

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
Facultad de Construcciones  
Departamento de Ingeniería Civil



## Trabajo de diploma

---

Comprobación de la influencia del tráfico en el período de  
diseño de la NC 334:2004

---

**Diplomante:** Jorge Felix Peña Parra

**Tutor:** Dr. René Antonio García Depestre

**Cotutor:** Ing. Luis Felipe Basulto López

Santa Clara

**2017**

*“[...] Ninguna idea nace pura ni completa desde el primer día,  
siguiendo una lógica se va desarrollando [...]”*

*Fidel Castro Ruz*

## DEDICATORIA

*A la memoria de:*

*Juan Armando Bermúdez Zamora (tío tito)*  
*Olga Aledia Zamora Alonso (mami)*

## AGRADECIMIENTOS

*A mi mamá: por ser el paradigma más grande que tengo en esta vida, por su educación, su amor abnegado y por todo lo sacrificado para ser quien soy en esta vida.*

*A mi papá: por ser el mejor padre de este mundo, por su apoyo siempre y por ser mi mejor amigo.*

*A mi tata linda: por ser la mejor hermanita del mundo y su apoyo incondicional en todo momento.*

*A mis hermanos Daniel y Víctor: por toda la preocupación mostrada y por estar siempre presentes como buenos hermanitos que son.*

*Al Charly: por ser la persona grande que es por encima de toda adversidad que se presente en esta vida y por ser mi hermanito mayor.*

*A mi tío Nelson: por todo su apoyo, interés, preocupación, consejos y conocimientos expuestos para mi formación como profesional.*

*A mis abuelas: por sus consejos y por orientarme de la mejor manera siempre.*

*A mi novia: por tener la virtud de escucharme, comprenderme, aconsejarme, por apoyarme siempre en todo momento y por ofrendar mucha seguridad y confianza.*

*A mi suegri: por su preocupación, por su apoyo incondicional, por sus consejos y sobre todas las cosas por quererme como si fuera un hijo más para ella.*

*A mis tutores: Felipe, Ángel y René, por sus críticas justas, por sus consejos y recomendaciones en la realización de este trabajo.*

*A mis amigos de estudios: por todos estos años cursados, por el trabajo conjunto y la colaboración mutua en los diferentes proyectos que coincidimos.*

*Y a todos los que de una forma u otra desde familiares hasta amigos me han brindado una ayuda incondicional durante el transcurso de estos cinco años.*

## RESUMEN

En Cuba para el diseño estructural de los pavimentos flexibles se emplea la Norma Cubana 334 del año 2004. Esta norma establece de manera general 20 años como período de diseño para este tipo de vías, pero actualmente en el país las actividades de rehabilitación e intervención sobre las vías proyectadas están siendo cada vez más prematuras debido al agotamiento de la capacidad estructural de estas. Este tipo de vía no está siendo capaz de soportar las demandas en su etapa de proyecto, por lo que habría que analizar si es correcto el período de diseño que establece la NC 334 para los pavimentos flexibles.

El presente trabajo de investigación persigue el objetivo de comprobar a nivel de proyecto el período de diseño que establece el modelo empírico de la NC 334 para estructuras de pavimento flexible bajo diferentes manifestaciones de tráfico. Por medio de la modelación estructural de cuatro vías flexibles a través del *software* Kenlayer, bajo la consideración de diferentes modelos de comportamiento de sistemas multicapa, se obtendrán las deformaciones generadas en estas estructuras flexibles producto a la acción de las cargas del tránsito, y en función de las deflexiones elásticas admisibles que estipula la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba en relación con tráfico de proyecto considerado, se evaluará el período de diseño de la NC 334 definido previamente en proyecto para estas estructuras flexibles.

## ABSTRACT

In Cuba for the structural design of flexible pavements is used the Cuban Standard 334 of the year 2004. This norm generally establishes 20 years as a design period for this type of road, but currently in the country rehabilitation and intervention activities on the projected pathways are becoming more and more premature due to the exhaustion of the structural capacity of these. This type of road is not being able to withstand the demands in its project stage, so it would be necessary to analyze if the design period established by the NC 334 for the flexible pavements is correct.

The present research aims at checking at the project level the design period that establishes the empirical model of NC 334 for flexible pavement structures under different manifestations of traffic. Through the structural modeling of four flexible road through the Kenlayer *software*, under the consideration of different models of behavior of multilayer systems. The deformations generated in these flexible structures will be obtained product to the action of the traffic loads, and depending on the permissible elastic deflections stipulated in the law on the behavior of flexible pavements in Cuba in relation to the project traffic considered. The design period of the NC 334 previously defined in the design for these flexible structures will be evaluated.

# ÍNDICE

Introducción .....	1
Capítulo 1: “Estado actual del conocimiento sobre el diseño de estructuras de pavimento flexible y su comportamiento ante sollicitaciones de tráfico” .....	7
1.1. Pavimentos flexibles .....	8
1.2. Factores de diseño de estructuras de pavimento flexible .....	9
1.2.1. Subrasante.....	10
1.2.2. Características de los materiales de la estructura del pavimento .....	11
1.2.3. Factores climáticos .....	12
1.2.4. El tráfico.....	13
1.3. Modos de falla en los pavimentos flexible provocados por la acción del tráfico .....	15
1.3.1. Deformación permanente en el pavimento .....	15
1.3.2. Fatiga en los materiales del pavimento .....	16
1.4. Teorías para el análisis de los pavimentos flexibles por medio de sistemas de capas .....	17
1.4.1. Modelos elásticos lineales.....	17
1.4.2. Modelos elásticos no lineales.....	18
1.4.3. Modelos visco-elásticos .....	19
1.5. Métodos de diseño de pavimentos flexibles.....	19
1.5.1. Métodos empíricos.....	20
1.5.1.1. Método de la AASHTO.....	20
1.5.1.2. Método de la SHELL .....	22
1.5.1.3. Norma Cubana 334.....	22
1.5.2. Métodos empírico-mecanicistas .....	23
1.5.2.1. Método de diseño del <i>Asphalt Institute</i> (AI) .....	24
1.5.2.2. Procedimiento de diseño francés (LCPC).....	24
1.5.2.3. Método de la AASHTO.....	25
1.5.3. Métodos mecanicistas.....	26
1.6. Programas para la modelación del pavimento flexible. Características .....	27
1.6.1. <i>Software</i> ALIZE .....	27
1.6.2. <i>Software</i> BISAR .....	28
1.6.3. <i>Software</i> ICAFIR .....	28
1.6.4. <i>Software</i> MEPDG.....	29
1.6.5. <i>Software</i> KENLAYER.....	29
1.7. Selección del programa de cómputo.....	30

1.8. Conclusiones parciales .....	30
Capítulo 2: “Planteamiento de procedimientos a implementar para la modelación por medio del <i>software</i> Kenlayer en la determinación de deformaciones de los pavimentos flexibles proyectados por la NC 334:2004” .....	32
2.1. Procedimiento de diseño de la NC 334:2004 .....	32
2.1.1. Definición de los parámetros climáticos para el diseño .....	33
2.1.2. Análisis y obtención del tráfico de diseño .....	34
2.1.3. Obtención de la resistencia de diseño de la subrasante .....	37
2.1.4. Resistencia de diseño sin ensayos de laboratorio .....	38
2.1.5. Aceptación de los materiales dado los requisitos de calidad de estos .....	38
2.1.6. Cálculo del espesor total equivalente del pavimento (T) .....	39
2.1.7. Determinación del espesor mínimo de superficie ( $T_S$ ) .....	39
2.1.8. Determinación del espesor mínimo de base ( $T_B$ ) .....	39
2.1.9. Cálculo del espesor mínimo de subbase ( $T_{SB}$ ) .....	39
2.1.10. Determinación de los espesores reales ( $h_i$ ) .....	40
2.2. Ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba .....	40
2.3. Análisis tenso-deformacional del pavimento flexible .....	41
2.3.1. Cálculo de la deformación permanente .....	42
2.3.2. Cálculo del daño por fatiga en los materiales .....	44
2.4. Análisis tenso-deformacional de estructuras de pavimento flexible mediante el <i>software</i> Kenlayer .....	45
2.4.1. Procedimiento para la determinación de los esfuerzos y deformaciones en una estructura de pavimento empleando el <i>software</i> Kenlayer .....	46
2.5. Conclusiones parciales .....	50
Capítulo 3: “Interpretación y análisis de los resultados en la comprobación del período de diseño de la NC 334:2004 para el diseño de estructuras de pavimento flexible” .....	51
3.1. Datos generales de los cuatro tipos de vías flexibles en estudio .....	51
3.2. Diseño estructural de los cuatro tipos de vías flexibles en análisis mediante la metodología de cálculo de la NC 334 .....	53
3.3. Implementación del <i>software</i> Kenlayer en la modelación de las estructuras de pavimento flexible diseñadas .....	54
3.4. Cálculo del período de diseño de las estructuras flexibles diseñadas por medio de la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba .....	60
3.5. Interpretación de los resultados obtenidos en el análisis del período de diseño que establece la NC 334 para las estructuras de pavimento flexible diseñadas .....	61
3.6. Conclusiones parciales .....	66

Conclusiones generales.....	67
Recomendaciones.....	68
Bibliografía.....	69
Anexos.....	73

## Introducción

El desarrollo histórico de las carreteras se remonta a ejemplos de obras milenarias como Creta, China y Egipto. Dichas construcciones evidencian la necesidad humana de reducir las dificultades de viajar, especialmente a la hora de trasladar personas y cargas pesadas. En Babilonia, 600 años antes de nuestra era, fue aplicada una forma de construcción asfáltica en la avenida procesional de Aibur Shabu. En Creta, el pavimento de adoquines de basalto se cimentó sobre capas de arcilla y piedras cementadas con yeso (Medina, 2010).

