

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
SISTEMA DE ESTUDIO DE POSTGRADO**

**CONSIDERACIONES TEÓRICAS PARA EL DESARROLLO DE UNA GUÍA
MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA NICARAGUA**

Tesina sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Postgrado en Vías Terrestre para optar al grado de “Master en Vías Terrestre”.

Presentado por:

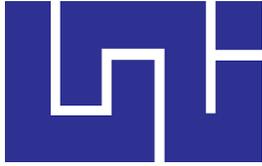
Ing. Evert Antonio Rivera González.

Ing. Jacqueline de los Ángeles Rojas Collado

Tutor: Ing. Luis Guillermo Loria Salazar, Msc. Phd.

Managua, Nicaragua

Enero 2016



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
SISTEMA DE ESTUDIO DE POSTGRADO**

**CONSIDERACIONES TEÓRICAS PARA EL DESARROLLO DE UNA GUÍA
MECANICISTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA NICARAGUA**

Tesina sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Postgrado en Vías Terrestre para optar al grado de “Master en Vías Terrestre”.

**Presentado por:
Ing. Evert Antonio Rivera González.
Ing. Jacqueline de los Ángeles Rojas Collado**

Tutor: Ing. Luis Guillermo Loria Salazar, Msc, Phd

**Managua, Nicaragua
Enero 2016**

Dedicatoria

Dedicamos esta tesis a Dios por habernos dado la oportunidad de seguirnos formando profesionalmente y de esta manera servir de una manera más eficiente a nuestro país, para que el desarrollo futuro se construya cada día mejor tomando en cuenta los avances de la ciencia en el tema que nos compete como ingenieros civiles.

Agradecimiento

Agradecemos al Dr. Luis Guillermo Loria Salazar, quien nos ha apoyado incondicionalmente para el desarrollo de este tema, el cual a pesar de las limitantes que hemos tenido siempre estuvo pendiente de que toda la investigación se realizara tomando en cuenta las condiciones propias de nuestro país.

Agradecemos a nuestros familiares que nos han dado su apoyo moral para que pudiéramos culminar con este programa de maestría.

Muchas Gracias.....

Hoja de Aprobación

“Esta Tesina fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Postgrado en **Vías Terrestre** de la Universidad Nacional de Ingeniería, como requisito parcial para optar al grado de **Máster en Vías Terrestre** “.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN	1.
II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	2
III. HIPOTESIS	3
IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	4
V. DESARROLLO DEL TEMA	8
5.1 Métodos de análisis del pavimento	8
5.2 Métodos empíricos de diseño de pavimentos flexibles	9
5.3 Teoría mecanicista de un pavimento flexible	12
5.3.1 Teoría de Boussinesq	13
5.3.2 Modelo de respuesta mecanicista en Pavimentos flexibles (Teoría de Burmister)	15
5.4 Variables de entrada al diseño mecanicista	17
5.4.1 <i>Geometría de la estructura</i>	17
5.4.2 <i>Tránsito vehicular</i>	18
5.4.3 <i>Clima</i>	19
5.4.4 <i>Materiales</i>	20
5.5 Propiedades de los materiales en el diseño empírico – mecanicista	21
5.5.1 Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en caliente	21
5.5.2 Módulo Resiliente de los materiales granulares y suelo	25
5.5.3 Relación de Poisson	29
5.5.3.1 Relación de Poisson para las mezclas asfálticas.....	29
5.5.3.2 Relación de Poisson para materiales granulares y suelos.....	29
5.6 Modelos de deterioro estructural para pavimento flexible	30
5.6.1 Fisuración por fatiga en mezclas asfálticas	30
5.6.2 Deformación permanente	34
5.6.2.1 Deformación permanente de la mezcla asfáltica	35
5.6.2.2 Deformación permanente de las Capas Granulares	38
5.6.2.3 Deformación permanente de la Sub-rasante	40
5.7 Algoritmo para el diseño ME de pavimentos flexibles	41

5.8 Explicación de la modelación de la estructura del pavimento flexible para el análisis	44
5.8.1 Numero de repeticiones de carga para el análisis.	45
5.8.2 Configuración de los ejes en el pavimento	45
5.8.3 Rueda simple equivalente	48
5.8.4 Forma geométrica de cada solicitación sobre el pavimento, Área de contacto y reparto de presiones sobre la misma	51
5.8.5 Presión de los neumáticos.....	52
5.8.6 Lugares críticos de análisis en el modelo multicapa	54
5.9 Ejemplos de análisis de secciones típicas de diseño	55
<u>5.9.1 Tramo 1: Lovago – pájaro negro</u>	56
5.9.1.1 Sub-Tramo I: “Empalme Lovago - Acoyapa”	56
5.9.1.1.1 Puntos de análisis en la Sección del pavimento.....	58
5.9.1.1.2 Resultados del análisis con el software multicapa	58
5.9.1.1.3 Respuestas Estructurales	59
5.9.1.1.4 Calculo de N_f para producir la Fatiga de la carpeta asfáltica	59
5.9.1.1.5 Ahuellamiento de la carpeta asfáltica.....	62
5.9.1.1.6 Corrección de la Temperatura del Pavimento	63
5.9.1.1.7 Deformación Permanente Base y Sub-base	65
5.9.1.1.8 Deformación Permanente de la Sub-rasante	66
5.9.1.1.9 Deformación Permanente Total.....	67
<u>5.9.2 Sub-Tramo II: “Acoyapa – Pájaro Negro”</u>	69
5.9.2.1 Puntos de análisis en la Sección del pavimento.	70
5.9.2.2 Resultados del análisis con el software multicapa.....	70
5.9.2.3 Respuestas Estructurales	71
5.9.2.4 Calculo de N_f para producir la Fatiga de la carpeta asfáltica.....	71
5.9.2.5 Ahuellamiento de la carpeta asfáltica	73
5.9.2.6 Deformación Permanente Base y Sub-base	74
5.9.2.7 Deformación Permanente de la Sub-rasante	74
5.9.2.8 Deformación Permanente Total	75

5.10	Resumen de resultados obtenidos del análisis de las secciones del tramo Acoyapa-San Carlos.....	76
V	CONCLUSIONES.....	77
VI	RECOMENDACIONES.....	80
VII	BIBLIOGRAFIA.....	81
VIII	ANEXOS.....	83

Resumen en Español

En esta tesis se abordaron las metodologías para el análisis y diseño de estructuras de pavimentos flexibles usadas actualmente y su tendencia en la aplicación de una metodología empírica –mecanicista que toma en cuenta como fundamento modelos de deterioro tanto para la carpeta asfáltica, materiales subyacentes (granulares o cementados) y para la sub-rasante.

El principal aporte de este trabajo consiste en cuestionar el paradigma típico del diseño de pavimento que se basa solo en el cálculo de espesores de capa, si no en introducir el concepto del diseño basado en la predicción del desempeño del pavimento. Para tal efecto se introduce el uso de propiedades reales de los materiales componentes del pavimento, una mejor incorporación de las variables de clima y carga, así como de la determinación de las respuestas mecánicas del pavimento (σ , ϵ).

Criterios y consideraciones teóricas mecanicistas fueron aplicados para el diseño de pavimentos flexibles mediante un modelo de multicapa elástico usual. Tomando información de algunas secciones típicas diseñadas y construidas previamente se verifica que los espesores calculados a través de la metodología de diseño empírica AASHTO 93, cumplen con los criterios adoptados en la metodología racional o mecanicista. El cálculo de esfuerzo y deformaciones en las capas del pavimento se realizó a través de un software multicapa.

Finalmente, se propone un algoritmo para el análisis mecanicista de pavimento flexibles que podría utilizarse para verificar los espesores obtenidos por la metodología AASHTO 93, esto con la finalidad de ir introduciendo estas consideraciones para el uso de este método en Nicaragua.

Lista de Tablas

<u>Tabla 1.</u>	Espesores mínimos sugeridos.....	11
<u>Tabla 2.</u>	Ejemplo de Resultados obtenidos en laboratorio para Modulo Dinámico de una Mezcla asfáltica	24
<u>Tabla 3.</u>	Ecuaciones de correlación para estimar módulo Resiliente de materiales de sub-rasante	28
<u>Tabla 4.</u>	Ecuaciones de correlación para estimar módulo Resiliente de materiales de Sub-base y Base Granulares	29
<u>Tabla 5</u>	Valores aproximados de la presión de inflado para Diferentes tipos de vehículos	53
<u>Tabla 6</u>	Lugares críticos de análisis en el modelo multicapa	54
<u>Tabla 7</u>	Propiedades y espesores del Tramo I, Sub-Tramo I	56
<u>Tabla 8</u>	Puntos de análisis para el Tramo I, Sub-tramo I	58
<u>Tabla 9.</u>	Tensiones y deformaciones normales obtenidas del análisis Multicapa con Evestress para el Tramo I, Sub-Tramo I.	58
<u>Tabla 10.</u>	Respuestas estructurales obtenidas con Everstress Tramo I, Sub-tramo I	59
<u>Tabla 11</u>	Daño Relativo acumulado y %FC para Tramo I, Sub-Tramo I	61
<u>Tabla 12</u>	Temperatura Intermedia del pavimento	64
<u>Tabla 13</u>	Valores Límite de Deformación Permanente de acuerdo al nivel de Severidad- AASHTO	67
<u>Tabla 14</u>	Valores Límite de Deformación Permanente de acuerdo	

	al Tipo de Carretera - Federal Highway Administration	68
<u>Tabla 15</u>	Propiedades y espesores del Tramo I, Sub-Tramo II :.....	69
<u>Tabla 16</u>	Puntos de análisis para el Tramo I, Sub-tramo II	70
<u>Tabla 17.</u>	Tensiones y Deformaciones Normales del análisis Multicapa con Evestress. Tramo I, Sub-tramo II	70
<u>Tabla 18</u>	Respuestas estructurales obtenidas con Everstress Tramo I, Sub-tramo II	71
<u>Tabla 19</u>	Daño Relativo acumulado y %FC para Tramo I, Sub-Tramo II	72
<u>Tabla 20</u>	Resultados obtenidos del análisis de las secciones.....	76

Lista de Ilustraciones y Figuras.

Figura 1.	Modelo estructural de referencia de pavimento flexible.	6
Figura 2	Teoría de Boussinesq	14
Figura 3	Datos del módulo dinámico	24
Figura 4	Curva maestra de una mezcla asfáltica	25
Figura 5.	Estado de esfuerzos provocados en la subrasante por el paso De un vehículo en movimiento	24
Figura 6	Ensayo de Modulo Resiliente	26
Figura 7	Metodología de Análisis Emperico –Mecanicista (AASHTO 2002)	41
Figura 8	Metodología para Revisión de los espesores de diseño Aplicando consideraciones mecanicistas	43
Figura 9	Modelación de la estructura de pavimento flexible para el análisis	44
Figura 10.	Ejes Simples	45
Figura 11	Eje “tándem” (eje doble)	46
Figura 12	Eje “trídem” (eje triple)	46
Figura 13	Espaciamiento entre llantas de un camión con remolque típico.....	47
Figura 14	Esquema que muestra cómo se interrelaciona los esfuerzos Que provocan en el pavimento las ruedas dobles	49
Figura 15	Comparación y relación de las de flexiones determinadas a Diferentes profundidades y sus dimensiones en ruedas dobles para ejes simples y tándem	50
Figura 16	Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta	52
Figura 17	Modelo estructural de análisis Tramo I, sub-Tramo I.....	57
Figura 18	Porcentaje de daño & tiempo para el Tramo I, Sub-Tramo I	62
Figura 19	Modelo estructural de análisis Tramo I, sub-Tramo II	69
Figura 20	Porcentaje de daño & tiempo para el Tramo I, Sub-Tramo II	73

Lista de abreviaturas

ASTM:	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Prueba y Materiales).
AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials. (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte).
ESAL:	Equivalent Single Axle Load. (Equivalente de unidades de carga simples).
LANAMME UCR:	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
MAC:	Mezcla Asfáltica Caliente.
MTI:	Ministerio de Transporte e Infraestructura
SHRP:	Strategic Highway Research Program (Programa Estratégico de Investigación de Carreteras)

I. INTRODUCCIÓN.

El diseño estructural de pavimentos basado en criterios y consideraciones empíricas – mecanicistas es una idea que nació hace más de 50 años. Sin embargo, la aplicación extensiva de estos conceptos tuvo que esperar hasta el desarrollo de computadoras modernas. En muchos países, se siguen utilizando, guías empíricas AASHTO 93, pero el estado del conocimiento actual ha permitido un gran avance en determinar propiedades de los materiales que permite predecir de una manera más acertada el desempeño del pavimento durante su vida útil, lo cual constituye un cambio de paradigma respecto del tradicional cálculo de espesores de las capas componentes.

Debido a las características de los métodos empírico - mecanicistas, los equipos requeridos para realizar los ensayos, y la falta de familiaridad por parte de los ingenieros diseñadores, este método no ha sido adoptado en muchos países. A la fecha, muy pocos pavimentos se han diseñado con este nuevo método. Sin embargo, ciertas comparaciones son posibles utilizando la información existente.

En Nicaragua es necesario implementar estas consideraciones mecanicistas en el análisis de los pavimentos flexibles ya que de esta manera se podrá garantizar que los espesores calculados a través de la metodología AASHTO 93 cumplen con criterios de desempeño adoptados en este nuevo enfoque, que garanticen una inversión óptima de los recursos públicos disponibles asignados a obras viales, por lo que, en este estudio, se abordó lo que el método enfoca con relación a las propiedades de los materiales y modelos de deterioros para predecir las fallas en el pavimento flexible.

Para estudiar estos criterios y consideraciones teóricas mecanicistas se realizó el análisis de la información disponible para aplicar esta metodología a las condiciones de Nicaragua, y finalmente se presentan algunos ejemplos numéricos de secciones típicas diseñadas por AASHTO 93 en las que se hace la revisión de los espesores aplicando estos conceptos.

II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

Objetivo General:

Realizar las consideraciones teóricas para el desarrollo de una Guía Empírico-Mecanicista para el Diseño de Pavimentos Flexibles en Nicaragua.

Objetivos Específicos:

- Analizar los criterios y consideraciones teóricas definidas en la metodología empírica-mecanicista clásica que puedan ser aplicadas a las condiciones y conocimiento actual de la ingeniería de Nicaragua en el diseño de pavimentos flexibles.
- Calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones mediante un sistema multicapa de análisis, empleando el software EVERSTRESS para algunas Secciones Típicas diseñadas por AASHTO 93.
- Revisar que los espesores calculados aplicando la metodología AASHTO 93 en algunas secciones típicas cumplen con los criterios empíricos-mecanicistas en el desempeño a fatiga y deformación permanente.
- Proponer una metodología de análisis de espesores de pavimentos flexibles que pueda aplicarse a las condiciones de Nicaragua, usando consideraciones mecanicistas para realizar revisiones de espesores diseñados a través de la Metodología AASHTO 93.

III. HIPOTESIS

Aplicando los conceptos del diseño Mecanístico – Empírico en el dimensionamiento de los pavimentos flexibles en Nicaragua se podrá predecir de una manera más acertada el desempeño de la estructura durante la vida útil para la cual se está proyectando.

Con los análisis realizados a las secciones típicas se podrá demostrar que los espesores diseñados por la metodología AASHTO 93, se obtienen de una manera muy empírica, sin fundamento en las propiedades clásicas de la mecánica, sin considerar adecuadamente el efecto climático y el tráfico. Al contrario al aplicar los conceptos mecanísticos, que caracterizan apropiadamente las propiedades de los materiales, el espectro de carga y el efecto de clima, para predecir el desempeño que tendrá el pavimento durante su vida útil para la cual se está diseñando, y que está relacionado con la mejora en la inversión de los proyectos de estudios y diseños con fondos públicos disponibles.

IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

Este estudio es de tipo descriptivo, no experimental, ya que no se realizaron ensayos de laboratorio a los materiales, se utilizó la información existente referente a la sección típica de pavimento que se analizó, se retomaron los estudios referentes al tráfico, clima y propiedades de los materiales ya caracterizados para la sección en estudio. También se describieron las variables que se analizaron, pero no se calibro ningún modelo particular, ya que el principal objetivo del estudio es introducir los conceptos iniciales para un futuro desarrollo de una Guía Empírico – Mecanicista para el diseño de los pavimentos flexibles para Nicaragua.

Adicionalmente este documento pretende difundir ideas mecanicistas de diseño de pavimentos, basadas en propiedades fundamentales de los materiales y conceptos ingenieriles, en contraposición a las ampliamente difundidas guías empíricas.

La sección típica de la estructura del pavimento flexible analizada se ubica en el Tramo Acoyapa-San Carlos, específicamente se analizó el Subtramo Acoyapa-Pájaro negro. La información del tramo se obtuvo de los estudios realizados por la empresa Consultora que estuvo a cargo del diseño, y se recopiló información relacionada a:

- ❖ Tráfico.
- ❖ Propiedades de los materiales usados para las distintas capas.
- ❖ Clima de la zona.
- ❖ Metodología de diseño de los espesores.
- ❖ Propiedades de la mezcla asfáltica usada.

Variables medidas (calculadas):

- ❖ Repeticiones de carga admisible para que se produzca el agrietamiento por fatiga.
- ❖ Deformación permanente del pavimento.

Medición de las variables

Para medir las variables en este estudio se siguió la siguiente metodología:

1. Se recopiló información de las características y propiedades de cada una de las capas que conforman la estructura de pavimento de la sección típica que se analizó.

Esto incluyó:

- ❖ Estudio de tráfico (cargas a las que estará sometida la estructura durante su vida útil)
- ❖ Caracterización de los materiales que conforman cada una de las capas.
- ❖ Ensayos de laboratorio realizados por la empresa consultora a cargo del diseño del pavimento.
- ❖ Metodología empleada en el Diseño (AASHTO 93).

Conforme esta información técnica obtenida de los estudios del proyecto se estimó el módulo resiliente de la sub-rasante de acuerdo a las ecuaciones de correlación de la AASHTO, así como el coeficiente de poisson.

2. Se modeló la sección estructural del pavimento mediante un sistema multicapa elástico lineal teórico con una serie de hipótesis de comportamiento para que pudiera ser calculado de forma práctica mediante un programa de ordenador (hipótesis de Burmister).

El modelo estructural está compuesto por una estructura típica de pavimento flexible, integrada por cuatro capas: capa asfáltica o de rodadura, base granular, sub-base granular y fundación o apoyo (Subrasante). El modelo se muestra en la **Figura 1**. Se considera que existe completa fricción en la interface de las capas del modelo estructural del pavimento flexible. De no existir completa fricción, no se podría usar la teoría de multicapa elástica lineal clásica.

3. Se determinaron esfuerzos, deformaciones y deflexiones de servicio del modelo estructural usando el software EVERSTRESS, para calcular las variables siguientes:

- Deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica, ϵ_t .
- Deformación vertical de compresión sobre las capas granulares y la sub-rasante, ϵ_z .

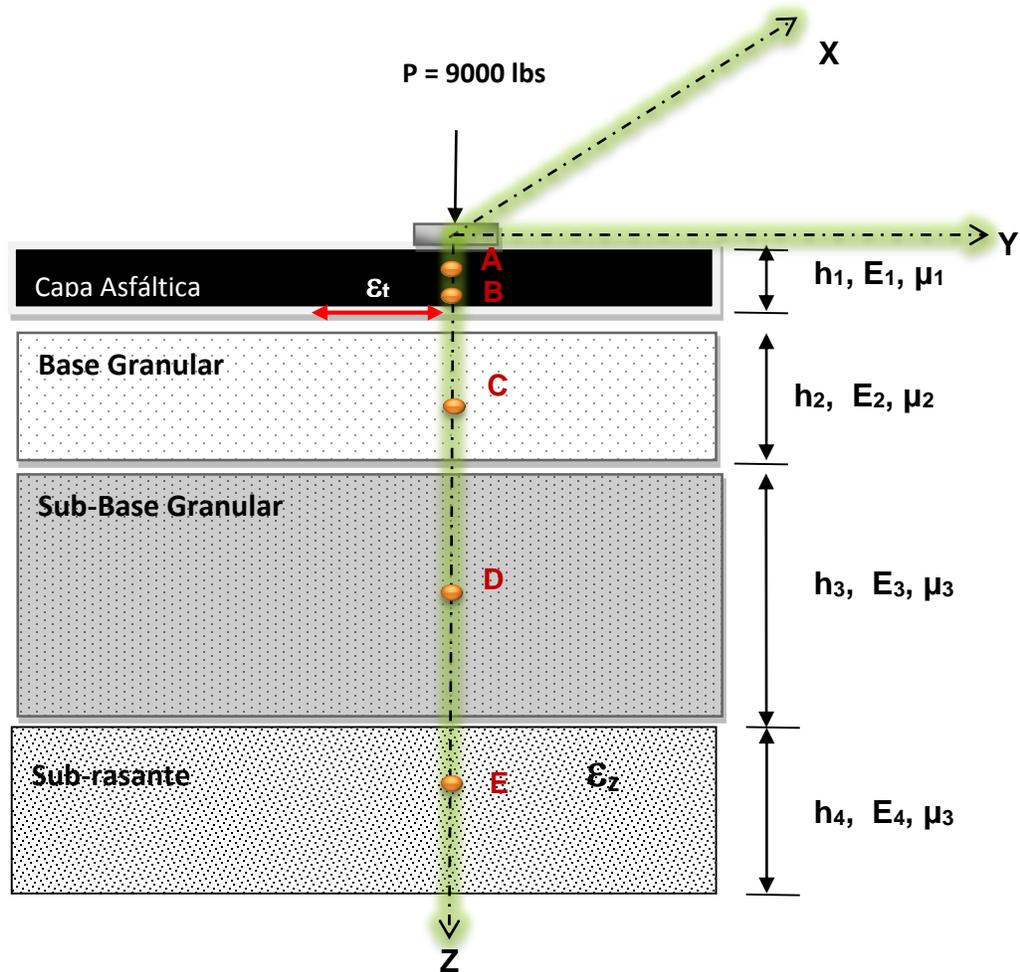


Figura 1. Modelo estructural de referencia de pavimento flexible¹.

¹ Fuente: Diseño Racional de Pavimentos/ Fredy Alberto Reyes Lizcano-1ra Edición, Bogotá. CEJA. 2003, 586 p.

