	60
			7.5	12. 5	15	
			15	15	15	
			20	20	20	

CONCLUSIONES

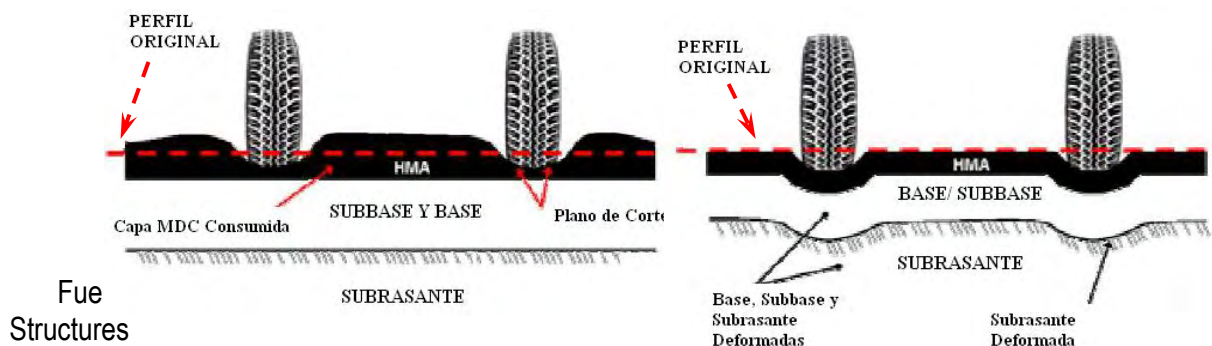
Las metodologías de diseño de pavimentos flexibles empleadas en Colombia son generalmente de carácter empírico o mecánico- empíricas

Los métodos empíricos de diseño de pavimentos correlacionan el comportamiento de los pavimentos *in situ*, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismo de degradación en estas estructuras

Los dos mecanismos principales de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas y en las mecanicistas son fatiga en las capas ligadas y exceso de deformación permanente.

Los métodos de diseño deben tener en cuenta que los materiales granulares que conforman las capas de subbase y base pueden contribuir en la acumulación de la deformación permanente en estructuras flexibles.

En los pavimentos flexibles la deformación permanente total es la suma de la deformación producida en cada una de las capas de pavimento, pero en la actualidad los métodos empíricos suponen que esta deformación se genera solo en la capa de subrasante.

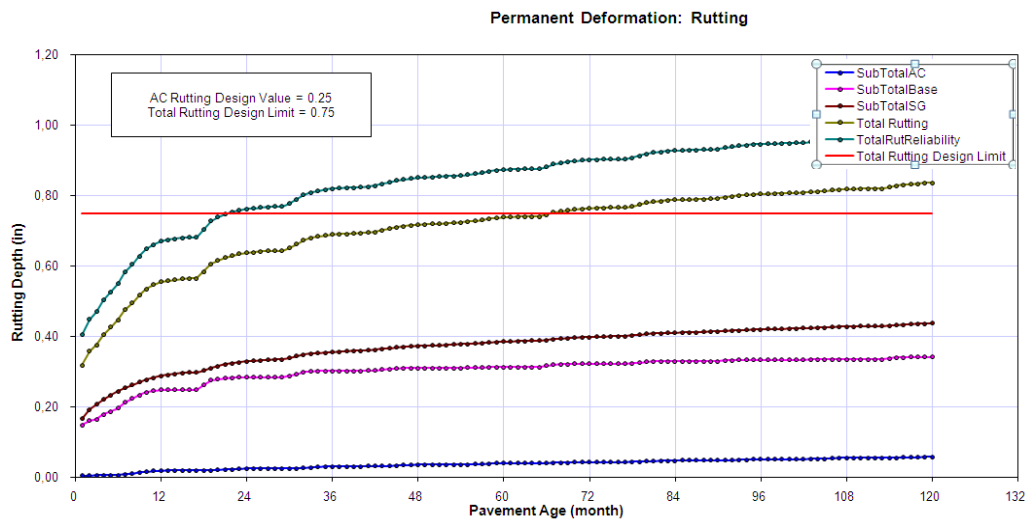


A continuación, se presenta la comparación de dos gráficas de deformación permanente, la primera corresponde a una estructura de pavimento propuesta en el Manual del INVIAS (para una Región Fría (Pasto) con un CBR 3 % y un tránsito de 1.5×10^6 ejes equivalentes) y la segunda corresponde a una estructura de pavimento que cumpliría satisfactoriamente para el período de diseño, los dos pavimentos han sido evaluados con el Software AASHTO ME –PDG 2002, y tienen como valor máximo una deformación permanente total de 20 mm en 10 años.