Las ventajas de utilizar materiales angulosos y duros quedaron establecidas desde las primeras experiencias en la construcción de carreteras. En Gran Bretaña, esta técnica se asocia a Mc. Adam, quien demostró al gobierno que la inversión en carreteras formadas con un revestimiento de un espesor aproximado de 250 mm de piedra granular ahorraría tiempo en los desplazamientos de carruajes. En este período la construcción no incluía un ligante y la capacidad de soporte de las cargas dependía por completo de la unión del árido (Medina, 2010).

Se cree que el primer caso de pavimento asfáltico compactado se registró alrededor de 1870 en Estados Unidos, al emplearse un ligante de roca natural asfáltica en polvo (Sánchez, 2014). Estos materiales eran importados, por lo que resultaban costosos, lo cual dio lugar a la investigación y a la mejora de alternativas más económicas.

A partir de 1920 el transporte terrestre por carretera se incrementó a niveles nunca sospechados debido a la gran aceptación y difusión de los vehículos de uso personal, por lo que comenzó un rápido proceso de transformación, que motivó el desarrollo de procedimientos de diseños y de nuevas tecnologías como fueron las teorías desarrolladas por Westergaard (1926 - 1939) y la teoría multicapa desarrollada por Burmister, 1945, entre otras, que han demostrado la ventaja de analizar las tensiones y deformaciones de los pavimentos flexibles (García, 2014).

Tanto en Europa como en Norteamérica se pusieron en marcha numerosos ensayos a escala real. El más conocido y significativo de todos en términos de dimensionamiento de pavimento y prácticas de construcción, fue el “*AASHO Road Test*” llevado a cabo por la *American Association of State Highway Officials* (AASHO) en Ottawa (Illinois, Estados Unidos de América) desde 1958 a 1960. Como resultado de dicho ensayo se publicó en 1961 la *Guide*

*for Design of Pavement Structures*. En ella se recogen los resultados del trabajo y se introducen conceptos como nivel de servicio y ejes equivalentes, que luego se han empleado en todo el mundo para el dimensionamiento de pavimentos (Medina, 2010).

Con el desarrollo de las técnicas, han surgido diferentes conceptos de clasificación de métodos de diseños de pavimento. En la actualidad se manejan tres conceptos de diseño de pavimentos que son: método empírico, semi-empírico o empírico-mecanicista, y método mecanístico.

El método empírico, primero en ser desarrollado, se basa en procesos racionales de identificación de parámetros críticos de comportamiento para un conjunto de variables de diseño como la resistencia de la explanada, el tránsito, el espesor y calidad de los materiales estructurales. Este se establece empíricamente atendiendo a criterios observados tras el funcionamiento de una amplia gama de pavimentos experimentales medidos y analizados mediante ensayos a escala real bajo condiciones controladas (García, 2014).

La aproximación más utilizada para interpretar el comportamiento observado es analizando las tensiones y deformaciones teóricas de las capas del pavimento. Representativos de este enfoque ha sido la guía *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 1993) y el método del *TRRL Powell*, 1984, para pavimentos flexibles (Triste de Ceita, 2009).

El método semi-empírico o empírico-mecanicista se basa en la aplicación de la mecánica estructural que permite determinar la respuesta de los elementos estructurales que componen el pavimento debido a las cargas aplicadas por las ruedas, utilizando los fundamentos y la modelación teórica elástica. Algunos de los ejemplos, que se pueden citar son: el método Shell, 1993, el método del Instituto Norteamericano del Asfalto, 1993 y AASHTO, 2004 (Triste de Ceita, 2009).

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen y se pueden determinar en laboratorio o en campo. (Medina, 2010)

Actualmente Cuba se enmarca en el concepto de diseño empírico ya que la NC 334:2004 “Norma de Carreteras. Pavimentos Flexibles. Método de cálculo”, establece un método de

cálculo empírico, partiendo de un modelo matemático que obtiene las tensiones y deformaciones debido a las solicitaciones estimadas, obteniendo un dimensionamiento que define la resistencia del pavimento para lograr resistir el número equivalente de repeticiones de la carga de cálculo.

La NC 334 establece para el diseño de pavimentos flexibles generalmente un período de diseño de 20 años. Actualmente en el país las actividades de rehabilitación e intervención sobre las vías proyectadas están siendo cada vez más prematuras debido al agotamiento de su capacidad estructural (Zaldivar & Sanchez, 2008). Las vías no están siendo capaces de soportar las demandas en su etapa de proyecto por lo que habría que analizar si es correcto el período de diseño que establece la NC 334 para pavimentos flexibles.

El presente trabajo persigue el objetivo de comprobar si el período de diseño para las estructuras de pavimento flexible proyectadas por la NC 334 resulta correcto, para lo cual se tomará como referencia la ley de comportamiento de los pavimentos en Cuba para el análisis deformacional a nivel de proyecto de las estructuras de pavimento flexible en estudio, bajo la acción de diferentes tipos de tráfico.

Dicho análisis pretende comprobar cuán eficiente puede ser la estimación del período de diseño propuesto por la metodología empírica de la NC 334 para vías de pavimento flexible recién construidas y que estas no hayan sido sometidas a períodos de explotación, para de esta manera comprobar la veracidad de su período de diseño.

De esta necesidad y con la posibilidad de consultas bibliográficas del tema a tratar surge el **problema científico** de este trabajo: ¿Se corresponde el período de diseño propuesto por la NC 334 con las deformaciones que puede presentar una estructura de pavimento flexible a nivel de proyecto, teniendo en cuenta las variaciones del tráfico que pueden presentarse?

La solución a este problema se inserta en el siguiente **objeto de estudio**: período de diseño de los pavimentos flexibles en Cuba propuesto por la NC 334 y su correlación con la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles para Cuba, lo que propicia adentrarse en un **campo de acción** ajustado en el: análisis tenso-deformacional y el comportamiento estructural en los pavimentos flexibles ante la acción del tránsito.

Considerando el problema desarrollado se contempla la **hipótesis de la investigación**: si se modela la deformación que puede tener una estructura de pavimento flexible mediante métodos computacionales, es posible comparar el período de diseño de dicha estructura con

el propuesto por la metodología empírica de la NC 334, en función de la ley de comportamiento de los pavimentos en Cuba y el tráfico a nivel de proyecto considerado.

Para dar solución al problema científico, este trabajo se propone el siguiente **objetivo general**: Comprobar el período de diseño que establece el modelo empírico de la norma cubana de estructuras de pavimento flexible bajo diferentes manifestaciones de tráfico.

Y los siguientes **objetivos específicos**:

- Establecer el estado del conocimiento sobre el tema a tratar, en correspondencia con métodos de diseño de estructuras de pavimento flexible y con la metodología de diseño propuesta por NC 334.
- Realizar una modelación por medio de sistemas multicapa de estructuras de pavimento flexible mediante el empleo del *software* Kenlayer a partir de datos disponibles de la fase de proyecto.
- Analizar los resultados de deformación obtenidos tras la modelación de las estructuras de pavimento flexible bajo análisis y comprobar sus períodos de diseño en correspondencia con la ley de comportamiento de los pavimentos en Cuba y el tránsito considerado.

El cumplimiento de los objetivos planteados en la presente investigación, se ejecutan atendiendo a las siguientes **tareas de investigación**:

- Revisión bibliográfica preliminar y planteamiento del problema, definición y aprobación del proyecto de investigación y su plan de trabajo.
- Análisis y síntesis de la literatura científica relacionada con la temática de investigación.
- Planteamiento de las metodologías a utilizar en la presente investigación y elección de *software* relacionado con la modelación de capas.
- Modelación de las estructuras de pavimentos bajo análisis a través del *software* Kenlayer a raíz de llevar a cabo la comprobación del período de diseño de la normativa cubana.
- Análisis y comprobación de los resultados ante la deformación de las estructuras de pavimento flexible y determinación de sus períodos de diseño, teniendo en cuenta la ley de comportamiento de los pavimentos en Cuba y el tránsito asumido.
- Elaboración y defensa del informe final.

La **estrategia metodológica** a realizar parte de un enfoque dialéctico materialista como método más general, se aplican una pluralidad de métodos y técnicas, en el orden teórico que se encuentra:

Métodos del nivel teórico:

- Inductivo - deductivo, se irá de lo universal, en la aplicación de las metodologías, a lo particular, en el análisis del diseño de estructuras de pavimento flexible para arribar a conclusiones.
- Histórico - lógico, para conocer la aplicación de las metodologías y específicamente su aplicación en el país, haciéndose comparaciones entre estas.
- Analítico - sintético, para poder establecer nexos, determinar aspectos comunes y distintivos en los enfoques metodológicos estudiados y arribar a conclusiones.
- Sistémico - estructural, para desarrollar el análisis del objeto de estudio y el campo de acción, a través de la descomposición en los elementos que lo integran y llegar a conclusiones.

Métodos del nivel empírico:

- Análisis de documentos, que permite valorar lo establecido al respecto en la aplicación de estas metodologías en Cuba y otros países.

Métodos del nivel matemático:

- Análisis de modelos matemáticos establecidos para diferentes metodologías en estudio.

La **novedad científica** de la investigación consiste en la comprobación del período de diseño propuesto por la metodología empírica de la NC 334, mediante la modelación de las capas componentes de la estructura de pavimento flexible y diferentes manifestaciones del tráfico mediante el *software* Kenlayer, en el análisis de la deformación de las estructuras proyectadas por dicha normativa.

El **aporte práctico e importancia** del presente trabajo responde a una necesidad de los proyectistas de la rama de viales de comprobar de manera sencilla mediante un análisis empírico – mecanicista el período de diseño de una estructura de pavimento flexible, teniendo en cuenta la deformación que sufre el pavimento bajo la acción del tráfico.