4. Con base en los resultados obtenidos del modelo estructural se procedió a calcular las “ n ” repeticiones de carga que producen la fatiga de la carpeta asfáltica de acuerdo a la ley establecida en la Guía ME de la AASTHO 2008. Con esto se calcula mediante la ecuación de Miner, el daño acumulado por fatiga para el periodo de diseño.
5. Se calculó la deformación permanente (ϵ_p) acumulada en cada una de las capas del pavimento: Carpeta Asfáltica, base, sub-base y Subrasante. De acuerdo a la Guía ME la deformación permanente total del pavimento se calcula sumando la deformación de cada una de las capas que lo conforman.
6. Si de acuerdo a este análisis el pavimento no tiene un buen desempeño para controlar los niveles de fatiga y deformación permanente, se procede a repetir el análisis con una sección típica diferente, sin variar las propiedades de los materiales ya que solo se pretende revisar que los espesores propuestos y diseñados por AASHTO 93, son adecuados o se hace necesario incrementarlos para el desempeño del pavimento durante su vida útil, aplicando estos criterios Empíricos-Mecanicistas

V. DESARROLLO DEL TEMA.

5.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL PAVIMENTO

De acuerdo a las teorías usadas que se han desarrollado para el dimensionamiento de los espesores de un pavimento, se puede decir que existen dos formas típicas para abordar el análisis:

1. Los Métodos Empíricos.
2. Los métodos Empíricos-Mecanicistas.

Los primeros tienen aún gran aceptación ya que la mayor parte de los métodos de dimensionamiento se establecieron empíricamente observando el funcionamiento de una amplia gama de pavimentos experimentales medidos y analizados mediante ensayos a escala real bajo condiciones controladas, o secciones en servicio sometidas al tráfico real. El que ha tenido bastante aceptación ha sido el desarrollado por la AASHTO, y que lógicamente desde su primera publicación se han realizado varias versiones de la misma. Hoy es conocida como la “Guía de diseño AASHTO 93” y es con la que se diseñan los espesores de pavimentos flexibles en Nicaragua.

Actualmente debido a las limitaciones de los métodos empíricos y al avance tecnológico tanto en análisis y cálculo por medio de computadoras, así como de Equipos de Laboratorio sofisticados para determinar y caracterizar las propiedades de los materiales constituyentes de un pavimento, los métodos mecanísticos están desarrollándose y en algunos países se están haciendo esfuerzos para adecuar este nuevo enfoque a las condiciones propias e introducirlo en el análisis del dimensionamiento de los espesores del pavimento flexible.

La metodología empírica-mecanicista se basa en el cálculo de esfuerzos y deformaciones en las interfaces de las capas del pavimento Asfáltico, permiten el diseño óptimo y durable de pavimentos ya que se puede verificar su vida útil con respecto a las admisibilidades propias de cada capa del pavimento. El método hace

uso de la teoría de la elasticidad y aplicación de las leyes de fatiga de las capas, integrando un modelo matemático mediante un sistema multicapa elástico para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones a través de un software. Por lo tanto una Guía de Diseño Emperico-Mecanicista representa un cambio importante en la manera en que se realiza el diseño de pavimentos.

5.2 MÉTODOS EMPÍRICOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Se basan en la observación del comportamiento de los pavimentos existentes o en parámetros que en cualquier caso no permiten realizar un cálculo analítico. En general necesitan mucho tiempo para extraer conclusiones y son difíciles de generalizar a condiciones distintas de aquellas para los que fueron calibrados.

En general, estos métodos empíricos se basan no sólo en criterios experimentales obtenidos a partir de observaciones y ensayos in situ y en laboratorio, sino que, de forma más o menos explícita se apoyan también en hipótesis mecanicistas y la mayoría de ellos han sido contrastados con programas de cálculo. La justificación de la existencia de los métodos empíricos está en el hecho de simplificar la labor del proyectista. Sin embargo no es recomendable su aplicación en un ámbito distinto del original del método, ya que las asimilaciones sobre tipología del tráfico, características y prescripciones de materiales, factores estacionales, entre otros, pueden ser muy difíciles de realizar. Menos justificadas aún están las extrapolaciones en cuanto a cargas de cálculo, limitación de espesores, equivalencia entre materiales, etc.

Todos los métodos empíricos de dimensionamiento tienen en común el procedimiento siguiente:

1. Establecimiento de una vida útil al final de la cual se llega a un grado de deterioro determinado.

2. Determinación de los parámetros de entrada: caracterización de la superficie de apoyo, valoración del tráfico de proyecto, condiciones locales y estacionales.
3. Determinación de la solución o soluciones a través de un método propio de cada método: ábacos (nomogramas), tablas o catálogos de secciones estructurales.

El método AASHO, es el ejemplo más extendido mundialmente de los métodos empíricos, se basó en los resultados de la pista experimental de la AASHO (1957-1961), en el que se ensayaron 240 secciones flexibles, 271 rígidas y 50 semirrígidas, a las que se les aplicó un millón de cargas. En este ensayo se introdujo por primera vez la noción de equivalencias entre cargas de distinto peso, y el concepto de fallo de pavimentos por repetición de cargas. Basándose en los resultados del ensayo, se desarrolló un método de dimensionamiento cuya base es la obtención de un parámetro llamado número estructural "SN", en función del tráfico, las características de la Subrasante, propiedades básicas de la capa de pavimento y criterios de factor de incertidumbre. A continuación, mediante unos coeficientes estructurales asignados a los distintos materiales compuestos, se determina el espesor de las distintas capas de manera que la suma de espesores multiplicados por sus coeficientes estructurales sea igual al número estructural total.

$$S_N = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3$$

Dónde:

a₁, a₂, a₃, son coeficientes Estructurales o de capa que indican la resistencia relativa de los materiales de la superficie de rodadura, base y sub-base respectivamente. Los cuales son establecidos por medio de ensayos conocidos como prueba Marshall de la mezcla y CBR de una base granular sin tratamiento.

m₂, m₃ son los coeficientes de drenaje para la base y sub-base

D₁, D₂, D₃, son los espesores de capa en pulgadas para la superficie de rodadura, base y sub-base

En la **Tabla 1** se dan valores de espesores mínimos sugeridos para capas Asfálticas y base granular en función del tránsito.

Tabla 1. Espesores mínimos sugeridos²

Número de ESAL´s	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50, 000	3.0 cm	10 cm
50,000 - 150,000	5.0 cm	10 cm
150,000 - 500,000	6.5 cm	10 cm
500,000 - 2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000 - 7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

Algunas limitaciones del método AASHTO 93 son:

Determinación de las Cargas del Tráfico: Los niveles del volumen del tráfico pesado para el diseño se han incrementado tremendamente, por lo que la aplicación de este método a las corrientes de tráfico moderno, obliga al diseñador a menudo a extrapolar la metodología de diseño, más allá de sus datos de calibración. En consecuencia se obtienen espesores que podrían estar ya sea subdimensionados para tales condiciones de tráfico.

Incorporación del efecto climático: Debido a que la pista experimental de AASHO fue construida en una ubicación geográfica específica (Ottawa, Illinois), es imposible saber los efectos de diferentes condiciones climáticas sobre pavimentos construidos en otras regiones.

Incorporación de características de la Sub-rasante (SR): Un mismo tipo de sub-rasante se utilizó para todas las secciones de la Carretera Experimental, lo cual es

² Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1993

una limitación ya que existen muchos tipos, lo que resulta en diferentes comportamientos de los pavimentos.

Deficiencias en la Caracterización de los Camiones: La suspensión de los vehículos, las configuraciones de los ejes y los tipos y presiones de neumáticos fueron representativos de los usados a finales de los 50. Muchos de ellos han sido superados (presiones de neumáticos de 80 psi versus 120 psi en la actualidad), lo que resulta en diseños de pavimentos deficientes para soportar esas cargas.

Deficiencias en la Vida de Diseño: Debido a la corta duración de la pista experimental, los efectos a largo plazo del clima y del envejecimiento de los materiales no fueron tomados en cuenta. La carretera experimental AASHO se condujo a lo largo de dos años, mientras que las vidas de diseño para muchos de los pavimentos actuales son de 20 a 50 años.

5.3 TEORÍA MECANICISTA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

En la actualidad se está tratando de abordar la problemática en el diseño de pavimentos para carreteras desde un punto de vista analítico, basándose en un análisis de la relación entre tensiones y deformaciones producidas por la aplicación de cargas repetidas, comprendiendo en suma un modelo de respuesta y uno de falla.

Los modelos de respuesta se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Modelos Mecánicos
- Modelos de Regresión
- Modelos Probabilísticos

Los modelos mecánicos son los de empleo más generalizado. Existiendo tres tipos, según los principios de modelización geométrica y de cálculo en los que se basan.

- Sistema Multicapas
- Teoría de Placas
- Métodos Numéricos (Elementos Finitos)

Por otro lado, pueden clasificarse según las ecuaciones constitutivas de los materiales en:

- Modelos elásticos
- Visco-elásticos

Hasta la fecha, el mayor desarrollo producido en el diseño de pavimentos flexibles y semi-rígidos, lo han alcanzado los modelos basados en sistemas multicapas y ecuaciones elásticas (Hipótesis de Burmister).

Sin embargo en muchos países, se está trabajando sobre desarrollos basados en el método de los elementos finitos, permitiendo sea en el campo de la elasticidad o visco-elasticidad, analizar problemas tales como la influencia de fisuras y el proceso de propagación de las mismas.

En lo que se refiere al análisis de las fallas, los métodos que trabajan con las hipótesis de Burmister, suelen recurrir a leyes de fatiga, sin embargo hay métodos basados en otras leyes de comportamiento como por ejemplo la acumulación de deformaciones plásticas.

El procedimiento seguido para el diseño de un pavimento por métodos racionales se planteó inicialmente por medio de modelos bicapas que posteriormente fueron generalizados a tricapas y multicapa.

Desde el punto de vista de diseño, los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas y la distribución de la carga está determinada por las características propias del sistema de capas.

5.3.1 Teoría de Boussinesq

Como un primer análisis para determinar la distribución de esfuerzos en un pavimento se aplicó el modelo propuesto por el matemático francés Boussinesq en 1885, después de varias investigaciones basadas en la teoría de la elasticidad, propuso una expresión para calcular la distribución de los esfuerzos inducidos por

una carga superficial concentrada, a través de una masa de suelo homogénea e isotópica de dimensiones semi-infinitas. La carga de la rueda simple equivalente, P , se transmite a la superficie del pavimento por el neumático como una presión vertical uniforme (σ_c). Entonces, los esfuerzos se distribuyen por la estructura del pavimento para producir un esfuerzo vertical reducido a nivel de la subrasante de (σ_z). Conforme a esta teoría, el esfuerzo normal (σ_z) que obra sobre una partícula situada a una profundidad (z) a partir de la superficie y a una distancia (r) de la carga concentrada es:

Ecuación 1

$$\sigma_z = \sigma_c \left[1 - \frac{\left(\frac{z}{r}\right)^3}{\left(1 + \frac{z^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}}}\right]$$

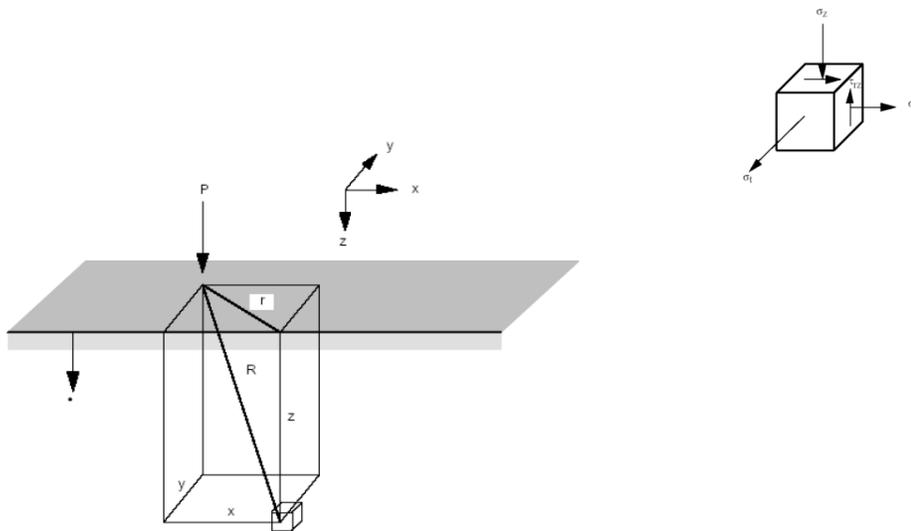


Figura 2 Teoría de Boussinesq³

Dónde:

σ_c = Presión de contacto dada en (psi)

³ Fuente: "Definición moderna de los parámetros para el Diseño de pavimentos" Hidalgo Felipe. Sangolqui Abril 2007

Z = Profundidad medida desde la superficie donde se requiere obtener la presión vertical (σ_z) dada en mts

r = Radio de la superficie de contacto de la llanta con el pavimento dado en m

Según la ecuación 1, el esfuerzo normal σ_z es independiente de las características del suelo. Los pavimentos flexibles se estructuran al considerar que los módulos de elasticidad de las capas que los constituyen tienen un valor menor, a medida que se localizan a mayor profundidad. Por este motivo el efecto causado por la presión de un neumático sobre el pavimento disminuirá conforme aumente la altura (h) del mismo.

La presión ejercida por un neumático σ_c es del orden de 0.2 a 0.7 MPa, el cuál es un valor elevado para ser soportado por el suelo natural; por tal razón la calzada debe distribuir esta presión para llevarla a un nivel tolerable a nivel de la subrasante.

Esta solución fue por mucho tiempo la única disponible, hasta que en 1945 Donald M. Burmister propuso una teoría que se podía aplicar a estructuras de pavimentos, basada en la de Boussinesq pero que tenía en cuenta estratos y las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la masa de suelo, para calcular el estado de esfuerzos de ésta a cualquier profundidad.

5.3.2 Modelo de respuesta mecanicista en Pavimentos flexibles

(Teoría de Burmister)

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 modelo de respuesta se basa en la teoría de Burmister cuyas hipótesis básicas son las siguientes:

- El pavimento se representa geoméricamente como una estructura constituida por una serie de capas horizontales paralelas, indefinidas en su plano y de espesor finito constante, apoyadas en un espacio semi-infinito de Boussinesq.
- Cada capa se comporta como un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo. Se caracteriza mecánicamente por su módulo de elasticidad (E) y su coeficiente de Poisson (μ).
- La carga se representa mediante una presión vertical distribuida uniformemente sobre un área circular.
- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua; el contacto puede modelarse en condiciones de adherencia total o nula.
- Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos.
- Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas.
- Los esfuerzos cortantes que se producen en las zonas de contacto entre las cargas y las superficies del pavimento, son prácticamente despreciables.
- La repuesta de la estructura se obtiene entonces en forma de integrales indefinidas que se resuelven numéricamente, utilizando para ello un programa de computador, tales como: EVERSTRESS, BISAR, 3D-MOVE, ELSYM5, KENLAYER, etc.

En los programas de computador se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (por lo general el módulo elástico y la relación de Poisson) y el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación. Una vez calculados estos 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.

Los valores admisibles de deformación a tracción y vertical en la base de la capa asfáltica y en la superficie de la subrasante respectivamente, se obtienen por medio de diversas ecuaciones desarrolladas en instituciones de investigación como TRL (Transportation Research Laboratory), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y AI (Asphalt Institute).

En esta tesis se analiza las secciones del pavimento en base a la vida por fatiga de la carpeta asfáltica utilizando la ley de fatiga propuesta por AASHTO 2002

5.4 Variables de entrada al diseño mecanicista.

Las variables de entrada al proceso de diseño mecanicista incluyen:

- Geometría de la estructura.
- El Tránsito vehicular, definido ya sea en ejes equivalentes o a través de su correspondiente espectro de distribución de cargas.
- El clima, medio físico que atravesara la carretera definido por precipitación y temperatura.
- Materiales, se necesita conocer las propiedades de los materiales que conforman cada una de las capas del pavimento, están serán módulos dinámicos o resiliente.

A continuación se describe estas variables:

5.4.1 Geometría de la estructura,

Se refiere a la geometría de la sección del pavimento, espesores de cada capa, así como las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas, como son el módulo dinámico de la mezcla asfáltica y el Modulo resiliente para las

capas granulares. Para ello previamente debe caracterizarse los materiales que se van a emplear en la construcción de esta estructura.

5.4.2 Tránsito vehicular

El tránsito vehicular constituye la sollicitación directa al sistema estructural que constituye el pavimento; es bajo el paso repetido de los vehículos que los pavimentos se deterioran. Constituye uno de los factores de diseño que presenta mayor variabilidad en cuanto al efecto de las cargas que transmiten los vehículos, su caracterización es fundamental, y a la vez muy compleja dada la gran distribución de tipos de vehículos y de cargas que transportan.

Para transformar toda esa variabilidad en formas e intensidades de carga en un valor que los represente y que sea simplemente obtenible y manejable se definió un "Eje patrón" que representa la carga estándar, o normalizada.

Este "eje patrón" contempla una carga por eje simple de cuatro ruedas de 8.200 kg (80 KNó 18.000 libras) al cual se le asignó un valor del efecto que causaba al pasar sobre un pavimento, este efecto se conoce como "factor daño", y se le asignó un valor unitario, es decir cada vez que un eje simple de 18.000 lbs pasa sobre una sección de un pavimento flexible, causa sobre ese pavimento un daño igual a uno (1).

Como consecuencia de esta simplificación surge la definición de los "Factores de equivalencia de cargas", que " transforman las repeticiones de un eje cualquiera, a un número de repeticiones del eje patrón que causan el mismo efecto daño sobre el pavimento que el daño causado por ese eje cualquiera.

Los "Factores de Equivalencia" para los ejes simples y tándem (dobles y triples) son los derivados empíricamente en el Ensayo Vial AASHO en función no solo de la magnitud de la carga y la configuración del eje que la transmite al pavimento, sino también del tipo de pavimento (flexible o rígido), del espesor del pavimento y de la

condición final de calidad de rodaje del pavimento para el momento final del periodo de diseño.

El método de diseño de pavimentos, AASHTO 2002, determina la información de tránsito a través de espectros de carga los cuales se calculan usualmente para cada tipo de eje: sencillo dual, tándem y tridem. Se definen como la relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje. Los rangos de carga, que definen los intervalos de clase, están definidos en la futura guía mecanicista para diseño de pavimentos de la AASHTO.

En nuestro país debería empezarse a manejar la data de pesaje de los vehículos de carga para producir estos “espectros de carga” aun con la limitante de recursos para realizar estos pesajes en forma continua podrían obtenerse una aproximación de estos espectros. Sin embargo mientras no se tenga suficiente información al respecto conviene seguir manejando la información del tránsito a través de los “ejes equivalentes”.

5.4.3 Clima:

El clima tiene gran importancia ya que las propiedades de los materiales que van a conformar cada capa del pavimento dependen fuertemente de los valores de temperatura y humedad presentes en la sección estructural del pavimento. Es necesario conocer el medio físico por donde atravesara la carretera en cuanto a precipitaciones y temperaturas ya que de este modo se podrá seleccionar apropiadamente los materiales que conformarán la estructura del pavimento.

Los materiales asfálticos son altamente sensibles a la temperatura y a la magnitud de las cargas. Debido a que el asfalto es un material plástico-visco-elástico, a altas temperaturas y prolongadas tasas de cargas (es decir, a baja velocidad vehicular), el módulo de una mezcla asfáltica puede parecerse al de un material granular no aglomerado. En contraste, a temperaturas frías y tasas muy cortas de cargas, el

material tenderá a comportarse de un modo puramente elástico y tendrá valores del módulo que se parecen a los de un material PCC. En la Guía de Diseño, la metodología para las mezclas asfálticas tiene en cuenta el rango de temperatura esperado en el período de diseño.

5.4.4 Materiales:

La apropiada caracterización de los materiales constituye un aspecto de gran importancia en el diseño mecanicista de pavimentos. La caracterización de materiales para el análisis estructural requiere la definición de las relaciones entre la tensión y la deformación, por medio de la rigidez o el módulo resiliente y una ley de falla de cada componente del pavimento. En el análisis, se utiliza como modelo de respuesta un sistema multicapa basado en la teoría de Boussinesq-Burmister y como es sabido, en un sistema multicapa, se considera que los materiales son elásticos, lineales, homogéneos e isótropos y están caracterizados por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson.

Las propiedades de los materiales (módulos y coeficientes de poisson) se pueden obtener de varias maneras:

- ✓ Ensayos de laboratorio de carga repetida combinados con ensayos no destructivos.
- ✓ Estimación o uso de nomogramas con correlaciones estadísticas.
- ✓ Comparación con materiales “estándar” de característica similares.
- ✓ Medición “in situ” basándose en ensayos no destructivos.

El comportamiento de los suelos y de los materiales granulares no ligados se considera elástico lineal en los métodos empíricos y generalmente se obtiene el módulo resiliente por correlación empírica con otros resultados de ensayo, mientras que en los métodos mecanicista se requiere una ecuación constitutiva que defina su comportamiento resiliente bajo cargas dinámicas.

Como las ecuaciones constitutivas y las leyes de fallas no son de fácil obtención o no se dispone de los equipos de ensayos requeridos para determinarlas, la guía de

Diseño Estructural de Pavimentos Empírico-Mecanicista 1-37A NCHRP (AASHTO 2002) establece para la determinación de las propiedades de los materiales, niveles jerárquicos de acuerdo a la categoría del proyecto relacionada con su importancia, tránsito solicitante, costo y particularidades del mismo. Los niveles van del 1 al 3 en orden decreciente a la importancia de la obra como:

NIVEL 1: se llevan a cabo ensayos de laboratorio o in situ para determinar las ecuaciones constitutivas midiendo la propiedad del material y estableciendo la ecuación constitutiva

NIVEL 2: se usan correlaciones con otras propiedades de los materiales determinados en laboratorio o in situ, para determinar las ecuaciones constitutivas. (Se estima la propiedad del material)

NIVEL 3: se adoptan valores apropiados basados en la experiencia con muy pocos ensayos (Se adopta un valor de la propiedad del material)

A continuación debido a la importancia del tema, se hablará sobre las propiedades de los materiales que deben tomarse en cuenta en el Diseño Empírico - Mecanicista.

5.5 Propiedades de los materiales en el diseño empírico – mecanicista

5.5.1 Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en caliente.

El modulo dinámico de las mezclas asfálticas constituye un parámetro importante dentro del diseño por métodos empíricos-mecanicistas, pues hacen parte del algoritmo que ayuda a definir el espesor de cada capa.

El comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas está definido por la variación de la temperatura y la frecuencia de aplicación de carga, incluso por las propiedades del asfalto y el agregado utilizado en la fabricación de las mismas.

La variación de las propiedades dinámicas se da principalmente por el cambio de temperatura, pues un aumento de esta genera una disminución en el módulo

resiliente. El efecto de la frecuencia de carga, que se manifiesta a través del movimiento de los vehículos pesados sobre la estructura, genera módulos mayores a medida que la velocidad se incrementa.

El módulo dinámico de la mezcla asfáltica se determina según la norma ASTM D3497, en donde un espécimen cilíndrico se somete a pulsos repetidos de cierto esfuerzo cíclico, en condiciones de compresión no confinada. Se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima, obtenido en un ensayo a compresión (uniaxial o triaxial), a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma cóncava. El ensayo se deberá realizar para el rango de temperaturas esperado en el lugar, la velocidad de operación esperada, y para el diseño volumétrico de la mezcla seleccionada.

Existen diversas variables relacionadas con la determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica, cuyos valores hacen que la mezcla se comporte de forma satisfactoria o no, que se presenten o no daños tanto en la carpeta de concreto asfáltico como en la estructura de pavimento en conjunto, tales como fallas, fisuras, grietas, deformaciones y fatiga, entre otros.

Para determinar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica existen diferentes metodologías, entre las cuales están: ensayos de laboratorio, nomogramas y fórmulas o correlaciones. Dentro de los ensayos se encuentran el de tracción indirecta, el de tracción por compresión directa y el de tracción de flexión de una viga cargada en el tercio central. Cada uno de estos ensayos tiene sus características particulares.

Otra de las metodologías utilizadas para la determinación de módulos dinámicos de mezclas asfálticas es la de los monogramas de la Shell, la cual fue desarrollada por Bonnaure y otros, basados en el módulo dinámico del asfalto y en las concentraciones volumétricas del asfalto y de los agregados (datos del diseño Marshall). La utilización de este método es un poco tediosa, por la configuración

gráfica que tienen los nomogramas, lo cual hace que el procedimiento sea largo y que, además, se pueda incurrir en errores de paralaje o personales del observador. La tercera metodología, correspondiente a fórmulas o correlaciones, hace que determinar el módulo de las mezclas asfálticas sea un proceso más corto y preciso que el nombrado anteriormente; dentro de esta metodología se encuentran cuatro métodos, que mediante la aplicación de ciertas expresiones matemáticas permiten conocer el valor del módulo dinámico utilizando diferentes variables, los métodos son: fórmulas de Bonnaure y otros, fórmulas del Instituto del Asfalto, fórmulas de Heukelom y Klompy la fórmula de Witczak.

Curva maestra del módulo dinámico

En el diseño mecanístico-empírico el módulo de una mezcla asfáltica, para todos los niveles de entrada, se obtiene a partir de una curva maestra. La curva maestra se construye utilizando principios de superposición tiempo de carga (frecuencia)-temperatura, lo cual consiste en realizar ensayos de módulos dinámicos a diferentes temperaturas de ensayo (40, 70, 100 y 130 °F, aproximadamente) y frecuencias de carga (0.1, 0.5, 1, 5, 10 y 25 Hz). Luego se selecciona una temperatura estándar de referencia y posteriormente los datos de las diferentes temperaturas, se desplazan horizontalmente con respecto al tiempo de carga hasta que las curvas se unan en una única función suavizada, como se muestra en la Figura 3. La curva maestra del módulo como función del tiempo de carga describe entonces, la dependencia del material con el tiempo; lo cual permite al ingeniero diseñador tomar en cuenta, no solamente la temperatura propia de la zona, sino también la velocidad de los vehículos, en la respuesta estructural que la mezcla asfáltica pueda brindar.

La Tabla 2 y la Figura 4 muestran un ejemplo de una curva maestra.

Tabla 2. Ejemplo de Resultados obtenidos en laboratorio para Modulo Dinámico de una Mezcla asfáltica densa, TMN 12.

Temperatura °F	Modulo $ E^* $, psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
40	2291064	2160578	2002052	1651544	1508924	1194337
70	1187907	1029429	876414	576622	474515	297037
100	376711	268755	198557	101091	76677	43946
130	83155	54099	40707	20934	17259	12957

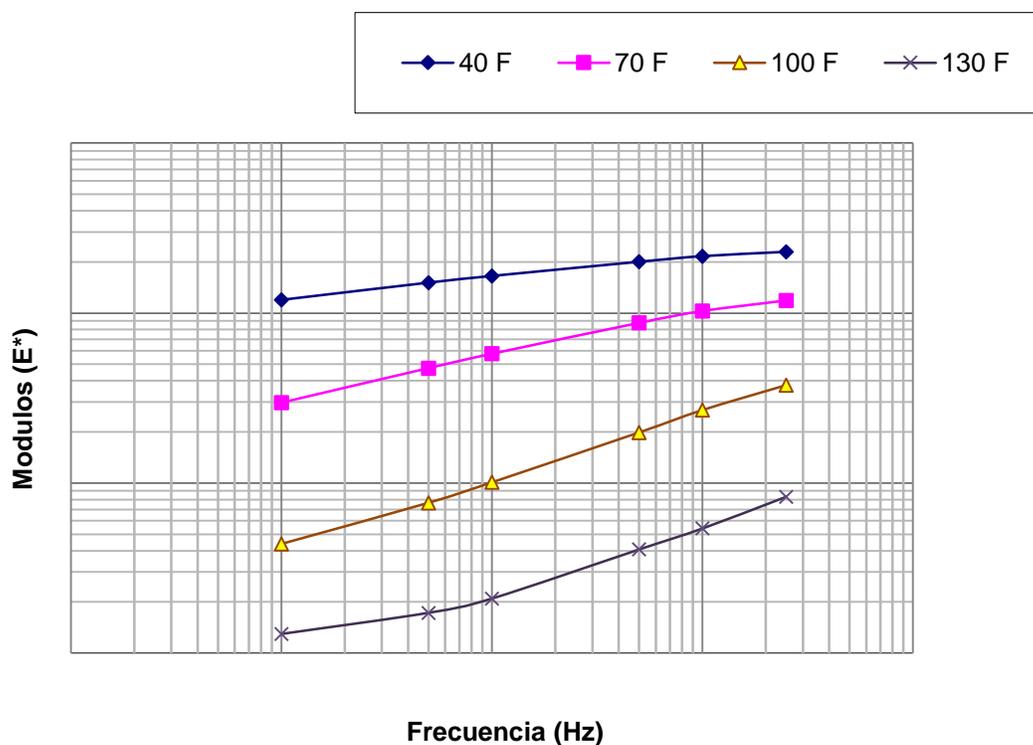


Figura 3. Datos de Modulo Dinámico.

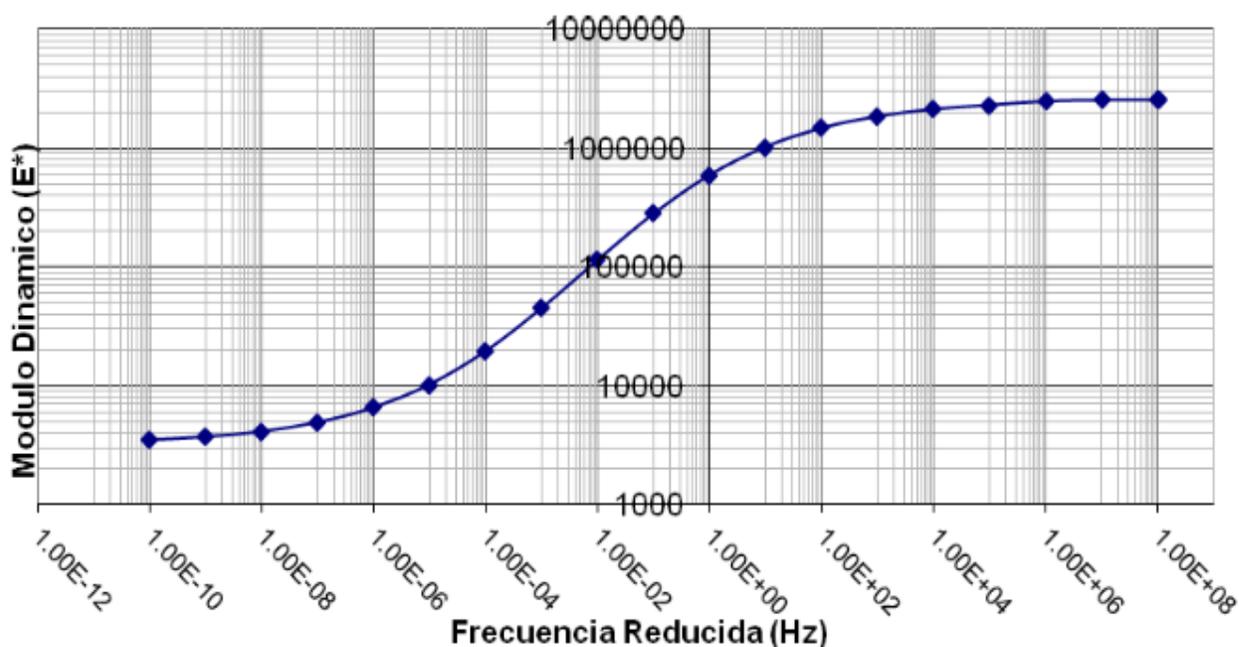


Figura 4. Curva maestra de una mezcla asfáltica.

5.5.2 Módulo Resiliente de los materiales granulares y suelo

Cuando un vehículo circula sobre un pavimento sus ruedas transmiten cargas que generan, al interior de la estructura de ese pavimento y el suelo de fundación, un estado de esfuerzos que a su vez induce un estado de deformaciones. Si el material de la capa se supone linealmente elástico, isotrópico y homogéneo, ambos estados se consideran relacionados entre sí a través del módulo de elasticidad y la razón de Poisson propios del material. Sin embargo la respuesta real de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos y suelo de fundación, muestra que bajo pulsos de carga dinámicos como los inducidos por las ruedas de los vehículos, solo parte de la deformación total generada se recupera al cesar la sollicitación aplicada. Esto implica que en estricto rigor este tipo de materiales no presenta un comportamiento elástico. En consideración a este hecho se introduce el concepto de módulo resiliente, que se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables [AASHTO, 1993].

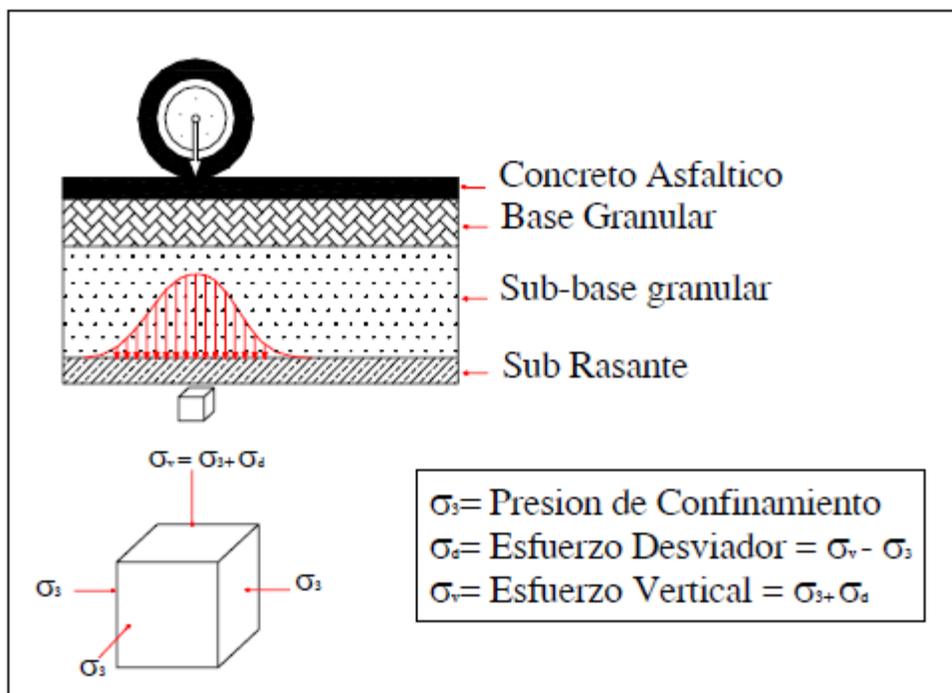


Fig. 5.- Estado de esfuerzos provocados en la subrasante por el paso de un vehículo en movimiento⁴.

El estudio del módulo resiliente se ha desarrollado a partir de ensayos triaxiales dinámicos con carga repetida. Este ensayo consiste básicamente en someter a una probeta de material a un estado de esfuerzos compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico, estado de esfuerzos que pretende reproducir el estado a que se encuentra sometido el suelo de fundación del camino cuando éste es solicitado por los vehículos

El ensayo se ejecuta de acuerdo con la norma AASHTO T307. La prueba se ejecuta por medio de un ensayo triaxial donde la presión de confinamiento es constante, y el esfuerzo desviador se aplica cíclicamente. El módulo de resiliencia se define como el cociente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga.

⁴ Fuente: "Definición moderna de los parámetros para el Diseño de pavimentos" Hidalgo Felipe. Sangolqui Abril 2007

Ecuación 2

$$MR = \frac{\sigma d}{\epsilon r}$$

Donde ϵ_r es la deformación específica recuperable o resiliente axial medida sobre la probeta de ensayo para un número determinado de repeticiones de carga.

Los ensayos de módulo de resiliencia se deben realizar en condiciones representativas de la colocación de los materiales en obra, como son las características de peso volumétrico, contenido de agua de compactación, método de compactación, granulometría, etc, ya que el ensaye es muy sensible a esas condiciones.

Durante el ensayo se mide para cada ciclo de carga, el nivel de sollicitación aplicado y la deformación resultante, en forma automática a través de un equipo de adquisición de datos.

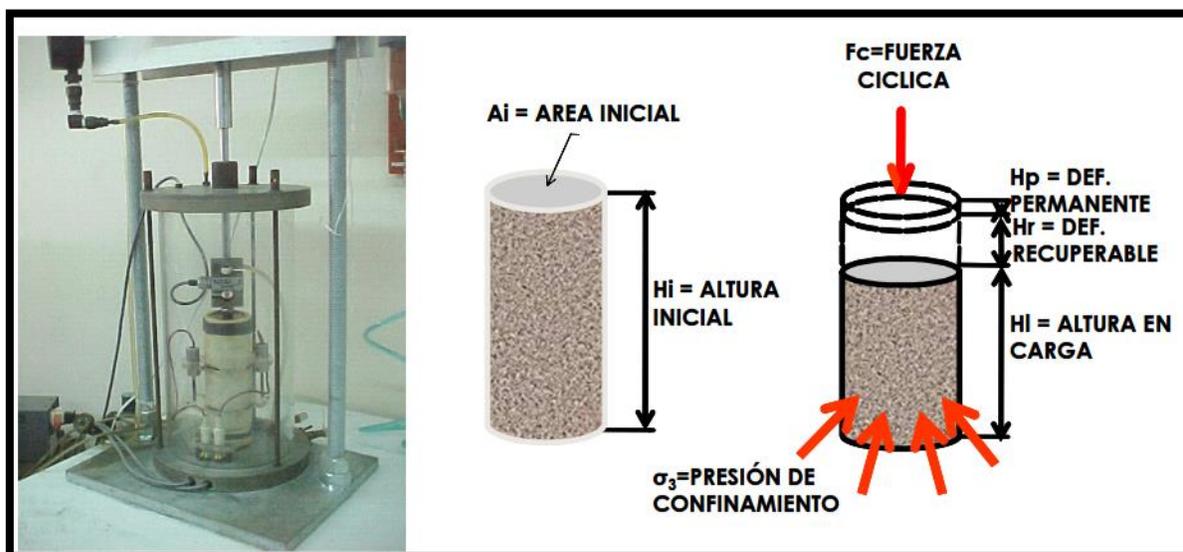


Fig. 6.- Ensayo de módulo resiliente⁵.

⁵ **Fuente:** "Caracterización dinámica de suelos granulares" Silvia Angelone, Fernando Martínez y Marina Cauhape Casaux. Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (I.M.A.E.) Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario Riobamba y Berutti (2000) Rosario – Argentina

El método de diseño de estructuras de pavimentos propuesto por AASHTO, incorpora al módulo resiliente como parámetro representativo de la capacidad de soporte del suelo de fundación del camino. El equipo requerido para este ensayo es de un costo bastante alto y de operación compleja, pero la misma guía ofrece alternativas para determinar este parámetro de diseño de acuerdo a los tres niveles jerárquicos dependiendo de la importancia del proyecto.

De acuerdo a la metodología AASHTO 2002 en el Nivel 2 el módulo resiliente se puede obtener por medio de la siguiente ecuación de correlación:

Ecuación 3

$$M_r = 2555 * (CBR)^{0.64} , \quad M_r, \text{ en psi}$$

Muchas agencias han determinado ciertas ecuaciones de correlación para poder estimar el módulo de resiliencia de suelos y materiales granulares debido a la limitante de equipos de laboratorio para realizar esta prueba. Algunas de estas ecuaciones se muestran en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3. Ecuaciones de correlación para estimar módulo Resiliente de materiales de sub-rasante.⁶

Rango de % de CBR.	Ecuación de correlación
$CBR \leq 7.2$	$M_R = 1500 * CBR$ <u>Ecuación 4</u>
$7.2 < CBR \leq 20$	$M_R = 3000 * (CBR)^{0.65}$ <u>Ecuación 5</u>
$CBR > 20$	$M_R = 4326 * \ln(CBR) + 241$ <u>Ecuación 6</u>

Nota: El valor resultante de estas correlaciones se mide en psi.

⁶ Tomadas de la versión de la Portland Cement Association PCA denominada Pavement Analysis System (PAS) la Guía de Diseño AASHTO-93

Tabla 4. Ecuaciones de correlación para estimar módulo Resiliente de materiales de Sub-base y Base Granulares⁷

Rango de % de CBR.	Ecuación de correlación
CBR ≤ 80	$M_R = 385.08 * CBR + 8660$ (psi) <u>Ecuación 7</u>
CBR > 80	$M_R = 321.05 * CBR + 13327$ (psi) <u>Ecuación 8</u>

5.5.3 Relación de Poisson

5.5.3.1 Relación de Poisson para las mezclas asfálticas

Para los materiales bituminosos de carreteras, la relación de poisson normalmente está en el rango 0.15 a 0.50 y es función de la temperatura. Idealmente, la relación de Poisson en el Nivel 1 de datos, debería estimarse a partir de ensayos de laboratorio; sin embargo, un enfoque del Nivel 1 para determinar la relación de Poisson no está garantizado hasta el momento en que se puedan implementar en el procedimiento de diseño de una manera rutinaria los modelos de respuesta del pavimento que utilizan módulos no lineales para los efectos del modelo de dilatación en la respuesta del pavimento. Por eso se puede considerar satisfactoriamente en el análisis el uso de correlaciones o valores típicos asumidos.

5.5.3.2 Relación de Poisson para materiales granulares y suelos

La relación de Poisson es un dato requerido para los modelos de cálculo de la respuesta estructural, aunque su efecto sobre la respuesta del pavimento calculado no es muy significativo. En consecuencia, este parámetro muy rara vez se mide y a

⁷ Tomadas de la versión de la Portland Cement Association PCA denominada Pavement Analysis System (PAS) la Guía de Diseño AASHTO-93

menudo se a sume. Para materiales granulares no ligados y sub-rasantes, típicamente está entre 0.2 y 0.45⁸.

Como la medición directa de la relación de Poisson normalmente no está justificada debido a su baja sensibilidad en la respuesta estructural se asumirá para el análisis de las secciones un valor de 0.30⁹.

5.6 Modelos de deterioro estructural para pavimento flexible.

El proceso de diseño estructural de los pavimentos por métodos mecanísticos-empíricos, se basa en la determinación en distintos puntos del pavimento de los esfuerzos críticos que, introducidos en diferentes leyes de falla, permitan establecer si para el periodo del proyecto, los deterioros del pavimento se mantendrán dentro de ciertos límites de aceptabilidad que no afecten el nivel de servicio ofrecido al usuario. En general, los criterios de falla empleados son:

- Fisuración por fatiga de las capas asfálticas, limitando la deformación de tracción en la parte inferior de las mismas.
- Acumulación de deformaciones permanentes que afectan a todas las capas componentes y al suelo de fundación.

Los deterioros que se van a considerar en el desarrollo de esta tesis son los asociados a la capa asfáltica en los que se incluye el modelo propuesto en la Guía de diseño Emperico-mecanicista AASTHO 2002 para la deformación permanente y la ley de fatiga. A continuación se describe estos dos criterios de fallo en los pavimentos flexibles:

5.6.1 FISURACION POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

En la literatura existente respecto a este tema se encuentra numerosos modelos para caracterizar el daño por fatiga de una capa asfáltica. El modelo más comúnmente

⁸ Fuente: Guía ME de la AASTHO 2008

⁹ Fuente: Guía ME de la AASTHO 2008

usado para predecir el número de repeticiones de carga para el fisuramiento por fatiga está en función de la deformación a tracción y el módulo de la mezcla asfáltica. La localización crítica puede ser en la superficie produciéndose fisuras de arriba hacia abajo o en la parte baja de la capa asfáltica produciéndose fisuras de abajo hacia arriba.

La relación matemática comúnmente usada para caracterizar la fatiga tiene la siguiente forma:

Ecuación 9

$$N_f = Ck_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3}$$

(AASHTO 2002 Ec.3.3.27)

Dónde:

N_f , número de repeticiones para el agrietamiento por fatiga.

ε_t , deformación por tracción en la localización crítica.

E, modulo de rigidez del material.

K1, k2, k3, coeficientes de regresión del laboratorio.

La determinación de la ley de fatiga de una mezcla bituminosa es algo complejo que requiere muchos y costosos 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.

Para esta tesis se usara la ley de fatiga por agrietamiento longitudinal planteada en la Guía de Diseño Empírica Mecanicista utilizada en E.E.U.U la cual se muestra a continuación:

Ecuación 10

$$N_f = 0.00432 * k'_1 * C \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281}$$

Dónde:

N_f , número de repeticiones de carga para producir el agrietamiento por fatiga.

ϵ_t , deformación por tracción en la localización crítica del modelo de análisis

E , modulo de rigidez de la mezcla asfáltica.