Estructuras evaluadas

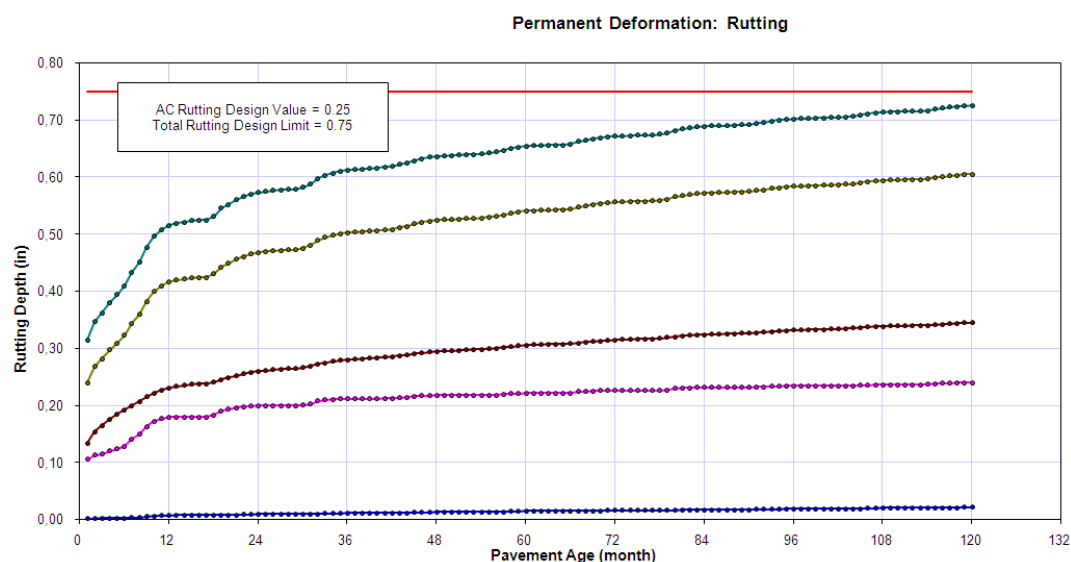
	Método INVIAS		Método AASHTO ME- PDG			
Subrasante (CBR %) Tránsito $N_{8.2} \times 10^6$	$3 \leq \text{CBR} < 5$		CBR = 3 (5161 PSI)			
T2 $1.0 < N_{8.2} \leq 2$	10 20 35	MDC-2 BG -1 SBG -1				
Te...1.50 x $N_{8.2}$ 10000 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1		fall a	fall a	fall a	O.K ⁹
			10	12.5	15	15
			20	20	20	25
			35	35	35	35

Graficas de Deformación de la estructura propuesta en el Manual del INVIAS



En esta gráfica se observa que se generara antes del segundo año deformación permanente de la totalidad de la estructura, cabe recordar que el periodo de diseño de la estructura es de 10 años, lo cual significa que el pavimento en menos de dos años podría presentar deterioros. Al analizar solo la deformación permanente en la carpeta asfáltica se puede observar que la estructura de pavimento tendría un buen desempeño durante el período de diseño, lo cual se cumple pero no refleja ni es equivalente a la deformación permanente de toda la estructura de pavimento.

Graficas de Deformación de la estructura propuesta y diseñada por el método AASHTO 2002 ME-PDG



En esta gráfica se observa que transcurrido 120 meses no se generara deformación permanente de la estructura total, ni en ninguna de las capas que la conforman, lo cual significa que el pavimento en sus 10 años del período de diseño no presentará deterioros. En el anexo A se presentan los reportes de las corrida del Programa AASHTO ME-PDG 2002, para estas estructuras.

En las capas de rodado y base asfáltica un incremento de temperatura genera disminución de la rigidez y por lo tanto un incremento en la deformación del pavimento, esto no es evaluado por los métodos empelados en la actualidad pero si por el Método de diseño AASHTO 2002 ME-PDG.

Los métodos aplicados en la actualidad en el diseño de estructuras de pavimento contemplan tránsito de diseño evaluado por el peso total del vehículo más no por el peso de cada uno de sus ejes, lo que significa que no se evalúa la acción del sobrepeso de los ejes que circulan en la actualidad, el Método de diseño AASHTO 2002 ME-PDG si contempla esta situación.

Los métodos aplicados en la actualidad consideran temperaturas constantes, cargas constantes y módulos resilientes constantes durante el año, lo cual no refleja el comportamiento de la estructura en la realidad y no se incluyen modelos de deterioro por clima, materiales o por variaciones de

tránsito a lo largo de la vida útil de la estructura. El empleo del software AASHTO ME-PDG 2002 permite la aplicabilidad de modelos de deterioro y la obtención de la progresión del desempeño de la estructura de pavimento en el tiempo.

En el método de diseño del Instituto Nacional de Vías, los cambios en las condiciones de tránsito o de clima de la zona de estudio generan pérdida de la confiabilidad en la predicción del dimensionamiento de pavimentos, lo cual se ha comprobado en el presente trabajo. A continuación se presenta algunas estructuras de pavimento propuestas por el Manual del Instituto Nacional de Vías y verificadas a través del Método AASHTO ME-PDG para condiciones climáticas correspondientes a la ciudad de Pasto con tránsitos de 1×10^6 y 1.5×10^6 ejes equivalente de 8.2 toneladas y para valores de CBR de 3 y 4 %, las cuales no alcanzan su óptimo desempeño en el período de diseño y se corroboró que los espesores propuestos por el Manual del INVIAS son insuficientes.