La **estructura de la tesis** guarda una estrecha relación con el diseño y metodología de la investigación establecida. Se encuentra estructurada de la siguiente forma:

- Resumen
- Introducción
- Redacción del Capítulo I “Estado actual del conocimiento sobre el diseño de estructuras de pavimento flexible y su comportamiento ante solicitaciones de tráfico”
- Redacción del Capítulo II “Planteamiento de procedimientos a implementar para la modelación por medio del *software* Kenlayer en la determinación de deformaciones de los pavimentos flexibles proyectados por la NC 334”
- Redacción del Capítulo III “Interpretación y análisis de los resultados en la comprobación del período de diseño de la NC 334 para el diseño de estructuras de pavimento flexible”
- Conclusiones generales
- Recomendaciones
- Referencias bibliográficas
- Anexos

## Capítulo 1: “Estado actual del conocimiento sobre el diseño de estructuras de pavimento flexible y su comportamiento ante solicitaciones de tráfico”

En el presente capítulo se realiza una amplia búsqueda bibliográfica relacionada con el tema de investigación para conocer el estado actual del conocimiento sobre el diseño de estructuras de pavimento flexible de hormigón asfáltico en caliente (HAC) y la distribución de las cargas y tensiones en las mismas, lo cual permite corroborar la hipótesis de este trabajo para luego constituir la línea de trabajo a alcanzar.

Se presentan en el capítulo los factores que intervienen en el diseño de estructuras de pavimento flexible, los métodos más relevantes para su diseño y los diferentes modos de deterioro que se presentan en el pavimento tras la acción del tráfico. Finalmente se comenta la utilización del *software* Kenlayer, programa de cómputo seleccionado en la presente investigación como herramientas de modelación y análisis del comportamiento estructural de los pavimentos flexibles.

En la práctica ingenieril se reconocen varias clasificaciones sobre los tipos de pavimentos como la que plantea la *Permanent International Association of Road Congress*, 2003 y la *Radelat*, 2003, en la que se destaca la de *Highway Safety Manual*, 2010, que clasifica los pavimentos en tres tipos: rígidos, articulados y flexibles (Sánchez, 2014).

Pavimentos rígidos: están constituidos por una losa de hormigón, armado o no, que puede o no descansar sobre una subbase de suelo seleccionado o tratado. Las cargas se distribuyen uniformemente debido a la rigidez del hormigón, lo que resulta que se presenten tensiones muy bajas a nivel de subrasante (Fundora, 2010).

Pavimentos articulados: son aquellos en los cuales la capa superior o acabado del pavimento está constituida por elementos prefabricados de concreto, piezas de arcilla cocida, o piedras duras en su forma natural o cortadas siguiendo algún patrón modular, estos se asientan sobre una capa de arena la cual se apoya sobre una capa de subbase. Transmiten los esfuerzos al terreno de soporte o suelo de fundación mediante un mecanismo de disipación de tensiones similar al flexible (ARQHYS, 2017).

Pavimentos flexibles: están constituidos por una superficie impermeable de espesor relativamente delgado, y una capa de base y/o sub-base, colocadas sobre una subrasante compactada. Al tener menor rigidez que los pavimentos rígidos, se deforma más y se producen tensiones mayores en la subrasante (Triste de Ceita, 2009).

Específicamente el presente trabajo de investigación se centrará en el análisis tenso-deformacional y el comportamiento estructural en los pavimentos flexibles ante la acción del tránsito.

### 1.1. Pavimentos flexibles

El pavimento flexible es una estructura compleja, sometida a diferentes combinaciones de cargas y a variadas condiciones ambientales. En su diseño debe concebirse una estructura que asegure las operaciones del tránsito de vehículos en la vía durante toda su vida de diseño, sin deterioros que afecten a la seguridad o a la comodidad de los usuarios. Una estructura de pavimento flexible clásica está formada por capas de diferente espesor y calidad, por un revestimiento hidrocarbonado desde la superficie, a veces dividido en una capa de rodadura y otra de adherencia, más una capa de base, una capa de subbase debajo de la anterior, donde finalmente apoyan en la explanada o subrasante (Triste de Ceita, 2009).

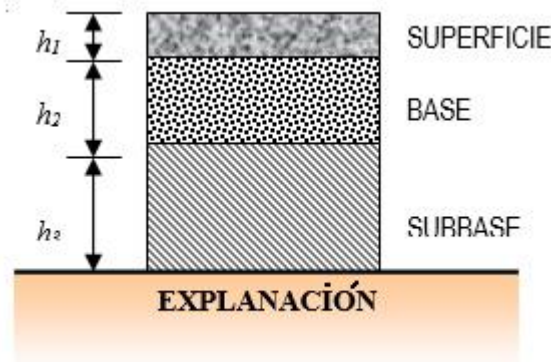


Figura 1.1 Estructura del pavimento flexible. Fuente: Elaboración propia

Para el alcance y análisis de las partes componentes de la estructura del pavimento flexible se exponen a continuación varios conceptos definidos actualmente:

#### Capa de rodadura

“Es la parte superior de un pavimento, de materiales de tipo bituminoso cuya función es sostener directamente el tráfico” (AASHTO, 2004).

“Capa superior del pavimento compuesta por una o más carpetas de mezcla asfáltica compactadas y que resiste los esfuerzos cortantes y tangenciales, transmitiendo en forma directa las cargas impuestas por el tráfico” (NC 253, 2005).

### **Base**

“Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante (*California Bearing Ratio*, CBR > 80%) o tratada, con asfalto, cal o cemento” (AASHTO, 2004).

“Capa de espesor y calidad previamente determinados que se coloca o prepara sobre la subbase y bajo el revestimiento o recubrimiento asfáltico. Capa del pavimento situada inmediatamente debajo de la capa de rodadura y que transmite las cargas del tránsito a la subbase y al terreno” (NC 822, 2010).

### **Subbase**

“Es una capa de material específico con un espesor de diseño, que soporta a la base y a la carpeta asfáltica; además se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse, la que puede ser de material granular o tratada con asfalto, cal o cemento” (AASHTO, 2004).

### **Subrasante**

“Nivel de interfase pavimento-explanación, que puede ser natural o compactada. Es el suelo portante inmediatamente debajo del pavimento que le sirve de cimentación y que puede influir por su resistencia, en el comportamiento del pavimento” (AASHTO, 2004).

Estas definiciones conceptuales son aplicadas íntegramente en los documentos normativos utilizados en Cuba, tal es el caso de la norma “Carreteras-Pavimentos Flexibles-Método de Cálculo” (NC 334, 2004).

## **1.2. Factores de diseño de estructuras de pavimento flexible**

La estructura de los pavimentos flexibles de carreteras debe diseñarse racionalmente asegurando la adecuada durabilidad y economía. Para lograr lo anterior se deben tener presente cuatro factores principales por su gran influencia, estos son (Fundora, 2010):

- La explanada o subrasante: está determinado por las características geotécnicas de los suelos del lugar y por las variaciones climáticas que condicionan la humedad de cálculo más desfavorable.
- Los materiales componentes: comprende los espesores y las características mecánicas de los materiales y mezclas de las capas de la estructura del pavimento, en condiciones de trabajo más desfavorables.
- Los factores climáticos: establecen un régimen de temperatura que afectan el trabajo de los materiales asfálticos y de humedades para los materiales no aglomerados del pavimento y la explanada.
- El tráfico: comprende la carga por rueda, el tipo de eje y la frecuencia de aplicación de las cargas.

En esta investigación, el tráfico ha de ser la variable de mayor importancia a manejar en el análisis del comportamiento estructural del pavimento flexible.

### **1.2.1. Subrasante**

El comportamiento de la subrasante está en función de la humedad y densidad de los materiales componentes de este tipo de suelos, dependiendo a las condiciones ambientales del sitio. Son suelos de baja capacidad de soporte, donde los valores de humedad alcanzan la condición saturada y los valores de densidad de campo están muy por debajo de la densidad de compactación, además de presentar valores de módulos elásticos realmente muy bajos (Medina, 2010).

El espesor total de un pavimento está en función de la resistencia de la subrasante y del tránsito que deberá soportar la estructura durante el período del diseño. Cuando existan valores muy bajos de capacidad de soporte en la subrasante se hace necesario realizar un proceso de estabilización en toda su profundidad o incorporar algún elemento de refuerzo (Medina, 2010).

La medida de la resistencia de la subrasante depende del método de diseño usado y cada uno tiene su ensayo particular. Dentro de los métodos que evalúan la resistencia de la subrasante existe el ensayo del *California Bearing Ratio* (CBR), el ensayo de placa (k) y el AASHTO T274-82 donde se aplica la correlación con ensayos empíricos (Triste de Ceita, 2009).

Generalmente los valores del ensayo *California Bearing Ratio* (CBR) por debajo de 8-10% son considerados inestables para soportar una estructura de pavimento, dada la correlación empírica entre el valor característico de CBR y el módulo resiliente ( $M_R$ ). Con esta consideración el módulo resiliente ( $M_R$ ) que se define como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación axial recuperable, será el parámetro elástico representativo del comportamiento de la subrasante porque siempre estará asociado a suelos con comportamiento estable. (AASHTO, 2004)

La evaluación de la resistencia de la subrasante siempre trata de considerar la influencia de la humedad, lo cual lleva, en el caso del ensayo de CBR, a probar las muestras después de un período de inmersión de cuatro días o con un contenido de agua que refleje las condiciones de humedad determinadas por la lluvia y la posición del nivel de aguas freáticas; o a manejar la variabilidad inherente de la resistencia del suelo de la subrasante en el tiempo, con medidas en diferentes meses y representando la resistencia por un valor efectivo que cuantifica el efecto combinado de los cambios del clima. (AASHTO, 1993)

En el caso de Cuba se clasifica la subrasante en tres categorías (NC 334, 2004): aceptable para un CBR que oscila entre 5% y 10%; media para un valor de CBR que oscila entre 10% y 15 %, y buena para un CBR mayor o igual a 15%.