El factor C corresponde a una corrección de acuerdo a las propiedades volumétricas y de vacíos de la mezcla asfáltica, está dada por la Ecuación 11:

Ecuación 11 $C=10^M$, donde M es igual a:

Ecuación 12
$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

Donde

V_b , = porcentaje Efectivo de Asfalto

V_a = Porcentaje de Vacíos en la mezcla.

Como se puede observar en la Ecuación 10 la capacidad de un pavimento ante la fatiga es función inversamente proporcional de la deformación en la fibra inferior al aplicar la carga estandarizada (9000 lbs) y del módulo resiliente de la mezcla asfáltica. El parámetro k'_1 fue introducido en la Guía AASHTO con el fin de proveer una corrección del efecto de los diversos espesores (h_{ac}) de la capa de asfalto.

Donde para el agrietamiento de abajo hacia arriba se calcula con la *Ecuación N°13*

Ecuación 13

$$k'_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 * h_{ac})}}}$$

Para el agrietamiento de arriba hacia abajo se usa la *Ecuación N°14*

Ecuación 14

$$k'_1 = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{(15.676 - 2.8186 * h_{ac})}}}$$

h_{ac} , es el espesor total de la capa de asfalto.

La función de transferencia final para calcular el agrietamiento de los daños de la fatiga es expresado como:

- Agrietamientos de abajo hacia arriba (% del área total del carril)

Ecuación 15

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C'_1 + C_2 * C'_2 * \log_{10}(D * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right)$$

Dónde:

FC_{bottom} , agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba (% del área del carril)

D, daño por fatiga de abajo hacia arriba

$$C_1 = 1$$

$$C'_1 = -2 * C'_2$$

$$C_2 = 1$$

$$C'_2 = -2.40874 - 39.748 * (1 + h_{ac})^{-2.856}$$

- Agrietamientos de arriba hacia abajo (feet/mile)

Ecuación 16

$$FC_{top} = \left(\frac{1000}{1 + e^{(7.0 - 3.5 * \log_{10}(D * 100))}} \right) * (10.56)$$

Dónde:

FC_{top} = agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo ft/mile.

D = Daño por fatiga de arriba hacia abajo.

Daño acumulado por fatiga.

El concepto de daño acumulado, propuesto por Miner en 1945, se utiliza para predecir el fracturamiento por fatiga. Según este concepto, el número permisible de repeticiones de carga está relacionado con el valor de la deformación por tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica. La cantidad de daño se mide por medio de lo que se denomina relación de daño, que es la relación entre los números de repeticiones esperadas y las permisibles.

El daño por fatiga (D) para la capa asfáltica se estima con la Ecuación N° 17

Ecuación 17

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i}$$

Dónde:

D , daño

T , total número de periodos

n_i , trafico actual para el periodo i

N_i , trafico permitido bajo las condiciones prevalecientes en i .

5.6.2 DEFORMACION PERMANENTE.

La deformación permanente de la estructura del pavimento es igual a la suma individual de la deformación permanente de cada una de las capas, la cual puede ser expresada a través de la siguiente ecuación.

Ecuación 18

$$RD_{Total} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG}$$

Donde:

RD_{AC} , deformación permanente de la carpeta asfáltica.

RD_{GB} , deformación permanente de la Base Granular.

RD_{SG} , deformación permanente de la sub-rasante

5.6.2.1 Deformación permanente de la mezcla asfáltica.

Las cargas repetidas del tránsito generan deformaciones permanentes en la capa asfáltica especialmente durante el periodo de verano debido a que el asfalto es un material que se comporta de una manera elástico lineal a temperaturas bajas y frecuencias de cargas altas, pero a temperaturas mayores presenta propiedades viscosas y plásticas.

La deformación permanente es el deterioro representado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original y es producto de la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga, esta deformación es irrecuperable y conducen a la formación de “ahuellamientos” que comprometen el confort y la seguridad y en consecuencia la calidad de circulación de los usuarios.

En el diseño estructural de los pavimentos se ha orientado a establecer valores límites de las tensiones y deformaciones con el objeto de valorar el periodo de tiempo para el que, bajo determinadas condiciones de sollicitación, resultaran profundidades de huellas compatibles para un nivel de servicio esperado o proyectado. Con este objetivo los métodos de diseño actuales deben adoptar criterios de falla, los cuales se pueden obtener a través de distintos mecanismos como ensayos de laboratorio, pistas de ensayo o análisis de datos de rutas reales conseguido por mediciones periódicas

El procedimiento para estimar la deformación permanente, consiste en establecer para cada material componente de la estructura del camino, y en particular para la subrasante, una ecuación constitutiva entre la deformación residual o plástica y el estado de tensiones aplicados, numero de aplicaciones de la misma y las características intrínsecas del material del tipo:

Ecuación 19

$$\epsilon_{pi} = f(\sigma_{ij}, N, P_{ij})$$

Donde:

ϵ_{pi} , deformación específica permanente

σ_{ij} , estado de tensiones impuesto

N , número de repeticiones de ese estado de tensiones.

P_{ij} , propiedades del material

Modelos matemáticos para el análisis del ahuellamiento de la carpeta asfáltica.

La necesidad de desarrollar metodologías para estimar el ahuellamiento de un pavimento en servicio conduce a vincular el cálculo de tensiones y deformaciones en las distintas capas de la estructura con modelos de comportamiento de la deformación permanente o la velocidad de desarrollo de esta en función del estado de tensiones, número de repeticiones, temperaturas y propiedades del material.

En lo que respecta a los modelos de evolución de la deformación permanente o de la velocidad de acumulación de esta respecto a distintas variables, numerosos modelos han sido propuestos por diferentes investigadores. En muchos casos, estos modelos matemáticos son ecuaciones obtenidas por correlación a partir de resultados de ensayos de laboratorio o análisis de tramos de pavimentos en servicios. El modelo utilizado en esta tesis será el propuesto por la AASHTO 2002 el cual se muestra a continuación:

Ecuación 20

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = a_1 T^{a_2} N^{a_3}$$

Donde:

ϵ_p , deformación plástica acumulada en N repeticiones de carga (in/in).

ϵ_r , deformación resiliente del material asfáltico como una función de las propiedades de la mezcla, temperatura y tiempo de aplicación de las cargas.(in/in).

N, número de repeticiones de carga.

T, temperatura (°F).

a_i, coeficientes de regresión no lineal.

La ecuación resultante de la Guía de Diseño es:

Ecuación 21

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = k_1 * 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244}$$

Dónde:

ϵ_p , deformación plástica acumulada en N repeticiones de carga (in/in).

ϵ_r , deformación resiliente del material asfáltico como una función de las propiedades de la mezcla, temperatura y tiempo de aplicación de las cargas.(in/in). (respuesta de la aplicación de la carga equivalente de 9000 libras en el modelo estructural)

N, número de repeticiones de carga.

T, temperatura (deg F).

El parámetro **k₁** se introdujo para predecir el comportamiento a diferentes profundidades de la capa asfáltica.

Dónde:

Ecuación 22

$$K_1 = (C_1 + C_2 * \text{depth}) * 0.328196^{\text{depth}}$$

Ecuación 23

$$C_1 = -0.1039 * h_{ac}^2 + 2.4868 * h_{ac} - 17.342$$

Ecuación 24

$$C_2 = 0.0172 * h_{ac}^2 - 1.7331 * h_{ac} + 27.428$$

K_1 , es función del espesor total de la capa de asfalto (h_{ac} , in) y la profundidad al punto de cálculo (depth), para verificar la presión de confinamiento a diferentes profundidades.

5.6.2.2 Deformación permanente de las Capas Granulares.

Ecuación 25

$$\delta_a(N) = \beta_{GB} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \varepsilon_v h$$

Dónde:

δ_a = Deformación permanente de la capa. (in)

N = Numero de repeticiones de carga.

ε_0 , ε_r , β y ρ = Propiedades de los materiales.

ε_v = Deformación unitaria vertical promedio en el centro de la capa obtenida del cálculo estructural del modelo multicapa.

h = espesor de la capa (in)

β = factor de calibración dependiente del tipo de capa.

Este modelo representa la forma inicial, sin embargo en el proceso de calibración entre laboratorio y campo, fueron necesarias una serie de modificaciones que permitieran determinar un modelo final razonable y calibrado. Las variables fueron

aproximadas de acuerdo a parámetros estadísticos relacionados con la calibración, y se muestran a continuación:

Ecuación 26

$$\log \beta = -0.61119 - 0.017638 W_c$$

Ecuación 27

$$C_o = \ln \left[\frac{(a_1 E_r^{b_1})}{(a_9 E_r^{b_9})} \right]$$

Ecuación 28

$$\rho = 10^9 \left[\frac{C_o}{(1 - (10^9)^\beta)} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

Ecuación 29

$$\log \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(\rho)^\beta} * a_1 E_r^{b_1}) + (e^{(\rho/10^9)^\beta} * a_9 E_r^{b_9})}{2}$$

Ecuación 30

$$W_c = 51.712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} \right]^{-0.3586 * GWT^{0.1192}}$$

Donde:

W_c = Contenido de Agua, %.

E_r = Modulo Resiliente de la capa (psi)

GWT = Nivel freático, se asume un valor muy alto de 10^8 para eliminar la influencia del nivel freático, debe notarse que existe una asíntota y que a partir de un valor de nivel freático definido (alrededor de 20 pies) el aumentar la profundidad del nivel freático no tiene mayor impacto.

$a_1=0.15$

$b_1=0.0$

$a_9=20.0$

$b_9=0.0$

El modelo final calibrado para la base granular independiente es como sigue:

Ecuación 31

$$\delta_a(N) = \beta_{GB} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \varepsilon_v h$$

Con el factor de calibración Nacional para Estados Unidos de $\beta_{GB} = 1.673$

El modelo calibrado final para la sub-base granular es como sigue

Ecuación 32

$$\delta_a(N) = \beta_{SG} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \varepsilon_v h$$

Con el factor de calibración Nacional para Estados Unidos de $\beta_{SG} = 1.35$

En este estudio se tomo $\beta_{GB}=0,4$ para la base y $\beta_{SG}=0,8$ para la subbase.

5.6.2.3 Deformación permanente de la Sub-rasante.

La deformación permanente para la subrasante está dada por la siguiente expresión según la Guía de Diseño:

Ecuación 33

$$\delta = \varepsilon_{p,z=0} \int_0^{h_{bedrock}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-kh_{bedrock}}}{k} \right) \varepsilon_{p,z=0}$$

Dónde:

δ deformación plástica de la subrasante.

K , Constante obtenida de regresión, usualmente se usa el valor de $1 \times E10^{-6}$

h_{bedrock} , Profundidad hasta el estrato rocoso o donde ya no exista afectación como consecuencia de la carga en feet

$\epsilon_{p,z}$ = Deformación unitaria elástica en la fibra superior de la sub-rasante debido a la aplicación de la carga equivalente. Obtenida a través de análisis estructural.

5.7 Algoritmo para el diseño ME de pavimentos flexibles.

Esta metodología combina aspectos tanto empíricos como mecanicistas. En la parte mecanicista utilizando modelos matemáticos se determina la respuesta del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) ante situaciones “críticas” de cargas y clima, y con la parte empírica se relaciona esta respuesta del pavimento con indicadores observados de comportamiento a través de modelos de deterioros.

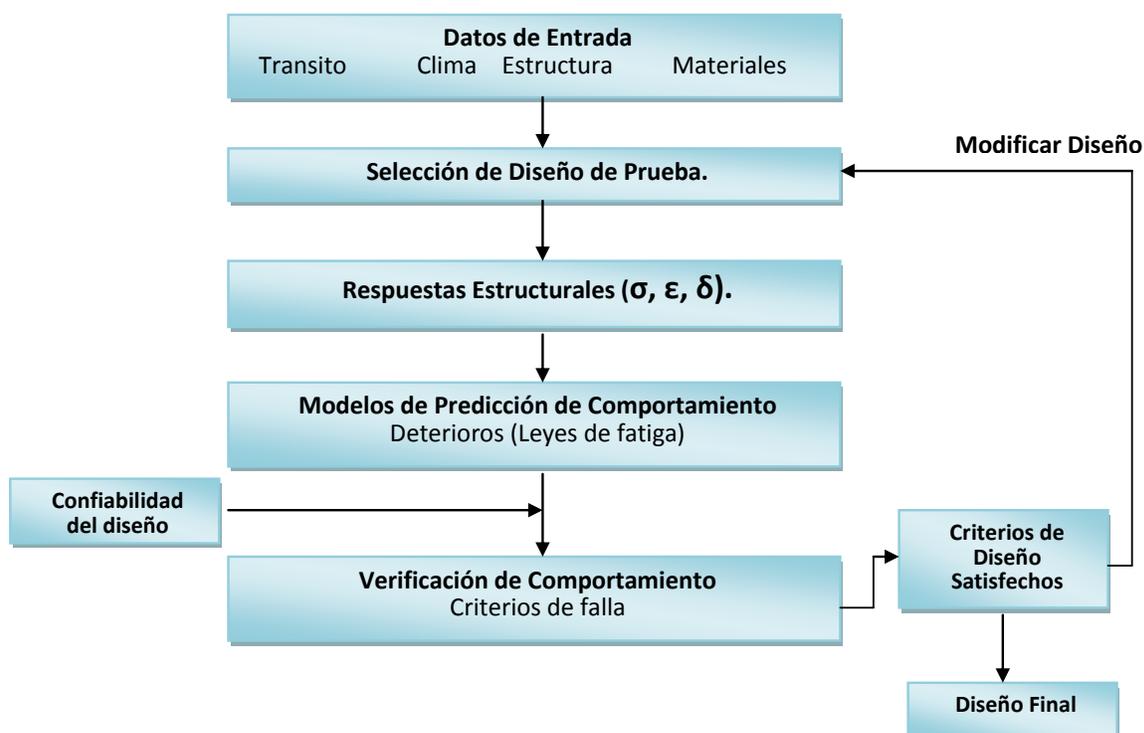


Figura 7 Metodología de Análisis Emperico –Mecanicista (AASHTO 2002)

Para aplicar todas estas consideraciones teóricas del Diseño mecanicista de

pavimentos flexibles, en el caso de Nicaragua, se sugiere realizar revisiones de espesores de secciones típicas diseñadas por medio de la guía AASHTO 93 aplicando estos criterios y calculando las respuestas estructurales (σ , ϵ , δ) a través de un software de multicapa elástica. Luego compararlo con los modelos de deterioro propuestos por la AASHTO 2002 para verificar el desempeño del pavimento de acuerdo al periodo de diseño para el cual se proyectó su vida útil.

Las propiedades de los materiales se retomaran de los estudios realizados para la sección típica de análisis, esto porque el objetivo principal de esta tesis es hacer una modelación mecanicista del pavimento flexible para Nicaragua. En un futuro se tendrá que invertir en la caracterización dinámica de los materiales usados en la pavimentación y obtener una ley de fatiga para las mezclas asfálticas usadas en Nicaragua, así como el módulo dinámico y resiliente de acuerdo a la importancia del proyecto, tomando en cuenta los niveles jerárquicos de obtención de los datos para el diseño Mecanístico emperico propuestos por la AASHTO 2002.

Se sugiere la metodología de análisis mostrada en la figura 8:

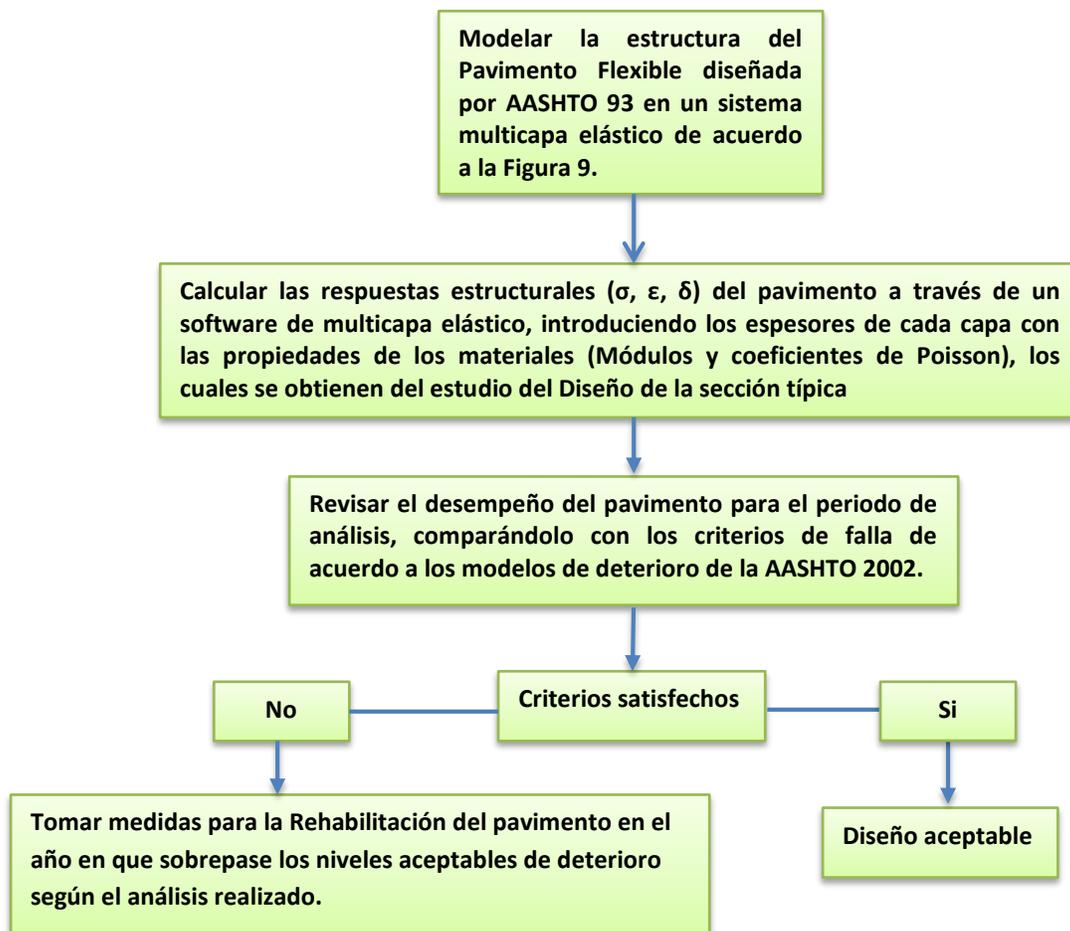


Figura 8 Metodología para Revisión de los espesores de diseño aplicando consideraciones mecanicistas¹⁰

¹⁰ Elaboración propia

5.8 EXPLICACIÓN DE LA MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE PARA EL ANÁLISIS.

El modelo de análisis de la figura 9 se basa en la teoría multicapa elástica en la que se considera que cada una de las capas está caracterizada mecánicamente por su módulo de elasticidad y coeficiente de poisson y cada capa se comportan como un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo. La carga se representa mediante una presión vertical distribuida uniformemente sobre un área circular. Las respuestas de la estructura se obtienen en forma de integrales indefinidas que se resuelven numéricamente, utilizando para ello un programa de computador, en este caso el Evestress.

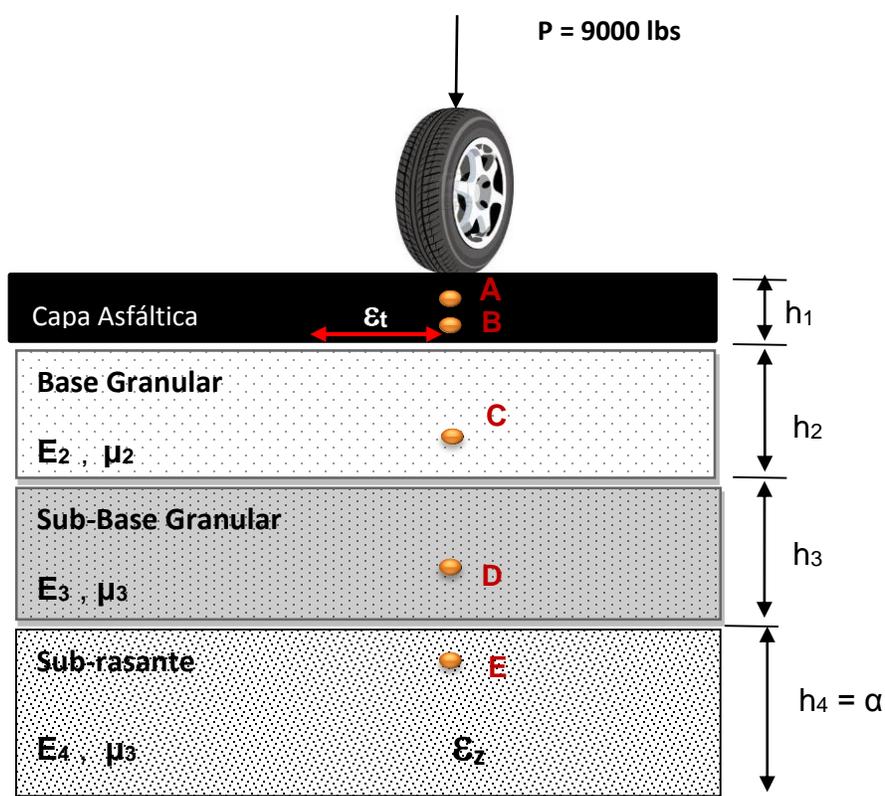


Figura 9. Modelación de la estructura de pavimento flexible para el análisis¹¹.

¹¹ Fuente: Diseño Racional de Pavimentos/ Fredy Alberto Reyes Lizcano-1ra Edición, Bogotá. CEJA. 2003, 586 p.

5.8.1 Número de repeticiones de carga para el análisis.

Con el uso de las computadoras, no es problema considerar el número de repeticiones de carga por cada eje y evaluar su deterioro. El método que consiste en dividir los ejes en grupos ha sido utilizado frecuentemente para el diseño de pavimentos rígidos, sin embargo, su aplicación no se ha extendido a pavimentos flexibles por la naturaleza empírica del diseño y la gran cantidad de tiempo de cálculo que se requiere. Sin embargo, en lugar de analizar los esfuerzos y deformaciones debido a cada grupo de ejes de carga, un procedimiento simplificado y ampliamente aceptado desarrolla factores equivalentes y convierte cada grupo de carga en un eje simple de carga equivalente. (Huang, 1993)

Para el análisis se toma únicamente la carga del eje patrón el cual contempla una carga por eje simple de cuatro ruedas de 8.200 kg (80 KNó 18.000 libras), en este caso la carga se divide entre las dos ruedas y queda únicamente una carga de 9000 lbs a como se ilustra en la Figura 8.