Al finalizar este trabajo se logró determinar que con las mismas variables de entrada como son clima, tránsito, capacidad de carga de subrasante y condiciones de materiales, las estructuras obtenidas por los dos métodos analizados difieren tanto en espesores como en desempeño a lo largo del periodo de diseño.

	Método INVIAS	Método AASHTO ME- PDG						
Subrasante (CBR %) Tránsito $N_{8.2} \times 10^6$	$3 \leq \text{CBR} < 5$	$\text{CBR} = 3$ (5161 PSI)				$\text{CBR} = 4$ (6204 PSI)		
$T1 \quad 0.5 < N_{8.2} \leq 1$	10 20 25 MDC-2 BG -1 SBG -1							
$Tc \dots 1.0 \times N_{8.2}$ 6600 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1	falla	Falla a	O.K ⁵	falla a	falla a	O.K ⁶	
		10	12.5	15	10	12.5	12.5	
		20	20	20	20	20	25	
		25	25	25	25	25	25	
$T2 \quad 1.0 < N_{8.2} \leq 2$	10 20 30 MDC-2 BG -1 SBG -1							
$Te \dots 1.50 \times N_{8.2}$ 10000 Rep.Mensuales	MDC-2 BG -1 SBG -1	falla	Falla a	falla	O.K ⁹	falla a	falla a	O.K ¹⁰
		10	12.5	15	15	10	12.5	15
		20	20	20	25	20	20	20
		35	35	35	35	35	35	35

RECOMENDACIONES

Realizar estudios particulares para obtener registros permanentes y confiables de parámetros como son el tránsito, CBRs, materiales de la región y condiciones climáticas, que permitan predecir el comportamiento de las estructuras de pavimento en el tiempo y aplicar métodos de diseño como el AASHTO ME- PDG en el Nivel 1 y 2 de confiabilidad.

BIBLIOGRAFIA

INVIAS - Instituto Nacional de Vías. (2002). Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en vías con Bajos, Medios y Altos volúmenes de Tránsito. Bogotá D.C., Colombia.

National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council. (2004). Guide for Mechanistic - Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures. Final Report. Illinois, USA.

MINTRANSPORTE - Ministerio de Transporte, Oficina de Planeación. (2008). El Transporte en Cifras. Bogotá D. C., Colombia.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. (2001). Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Bogotá D.C.

INVIAS - Instituto Nacional de Vías. (2007). Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C., Colombia.

GIDEL, G., BREYSSE, D. & DENIS, A. (2002). Modeling the Unbound Granular Material Long Term Behavior. En: 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York. 10,11 pp.

McDOWELL, G. R. & HAU, K. W. (2004). The Use of a Kinematic Hardening Model for Estimating Subgrade Stiffness in Layered-elastic Analyses. En: International Journal of Pavement Engineering, Vol. 5. pp. 53-59.

GOMES CORREIA, A. (2000). Modelling Unbound Granular Materials. En: Recommendations for Pavement Design. Technical University of Lisbon – IST.

BARKSDALE, R. D. (1972). Laboratory Evaluation of Rutting in Basecourse Materials. En: Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1. pp. 161-174.

WICHTMANN, T. (2005). Explicit Accumulation Model for Non-cohesive Soils under Cyclic Loading. Ph. D. Thesis, Des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr - Universität Bochum.

Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program 1-37A, Final Report, March 2004.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. (2002). Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D. C.

ARENAS LOZANO, Hugo León. Teoría de los Pavimentos. Popayán: Universidad del Cauca, 2005.

GARBER, Nicholas J. Ingeniería de tránsito y carreteras México , Thomson Editores S:A., 2005.

REYES LIZCANO, Fredy Alberto Diseño Racional de Pavimentos. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de ingeniería, 2005.

FONSECA M., Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2a ed. Universidad Católica de Colombia.

La Ingeniería de los Suelos en las Vías Terrestres, Volumen I y Volumen II. Ing. Alfonso Rico y Hermilo del Castillo. Editorial Limusa, México.

YODER, E.J. and WITCZAK, M.W. Principles of pavement desing. 2ª ed. New York. Jonh Willey, 1975, 711p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Gravel roads maintenance and design manual, 2000.

J.P. GIROUD Y JIE HAN. Método de diseño para carreteras No pavimentadas reforzadas con Geomallas, 1981.

PAUL GARNICA ANGUAS, ANGEL CORREA. Conceptos mecanicistas de pavimentos, 2004.

SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. SHELL pavement design manual (asphalt pavements and overlays for road traffic), 1978.

ANEXOS

ANEXO A.
REPORTE DE INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL SOFTWARE AASHTO ME –PDG 2002
PARA LA ESTRCUTURA N° 9.