### **1.2.2. Características de los materiales de la estructura del pavimento**

La identificación y selección de materiales corresponde a la fase inicial del proceso de diseño. El instrumento para la realización de este paso son las normas relativas a los materiales, estas normas son conservadoras y si los materiales las cumplen existe una alta probabilidad de que la estructura del pavimento presente un buen comportamiento, especialmente si las normas han sido desarrolladas bajo experiencia regional.

La caracterización de los materiales del pavimento requiere la cuantificación de la rigidez del material, es decir, la relación entre el esfuerzo y la respuesta deformacional en tiempo real definida esto por el módulo resiliente de elasticidad ( $E$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ). De esta manera, para algunos componentes del pavimento deberá proveerse una ley de fatiga definida por un criterio de falla. La validez de la aplicación de la teoría de capas elásticas, depende de la calidad de la caracterización de los materiales disponibles para la construcción (Triste de Ceita, 2009).

La NC 334 define valores de calidad en la selección de materiales para la construcción de bases y subbases. Los valores representativos de CBR, módulo de elasticidad, índice plástico e índice líquido de los materiales han de ser los más significativos en la aceptación y selección de estos.

En caso de suelos estabilizados, las características mecánicas de los materiales cambian sustancialmente con la aplicación de los productos estabilizantes, ya que el módulo de resiliencia se incrementa en valores apreciables (Triste de Ceita, 2009).

Cuando no se cuenta con suelos adecuados para la estructura del pavimento, tales como subrasantes, subbases y bases que no cumplan con las exigencias o especificaciones y que económicamente sea necesario recurrir al uso de productos estabilizadores, es conveniente que los de cada una de las capas ya estabilizadas, estén acorde con la capacidad de esfuerzo de las otras capas contiguas, ya que no es conveniente que una capa sea rígida y otra flexible, o que una impermeable quede debajo de una permeable (Medina, 2010).

En ocasiones los suelos no cumplen con los criterios de selección y no existe una disponibilidad económica para su mejoramiento, por lo que los diseñadores de este tipo de estructura ven condicionado su diseño a la calidad de los materiales de los que disponen.

### **1.2.3. Factores climáticos**

Los factores climáticos tienen su importancia, ya que las propiedades de los materiales descritas en el punto anterior dependen fuertemente de los valores de temperatura y humedad presentes en la sección estructural del pavimento. Por ello es necesario conocer fundamentalmente la distribución en el medio físico en cuestión de la precipitación, humedad, temperatura, viento y radiación solar.

La influencia de la temperatura ambiente en la vida de servicio de un pavimento asfáltico está considerada en el procedimiento de diseño mediante la ponderación de la temperatura promedio anual del aire. Se debe tener en cuenta que los valores de la temperatura generalmente son los promedios de valores obtenidos de largos períodos de observación. Durante la vida de servicio del pavimento el valor característico de temperatura puede desviarse del promedio de estos valores. Para períodos de diseño cortos, estas desviaciones deben ser tenidas en cuenta mediante la estimación de valores de promedios anuales de temperatura del aire para valores elevados, especialmente para el período de verano. El margen apropiado a usar depende de diversas peculiaridades del clima local (Medina, 2010).

El análisis de las variaciones de temperatura y perfiles de humedad en la estructura del pavimento y la explanación, sobre la vida de diseño de un pavimento, son considerados en la Guía de diseño AASHTO, 2004, a través de una herramienta de modelado climática sofisticada, denominada “Modelo Climático Integrado Mejorado” (Triste de Ceita, 2009).

En Cuba, la resistencia de cálculo en los suelos y mezclas asfálticas se define dentro del período de cálculo de mayo a octubre, donde son más elevadas las temperaturas del hormigón asfáltico y se esperan las mayores precipitaciones y humedad de los suelos de la explanación y de las capas no aglomerantes del pavimento (NC 334, 2004).

En la NC 334 la temperatura de cálculo es de 50°C, definida como un valor representativo de los máximos valores esperados, para una probabilidad del 95%; la humedad de cálculo considerada para los suelos de subrasante está en función del tipo de emplazamiento. En los terraplenes la humedad de cálculo será igual al 85% de la humedad óptima del ensayo estándar, mientras que para las excavaciones puede ser entre 90-95% de dicha humedad (NC 334, 2004).

#### **1.2.4. El tráfico**

El tránsito vehicular es la solicitud directa al sistema estructural que constituye el pavimento. La caracterización de las solicitudes producidas por el tránsito es bastante compleja debido a la variabilidad de los distintos vehículos existentes y las interacciones vehículo pavimento que producen solicitudes adicionales. Para dicha caracterización se consideran los siguientes aspectos (Medina, 2010):

- Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, tipos de ejes que circulan y número de repeticiones de carga).
- Forma geométrica de cada solicitud sobre el pavimento, área de contacto y reparto de presiones sobre la misma.
- Velocidad de los vehículos y tiempo de solicitud en un punto.
- Estado de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto) y las características de las capas de la estructura del pavimento.

Un procedimiento simplificado y ampliamente aceptado es establecer factores equivalentes y convertir cada grupo de carga en un eje simple de carga equivalente, en lugar de analizar los

esfuerzos y deformaciones debido a cada grupo de ejes de carga (Iturbide, 2002) .Este tipo de simplificación está establecida en la metodología de cálculo de la NC 334.

El método de diseño de pavimentos, Guía de diseño AASHTO, 2004, maneja la información del tránsito por medio de datos de ejes equivalentes, introduce en los módulos del programa de diseño la carga expresada en toneladas por tipo de eje, ya sea a nivel de cada tipo de vehículo de carga, o agrupándolos por tipo de eje: simple, doble y triple. La misma norma contempla los ejes equivalentes simples de 82 kN también conocidos como “*ESAL's*” (*Equivalent Single Axle Load*), acumulados durante el período de diseño pero ordenados en función de la frecuencia en que ocurren, en lo que ha sido denominado como “espectros de carga”. Esta metodología considera un período de diseño de uno a 20 años y la tasa de crecimiento del tránsito oscila de 1% al 5% anual, esta última se evalúa según el crecimiento del tráfico de vehículos pesados con el tiempo. (AASHTO, 2004)

El Método de Diseño del Instituto del Asfalto considera períodos de diseño de uno a 35 años y tasas de crecimiento del tránsito del 2 al 10% anual con una carga de cálculo de 80 kN (Triste de Ceita, 2009).

La NC 334 usa un método indirecto para la determinación de las solicitaciones del tráfico. Este método permite determinar las características del tránsito en cualquier vía, no se utilizan básculas o sistema de pesaje de los vehículos en su implementación, lo cual justifica su implementación en Cuba debido a que el país no dispone de estos en el estudio del tránsito. Dicho método se fundamenta en el criterio de que los vehículos ligeros no tienen influencia apreciable en el cálculo del pavimento. Los vehículos pesados han de ser los considerados para la estimación del número total de cargas por ejes, que se espera que circularán sobre el carril de diseño durante el período de diseño (Medina, 2010).

La razón anual de crecimiento de tránsito exige el estudio de las tendencias de crecimiento de la red. Como aproximación puede utilizarse el incremento anual del Producto Global. La NC 334 recomienda cuando no se dispone de información más precisa, una razón de crecimiento entre 0,03 y 0,04 (Triste de Ceita, 2009).

Esta normativa cubana en su método de cálculo para el diseño de estructuras de pavimento flexible reduce las cargas por eje de diferentes tipos y magnitudes a una carga de 100 kN, provocada por un eje simple sobre ruedas duales. Para llevar las repeticiones de una carga simple cualquiera a repeticiones de la carga de cálculo, es decir, número de ejes acumulados

( $\Sigma N$ ), la norma utiliza factores de equivalencia de las cargas. Esta carga característica de 100 kN es utilizada por el método en el cálculo estructural para determinar el estado de tensiones y deformaciones en las capas de la estructura y en la subrasante.

La NC 334 define de acuerdo al valor de  $\Sigma N$ , tres tipos de valores de tráfico de proyecto: ligero, medio y pesado, los que se subdividen en varias categorías, contemplados desde valores de tráfico muy pesados hasta valores de tráfico muy ligeros.

### **1.3. Modos de falla en los pavimentos flexibles provocados por la acción del tráfico**

El diseño de una estructura de pavimento flexible se basa en la consideración de la acumulación de los deterioros producto al tráfico que circula por una vía con el paso del tiempo. Existen diversos tipos de deterioro que se pueden presentar en una estructura de pavimento flexible, pero existen dos en particular sobre los cuales se enfocan la mayoría de las metodologías existentes de hoy, en este caso: las deformaciones permanentes y la fatiga de los materiales componentes (Moll, 2016).

#### **1.3.1. Deformación permanente en el pavimento**

La deformación permanente en los pavimentos es el resultado de la acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables que se manifiestan cada vez que una carga es aplicada sobre el camino. El efecto final es el ahuellamiento causado por el paso de los neumáticos de los vehículos. El ahuellamiento puede tener varias causas como, por ejemplo: el debilitamiento de las capas del pavimento por daños, por humedad, abrasión y exceso de tráfico pero la principal causa está asociada a la resistencia de soporte que tenga la subrasante y/o capas granulares, bajo la acción del tráfico (Medina, 2010).

Aunque las deformaciones permanentes no influyen inmediatamente en la capacidad de soporte del pavimento, se conoce que pueden acortar significativamente su vida efectiva, además de causar una pérdida importante en la calidad de servicio del camino (Triste de Ceita, 2009).

La deformación permanente total en las estructuras flexibles es la suma de la deformación producida en cada una de las capas del pavimento. La subrasante es la capa más susceptible a la deformación debido a su más baja rigidez y a una mayor probabilidad de presentar altos contenidos de agua, lo cual hace disminuir su capacidad portante (Triste de Ceita, 2009).

Como en la práctica es difícil determinar experimentalmente el cálculo de deformación permanente en la subrasante, ya sea por falta de equipos o definición acertada de trayectorias de esfuerzo, lo que se hace es correlacionarla con el valor del CBR. En general esta metodología radica en que el cálculo de los estados de esfuerzo y deformación se realiza por lo general suponiendo que el pavimento flexible es un sistema multicapa elástico lineal compuesto por tres capas: la subrasante, la capa granular no tratada y la capa asfáltica (Medina, 2010).