5.8.2 Configuración de los ejes en el pavimento

A continuación se explica el efecto de la configuración de los ejes en el pavimento

- Eje simple: Ensemble de dos o cuatro llantas unidas entre sí por una línea de rotación.



Figura 10. Ejes Simples

- Eje “tándem” (eje doble): Eje conformado por dos líneas de rotación, dotado de una suspensión que permite la compensación de cargas.



Figura 11. Eje “tándem” (eje doble)

- Eje “trídem” (eje triple): eje conformado por tres líneas de rotación, dotado de una suspensión que permite la compensación de cargas.

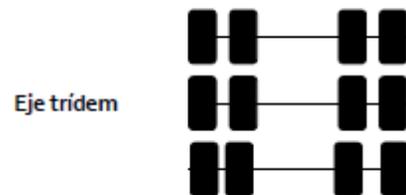


Figura 12. Eje “trídem” (eje triple)



Eje simple

Eje tándem



EJE TRÍDEM

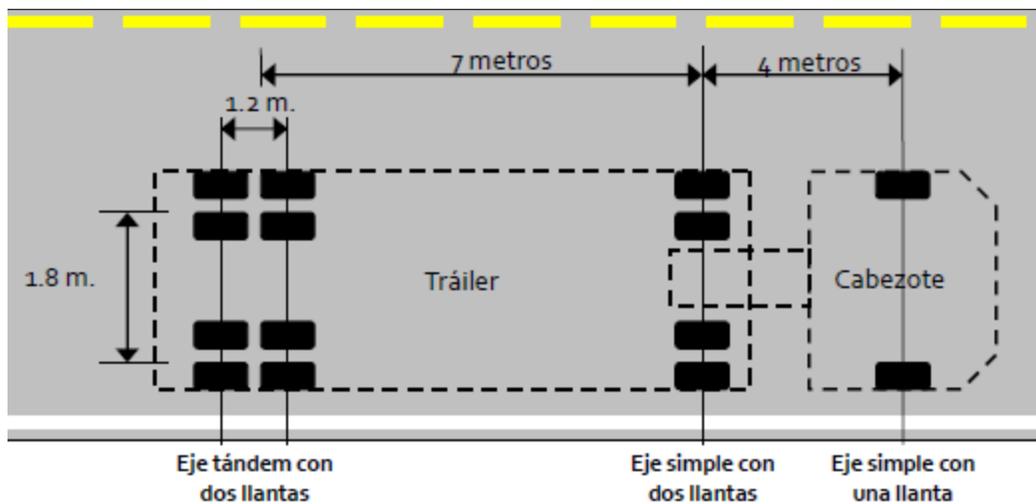


Figura 13 Espaciamento entre llantas de un camión con remolque típico (Adaptado de Huang, 2004).

La separación de 7 y 4 metros mostrada en la Figura 13 no debe tener efecto en el diseño de pavimentos, ya que las ruedas están muy separadas y la influencia en los esfuerzos y deformaciones debe ser considerada independientemente. A menos que sea utilizado un eje sencillo de carga equivalente, la consideración de ejes múltiples no es materia fácil. El diseño puede facilitarse si los ejes tándem y trídem son tratados como un grupo y considerados como una repetición.

5.8.3 Rueda Simple Equivalente

De acuerdo a los métodos de diseño tradicionales el parámetro que se utiliza es el transmitir las cargas a través de los ejes vehiculares (AASHTO), pero las cargas generadas por el peso de los ejes son transmitidas a través de los neumáticos de los vehículos, por tanto, es necesario definir este concepto de rueda simple equivalente.

Las ruedas múltiples disminuyen el valor de la carga impuesta al pavimento, pero no la reducen a una fracción cuyo denominador sea el número de ruedas, así, una rueda simple transmite la carga P , su substitución por ruedas dobles no la reducirá a $P/2$ y mucho menos por un tándem de 4 ruedas a $P/4$.

Esto se da por que existe un cierto grado de superposición de las tensiones provocadas por las diversas ruedas, resultado de ahí que el efecto total de todas las ruedas en conjunto será mayor que el efecto de cada una de las ruedas de ese conjunto.

De hecho supóngase un conjunto de ruedas dobles, hasta cierta profundidad D_1 cada rueda actuará como si estuviera aislada, pues cualquiera que sea la hipótesis admitida para la distribución de las tensiones en el suelo, hasta ahí no habrá superposición de las mismas.

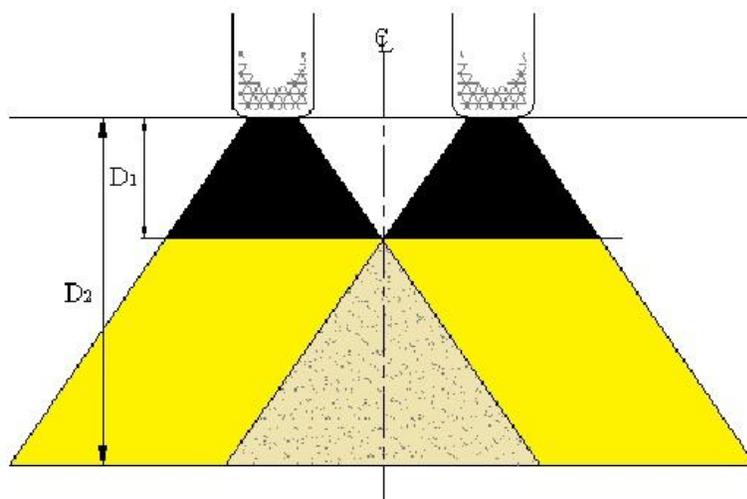


Figura 14. Esquema que muestra como se interrelaciona los esfuerzos que provocan en el pavimento las ruedas dobles¹².

Como a partir de esa profundidad las tensiones comienzan a superponerse, es de proveerse que a otra profundidad D_2 el efecto de dos ruedas será igual al que sería ejercido por una rueda simple, transmitiendo la misma carga del conjunto

Dicho efecto produce una tensión vertical determinada por las ruedas a cada una de las profundidades indicadas.

Por consiguiente el problema es investigar aquella profundidad o espesores donde:
 D_1 = Profundidad hasta la cual la rueda actuaría como una unidad independiente
 D_2 = Profundidad a partir de la cual las dos ruedas producen efectos como si fuese una rueda única.

La conclusión a la que se llegó después de una larga serie de experiencias fue la siguiente:

La profundidad D_1 corresponde a la mitad de la distancia libre entre las ruedas $D_1 = D/2$ es por lo tanto una conformación experimental de la hipótesis simplificadora,

¹² Fuente: "Definición moderna de los parámetros para el Diseño de pavimentos" Hidalgo Felipe. Tesis. Sangolqui Abril 2007)

generalmente aceptada de que las tensiones se distribuyen en el suelo formando un cono cuya generatriz hace con la horizontal un ángulo de 45 grados.

La profundidad D_2 , se verificó que corresponde al doble de las distancias entre los centros de las áreas de contacto $D_2 = 2S$

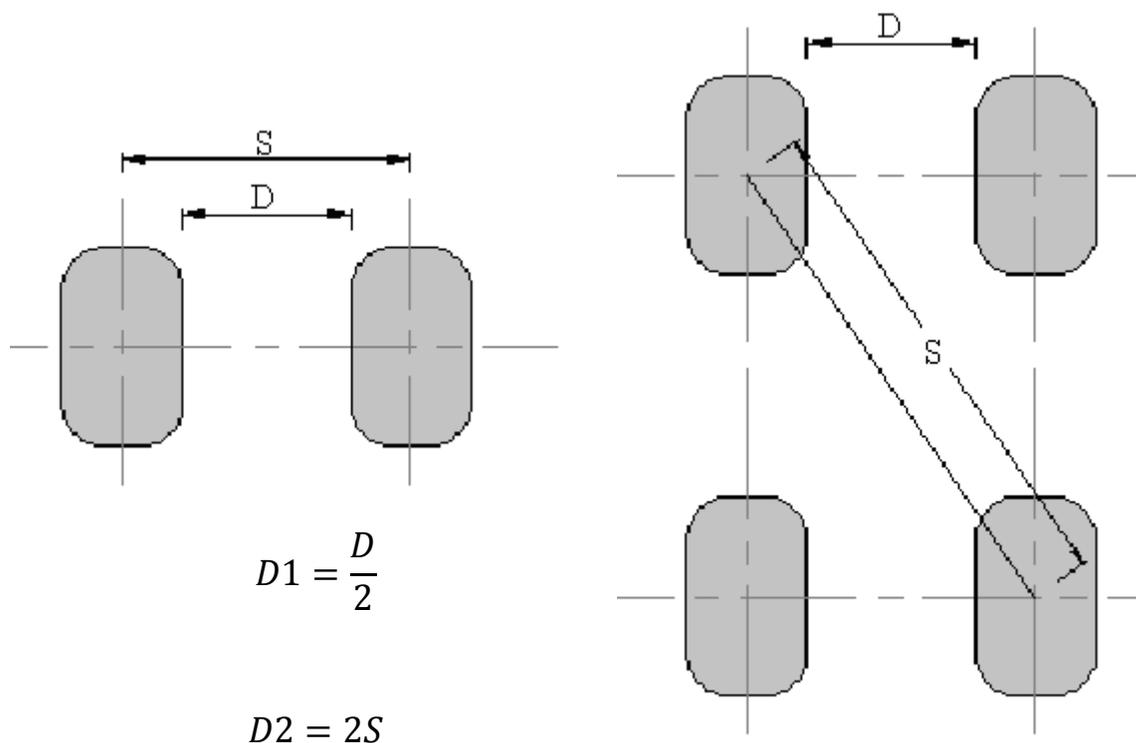


Figura 15. Comparación y relación de las de flexiones determinadas a diferentes profundidades y sus dimensiones en ruedas dobles para ejes simples y tandem¹³

En el caso los ejes tándem 4 ruedas, fue verificado que las mismas expresiones son apreciables, siendo D la distancia libre entre ruedas paralelas pero S ahora es la distancia entre los centros de las áreas de contacto más alejadas (en diagonal).

Para simplificar el problema, se procura traducir el valor de la carga transmitida por los conjuntos de ruedas múltiples con la introducción del concepto de rueda simple equivalente.

¹³ Fuente: "Definición moderna de los parámetros para el Diseño de pavimentos" Hidalgo Felipe. Tesis. Sangolqui Abril 2007)

La rueda simple equivalente a un grupo de dos o más ruedas relativamente próximas, es una rueda simple aislada, que con la misma presión de los neumáticos de las ruedas del grupo, determina en los pavimentos tensiones equivalentes determinadas por el grupo.

En los pavimentos flexibles sólo se consideran las ruedas de la huella exterior pues el ancho del eje (1.8 metros) es suficiente para que los efectos de cada llanta sean independientes entre sí.

5.8.4 Forma geométrica de cada solicitación sobre el pavimento, área de contacto y reparto de presiones sobre la misma

La carga del vehículo al pavimento se transmite a través de las ruedas. En los métodos de diseño mecanicistas, es necesario conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento, asumiendo que la carga de contacto depende de la presión de contacto.

El tamaño del área de contacto depende de la presión de contacto. Como se indica en la Figura 16, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la misma está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión de la llanta deben ser iguales a la fuerza debido a la presión de contacto; la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta para presiones altas de las llantas, debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, en el diseño de pavimentos la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta. Debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, utilizar la presión de llanta como presión de contacto es estar por el lado de la seguridad. (Huang,1993)

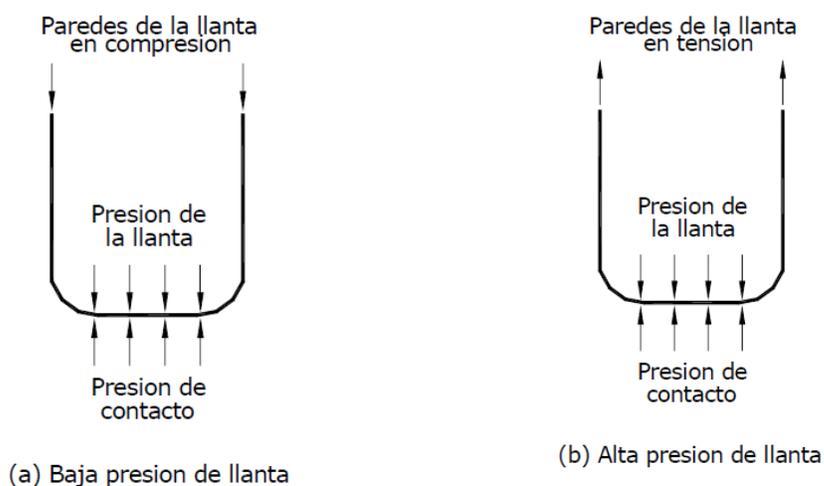


Figura16 Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta¹⁴

5.8.5 Presión de los neumáticos

El área de contacto de la rueda sobre el pavimento depende de la presión del neumático, contrariamente a la que se podría pensar, la presión unitaria transmitida por la rueda al pavimento no es igual a la presión de inflado del neumático, pero es ligeramente mayor. Generalmente se acepta un valor del 10%, este es un factor de corrección igual a 1.1 de la presión de inflado, debido a la rigidez de las paredes laterales del neumático.

Ecuación 34

$$Ac = 0.9 * \frac{P}{\sigma_{inflado}} = \frac{P}{\sigma_c}$$

Ecuación 35

$$Ac = 1.10 * \sigma_{inflado}$$

En la Tabla 5 se presentan valores aproximados de presión de inflado para los tipos de vehículos livianos (automóviles), Pesados (bus, camiones).

¹⁴ Garnica Anguas, Paul y otros. "Mecánica de Materiales para Pavimentos". Instituto Mexicano del Transporte Publicación Técnica No. 197 Sanfandila, Qro, 2002

Tabla 5 Valores aproximados de la presión de inflado para los diferentes tipos de vehículos¹⁵

<i>Tipo de Vehículos</i>	<i>Presión de Inflado</i> σ_{inf} (psi)	<i>Presión de Inflado</i> σ_{inf} (Kg/cm ²)	<i>Presión de Contacto</i> σ_c (Kg/cm ²)
Automóvil	30	2.10	2.00 – 3.00
Bus	80	5.60	5.00 – 6.50
Camión	110	7.70	7.00 – 8.50

Cuando se utiliza la teoría multicapas en el diseño de pavimentos flexibles, se asume que cada llanta tiene un área de contacto de forma circular. Esta suposición no es correcta, pero el error en que incurre no es significativo. Para el análisis se usó una presión de contacto igual a 110 psi debido a que obedece al camión de diseño.

El diseño, análisis y evaluación estructural de las condiciones de los pavimentos comúnmente se basan en el análisis de la teoría elástica multicapas; este acercamiento ofrece la posibilidad de una solución racional al problema de diseño. El éxito de esta aproximación depende de la precisión y la manera en que las propiedades de los materiales son evaluadas y utilizadas.

El acercamiento mecanicista en el diseño involucra el análisis teórico y el cálculo de esfuerzos y deformaciones en lugares críticos, como resultado de las aplicaciones de carga originadas por las ruedas cargadas.

¹⁵ Fuente: "Definición moderna de los parámetros para el Diseño de pavimentos" Hidalgo Felipe. Tesis. Sangolqui Abril 2007

5.8.6 Lugares críticos de análisis en el modelo multicapa¹⁶

El modelo de la figura 9 muestra los lugares críticos de análisis, en los cuales se calcula la respuesta estructural a través del software de multicapa elástico Everstress. En la Tabla 6 se explica mejor la razón de porque se emplea esa ubicación en el análisis.

Tabla 6 Lugares críticos de análisis en el modelo multicapa

Ubicación	Respuesta	Razón de su empleo
Punto medio de la capa de mezcla asfáltica en caliente (A)	Deformación vertical de compresión (ϵ_z)	Empleada para predecir la falla por ahuellamiento en la carpeta asfáltica
Fondo de la capa de mezcla asfáltica en caliente. (B)	Deformación horizontal (ϵ_x , ó ϵ_y)	Empleada para predecir la falla por fatiga en la mezcla asfáltica en caliente
Parte media de una capa intermedia ya sea la base o sub-base (C, D)	Deformación vertical de compresión (ϵ_z)	Empleada para predecir la falla por ahuellamiento en la base o la sub-base
Parte superior de la Subrasante (E)	Deformación vertical de compresión (ϵ_z)	Empleada para predecir la falla por ahuellamiento en la sub-rasante

En el siguiente capítulo se muestran algunos ejemplos de cálculo de secciones típicas diseñadas por AASHTO 93.

¹⁶ Fuente: Diseño Racional de Pavimentos/ Fredy Alberto Reyes Lizcano-1ra Edición, Bogotá. CEJA. 2003, 586 p.

5.9 Ejemplos de análisis de secciones típicas de diseño.

En esta tesis se presentan modelaciones mecánicas de 4 secciones de pavimento localizadas en nuestro país. El análisis se enfoca en la evaluación del desempeño bajo la llanta de un eje equivalente de 18,000 libras. Para esto se tomó como base el Informe de Diseño de Pavimento para el tramo Acoyapa - San Carlos realizado en Febrero de 2007.

Los tramos a analizar son los siguientes:

Tramo 1: Lovago – Pájaro Negro

Sub-tramo I:	Empalme de Lovago-Acoyapa
Subtramo II:	Acoyapa – Pájaro Negro

Tramo 2: Pájaro Negro – San Carlos.

Sub-tramo I:	Pájaro Negro- La Argentina
Subtramo II:	La Argentina – San Carlos

Estos tramos se diseñaron por medio de la metodología AASHTO 93, se obtuvieron resultados de espesores de capas según la cantidad de ejes equivalentes estimados por la empresa consultora que realizó el estudio y el diseño. A continuación se muestra los resultados que se obtuvieron en el diseño.

5.9.1 TRAMO 1: LOVAGO – PÁJARO NEGRO

5.9.1.1 Sub-Tramo I: “Empalme Lovago - Acoyapa”

Datos de la Sección a analizar:

PROYECTO: ACOYAPA - SAN CARLOS
 Tramo I : Lovago - Pájaro Negro
 Sub-Tramo I : Empalme Lovago - Acoyapa
 ESAL'S DE DISEÑO = 7,360,000.00

Tabla 7 Propiedades y espesores del Tramo I, Sub-Tramo I : Empalme de Lovago-Acoyapa

Capa	Coefficiente de Poisson's	Espesor (in)	Modulos (psi)
Carpeta asfáltica	0.35	2.00	296,668.00
Base Granular	0.35	9.10	30,100.00
Sub-base	0.40	9.85	17,900.00
Subrasante	0.45	*	12,250.00

Modelo estructural de análisis para Tramo I Lovago - Pájaro Negro, Sub-tramo I
Empalme Lovago - Acoyapa

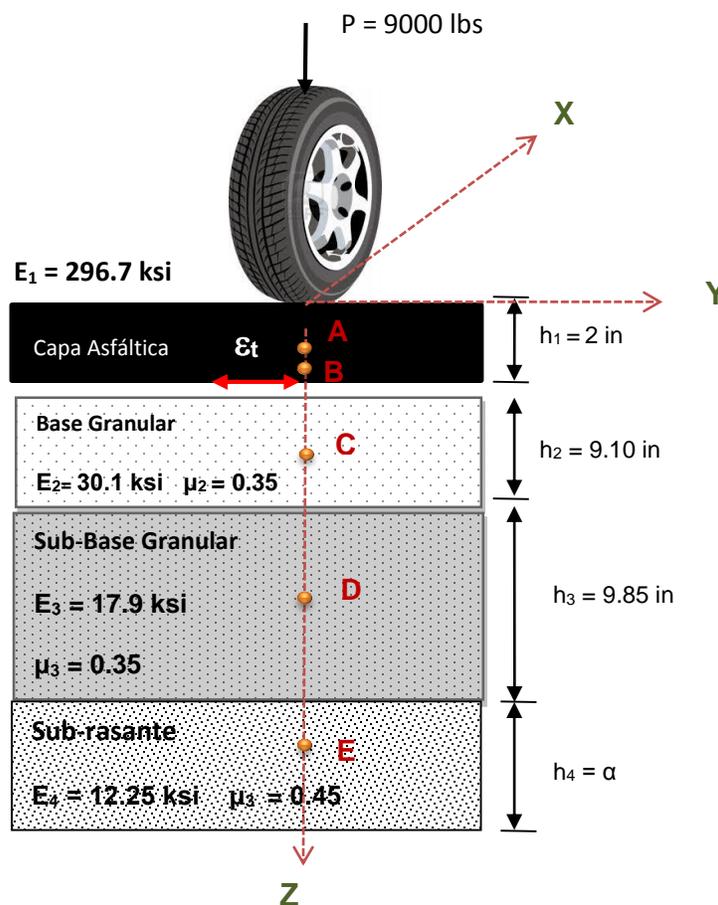


Figura 17. Modelo estructural de análisis Tramo I, sub-Tramo I.

A partir de estos datos se procedió a realizar el análisis utilizando el software de análisis multicapa elástico Everstress. Este análisis tiene como premisa la evaluación de la carga de una de las 2 llantas de un eje de 18,000 libras (9,000 libras) distribuida en una superficie de contacto circular de 5 pulgadas de diámetro.

- *Presión de inflado = 110 psi*
- *Carga del neumático = 9,000 libras*

Se pretende recolectar parámetros mecánicos tales como esfuerzos normales y principales, esfuerzos cortantes, deformaciones y desplazamientos. Además, se

pretende recolectar información en diversos puntos de la estructura, la figura 1 ejemplifica los puntos de interés.

5.9.1.1.1 Puntos de análisis en la Sección del pavimento.

Para el análisis en el software multicapa elástico Everstres tenemos las ubicaciones que se indican en la Tabla 8:

Tabla 8. Puntos de análisis para el Tramo I, Sub-tramo I

Profundidad z (in)	
Punto	Tramo 1: Lovago – Pájaro Negro
A	1.00
B	1.99
C	6.55
D	16.03
E	20.96

5.9.1.1.2 Resultados del análisis con el software multicapa

Los Resultados del análisis con el software multicapa Everstress se muestran en la Tabla 9

Tabla 9. Tensiones y deformaciones normales obtenidas del análisis multicapa con Evestress para el Tramo I, Sub-Tramo I.