Para el caso de Cuba, el valor de deflexión admisible del pavimento se obtiene de forma analítica a través de la ley que representa el comportamiento del pavimento flexible para las condiciones de Cuba, ya que esta es la expresión matemática que relaciona la deflexión exigida en la superficie del pavimento al final del período de diseño, con el número de ejes de cálculo que circularán durante este tiempo. Aunque esta ley no se exponga en el método de cálculo de la NC334 sí se encuentra implícita en su procedimiento (Moll, 2016).

### **1.3.2. Fatiga en los materiales del pavimento**

En todos los métodos de diseño de pavimentos se acepta que durante la vida útil de la estructura se pueden producir dos tipos de fallas, la funcional y la estructural. La falla funcional se deja ver cuando el pavimento no brinda un paso seguro sobre él, de tal forma que no transporta cómoda y seguramente a los vehículos. La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga (Triste de Ceita, 2009).

Estos fenómenos que se producen en el pavimento durante su funcionamiento pueden ser modelados en el laboratorio haciéndose los llamados ensayos de fatiga; el agrietamiento que se produce en los materiales cuando se hacen las pruebas de laboratorio sobre las muestras de materiales o a escala natural, se asocia con la respuesta resiliente del pavimento ante las cargas dinámicas. En estos ensayos se ha determinado que las grietas se propagan de la base de cada capa hacia arriba (García, 2014).

Cuando se considera que los materiales que conforman la estructura durante su vida útil están trabajando dentro del rango elástico, entonces la fatiga de estos es causada por repeticiones

de carga impuestas por el tránsito. Por consiguiente, el comportamiento de fatiga para las capas que conforman el pavimento se presenta normalmente como una relación entre las repeticiones de carga y la deformación (Triste de Ceita, 2009).

Por lo que de forma general el pavimento flexible puede fallar de dos maneras asociadas a la acción directa de las cargas del tránsito (Yoder & Witczak, 1975):

- Que la deformación horizontal por tracción ( $\epsilon_t$ ) en la fibra inferior de las capas asfálticas, al flexionar ellas bajo la acción de las cargas, supere cierto límite admisible, en este caso se producirá agrietamiento en dichas capas.
- Que la deformación vertical ( $\epsilon_z$ ) por compresión de la subrasante supere el límite admitido por ella, caso en el cual se presenta una deformación permanente y por consiguiente la del pavimento, en este caso se producirá ahuellamiento.

#### **1.4. Teorías para el análisis de los pavimentos flexibles por medio de sistemas de capas**

En el curso de la historia se han desarrollado varias teorías para el cálculo de las tensiones y deformaciones generadas en los pavimentos flexibles bajo la acción del tránsito. Dentro de estas hay que destacar los modelos desarrollados por medio de sistemas de capas, en la interpretación del análisis tensional que se generan en los pavimentos flexibles ante las cargas del tránsito.

##### **1.4.1. Modelos elásticos lineales**

Fueron los primeros modelos desarrollados y declaraban una serie de suposiciones básicas para la solución analítica de los estados de esfuerzos y deformaciones (Torres Vila, 1985):

- El material de cada capa es homogéneo, isotrópico y linealmente elástico y está caracterizado por su módulo elástico (E) y su relación de Poisson ( $\nu$ ).
- El peso del material es despreciable.
- Con excepción de la inferior, todas las capas tienen espesor finito.
- Las capas son infinitas lateralmente y no tienen juntas ni grietas.
- Hay fricción completa en las interfaces.
- No existen fuerzas cortantes en la superficie.

- La carga que ejercen los neumáticos en la superficie se interpretan como una presión uniforme a través de un área circular.

Como pioneros de este análisis elástico en el comportamiento de los pavimentos vale destacar los modelos bicapa desarrollados por Boussinesq, 1943, tricapa por Burmister, 1945 y sistemas multicapa Huang, 1967, que posteriormente han sido implementados mediante *software* en la modelación de estos debido a su complejidad y trabajo matemático.

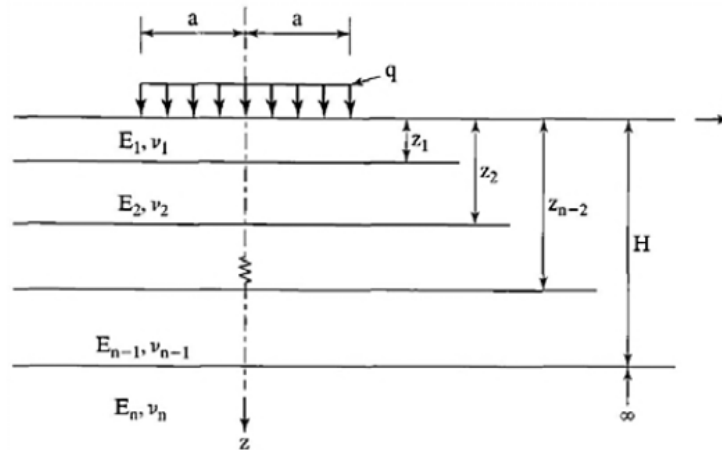


Figura 1.2 Sistema elástico multicapa generalizado. Fuente: Huang, 1993

#### 1.4.2. Modelos elásticos no lineales

Estos modelos mantienen igualmente varias de las suposiciones del análisis elástico lineal, pero la relación entre el esfuerzo vertical y la deformación vertical no es constante, sino que depende de la magnitud del esfuerzo aplicado.

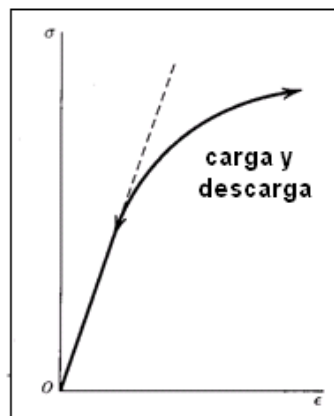


Figura 1.3 Relación esfuerzo vs deformación. Fuente: Sánchez, 2014

Es decir, que los valores del módulo de elasticidad varían con el nivel de esfuerzo a los cuales son sometidos. El módulo de elasticidad de los materiales granulares se incrementa con el aumento de la intensidad del esfuerzo, mientras que en los suelos finos el módulo disminuye con el incremento de la intensidad de la carga aplicada.

### 1.4.3. Modelos visco-elásticos

Los modelos visco-elásticos difieren del comportamiento elástico del material, porque estos consideran que los materiales se comportan de forma plástica bajo diversas situaciones de cargas, quiere decir, que la respuesta de las deformaciones está totalmente desfasada con respecto a la tensión aplicada, pues estos consideran otros factores que afectan dicha relación, como por ejemplo: la velocidad de los esfuerzos aplicados en el tiempo y la temperatura ambiente (Moreno & Pinto, 2007).

### 1.5. Métodos de diseño de pavimentos flexibles

Independientemente del tipo de material que conforman las estructuras de pavimento, se han realizado una serie de estudios, enfocados a la creación de métodos de diseño que permitan contar con la existencia de pavimentos más confortables y duraderos, entre los que se destacan: El método empírico, semi-empírico o empírico-mecanicista (estado de la práctica actual en varios países) y mecanicista (Medina, 2010).

Para el análisis de su desarrollo y evolución de estos se exponen a continuación los métodos más significativos en el diseño de pavimentos flexibles:

**Tabla 1.1 Métodos de diseño de pavimento flexible. Fuente: Medina, 2011**

<b>Métodos de Diseño de Pavimentos Flexible</b>		
<b>Métodos Empíricos</b>	<b>Métodos Empíricos - Mecanísticos</b>	<b>Métodos Mecanísticos</b>
AASHTO [(1958, 1972, 1986 y 1993) EE.UU.]	AASHTO [(2004) EE.UU.]	Lo que se pretende alcanzar
Road Note [(1975 -1993) Reino Unido]		
SHELL [(1978) Reino Unido]	SHELL [(1993) Reino Unido]	
Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM [(1981) México]		

Instituto del Asfalto [(1979- 1981) EE.UU.]	Instituto del Asfalto [(1982 - 1993) EE.UU.]	
MOPU [(1990) España]	LCPC [(1997) Manual Francés]	
Norma Cubana 334 (2004)	Theyse H. L. [(1996) Sudáfrica]	

### 1.5.1. Métodos empíricos

Los desarrollos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de pavimentos existentes, en estos se correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones de campo con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras. Los factores más importantes son las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones ambientales (principalmente temperatura y precipitación) a las cuales se encuentra sometida la estructura, el tipo de suelo de la explanada, la calidad de los materiales empleados y deficiencias durante el proceso constructivo. Todos estos factores son controlados y medidos durante las fases de estudio para correlacionarlos con los mecanismos de degradación y crear así el método de diseño (García, 2014).

#### 1.5.1.1. Método de la AASHTO

Este procedimiento es de amplia aceptación para el diseño de pavimentos flexibles y es el principal documento para el diseño y rehabilitación de pavimentos de carretera, se presenta en la Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimento, la cual es publicada por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* en el año 1962. Este método combina ecuaciones, tablas y figuras. La información de pruebas incluidas en el desarrollo del método fue recolectada en el Ensayo Vial AASHTO de 1958 a 1961 y se llevó a cabo en Ottawa, Illinois (García, 2014).



**Figura 1.4 Ensayo realizado en Ottawa, Illinois. Fuente: Guía AASTHO 1993**

La Guía conserva los algoritmos originales del Ensayo Vial correspondientes a un grupo reducido de materiales, un solo tipo de explanada, tránsito homogéneo y muy modesto comparado con la actualidad y el medio ambiente del sitio del ensayo.

La Guía comprende procedimientos para diseñar pavimentos, incluyendo la selección del tipo de estructura, el espesor total de la misma y el espesor de cada capa componente. Las versiones de (1972-1993) de la Guía de Diseño fueron basadas en la ecuación resultante del comportamiento de la pista de pruebas de la AASHO en la década de 1950, con estas metodologías se han diseñado con éxito las estructuras de pavimentos para varios millones de kilómetros de carreteras en el mundo (Triste de Ceita, 2009).

La metodología de diseño implantada en 1972 con la publicación por AASTHO es de carácter empírico y no incorpora procedimientos mecanicistas. En la Guía de Diseño de Pavimentos AASTHO, 1986, se reconoce abiertamente la conveniencia de avanzar hacia la adopción de procedimientos de diseños empírico-mecanicistas que permitan predecir el desempeño de estructuras de pavimento teniendo en consideración las variaciones en las cargas, los materiales, los dispositivos de diseño, así como los efectos directos del clima, sin embargo, en aquel entonces no era práctico desarrollar dicha metodología por la ausencia de sistemas de cómputo. La Guía de Diseño de 1993 indirectamente usa procedimientos mecanicistas para evaluar el deterioro debido al clima y establecer coeficientes para drenaje y transferencia de cargas (Medina, 2010).

El método AASTHO 1993 presenta el criterio de “confiabilidad”, el cual permite adoptar un nivel de “seguridad” ante la falla prematura del pavimento dentro del período de análisis. La falla del pavimento no está asociada a un tipo de daño en particular, sino al concepto de

serviciabilidad, calificado como Índice de Condición del Pavimento (PCI – *Pavement Condition Index*), en el cual la regularidad, las grietas y las roderas, son componentes importantes (Medina, 2010).

#### **1.5.1.2. Método de la SHELL**

En 1963 la *Shell Transport and Trading Company*, conocida como SHELL, publica: “*Design charts for flexible pavements*”, representativo de un juego de cartas de diseño para pavimentos flexibles como metodología. Años más tarde, el procedimiento fue expandido para incorporar importantes parámetros de diseño que determinan las propiedades de los materiales y los efectos de la temperatura y carga dentro de un paquete conocido como el Manual de Diseño de Pavimentos SHELL de 1978 (García, 2014).

El método de diseño SHELL considera la estructura como un sistema de tres capas. La capa superior representa todos los materiales ligados y se caracteriza por las propiedades de la base asfáltica, la segunda capa representa la sub-base no ligada y la tercera capa la explanada. Las capas asfálticas y de sub-base se consideran construidas con materiales homogéneos, de espesor uniforme y extensión horizontal infinita, los cuales yacen sobre una explanada homogénea semi-infinita. Se considera que todas las capas desarrollan fricción total en sus interfaces. Este define la carga aplicada a la estructura como el número estimado de ejes estándar acumulados durante el período de diseño (García, 2014).

El principio del método es diseñar la capa asfáltica de tal forma que las cargas del tránsito aplicadas al pavimento no generen una deformación excesiva en la interface entre la sub-base y la explanada (criterio de la deformación unitaria vertical por compresión de la explanada) y no induzcan el agrietamiento estructural de la base asfáltica (criterio de deformación unitaria por tensión en la parte inferior de la capa asfáltica). Las propiedades que determinan el comportamiento de los materiales del pavimento son la rigidez y la relación de Poisson de cada capa (Medina, 2010).

#### **1.5.1.3. Norma Cubana 334**

La NC 334:2004 establece como metodología de cálculo un procedimiento empírico que se fundamenta en el cálculo de un espesor total equivalente a una base granular de 500 MPa, para una carga característica de 100 kN, utilizando el tráfico de diseño y la resistencia de la subrasante. Con ayuda de los coeficientes de equivalencia de espesores se conforma la estructura definitiva, sustituyendo cada parte del espesor total con materiales de otras

características resistentes para la superficie, base y subbase. La ecuación de comportamiento, los coeficientes de equivalencia y espesores mínimos que se usan en la norma han sido validados mediante procedimientos de cálculo analítico. Se calcula el tráfico de diseño a partir de recuentos en una vía de características similares, o en su defecto, se recomiendan parámetros que permiten estimarlo. Se propone en esta norma un método indirecto para la determinación de las cargas del tránsito cuyo procedimiento es útil en los estudios de cargas en ausencia de equipos para el pesaje de los vehículos (Medina, 2010).

Es importante señalar que la misma toma como base los conceptos establecidos en la “*Guide for design of pavement structures*”, publicada por la AASHTO en el año 1986, y en “*Thickness design-asphalt pavements for highways and streets*”, del *Asphalt Institute*, 1991 y considera las leyes de fallo y clasificación para los suelos de subrasante, ajustadas para las condiciones de Cuba, tomado de “Introducción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía” publicada por la Consejería de Obras Públicas y Transportes, España, 1999. (NC 334, 2004)

### **1.5.2. Métodos empírico-mecanicistas**

Método científico basado en el análisis mecánico que proporciona las herramientas para evaluar las variaciones de los materiales en el comportamiento del pavimento y que además utiliza los principios de la mecánica racional para predecir el comportamiento estructural (esfuerzos y deformaciones) en la búsqueda de diseños más eficientes y duraderos. Este método presenta modelos matemáticos cuya solución se basa en (García, 2014):

- Los requerimientos físicos de una estructura para soportar las cargas externas, las deformaciones y los esfuerzos en los elementos,
- El comportamiento mecánico de los materiales de acuerdo con las leyes básicas de la mecánica que gobiernan el movimiento y las fuerzas.

Los métodos de diseño empírico-mecanicistas tienen grandes ventajas como son:

- Utilizan distintos tipos de cargas y cuantifican el impacto en el desempeño del pavimento.
- Utilizan materiales disponibles de manera más eficiente.
- Realizan predicciones confiables.
- Mejor evaluación de aspectos constructivos.
- Incluyen efectos ambientales y de envejecimiento en los materiales.

### **1.5.2.1. Método de diseño del *Asphalt Institute* (AI)**

En Estados Unidos el Instituto del Asfalto en el año 1981 propone un modelo para predecir la vida por fatiga de las mezclas asfálticas y en la predicción del Módulo Dinámico. (Yoder & Witczak, 1975). El mismo método considera un valor del módulo resiliente de la subrasante de 100 MPa y un tránsito de  $1 \times 10^6$  ejes de 80 kN, para el que se obtiene un espesor de mezcla asfáltica. La actualización de este método para 1993 presenta algunos cambios significativos respecto a los métodos anteriores para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles. Este se basa principalmente en la aplicación de la teoría elástica en sistemas multicapas que utiliza resultados de investigaciones recientes por parte de ese organismo (Medina, 2010).

El método considera períodos de diseño de uno a 35 años y tasas de crecimiento del tránsito del 2 al 10% anual, también incorpora factores de ajuste de los ejes equivalentes de diseño para diferentes presiones de contacto de las llantas sobre el pavimento en función de su presión de inflado y de los espesores de la carpeta asfáltica, donde contempla desde 10 hasta 25 cm de espesor; además, considera como parámetro fundamental dentro de la evaluación de los materiales, la obtención del módulo resiliente ( $M_r$ ), sin embargo, reconocen que no todos los organismos o dependencias tienen el equipo adecuado para llevar a cabo tal prueba, por lo que han establecido factores de correlación entre  $M_r$  y la prueba estándar de Valor Relativo de Soporte (CBR); no obstante, para un diseño preciso se recomienda llevar a cabo la prueba de  $M_r$  para la capa de la subrasante (García, 2014).

El método contempla factores de medio ambiente y varios tipos o clases de asfalto, según las necesidades particulares de los usuarios, ejes equivalentes con metodología AASHTO, factor de ajuste para diferentes presiones de contacto de llantas,  $M_r$  de diseño, correlación del  $M_r$  con Valor Relativo Soporte y pruebas índices según AASHTO para compactación (Triste de Ceita, 2009).

### **1.5.2.2. Procedimiento de diseño francés (LCPC)**

Es un procedimiento de diseño que se presenta como la adaptación de la metodología expuesta en el *French Design Manual for Pavement Structures* en el *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC, 1997), este se basa en el concepto de esfuerzos (deformaciones unitarias) de trabajo en las capas del pavimento, los cuales se determinan de acuerdo con las

características de fatiga del material, el tránsito acumulado y el riesgo aceptable (Medina, 2010).

Se considera que la variabilidad de las características mecánicas de los materiales del pavimento está dentro de unos límites reducidos para materiales que son artificiales y se construyen de acuerdo con alguna especificación. Por lo tanto, los únicos factores que se toman en consideración para la variabilidad de la ocurrencia de los deterioros del pavimento son los resultados de los ensayos de fatiga y el espesor construido de las capas (García, 2014).

En el proceso de diseño del pavimento se anticipa un número de repeticiones de ejes NE y se establece un riesgo  $r$ , de forma que el pavimento se diseña para una probabilidad de falla, a las  $N$  repeticiones de carga, menor o igual que  $r$  (García, 2014).

El Manual Francés presenta una serie de relaciones sugeridas para la obtención de los módulos de elasticidad de las capas granulares no tratadas. Sin embargo, aclara que aún no existe una metodología plenamente aceptada para la determinación de este parámetro en dichos materiales, por lo cual se sugiere hacer uso de las ecuaciones como herramienta suficiente para la estimación de los módulos de elasticidad de los materiales granulares no ligados (García, 2014).

Además de la metodología que se presenta para el diseño de estructuras de pavimento flexible este manual expone una herramienta para la modelación computacional, el *software* ALIZE (LCPC, *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*).

### **1.5.2.3. Método de la AASHTO**

La Guía de diseño AASHTO 2004, para estructuras nuevas y rehabilitación de pavimentos combina el análisis mecanicista de los pavimentos con verificación empírica del comportamiento a través de la predicción de determinados tipos de deterioros, es también conocida como *Mechanical Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG).