TENSIONES Y DEFORMACIONES NORMALES							
Z-profundidad (in)	Capa *	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (mils)	Uy (mils)	Uz (mils)
1	1	-58.65	-58.65	-147.39	0	0	33.288
1.99	1	495.1	495.1	-712.38	0	0	32.864
6.55	2	490.97	490.97	-1359.38	0	0	24.377
16.03	3	265.97	265.97	-612.6	0	0	15.727
20.96	3	219.78	219.78	-490.21	0	0	13.196

5.9.1.1.3 Respuestas Estructurales

Las respuestas Estructurales obtenidas para el Tramo I, Sub-tramo I “Empalme de Lovago – Acoyapa” se muestran en la Tabla 10

Tabla 10. Respuestas estructurales obtenidas con Everstress Tramo I, Sub-tramo I “Lovago – Acoyapa”

Punto	Z-profundidad (in)	Capa	ϵ_v (10^{-6})	ϵ_h (10^{-6})
A	1.00	Carpeta asfáltica	-147.39	-
B	1.99	Carpeta asfáltica	----	495.1
C	6.55	Base Granular	-1359.38	-
D	16.03	Sub-base	-612.6	-
E	20.96	Sub-rasante	-490.21	-

5.9.1.1.4 Calculo de N_f para producir la Fatiga de la carpeta asfáltica

Para calcular el número de repeticiones para que se produzca la fatiga de abajo hacia arriba en la carpeta asfáltica se hace uso de la Ecuación 10 y Ecuación 11

$$N_f = 0.00432 * k'_1 * C \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281} \quad (\text{Ecuación 10})$$

k'_1 para el agrietamiento de abajo hacia arriba calcula con la Ecuación 13.

$$k'_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 * \text{hac})}}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$k_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 * 2)}}} = 2172.54$$

El factor C se calcula de acuerdo a la Ecuación No.12 :

Se asume los siguientes valores para el análisis

$$V_b = 11\%$$

$$V_a = 5\%$$

$$C = 10^{4.84 * \left(\frac{V_b}{V_b + V_a} - 0.69\right)} = 10^{4.84 * \left(\frac{11}{11+5} - 0.69\right)} = 0.97$$

$$N_f = 0.00432 * 2172.54 * 0.97 * \left(\frac{1}{495.1 E - 6}\right)^{3.9492} \left(\frac{1}{296,668}\right)^{1.281} = 10,085,378$$

El daño por fatiga (D) para la capa asfáltica se estima con la Ecuación N° 17

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Dónde:

D, daño

T, total número de periodos

n_i, trafico actual para el periodo i

N_i, trafico permitido bajo las condiciones prevalecientes en i.

Del estudio de tráfico se tiene la información para realizar el cálculo de daño por fatiga:

Para el Primer año de servicio $n_i = 163,742$ y $N = 10,085,378$

$$D_1 = \frac{163,742}{10,085,378} = 0.0162 = 1.62\%$$

Con esta información es posible calcular las funciones de transferencia, la primera representada con la Ecuación número 15 y que corresponde al porcentaje de agrietamiento, de la forma:

$$FC_{\%} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 C_1' + C_2 C_2' * \log_{10}(D * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) = \left(\frac{6000}{1 + e^{(1 * -2 + 1 * -2.56 * \log_{10}(0.0162 * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right)$$

$$= 0.0069 = 1.62\%$$

Tabla 11 Daño Relativo acumulado y %FC para Tramo I, Sub-Tramo I

$N_f = 10,085,378$ $N_{diseño} = 7,360,000$							
N°	Año	TPDA	ESALS	ESALS Acumulado	Daño Relativo	Daño Relativo Acumulado	%FC
1	2006	978.00	163,742	163,742	1.62%	1.62%	0.45
2	2007	2,010.00	172,783	336,524	1.71%	3.34%	1.62
3	2008	3,101.00	182,661	519,185	1.81%	5.15%	3.47
4	2009	4,383.00	214,639	733,823	2.13%	7.28%	6.27
5	2010	5,723.00	224,349	958,173	2.22%	9.50%	9.75
6	2011	7,124.00	234,562	1192,735	2.33%	11.83%	13.80
7	2012	8,587.00	244,943	1437,678	2.43%	14.26%	18.29
8	2013	10,119.00	256,495	1694,173	2.54%	16.80%	23.11
9	2014	11,720.00	268,047	1962,220	2.66%	19.46%	28.12
10	2015	13,392.00	279,934	2242,155	2.78%	22.23%	33.20
11	2016	15,144.00	293,328	2535,483	2.91%	25.14%	38.26
12	2017	16,978.00	307,057	2842,540	3.04%	28.18%	43.21
13	2018	18,900.00	321,791	3164,331	3.19%	31.38%	47.98
14	2019	20,910.00	336,524	3500,855	3.34%	34.71%	52.52
15	2020	23,016.00	352,597	3853,452	3.50%	38.21%	56.78
16	2021	25,223.00	369,507	4222,959	3.66%	41.87%	60.76
17	2022	27,537.00	387,421	4610,380	3.84%	45.71%	64.45
18	2023	29,966.00	406,675	5017,056	4.03%	49.75%	67.84
19	2024	32,506.00	425,259	5442,315	4.22%	53.96%	70.94
20	2025	35,171.00	446,187	5888,502	4.42%	58.39%	73.77
21	2026	37,963.00	467,450	6355,953	4.63%	63.02%	76.34
22	2027	40,892.00	490,388	6846,340	4.86%	67.88%	78.66
23	2028	43,960.00	513,660	7360,000	5.09%	72.98%	80.76
			7360,000				

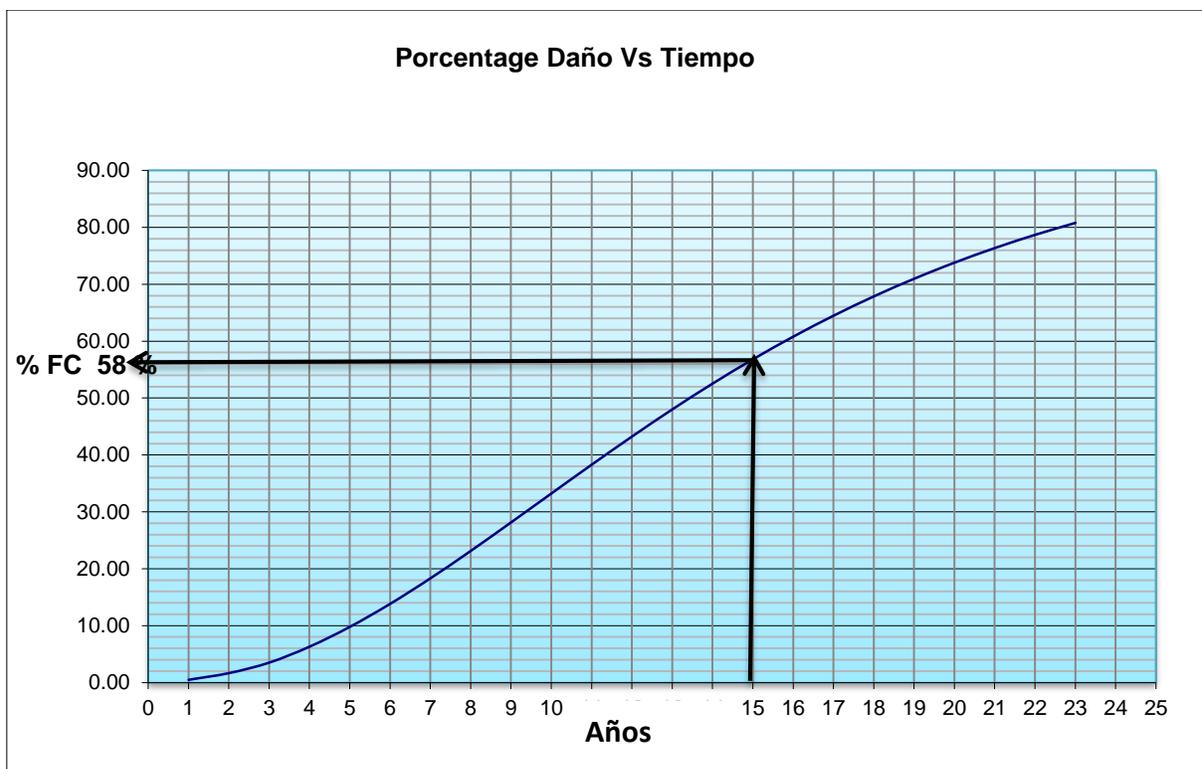


Figura 18. Porcentaje de daño & tiempo para el Tramo I, Sub-Tramo I Empalme de Lovago-Acoyapa.

Como se aprecia en el Figura 18, en el año 15 se alcanza un 58% de daño por agrietamiento de fatiga para el pavimento, en otras palabras el 58% del total del área del carril está agrietada.

5.9.1.1.5 Ahuellamiento de la carpeta asfáltica

Para calcular el Ahuellamiento de la carpeta asfáltica se hace uso de la ecuación número 21

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 * 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244} \quad (\text{Ecuacion 21})$$

$$K_1 = (C_1 + C_2 * \text{depth}) * 0.328196^{\text{depth}}$$

$$C_1 = -0.1039 * h_{ac}^2 + 2.4868 * h_{ac} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172 * h_{ac}^2 - 1.7331 * h_{ac} + 27.428$$

$$C_1 = -0.1039 * (2)^2 + 2.4868 * 2 - 17.342 = -12.78$$

$$C_2 = 0.0172 * (2)^2 - 1.7331 * 2 + 27.428 = 24.03$$

$$K_1 = (-12.78 + 24.03 * 1) * 0.328196^1$$

$$K_1 = 3.69$$

5.9.1.1.6 Corrección de la Temperatura del Pavimento de Acuerdo a la Temperatura del Aire.

De acuerdo al Departamento de Ingeniería Civil y Arquitectura de la Universidad de Wyoming, la temperatura crítica del pavimento, localizada a 20mm de profundidad está dada por la ecuación (Yavuzturk & Ksaibati, 2002):

$$T_{20\text{ mm}} = (T_{\text{aire máx}} - 0.00618 \text{ Lat}^2 + 0.2289 \text{ Lat} + 42.2) (0.9545) - 17.78$$

Donde: $T_{20\text{ mm}}$ = Temperatura Crítica, Lat = Latitud., T_{aire} = Temperatura promedio del aire.

De acuerdo a la Información de la estación meteorológica San Carlos, se tiene que la temperatura máxima del aire es de 38.6 °C con una latitud de 11.128333 °C

$$T_{20\text{ mm}} = (38.6 - 0.00618 (11.128333)^2 + 0.2289 (11.128333) + 42.2) (0.9545) - 17.78$$

$$T_{20\text{ mm}} = 61.0 \text{ °C} = 141.8 \text{ °F}$$

En la Tabla 12 se muestra las temperaturas que pueden ser tomadas de acuerdo a la ubicación del proyecto que se esté analizando.

Tabla 12 Temperatura Intermedia del pavimento¹⁷.

ESTACIÓN	TEMPERATURA INTERMEDIA DEL PAVIMENTO T = (T aire máx - 0.00618 Lat2 + 0.2289 Lat + 42.2) (0.9545) -17.78.	MÀXIMA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO T = (T aire máx - 0.00618 Lat2 + 0.2289 Lat + 42.2) (0.9545) -17.78.
AEROPUERTO INTERNACIONAL	37.6	62.2
CAMPOS AZULES / MASATEPE	38.1	58.1
CORINTO II / CORINTO	40.0	62.0
INGENIO XAVIER GUERRA BAEZ / NANDAIME	41.3	60.5
BLUEFIELDS / BLUEFIELDS	39.6	61.6
PUERTO CABEZAS II / PUERTO CABEZAS II	39.7	60.7
SAN CARLOS / SAN CARLOS	40.1	61.0
CHINANDEGA / CHINANDEGA	36.0	62.8
CONDEGA / CONDEGA	33.7	61.5
JINOTEGA / JINOTEGA	34.9	55.5
JUIGALPA / JUIGALPA	38.2	61.7
LEON (AEROP.GODOY) / LEON	38.2	62.4
MASAYA (L. OXIDACION) / MASAYA (L. OXIDAC	39.7	59.4
MUY MUY / MUY MUY	37.3	62.2
OCOTAL / OCOTAL	33.7	61.5
RAUL GONZALEZ / SAN ISIDR	35.2	60.1
RIVAS / RIVAS	42.5	58.8

Con base con la Ec.20, y para $\epsilon_r = 147 \times 10^{-6}$

$$\epsilon_p = 1.47e - 4 * 3.69 * 10^{-3.51108} 141.8^{1.56067} 7,360,000^{0.479244}$$

$$\epsilon_p = 0.86 \text{ in}$$

¹⁷ **Fuente:** Tesis “Determinación del Tipo de Cemento Asfáltico por grado de desempeño (PG) SUPERPAVE, para Nicaragua” Ing. Sergio Navarro e Ing. Ricardo Arauz

5.9.1.1.7 Deformación Permanente Base y Sub-base del Tramo I, Sub-Tramo I “Lovago – Acoyapa”

Para este cálculo se hace uso de las ecuaciones número 24, 25, 26, 27, 28 y 29

$$\delta_a(N) = \beta_1 \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \varepsilon_v h$$

Parámetros de ajustes.

$$W_c = 51.712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} \right]^{-0.3586 * GWT^{0.1192}}$$

GWT= Nivel freático, se asume un valor muy alto de 10^8 para eliminar la influencia del nivel freático

Con $E_r = 30,100$ psi para la base y un $E_r = 17,900$ psi para la sub-base se obtiene para ambos un $W_c = 0.0$

$$\log \beta = -0.61119 - 0.017638 W_c$$

$$\beta = 10^{-0.61119 - 0.017638 W_c} = 0.24$$

$$C_o = \ln \left[\frac{(a_1 E_r^{b_1})}{(a_9 E_r^{b_9})} \right]$$

$$a_1 = 0.15$$

$$b_1 = 0$$

$$a_9 = 20$$

$$b_9 = 0$$

$$C_o = -4.89285$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{C_o}{(1 - (10^9)^\beta)} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{-4.89285}{(1 - (10^9)^{0.24})} \right]^{\frac{1}{0.24}} = 672.97$$

$$\log \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(\rho)^\beta} * a_1 E_r^{b_1}) + (e^{(\rho/10^9)^\beta} * a_9 E_r^{b_9})}{2}$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = 20.31 \text{ tanto para la base como la subbase}$$

Realizando los cálculos en Hoja de Excel, la cual forma parte de los anexos se tiene los siguientes resultados

$$\delta_a(N) \text{ base} = 0.091 \text{ in}$$

$$\delta_a(N) \text{ Sub_base} = 0.088 \text{ in}$$

5.9.1.1.8 Deformación Permanente de la Sub-rasante del Tramo I, Sub-Tramo I "Lovago – Acoyapa"

Para este cálculo se hace uso de la ecuación número 32

$$\delta = \varepsilon_{p,z=0} \int_0^{h_{bedrock}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-kh_{bedrock}}}{k} \right) \varepsilon_{p,z=0}$$

Parámetro	Valor
k =	1.00E-06
h-hasta roca =	96.00
$\epsilon_{p,z=0}$ =	4.90E-04
RD Sub-rasante =	0.047 in

5.9.1.1.9 Deformación Permanente Total del Tramo I, Sub-Tramo I “Lovago – Acoyapa”

Finalmente, se procede a calcular la deformación permanente total, sumando los valores correspondientes a las deformaciones permanentes de cada capa, de acuerdo a la ecuación 17 de la forma:

$$PD_{Total} = PD_{CA} + PD_{CG} + PD_{SR} = 0.86 + 0.091 + 0.088 + 0.047 = 1.09in$$

Para determinar si el valor de deformación permanente calculado se encuentra en un rango aceptable, hacemos uso de los criterios sugeridos por AASHTO según las tablas 13 y 14.

Tabla 13: Valores Límite de Deformación Permanente de acuerdo al nivel de Severidad- AASHTO

Severidad	Deformación D (pulg.)
Baja	0.25<D<0.5
Media	0.5<D<1
Alta	D>1

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

Tabla 14 : Valores Límite de Deformación Permanente de acuerdo al Tipo de Carretera - Federal Highway Administration.

Tipo de Carretera	Deformación Máxima (in)
Interestatal	0.4
Primaria	0.5
Otras	0.65

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

Para esta sección del Tramo I, Sub-Tramo I “Lovago – Acoyapa” podemos decir que anda en un rango de severidad alta $D > 1$

5.9.2 Sub-Tramo II: “Acoyapa – Pájaro Negro”

<u>PROYECTO:</u>	<u>ACOYAPA - SAN CARLOS</u>
Tramo I :	Lovago - Pájaro Negro
Sub-Tramo II :	Acoyapa - Pájaro Negro
<u>ESAL'S DE DISEÑO =</u>	<u>4,450,000.00</u>

Tabla 15 Propiedades y espesores del Tramo I, Sub-Tramo II : Acoyapa-Pájaro Negro.

Capa	Radio de Poisson's	Espesor (in)	Modulos (psi)
Carpeta	0.35	2.00	296,668.00
Base	0.35	9.85	30,100.00
Subbase	0.40	11.10	17,900.00
Subrasante	0.45	*	8,200.00

Moldeo de análisis multicapa elástico

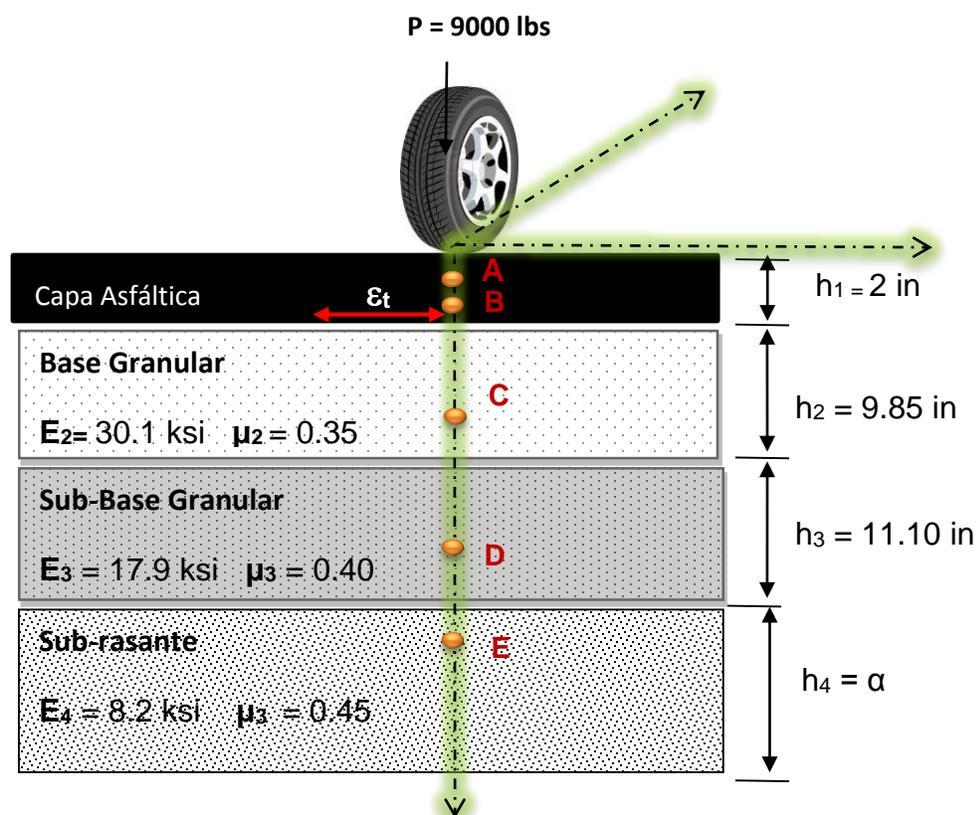


Figura 19 . Modelo estructural de análisis Tramo I, sub-Tramo II Acoyapa-Pájaro Negro

5.9.2.1 Puntos de análisis en la Sección del pavimento. Tramo I, Sub-Tramo II: “Acoyapa – Pájaro Negro”

Tabla 16. Puntos de análisis para el Tramo I, Sub-tramo II

Profundidad z (in)	
Punto	Tramo 1: Lovago – Pájaro Negro
A	1.00
B	1.99
C	6.93
D	17.40
E	22.96

5.9.2.2 Resultados del análisis con el software multicapa Everstress para el Tramo I, Sub-tramo II “Acoyapa– Pájaro Negro”

Tabla 17. Tensiones y Deformaciones Normales del análisis multicapa con Everstress. Tramo I, Sub-tramo II “Acoyapa– Pájaro Negro”

TENSIONES Y DEFORMACIONES NORMALES							
Z-profundidad (in)	Capa *	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (mils)	Uy (mils)	Uz (mils)
1	1	-65.17	-65.17	-140.46	0	0	36.761
1.99	1	487.95	487.95	-704.91	0	0	36.345
6.93	2	466.3	466.3	-1281.84	0	0	27.37
17.40	3	244.36	244.36	-527.67	0	0	18.782
22.96	3	235.53	235.53	-523.27	0	0	16.262

5.9.2.3 Respuestas Estructurales obtenidas para el Tramo I, Sub-tramo II
“Acoyapa –Pájaro Negro”

Tabla 18. Respuestas estructurales obtenidas con Everstress Tramo I, Sub-tramo II
“Acoyapa– Pájaro Negro”

Punto	Z-profundidad (in)	Capa	ϵ_v (10^{-6})	ϵ_h (10^{-6})
A	1.00	Carpeta asfáltica	-140.46	-
B	1.99	Carpeta asfáltica	----	487.95
C	6.93	Base Granular	-1281.84	-
D	17.40	Sub-base	-527.67	-
E	22.96	Sub-rasante	-523.27	-

5.9.2.4 Calculo de N_f para producir la Fatiga de la carpeta asfáltica del Tramo I, Sub-Tramo I “Lovago – Acoyapa”

Aplicando las mismas ecuaciones que se usaron para el análisis de la Sección del Tramo I, Sub-Tramo I, se obtiene:

$$k_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 * 2)}}} = 2172.54$$

$$N_f = 0.00432 * 2172.54 * 0.97 * \left(\frac{1}{487.95 E - 6}\right)^{3.9492} \left(\frac{1}{296,668}\right)^{1.281} = 10,681,732$$

Del estudio de tráfico se tiene la información para realizar el cálculo de daño por fatiga:

Para el Primer año de servicio $n_i = 70,131$ y $N = 10,681,732$

$$D_1 = \frac{70,131}{10,681,732} = 0.0066 = 0.66\%$$

Con esta información es posible calcular las funciones de transferencia, la primera representada con la ecuación número 15 y que corresponde al porcentaje de agrietamiento,

de la forma:

$$FC\% = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 C_1' + C_2 C_2' * \log_{10}(D * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) = \left(\frac{6000}{1 + e^{(1 * -2 + 1 * -2.56 * \log_{10}(0.0066 * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right)$$

$$= 0.09\%$$

Tabla 19 Daño Relativo acumulado y %FC para Tramo I, Sub-Tramo II

$N_r = 10,681,732$ $N_{\text{diseño}} = 4,450,000$							
N°	Año	TPDA	ESALS	ESALS Acumulado	Daño Relativo	Daño Relativo Acumulado	%FC
1	2006	486.00	70,131	70,131	0.66%	0.66%	0.09
2	2007	993.00	73,161	143,292	0.68%	1.34%	0.32
3	2008	1,521.00	76,192	219,484	0.71%	2.05%	0.69
4	2009	2,394.00	125,976	345,460	1.18%	3.23%	1.54
5	2010	3,261.00	125,110	470,570	1.17%	4.41%	2.65
6	2011	4,186.00	133,480	604,050	1.25%	5.65%	4.08
7	2012	5,160.00	140,551	744,601	1.32%	6.97%	5.84
8	2013	6,193.00	149,064	893,665	1.40%	8.37%	7.92
9	2014	7,272.00	155,702	1049,368	1.46%	9.82%	10.29
10	2015	8,406.00	163,639	1213,007	1.53%	11.36%	12.95
11	2016	9,604.00	172,874	1385,881	1.62%	12.97%	15.90
12	2017	10,870.00	182,687	1568,568	1.71%	14.68%	19.10
13	2018	12,205.00	192,644	1761,212	1.80%	16.49%	22.52
14	2019	13,612.00	203,034	1964,245	1.90%	18.39%	26.12
15	2020	15,106.00	215,588	2179,833	2.02%	20.41%	29.88
16	2021	16,682.00	227,421	2407,254	2.13%	22.54%	33.74
17	2022	18,352.00	240,985	2648,239	2.26%	24.79%	37.67
18	2023	20,127.00	256,137	2904,376	2.40%	27.19%	41.64
19	2024	22,010.00	271,722	3176,098	2.54%	29.73%	45.58
20	2025	24,015.00	289,326	3465,424	2.71%	32.44%	49.48
21	2026	26,144.00	307,220	3772,644	2.88%	35.32%	53.29
22	2027	28,416.00	327,855	4100,499	3.07%	38.39%	56.99
23	2028	30,838.00	349,501	4450,000	3.27%	41.66%	60.54
			4450,000				

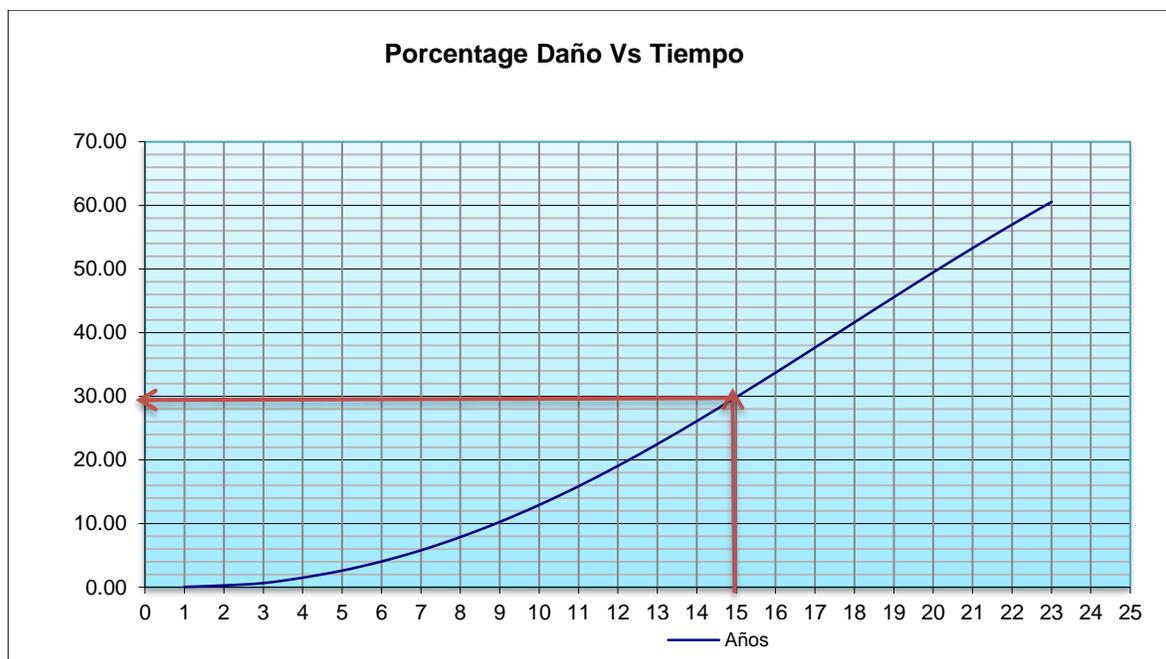


Figura 20. Porcentaje de daño & tiempo para el Tramo I, Sub-Tramo II Acoyapa – Pajaro Negro.

Como se aprecia en el Figura 20, en el año 15 se alcanza un 30% de daño por agrietamiento de fatiga para el pavimento, en otras palabras el 30% del total del área del carril está agrietada.

Utilizando la Hoja de Cálculo Excel se procedió a calcular las deformaciones permanentes de cada capa dando como resultado lo siguiente:

5.9.2.5 Ahuellamiento de la carpeta asfáltica del Tramo I, Sub-Tramo II “Acoyapa-Pajaro Negro”

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 * 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244}$$

Como se trata de un mismo tramo, la temperatura a usar para el Ahuellamiento de la carpeta asfáltica es la misma que se calculó anteriormente la cual es de $T_{20\text{ mm}} = 61.0\text{ °C} = 141.8\text{ °F}$

$$\varepsilon_p = 1.40e - 4 * 3.69 * 10^{-3.51108} 141.8^{1.5606} 4,450,000^{0.479244}$$

$$\varepsilon_p = 0.65 \text{ in}$$

5.9.2.6 Deformación Permanente Base y Sub-base del Tramo I, Sub-Tramo II, "Acoyapa - Pajaro Negro"

Realizando los cálculos en Hoja de Excel, la cual forma parte de los anexos se tiene los siguientes resultados

$$\delta_a(N) \text{ base} = 0.091 \text{ in}$$

$$\delta_a(N) \text{ Sub_base} = 0.085 \text{ in}$$

5.9.2.7 Deformación Permanente de la Sub-rasante del Tramo I, Sub-Tramo II "Acoyapa-Pájaro Negro"

$$\delta = \varepsilon_{p,z=0} \int_0^{h_{bedrock}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-kh_{bedrock}}}{k} \right) \varepsilon_{p,z=0}$$

Parámetro	Valor
k =	1.00E-06
h-hasta roca =	96.00
$\varepsilon_{p,z=0}$ =	5.23E-04
RD Sub-rasante	
=	0.050 in

5.9.2.8 Deformación Permanente Total del Tramo I, Sub-Tramo II “Acoyapa-Pájaro Negro”

Finalmente, se procede a calcular la deformación permanente total, sumando los valores correspondientes a las deformaciones permanentes de cada capa, de acuerdo a la ecuación 17 de la forma:

$$PD_{Total} = PD_{CA} + PD_{CG} + PD_{SR} = 0.65 + 0.091 + 0.085 + 0.050 = 0.87in$$

Para esta sección de pavimento podemos decir que anda en un rango de severidad media $0.5 < D < 1$.

NOTA:

PARA EL ANALISIS DE LAS SECCIONES DEL TRAMO II, “PAJARO NEGRO-SAN CARLOS” SE USO LA MISMA METODOLOGIA Y LA HOJA DE CALCULO DE EXCEL, LOS RESULTADOS PASO A PASO SE MUESTRAN EN ANEXOS.

5.10 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE LAS SECCIONES DEL TRAMO ACOYAPA-SAN CARLOS.

En el proyecto Acoyapa-San Carlos se diseñaron 4 secciones de pavimento, las cuales fueron analizadas con el propósito de aplicar los conceptos relacionados al diseño Empírico Mecanicista tomando como referencia los modelos de deterioro propuestos por la AASHTO 2002. En la Tabla 20, se muestra el resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 20 Resultados obtenidos del análisis de las secciones del proyecto Acoyapa-San Carlos.

Esals Diseño	N_r (Admisibles)*	Daño acumulado al periodo de diseño	<i>PD_{Total}</i> (Deformación Permanente del Pavimento)	Observaciones
<i>Tramo I Lovago-Pájaro Negro</i>				
Sub-Tramo I: Empalme Lovago - Acoyapa				
7, 360, 000	10, 085, 000	73%	1.09 in	Severidad alta
Sub-Tramo II: Acoyapa – Pájaro Negro				
4,450,000	10, 681,732	42%	0.87 in	Severidad media
<i>Tramo II: Pájaro Negro – San Carlos</i>				
Sub-Tramo I : Pájaro Negro - La Argentina				
3,630,000	10,515,652	35%	0.80 in	Severidad media
Sub-Tramo II : La Argentina - San Carlos				
4, 410, 000	10, 610, 277	42%	0.87 in	Severidad media

V. CONCLUSIONES.

1. En base a las consideraciones teóricas del procedimiento Empírico-Mecanicista para el análisis de Pavimentos flexibles podemos concluir que debe irse introduciéndose estos conceptos en el diseño y empezar a revisar si los espesores calculados por AASHTO 93 cumplen con los criterios de este proceso de diseño. Hay que tomar en cuenta que en algunos países se hacen estas comparaciones entre ambas metodologías.

Los criterios de falla que pueden analizarse en las revisiones de los espesores determinados por la AASHTO 93 podrían ser los siguientes:

- ✓ La fisuración por fatiga de las capas asfáltica, limitando la deformación por tracción en la parte inferior de las mismas.
 - ✓ La acumulación de deformaciones permanentes que afecta a todas las capas componentes y al suelo de fundación.
2. Conforme al criterio de falla funcional, el análisis realizado en las Secciones del tramo Acoyapa-San Carlos y tomando en cuenta que se usaron leyes de deterioro que forzosamente necesitan calibrarse a nuestras condiciones podemos concluir lo siguiente:
 - ✓ Según los resultados obtenidos del análisis multicapa a través del software Everstress se logró en base a las propiedades de los materiales usados en cada capa determinar los esfuerzos a que estará sometido el pavimento en los puntos críticos de cada capa, para posteriormente a través de las leyes de deterioro precisar el desempeño durante la vida útil. En todas las secciones las repeticiones de ejes para producir la fatiga en la carpeta asfáltica están por encima de las calculadas para el periodo de diseño, lo cual significa que el pavimento tendrá un buen desempeño durante la vida útil, el cual ira acumulando un daño relativo que anda en un

rango de 35% para el Tramo II, Sub-tramo I “Pájaro Negro - La Argentina” y un 73% para el Tramo I, Sub-Tramo I “Empalme Lovago – Acoyapa”.

- ✓ La deformación permanente del pavimento usando los modelos de la Guía AASHTO andan en un rango de 0.80 pulgadas para el Tramo II, Sub-tramo I “Pájaro Negro - La Argentina” y de 1.09 pulgadas para el Tramo I, Sub-Tramo I “Empalme Lovago – Acoyapa”. Con estos resultados comparándolos con al Tabla 12 vemos que el pavimento tiene una Severidad media.
 - ✓ Con estos análisis realizados a las secciones del Tamo Acoyapa – San Carlos podemos decir que el pavimento tendrá un buen comportamiento de acuerdo a estos deterioros analizados, sin embargo no debe olvidarse que si bien es cierto hay que calibrar los modelos de deterioro, se puede usar los modelos propuestos por AASHTO 2002 como una primicia para empezar a comprender el comportamiento del pavimento de acuerdo a su desempeño por fatiga y deformación permanente.
3. La metodología que se propone en esta tesis para analizar si los espesores calculados por AASHTO 93 cumplen con criterios mecanicistas, sirve como herramienta en la etapa de preinversión donde se están llevando a cabo los estudios concernientes al Diseño del Pavimento y que obviamente se alimenta de la Información de Trafico y propiedades de materiales con los que se resuelve la Ecuación de diseño de la AASHTO 93. Lo importante es que se usen los mismos ESALS de diseño para medir la vida de fatiga con respecto a los ESALS calculados de acuerdo al modelo de fatiga propuesto por la GUIA MEPDG, igual en el cálculo de la deformación permanente de cada una de las capas que componente la estructura. Se ha elaborado una Hoja de Calculo de Excel que nos facilita realizar todos los cálculos ya que solo se introduce los datos de las Secciones y las respuestas encontradas con EVESTRES y

automáticamente obtenemos los resultados de fatiga y deformación permanente.

4. La propuesta de la metodología de análisis para revisar los espesores calculados con AASHTO 93 y la Hoja de Calculo de Excel nos ha facilitado poder analizar otras secciones de pavimentos usando estos mismos criterios fatiga y deformación permanente, los resultados se ilustran en los Anexos.

VI. RECOMENDACIONES.

1. Los resultados y datos de la presente investigación, se deben utilizar como una guía introductoria a la aplicación de conceptos iniciales Mecanicistas para el análisis del desempeño de la estructura de pavimentos flexibles durante la vida útil para la cual se está proyectando.
2. Es necesario realizar estudios para determinar las propiedades de los materiales empleados en la estructura de pavimento flexible, ya que a medida que eliminemos las incertidumbres en la obtención de tales propiedades así las respuestas calculadas con el modelo multicapa elástico serán mas acertadas para predecir el desempeño que va a tener nuestro pavimento durante la vida útil para la cual se esta proyectando.
3. Debido a que la tendencia actual es emplear conceptos mecanicistas en el diseño del pavimento flexible se debe retomar experiencias de países como Costa Rica y México y buscar mecanismos de alianzas con dichos países para lograr capacitaciones técnicas de ingenieros de diseño de estructuras de pavimento flexibles.
4. Como parte del proceso de enriquecimiento en la inclusión de la Guía Mecanicista Empírica se recomienda a todos los profesionales, docentes, estudiantes y personal involucrados en el diseño de Estructura de pavimento, continuar con estudios e investigaciones y generar aportaciones que vengan a enriquecer dicha Guía y logren en un futuro el uso generalizado de metodología en los diseño de pavimentos flexibles a las condiciones de Nicaragua.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D. C.
2. AEPO S.A, Ingenieros consultores. “Cálculo de Leyes de Fatiga”. Mayo 2001.
3. Águila, Pablo, “Modelación Mecanicista de Pavimentos Flexibles”. Universidad Nacional Federico Villareal, Lima, Perú. 2007
4. CRESPO, del Río Ramón “LA INGENIERIA DE PAVIMENTOS EN EL SIGLO XX1”. AEPO S.A. España 2002.
5. Corredor, Gustavo, “Apuntes sobre diseño de pavimentos flexibles”. Instituto Venezolano del asfalto INVEA. 2010
6. Garnica Anguas, Paul y Correa, Angel. “Conceptos Mecanicistas en Pavimentos”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 258. Sanfandila, Qro, 2004
7. Garnica Anguas, Paul y otros. “Mecánica de Materiales para Pavimentos”. Instituto Mexicano del Transporte Publicación Técnica No. 197 Sanfandila, Qro, 2002
8. Higuera Sandoval, Carlos Hernando. “Comportamiento de las variables de las leyes de fatiga, deformación y deflexión en una estructura de Pavimento Flexible”. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, 17(24), 2008.
9. http://www.camineros.com/biblioteca.htm#Diseño_estructural_de_pavimentos.
10. “Diseño Estructural de pavimentos”. Noviembre 2011

11. Instituto para el desarrollo de los pavimentos en el Perú, IDP, "Primer curso de actualización de Conocimientos en Pavimentos: La Nueva Guía para el Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos". Mayo 2005
12. Medina, Luis R. y otros. "Comprobación Estructural de las Secciones de Pavimento de la Instrucción de Carreteras 6.1 y 6.2 i.c.". AEPO S.A. España 2000.
13. Método Shell. "Diseño de Pavimentos flexibles". Año 1978
14. Reyes Lizcano, Fredy. "Diseño de pavimentos flexibles por metodología racional". Artículo 20 pag.
15. Rondón Quintana, Hugo Alexander y Reyes Lizcano, Fredy Alberto. "Metodología de Diseño de Pavimentos Flexibles: Tendencias, Alcances y limitaciones". Artículo Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol.17-2, Bogotá, Diciembre de 2007.
16. Vásquez Varela, Luis Ricardo. "Notas sobre Diseño de Pavimentos Flexibles". Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Colombia. 2002.
17. Vergara B., Henry A. "Diseño Directo de Pavimentos Flexibles". Artículo Científico. Junio 2002.

ANEXOS

TRAMO II

Sub-Tramo I: Pájaro Negro – La Argentina

PROYECTO:**ACOYAPA - SAN CARLOS**

Tramo II :

Pajaro Negro - San Carlos

Sub-Tramo I :

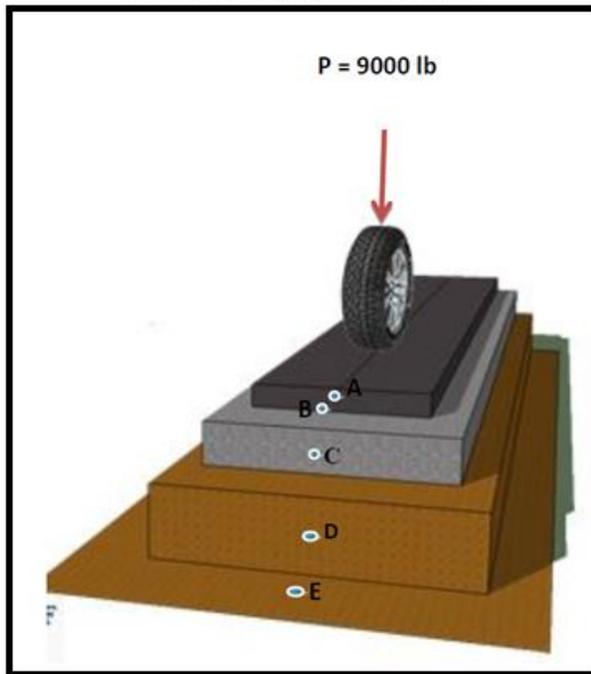
Pájaro Negro - La Argentina

ESAL'S DE DISEÑO =

3,630,000

Capa	Radio de Poisson's	Espesor (in)	Modulos (psi)
Carpeta	0.35	2.00	296,668.00
Base	0.35	9.10	30,100.00
Subbase	0.40	11.10	17,900.00
Subrasante	0.45	*	8,200.00

MODELO DE ANALISIS MULTICAPA



Determinacion de Puntos de Analisis	
A	1.00
B	1.99
C	6.55
D	16.65
E	22.21

Nº. Carga	X-Posicion (in)	Y-Posicion (in)	Carga (lbf)	Presión (psi)	Radio (in)
1	0	0	9000	110	5.1

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Title: acoyapa

No of Layers: 4

No of Loads: 1

No of X-Y Evaluation Points: 1

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (in)	Moduli(1) (ksi)
1	0.35	2	297
2	0.35	9.1	30.1
3	0.4	11.1	17.9
4	0.45	*	8.2

Load No	X-Position (in)	Y-Position (in)	Load (lbf)	Pressure (psi)	Radius (in)
1	0	0	9000	110	5.1

Location | X-Position (in): .000 Y-Position (in): .000

cNormal Stresses

Z-Position (in)	Layer *	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Syz (psi)	Sxz (psi)	Sxy (psi)
1.00	1	-84.62	-84.62	-100.34	0	0	0
1.99	1	177.88	177.88	-85.35	0	0	0
6.55	2	1.25	1.25	-39.82	0	0	0
16.65	3	2.21	2.21	-8.41	0	0	0
22.21	4	4.38	4.38	-4.61	0	0	0

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (in)	Layer *	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (mils)	Uy (mils)	Uz (mils)
1.00	1	-66.94	-66.94	-138.42	0	0	37.304
1.99	1	489.89	489.89	-706.63	0	0	36.887
6.55	2	490.06	490.06	-1351.98	0	0	28.432
16.65	3	261.83	261.83	-568.31	0	0	19.51
22.21	4	249.72	249.72	-453.19	0	0	16.866

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (in)	Layer *	S1 (psi)	S2 (psi)	S3 (psi)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
1.00	1	-100.34	-84.62	-84.62	-138.42	-66.94	-66.94
1.99	1	-85.35	177.88	177.88	-706.63	489.88	489.89
6.55	2	-39.82	1.25	1.25	-1351.98	490.06	490.06
16.65	3	-8.41	2.21	2.21	-568.31	261.83	261.84
22.21	4	-4.61	4.38	4.38	-453.19	249.72	249.72

I. MODELO DE FATIGA PARA LA CARPETA ASFALTICA

$$N_f = 0.00432 * k_1 * C \left(\frac{1}{\epsilon_f} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281}$$

Ecuación MEPDG

Para el agrietamiento de fatiga de abajo hacia arriba k_1 se calcula con la siguiente ecuacion

$$k_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{11.02 - 3.49 * h_{ac}}}}$$

De las respuestas estructurales calculadas con el software de analisis multicapa se obtuvo las siguientes respuestas estructurales

Saturacion = 0%		
	ϵ_v	ϵ_h
A	1.38E-04	-
B	-	4.90E-04
C	1.35E-03	-
D	5.68E-04	-
E	4.53E-04	-

Realizando el calculo conforme las ecuaciones anteriores se obtiene el numero de repeticiones de carga admisible para que se produzca la fatiga

Parámetro	Valor
E	296,668
ϵ_f	4.90E-04
h_{ac}	2.00
k₁	2,172.54
C	0.97
N_f	10,515,652

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

V_b , = porcentaje Efectivo de Asfalto

V_a = Porcentaje de Vacíos en la mezcla.

$$V_b = 11$$

$$V_a = 5$$

$$M = -0.0121$$

II. AHUELLAMIENTO DE LA CARPETA ASFALTICA

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244}$$



Parámetro	Valor
T (°F)	= 142
N	= 3,630,000.00
ϵ_r	= 1.38E-04
ϵ_p	= 1.56E-01

Donde:

ϵ_p , deformación plástica unitaria acumulada en N repeticiones de carga (in/in).