Dicha metodología no utiliza una ecuación de regresión para el diseño, sino recomienda la aplicación de la teoría elástica y modela el medio mediante múltiples capas horizontales, homogéneas, con comportamiento elástico en la explanada, bases granulares y comportamiento visco-elástico para los materiales asfálticos.

El procedimiento MEPDG calcula la respuesta del pavimento en cuanto a deformaciones y tensiones asociadas a las cargas de tráfico y las condiciones climáticas, además acumula el daño producido durante el período de diseño. Empíricamente a través de modelos de regresión relaciona el daño en el tiempo con deterioros típicos tales como: fisuras, ahuellamiento e índice de regularidad internacional (IRI) (Balay, 1997).

La guía introduce el concepto de carga de diseño en lugar de la conversión a ejes equivalentes “ESAL’s” y reemplaza el índice de servicio por indicadores de deterioro, funcional y estructural (García, 2014).

Actualmente la Guía MEPDG es uno de los métodos más novedosos y exactos que se utiliza en el diseño de estructuras de pavimento. Es resultado de un proyecto de investigación que incluso hoy continúa en desarrollo y que muchos países han tratado de replicar en dependencia de sus particularidades.

### **1.5.3. Métodos mecanicistas**

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular (Medina, 2011). Este método de diseño se basa que un pavimento puede ser modelado como una estructura multicapa elástica o visco-elástica sobre una cimentación elástica o visco-elástica. Con esta premisa es posible calcular las tensiones y deformaciones producidas por las cargas de tráfico y efectos del clima. En este método se conocen las propiedades fundamentales de los materiales y la geometría de la estructura sometida a sollicitaciones, el módulo de resiliencia se usa como un parámetro de cálculo que se correlaciona con el CBR y no como una propiedad fundamental del material. Esta metodología permitirá la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad de diseños.

Los beneficios que se pueden derivar de la correcta aplicación de los procedimientos mecánicos son:

- Mejora la confiabilidad para el diseño.
- Tiene capacidad de predecir tipos específicos de fallas.
- Tiene la capacidad de extrapolar resultados de campo y laboratorio.

Sin embargo, se concuerda que el comportamiento de los pavimentos está influenciado por varios factores que no permiten una modelación por los métodos mecanicistas puros que produzcan resultados suficientemente exactos y precisos para la predicción de su desempeño a lo largo de su ciclo de vida (Moreno & Pinto, 2007).

## **1.6. Programas para la modelación del pavimento flexible. Características**

El desarrollo alcanzado por la modelación matemática y los *software* profesionales disponibles en el mercado permiten el empleo de herramientas en el diseño de pavimentos flexibles al permitir modelar el comportamiento de sistemas multicapas ante cargas dinámicas y estáticas. Las características que brindan dichos sistemas hacen que en la actualidad se abran nuevas perspectivas en el campo de la modelación, su uso no solo se enmarca en la solución de problemas complejos donde los métodos analíticos son insuficientes, sino que existen tendencias actuales donde se aplican procedimientos numéricos para estudiar problemas a nivel de deformacional que se presentan en los pavimentos, permitiendo caracterizar su comportamiento ante la acción de las cargas y llegar a conclusiones. Ejemplo de ello son los *software* como: ALIZE, BISAR, ICAFIR, MEPDG, KENLAYER entre otros.

### **1.6.1. Software ALIZE**

El ALIZE-LCPC es un programa de dimensionamiento de los pavimentos basado en un modelo informático. Este *software* ha sido desarrollado por las organizaciones francesas LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) y SETRA (*Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagement*). Se trata del método de dimensionamiento de uso más extendido por la red de carreteras de Francia, además de ser usado por otras agencias externas.

La versión más completa del programa contiene tres módulos:

- *Alize-mechanical module*: determinación de deformaciones y tensiones en las capas generadas por el tráfico.
- *Alize-frost thaw module*: verificación del diseño considerando el comportamiento de la estructura ante los efectos de la escarcha en invierno.
- *Alize-back calculation module*: cálculo del módulo elástico de los materiales de las estructuras basado en medidas de deflexión en ensayos.

En cuanto a las especificaciones mecánicas del modelo, este permite evaluar las tensiones generadas por el tráfico hasta 15 capas que pueden conformar una estructura haciendo uso del modelo de Burmister. La estructura descansa sobre un espacio semi-infinito y se compone de diversas capas de espesor constante y comportamiento lineal, isotrópico y elástico.

### **1.6.2. Software BISAR**

BISAR (*Bitumen Stress Analysis in Roads*) es el módulo de dimensionamiento de los pavimentos del programa SPDM 3.0, de la multinacional de origen holandés Shell. El programa SPDM (*Shell Pavement Design Method*) además de dimensionar estructuras de pavimento, puede calcular rutas y estimar propiedades del ligante bituminoso y la mezcla asfáltica a través de una gran lista de composiciones y condiciones.

BISAR es un modelo de respuesta multicapa elástico lineal. Hasta 10 cargas circulares verticales y uniformes pueden ser definidas, en forma de un neumático o dos, y también un cortante horizontal.

Los datos de entrada pueden ser guardados por separados para repetir cálculos en otras condiciones, mientras que los datos de salida pueden obtenerse de diferentes maneras: resumido o detallado y especial para impresión o para un informe.

### **1.6.3. Software ICAFIR**

El método ICAFIR es el primer método analítico de dimensionamiento de estructuras de pavimento flexible producido en España a cargo de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía. Este usa el modelo de Burmister, es decir, estructura multicapa de comportamiento elástico, lineal, homogéneo, isótropo y continuo, lo que permite conocer tensiones y deformaciones en las capas componentes de la estructura.

El programa permite dimensionar estructuras flexibles, pero además ofrece la posibilidad igualmente para estructuras rígidas y semirrígidas; el dimensionamiento de estructuras rígidas se basa en dos criterios de fallo: erosión y fatiga.

Además del dimensionamiento en sí, el programa tiene otras opciones como la división en tramos distintos del cimiento de la carretera o el diseño de pavimentos de adoquines. El programa también puede emitir informes sobre el diseño realizado.

#### **1.6.4. Software MEPDG**

MEPDG es una guía de dimensionamiento analítico de estructuras flexibles elaborada en Estados Unidos, desarrollada por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* y basada en las directrices de la *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP). Ambas entidades ofrecen garantías suficientes de experiencia en el campo; de hecho, la AASHTO es la entidad que desarrolló en 1963 el ensayo que dio lugar al desarrollo de los métodos de dimensionamiento de estructuras que se conoce como “ensayo AASHO”.

El MEPDG proporciona un conjunto uniforme y completo de procedimientos para el análisis y diseño de pavimentos flexibles nuevos y rehabilitados. El MEPDG emplea parámetros comunes de diseño para el tráfico, los materiales, la subrasante, el clima y la confiabilidad para todos los tipos de pavimento y puede ser utilizado para desarrollar diseños alternativos empleando una variedad de materiales y procedimientos de construcción.

El resultado del MEPDG es predecir los deterioros y fallas y el IRI (regularidad superficial) al nivel de confiabilidad seleccionado. Por lo tanto, no es un procedimiento de diseño directo de espesores, sino más bien es una herramienta de análisis para que el diseñador la use de manera iterativa.

#### **1.6.5. Software KENLAYER**

Kenlayer, *software* desarrollado por la Universidad de Kentucky, herramienta que se utiliza para el diseño y análisis de estructuras de pavimentos flexibles, tiene su origen en 1993 con la primera edición del libro *Pavement Analysis and Design* del profesor Dr. Yang Hong Huang. La actualización de 2003 es la más reciente y se adjuntó como *software* a un paquete llamado KENPAVE, que incluye además un *software* para el análisis de pavimentos rígidos denominado KENSLABS.

El problema básico que resuelve el Kenlayer consiste en sistemas de pavimentos de varias capas de material elástico sometidos a una carga circular. Este *software* puede ser aplicado a sistemas de varias capas sometidos a cargas de rueda simple, dual, dual tándem o dual trídem con cada capa comportándose de manera diferente, sea de manera elástica lineal, elástica no lineal o visco-elástica.

En cuanto al modelo de deterioro, el *software* KENLAYER posibilita la evaluación durante diferentes períodos del año hasta 12 diferentes. El estudio se basa en la fisuración por fatiga y la deformación permanente, de manera que se suman los efectos para llegar a una estimación de la vida del pavimento donde también se pueden definir condiciones climáticas para la estimación.

### **1.7. Selección del programa de cómputo**

Se pudo apreciar en los epígrafes anteriores cómo todos los programas mencionados se basan en el método de la teoría de capas, es decir, a partir de espesores y módulos de deformación y mediante una carga que se le aplica al pavimento se pueden determinar las tensiones y deformaciones que en este se desarrollan. La mayoría de estos programas realizan solamente un tipo de análisis lineal y no tienen en cuenta otro comportamiento de los materiales ante las deformaciones. El programa de cómputo que se selecciona para la presente investigación es el Kenlayer porque el mismo tiene bajas solicitaciones de cómputo y permite realizar el análisis de la acumulación de daños en la estructura de pavimento, así como una estimación de la vida de diseño del pavimento, pues como se verá con posterioridad el programa permite modelar materiales de tipo lineal, no lineal y visco-elástico. También este programa, además de contemplar los parámetros característicos de los materiales como el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) considera el módulo resiliente de los materiales bajo la consideración de 24 períodos como máximo para variaciones de carga y comportamiento mecánico de los materiales, lo que permite a este *software* obtener resultados más confiables y exactos en la interpretación de las cargas originadas por el tráfico.

### **1.8. Conclusiones parciales**

El diseño del pavimento flexible consiste en establecer una estructura para un tiempo determinado bajo el efecto de las solicitaciones del tránsito y del medio ambiente. Los principales factores que intervienen en el diseño son: el tráfico, la subrasante, los materiales y las condiciones climáticas.

La acción directa del tránsito sobre el pavimento se manifiesta en diferentes modos de falla dentro de las cuales los más críticos a considerar son: las deformaciones permanentes y la fatiga de los materiales componentes.