ϵ_r , deformación resiliente del material asfáltico como una función de las propiedades de la mezcla, temperatura y tiempo de aplicación de las cargas. (in/in).

(respuesta de la aplicación de la carga equivalente de 9000 libras en el modelo estructural)

N, número de repeticiones de carga.

T, temperatura (deg F).

Para calcular la deformación permanente al punto de análisis A, osea a la mitad de la carpeta asfáltica, se introduce el factor k1 tal como sale en la GUIA ME

$$k_1 = (C_1 + C_2 * depth) * 0.328196^{depth}$$

$$C_1 = -0.1039 * h_{ac}^2 + 2.4868 * h_{ac} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172 * h_{ac}^2 - 1.7331 * h_{ac} + 27.428$$



Parámetro	Valor
h _{ac}	= 2.00
C1	= -12.78
C2	= 24.03
k1	= 3.69

Donde:

K₁, es función del espesor total de la capa de asfalto (h_{ac} in) y la profundidad al punto de cálculo (depth), para verificar la presión de confinamiento a diferentes profundidades

Luego calculamos la deformación permanente a esa profundidad.

(mitad de la carpeta asfáltica)

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = k_1 * 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244}$$

$$R_{D-Capa} = \mathbf{0.58 \text{ in}}$$

III. AHUELLAMIENTO DE LA BASE Y SUBBASE

$$\delta_a(N) = \beta_1 \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \epsilon_v h$$

Donde:

δ_a = Deformación permanente de la capa. (in)

N= Numero de repeticiones de carga.

$\epsilon_0, \epsilon_r, \beta$ y ρ Propiedades de los materiales

ϵ_v = Deformación unitaria vertical promedio en el centro de la capa obtenida del cálculo estructural del modelo multicapa

h= espesor de la capa (in)

β factor de calibración dependiente del tipo de capa

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta}$$

$$\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) = \frac{(0.15e^{\rho^\beta}) + (20e^{(\rho/10^9)^\beta})}{2},$$

$$\rho = 10^9 \left(\frac{-4.89285}{1 - (10^9)^\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \text{ and } \log \beta = -0.61119 - 0.017638W_c$$

$$W_c = 51.712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} \right]^{-0.3586 * GWT^{0.1192}}$$

Donde:

W_c = Contenido de Agua, %.

E_r = Modulo Resiliente de la capa (psi)

GWT= Nivel freático, se asume un valor muy alto de 10^8 para eliminar la influencia del nivel freático, debe notarse que existe una asíntota y que a partir de un valor de nivel freático definido (alrededor de 20 pies) el aumentar la profundidad del nivel freático no tiene mayor impacto

BASE = 9.10 in	
Parámetro	Valor
E =	30,100.00 psi
GWT =	100,000,000.00
Wc =	0.00
β =	0.24
ρ =	673.00
ϵ_v =	1.35E-03
(ϵ_o/ϵ_r) =	20.31
N =	3,630,000.00 Esals
β_1 =	0.4
$(\rho/N)^\beta$ =	0.122023765
δ_{base} =	0.088 in

SUB-BASE = 11.10 in	
Parámetro	Valor
E =	17,900.00 psi
GWT =	100,000,000.00
Wc =	0.00
β =	0.24
ρ =	673.49
ϵ_v =	5.68E-04
(ϵ_o/ϵ_r) =	20.31
N =	3,630,000.00 Esals
β_1 =	0.8
$(\rho/N)^\beta$ =	0.122072776
$\delta_{sub-base}$ =	0.091 in

III. AHUELLAMIENTO DE LA SUBRASANTE

$$\delta = \epsilon_{p,z=0} \int_0^{h_{bedrock}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-kh_{bedrock}}}{k} \right) \epsilon_{p,z=0}$$

Donde:

δ deformación plástica de la subrasante, in

K, Constante obtenida de regresión, usualmente se usa el valor de 1×10^{-6}

$h_{bedrock}$, Profundidad hasta el estrato rocoso o donde ya no exista afectación como consecuencia de la carga en feet ($Z=0$, representa la parte superior de la subrasante)

Parámetro	Valor
k =	1.00E-06
h-hasta roca =	96.00
$\epsilon_{p,z=0}$ =	4.53E-04
RD Sub-rasante =	0.044 in

IV. DEFORMACION PERMANENTE TOTAL DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

$$RD_{Total} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG}$$

Donde:

RD_{AC} , deformación permanente de la carpeta asfáltica

RD_{GB} , deformación permanente de la Base Granular

RD_{SG} , deformación permanente de la sub-rasante

Ahuellamiento Total en in (No Sat.)

RD_{AC} =	0.58 in
RD_{GB} =	0.088 in
RD_{G SUB-B} =	0.091 in
RD_{SG} =	0.044 in
RD_{TOTAL} =	0.80 in

FATIGA DE ABAJO HACIA ARRIBA DE LA CARPETA ASFALTICA.

MODELO DE FATIGA

$$N_f = 0.00432 * k_1 * C * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E}\right)^{1.281}$$

N_f , número de repeticiones de carga para producir el agrietamiento por fatiga.
 ϵ_t , deformación por tracción en la localización crítica del modelo de análisis
 E , modulo de rigidez de la mezcla asfáltica.

$$k_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 * h_{ac})}}}$$

$$C = 10^M$$

C , corresponde a una corrección de acuerdo a las propiedades volumétricas y de vacíos de la mezcla asfáltica.

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

V_b , = porcentaje Efectivo de Asfalto

V_a = Porcentaje de Vacíos en la mezcla

h_{ac} , es el espesor total de la capa de asfalto

La función de transferencia final para calcular el agrietamiento de los daños de la fatiga de abajo hacia arriba es expresado como:

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C_1 + C_2 * C_2 * \log_{10}(D * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right)$$

$$C_1 = 1$$

$$C_1' = -2 * C_2 = -2$$

$$C_2 = 1$$

FC_{bottom} , agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba (% del área del carril)

$$C_2' = -2.40874 - 39.748 * (1 + h_{ac})^{-2.858} = -4.1332$$

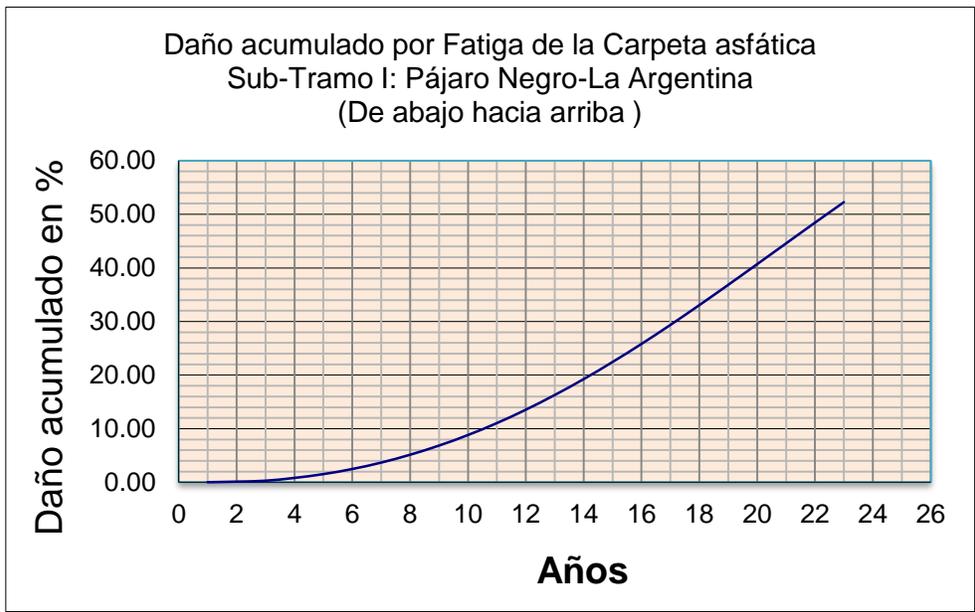
$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i}$$

T , total número de periodos

n_i , trafico actual para el periodo i

N_i , trafico permitido bajo las condiciones prevalecientes en i .

$N_f = 10,515,652$		$N_{diseño} = 3,630,000$					
N°	Año	TPDA	ESALS	ESALS Acumulado	Daño Relativo	Daño Relativo Acumulado	%FC
1	2006	269.00	44,626	44,626	0.42%	0.42%	0.04
2	2007	548.00	46,285	90,912	0.44%	0.86%	0.15
3	2008	839.00	48,276	139,188	0.46%	1.32%	0.31
4	2009	1,456.00	102,359	241,547	0.97%	2.30%	0.84
5	2010	2,056.00	99,538	341,085	0.95%	3.24%	1.55
6	2011	2,701.00	107,004	448,089	1.02%	4.26%	2.50
7	2012	3,383.00	113,142	561,231	1.08%	5.34%	3.70
8	2013	4,110.00	120,607	681,838	1.15%	6.48%	5.16
9	2014	4,868.00	125,750	807,588	1.20%	7.68%	6.87
10	2015	5,667.00	132,552	940,140	1.26%	8.94%	8.83
11	2016	6,513.00	140,349	1,080,489	1.33%	10.28%	11.06
12	2017	7,410.00	148,810	1,229,299	1.42%	11.69%	13.55
13	2018	8,360.00	157,602	1,386,902	1.50%	13.19%	16.30
14	2019	9,361.00	166,063	1,552,965	1.58%	14.77%	19.26
15	2020	10,429.00	177,178	1,730,144	1.68%	16.45%	22.45
16	2021	11,558.00	187,298	1,917,442	1.78%	18.23%	25.83
17	2022	12,759.00	199,243	2,116,684	1.89%	20.13%	29.37
18	2023	14,042.00	212,846	2,329,531	2.02%	22.15%	33.06
19	2024	15,407.00	226,450	2,555,981	2.15%	24.31%	36.84
20	2025	16,867.00	242,210	2,798,191	2.30%	26.61%	40.70
21	2026	18,423.00	258,136	3,056,327	2.45%	29.06%	44.57
22	2027	20,093.00	277,049	3,333,376	2.63%	31.70%	48.44
23	2028	21,881.00	296,624	3,630,000	2.82%	34.52%	52.27
			3,630,000				



TRAMO II

Sub-Tramo II: La Argentina-San Carlos

PROYECTO:**ACOYAPA - SAN CARLOS**

Tramo II :

Pajaro Negro - San Carlos

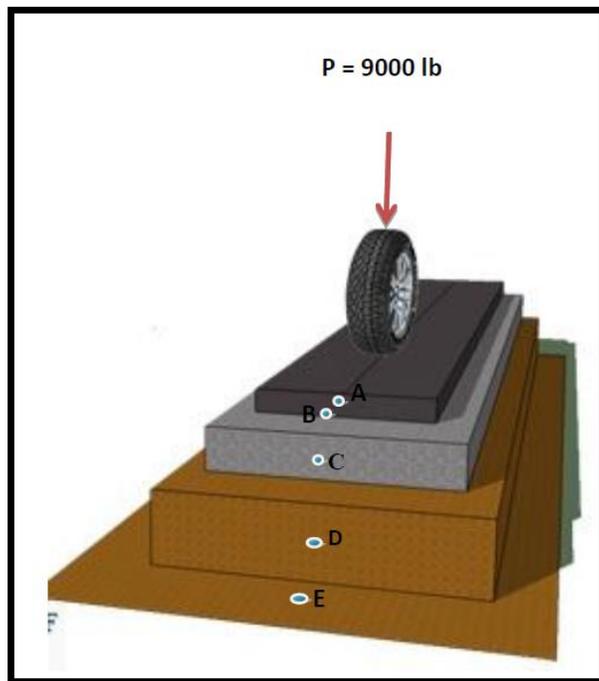
Sub-Tramo II :

La Argentina - San Carlos

ESAL'S DE DISEÑO =**4,410,000.00**

Capa	Radio de Poisson's	Espesor (in)	Modulos (psi)
Carpeta	0.35	2.00	296,668.00
Base	0.35	9.50	30,100.00
Subbase	0.40	11.10	17,900.00
Subrasante	0.45	*	8,200.00

MODELO DE ANALISIS MULTICAPA



Determinacion de Puntos de Analisis	
A	1.00
B	1.99
C	6.75
D	17.05
E	22.61

Nº. Carga	X-Posicion (in)	Y-Posicion (in)	Carga (lbf)	Presión (psi)	Radio (in)
1	0	0	9000	110	5.1

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Title: acoyapa

No of Layers: 4

No of Loads: 1

No of X-Y Evaluation Points: 1

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (in)	Moduli(1) (ksi)
1	0.35	2	297
2	0.35	9.5	30.1
3	0.4	11.1	17.9
4	0.45	*	8.2

Load No *	X-Position (in)	Y-Position (in)	Load (lbf)	Pressure (psi)	Radius (in)
1	0	0	9000	110	5.1

Location | X-Position (in): .000 Y-Position (in): .000

cNormal Stresses

Z-Position (in)	Layer *	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Syz (psi)	Sxz (psi)	Sxy (psi)
1.00	1	-84.2	-84.2	-100.38	0	0	0
1.99	1	177.32	177.32	-85.45	0	0	0
6.75	2	1.28	1.28	-38.67	0	0	0
17.05	3	2.16	2.16	-8.04	0	0	0
22.61	4	0	0	-4.42	0	0	0

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (in)	Layer *	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (mils)	Uy (mils)	Uz (mils)
1.00	1	-65.98	-65.98	-139.53	0	0	37.008
1.99	1	488.78	488.78	-705.65	0	0	36.592
6.75	2	477.36	477.36	-1314.61	0	0	27.86
17.05	3	252.3	252.3	-546.09	0	0	19.115
22.61	4	242.54	242.54	-538.93	0	0	16.516

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (in)	Layer *	S1 (psi)	S2 (psi)	S3 (psi)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
1.00	1	-100.38	-84.2	-84.2	-139.53	-65.98	-65.98
1.99	1	-85.45	177.32	177.32	-705.65	488.78	488.78
6.75	2	-38.67	1.28	1.28	-1314.61	477.35	477.36
17.05	3	-8.04	2.16	2.16	-546.09	252.3	252.3
22.61	4	-4.42	0	0	-538.93	242.54	242.54

I. MODELO DE FATIGA PARA LA CARPETA ASFALTICA

$$N_f = 0.00432 * k_1 * C \left(\frac{1}{\epsilon_f} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281}$$

Ecuación MEPDG

Para el agrietamiento de fatiga de abajo hacia arriba k_1 se calcula con la siguiente ecuacion

$$k_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{11.02 - 3.49 * h_{ac}}}}$$

De las respuestas estructurales calculadas con el software de analisis multicapa se obtuvo las siguientes respuestas estructurales

Saturacion = 0%		
	ϵ_v	ϵ_h
A	1.40E-04	-
B	-	4.89E-04
C	1.31E-03	-
D	5.46E-04	-
E	5.39E-04	-

Realizando el calculo conforme las ecuaciones anteriores se obtiene el numero de repeticiones de carga admisible para que se produzca la fatiga

Parámetro	Valor
E	296,668
ϵ_f	4.89E-04
hac	2.00
k1	2,172.54
C	0.97
Nf	10,610,277

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

V_b , = porcentaje Efectivo de Asfalto

V_a = Porcentaje de Vacios en la mezcla.

$$V_b = 11$$

$$V_a = 5$$

$$M = -0.0121$$

II. AHUELLAMIENTO DE LA CARPETA ASFALTICA

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.4488 T^{1.5606} N^{0.479244}}$$

Parámetro	Valor
T (°F)	= 142
N	= 4,410,000.00
ϵ_r	= 1.40E-04
ϵ_p	= 1.73E-01

Donde:

ϵ_p , deformación plástica unitaria acumulada en N repeticiones de carga (in/in).

ϵ_r , deformación resiliente del material asfáltico como una función de las propiedades de la mezcla, temperatura y tiempo de aplicación de las cargas. (in/in).

(respuesta de la aplicación de la carga equivalente de 9000 libras en el modelo estructural)

N, número de repeticiones de carga.

T, temperatura (deg F).

Para calcular la deformación permanente al punto de analisis A, osea a la mitad de la carpeta asfáltica, se introduce el factor k1 tal como sale en la GUIA ME

$$k_1 = (C_1 + C_2 * depth) * 0.328196^{depth}$$

$$C_1 = -0.1039 * h_{ac}^2 + 2.4868 * h_{ac} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172 * h_{ac}^2 - 1.7331 * h_{ac} + 27.428$$

Parámetro	Valor
h _{ac}	= 2.00
C1	= -12.78
C2	= 24.03
k1	= 3.69

Donde:

K₁, es función del espesor total de la capa de asfalto (h_{ac}, in) y la profundidad al punto de cálculo (depth), para verificar la presión de confinamiento a diferentes profundidades

Luego calculamos la deformacion permanente a esa profundidad.

(mitad de la carpeta asfáltica)

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = k_1 * 10^{-3.4488 T^{1.5606} N^{0.479244}}$$

$$R_{D-Capa} = \mathbf{0.64 \text{ in}}$$

BASE = 9.50 in		SUB-BASE = 11.10 in	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
E =	30,100.00 psi	E =	17,900.00 psi
GWT =	100,000,000.00	GWT =	100,000,000.00
Wc =	0.00	Wc =	0.00
β =	0.24	β =	0.24
ρ =	673.00	ρ =	673.49
ε _v =	1.31E-03	ε _v =	5.46E-04
(ε _{0/ε_r}) =	20.31	(ε _{0/ε_r}) =	20.31
N =	4,410,000.00 Esals	N =	4,410,000.00 Esals
β ₁ =	0.4	β ₁ =	0.8
(ρ/N) ^β =	0.116345942	(ρ/N) ^β =	0.116393269
δ_{base} =	0.090 in	δ_{sub-base} =	0.088 in

III. AHUELLAMIENTO DE LA SUBRASANTE

$$\delta = \varepsilon_{p,z=0} \int_0^{h_{bedrock}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-kh_{bedrock}}}{k} \right) \varepsilon_{p,z=0}$$

Donde:

δ deformación plástica de la subrasante, in

K, Constante obtenida de regresión, usualmente se usa el valor de 1×10^{-6}

$h_{bedrock}$, Profundidad hasta el estrato rocoso o donde ya no exista afectación como consecuencia de la carga en feet (Z=0, representa la parte superior de la subrasante)

Parámetro	Valor
k =	1.00E-06
h-hasta roca =	96.00
ε _{p,z=0} =	5.39E-04
RD Sub-rasante =	0.052 in

IV. DEFORMACION PERMANENTE TOTAL DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

$$RD_{Total} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG}$$

Donde:

RD_{AC} , deformación permanente de la carpeta asfáltica

RD_{GB} , deformación permanente de la Base Granular

RD_{SG} , deformación permanente de la sub-rasante

Ahuellamiento Total en in (No Sat.)

RD_{AC} =	0.64 in
RD_{GB} =	0.090 in
RD_{G SUB-B} =	0.088 in
RD_{SG} =	0.052 in
RD_{TOTAL} =	0.87 in

FATIGA DE ABAJO HACIA ARRIBA DE LA CARPETA ASFALTICA.

MODELO DE FATIGA

$$N_f = 0.00432 * k_1 * C * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E}\right)^{1.281}$$

N_f , número de repeticiones de carga para producir el agrietamiento por fatiga.
 ϵ_t , deformación por tracción en la localización crítica del modelo de análisis
 E , modulo de rigidez de la mezcla asfáltica.

$$k_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 * h_{ac})}}}$$

$$C = 10^M$$

C , corresponde a una corrección de acuerdo a las propiedades volumétricas y de vacíos de la mezcla asfáltica.

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

V_b , = porcentaje Efectivo de Asfalto

V_a = Porcentaje de Vacíos en la mezcla

h_{ac} , es el espesor total de la capa de asfalto

La función de transferencia final para calcular el agrietamiento de los daños de la fatiga de abajo hacia arriba es expresado como:

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C_1 + C_2 * C_2 * \log_{10}(D * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= 1 \\ C'_1 &= -2 * C'_2 = -2 \\ C'_2 &= 1 \end{aligned}$$

FC_{bottom} , agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba (% del área del carril)

$$C''_2 = -2.40874 - 39.748 * (1 + h_{ac})^{-2.856} = -4.1332$$

$$D = \sum_{i=1}^T ni/Ni$$

T , total número de periodos

n_i , trafico actual para el periodo i

N_{fi} , trafico permitido bajo las condiciones prevalecientes en i .

$N_f = 10,610,277$		$N_{diseño} = 4,410,000$					
N°	Año	TPDA	ESALS	ESALS Acumulado	Daño Relativo	Daño Relativo Acumulado	%FC
1	2006	553.00	92,492	92,492	0.87%	0.87%	0.15
2	2007	1,133.00	97,008	189,499	0.91%	1.79%	0.53
3	2008	1,745.00	102,360	291,859	0.96%	2.75%	1.15
4	2009	2,404.00	110,221	402,080	1.04%	3.79%	2.03
5	2010	3,071.00	111,559	513,639	1.05%	4.84%	3.12
6	2011	3,793.00	120,758	634,396	1.14%	5.98%	4.49
7	2012	4,561.00	128,451	762,848	1.21%	7.19%	6.15
8	2013	5,384.00	137,650	900,498	1.30%	8.49%	8.11
9	2014	6,248.00	144,508	1,045,006	1.36%	9.85%	10.34
10	2015	7,164.00	153,205	1,198,211	1.44%	11.29%	12.84
11	2016	8,135.00	162,404	1,360,616	1.53%	12.82%	15.62
12	2017	9,174.00	173,777	1,534,393	1.64%	14.46%	18.68
13	2018	10,276.00	184,314	1,718,707	1.74%	16.20%	21.97
14	2019	11,445.00	195,521	1,914,228	1.84%	18.04%	25.46
15	2020	12,697.00	209,403	2,123,631	1.97%	20.01%	29.16
16	2021	14,028.00	222,616	2,346,246	2.10%	22.11%	32.99
17	2022	15,447.00	237,334	2,583,581	2.24%	24.35%	36.92
18	2023	16,969.00	254,561	2,838,142	2.40%	26.75%	40.93
19	2024	18,571.00	267,942	3,106,084	2.53%	29.27%	44.89
20	2025	20,320.00	292,528	3,398,612	2.76%	32.03%	48.91
21	2026	22,191.00	312,933	3,711,545	2.95%	34.98%	52.86
22	2027	24,203.00	336,516	4,048,061	3.17%	38.15%	56.72
23	2028	26,367.00	361,939	4,410,000	3.41%	41.56%	60.45
			4,410,000				