Los métodos de diseño para pavimentos flexibles pueden ser de tres tipos: empíricos, semiempíricos o empírico-mecanicistas y mecanicísticos. Los empíricos se caracterizan por la

ausencia de predicción explícita del daño causado por la fatiga y están basados en la experiencia. Los semiempíricos, corresponden a un desarrollo posterior donde se incluye el análisis de la fatiga y un modelo de daño, pero con ajustes para considerar el comportamiento real. Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular.

El método de la NC 334:2004 se fundamenta en conceptos empíricos, es decir, su metodología de cálculo para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento ha sido validada mediante procedimientos de cálculo analítico. Esta propone un método indirecto para la determinación de las cargas del tránsito y establece de forma general 20 años como período de diseño para los pavimentos flexibles.

La modelación matemática por medio de *software* permite el análisis de estructuras de pavimentos flexibles, al permitir modelar el comportamiento de sistemas multicapa ante diferentes consideraciones de carga producto a la acción del tránsito, de esta forma se afirma que lo planteado en la hipótesis puede ser corroborado tras su implementación en el análisis del objeto de estudio.

## **Capítulo 2: “Planteamiento de procedimientos a implementar para la modelación por medio del *software* Kenlayer en la determinación de deformaciones de los pavimentos flexibles proyectados por la NC 334:2004”**

En el presente capítulo se analiza detalladamente la metodología de cálculo que establece la NC 334 en el diseño de los pavimentos flexibles; se define el cálculo de los principales deterioros asociados a la acción del tráfico y posteriormente se describen los procedimientos a implementar en la modelación por medio de sistemas multicapas a través del *software* Kenlayer en la determinación de deformaciones unitarias en los pavimentos flexibles proyectados por dicha normativa.

### **2.1. Procedimiento de diseño de la NC 334:2004**

La Norma Cubana 334 “Carreteras. Pavimentos flexibles. Método de cálculo” que es la norma vigente para el dimensionamiento de pavimentos flexibles en Cuba, establece un procedimiento de cálculo para la determinación de un espesor equivalente (T) a una base granular de 500 MPa para un determinado tráfico de diseño ( $\Sigma N$ ) y resistencia de subrasante. Esta se apoya en valores de coeficientes de equivalencia de espesores para conformar la estructura definitiva, sustituyendo cada parte del espesor total con materiales de otras características resistentes, para la superficie, base y subbase. La ecuación de comportamiento, los coeficientes de equivalencia y espesores mínimos que se usan en la norma han sido validados mediante procedimientos de cálculo analítico.

Esta norma considera en su diseño cuatro factores básicos: los parámetros climáticos existentes, el valor representativo del tráfico de diseño, la resistencia de la subrasante y la característica de los materiales que componen la estructura del pavimento flexible.

A continuación se exponen los pasos lógicos a seguir en la implementación de la metodología de cálculo de la NC 334:2004 en el diseño correspondiente a cualquier estructura de pavimento flexible.

### 2.1.1. Definición de los parámetros climáticos para el diseño

Las resistencias de cálculo en los suelos y mezclas asfálticas se definen dentro del período de cálculo de mayo a octubre, donde son más elevadas las temperaturas del hormigón asfáltico y se esperan las mayores precipitaciones y humedades de los suelos de la explanación y de las capas no aglomerantes del pavimento.

La temperatura de cálculo definida para pavimento flexible es de 50°C, definida como un valor representativo de los máximos valores esperados, para una probabilidad del 95%.

La humedad de cálculo considerada para los suelos de la subrasante está en función del tipo de emplazamiento. En los terraplenes la humedad de cálculo será igual al 85% de la humedad óptima del ensayo estándar, mientras que para las excavaciones puede ser entre 90-95% obtenida igual de dicha humedad óptima.

Cuando en las excavaciones exista influencia del manto freático, deben tomarse los valores de resistencia en muestras saturadas sometidas a cuatro días de inmersión. Pueden ser consideradas como las profundidades del manto freático por debajo de la subrasante, a partir de la cual este no influye en la saturación de las capas superiores, las de la tabla 2.1, según el tipo de suelo.

**Tabla 2.1 Profundidad del manto freático para no considerar la saturación. Fuente: NC 334**

Tipo de suelo de subrasante	Índice de Plasticidad	Profundidad del MF desde la subrasante (m)
Arenas	NP	> 1,0
Arcillas arenosas	< 10 %	> 1,5
Arcillas limosas	20 - 30	> 2,5

Para las capas de bases y sub-bases de materiales no aglomerados, la humedad de cálculo será igual al 85% de la óptima del estándar, excepto en sub-bases colocadas bajo bases permeables.

### 2.1.2. Análisis y obtención del tráfico de diseño

Las cargas impuestas por los vehículos ligeros no provocan en el pavimento un estado tensional de magnitud tal que genere el deterioro de la estructura, por tanto, para los propósitos de diseño los vehículos ligeros pueden ser ignorados y solo se consideran los efectos de los vehículos pesados. Son vehículos ligeros los autos, jeep, paneles, pick/up y los ciclos, vehículos de tracción animal, vehículos cuyo peso no exceda de 3500 kg. Considerándose como vehículos pesados los mayores a 3500 kg.

Para determinar el tráfico de diseño se procede como sigue:

a) Calcular la Intensidad Diaria de Vehículos pesados por el carril de diseño.

La Intensidad Diaria de Camiones ( $ICD_0$ ) es el volumen de camiones en el año inicial que circularán por el carril de diseño, en el sentido más cargado esperado como promedio diario durante el primer año de puesta en explotación de la carretera.

La Intensidad Diaria de Vehículos pesados en el carril de diseño durante el primer año de servicio puede ser obtenida mediante la expresión siguiente:

$$ICD_0 = PAIDT_0 * \frac{PVP}{100} * \frac{PCD}{100} * k \quad (\text{camiones/día}) \quad (2.1)$$

Donde:

k: Distribución por sentido de circulación.

PVP: Porcentaje de vehículos pesados respecto al total (%).

PCD: Porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño (%).

PAIDT<sub>0</sub>: Promedio Anual de Intensidad Diaria de Tránsito en el año inicial (veh/día).

El coeficiente k tiene en cuenta la distribución del tráfico total por sentido de circulación, generalmente el valor puede ser asumido como 0.5 para tráfico balanceado.

Los parámetros PVP y PCD se obtienen mediante recuentos en una vía existente de características similares a la del proyecto. En ausencia de aforos, estudios de planeamiento o por falta de datos más precisos, pueden utilizarse los valores que se muestran en la tabla 1 del Anexo 1. Los factores propuestos para cada categoría de vía son el resultado de recuentos clasificados, realizados durante varios años en arterias urbanas, autopistas y en varias vías rurales, mediante el "Método indirecto de determinación de las cargas del tráfico", expuesto en los anexos de la NC 334.

El Tránsito inicial, PAIDT<sub>0</sub>, es el volumen total del tránsito diario en ambos sentidos de circulación, que se espera que circulen como promedio, durante el primer año de puesta en explotación de la vía yestima a partir de los estudios para construir la vía o sobre la base del uso potencial de la tierra u otros factores.

b) Obtener el factor camión-eje ( $f_{CE}$ ).

El factor camión-eje ( $f_{CE}$ ) representa el número de aplicaciones de ejes simples equivalentes que como promedio circulan por cada vehículo pesado en el flujo y permite convertir los vehículos pesados en repeticiones de cargas por eje de un mismo peso.

Para llevar las repeticiones de una carga simple cualquiera a repeticiones de la carga de cálculo se utiliza el factor de equivalencia de cargas ( $F_e$ ). El factor de equivalencia de las cargas de diferentes pesos y tipos es el modelo matemático derivado de la prueba de la AASHO que plantea la relación entre una carga simple cualquiera ( $P$ ) y otra carga simple de referencia ( $P_c$ ). En la red vial de Cuba la carga de cálculo ( $P_c$ ) en cualquier tipo de vía se ha fijado en 100 kN.

$$F_e = \left[ \frac{a \cdot P}{P_c} \right]^b \quad (2.2)$$

**Tabla 2.2 Valores del coeficiente a. Fuente: NC 334**

CONFIGURACION	SIMPLE	TANDEM	TRIPLE
Ruedas simples	1,3	0,74	0,59
Ruedas duales	1,0	0,57	0,45

Calculado el número de repeticiones equivalentes de cada escalón de carga del espectro al haberse multiplicado las repeticiones observadas por el factor de equivalencia correspondiente para cada tipo de ruedas y configuración de los ejes, se puede obtener el ( $f_{CE}$ ). Este se determina como la suma total de ejes equivalentes de cálculo de 100 kN divididos entre el número total de camiones en la muestra.

$$f_{ce} = \frac{\sum_{j=1}^i (N_e) * (F_e)_j + \sum_{j=1}^i (N_t)_j * (F_e)_j + \sum_{j=1}^i (N_{tr})_j * (F_e)_j}{N_v} \quad (2.3)$$

Donde:

$N_e$ ,  $N_t$  y  $N_r$  son las repeticiones de cargas por ejes simples, tándem respectivamente, registradas en la muestra de  $N_v$  vehículos pesados, donde  $j$  representa el número de orden de intervalo de carga.

En ausencia de recuento de cargas, la norma propone una serie de factores en función del tipo de vía que pueden ser usados para la selección del  $f_{CE}$ . Tabla 2 del Anexo 1.

c) Obtener el número de ejes equivalentes de cálculo ( $\Sigma N$ ) que circularán durante el período de diseño.

El Tráfico de diseño es el número de ejes equivalentes a 100 kN que se pronostica para el carril de diseño durante el período de diseño.

$$\Sigma N = 365 * ICD_0 * K_r * f_{CE} \quad (\text{ejes de 100 kN}) \quad (2.3)$$

Donde:

$f_{CE}$ : Factor camión–eje.

$K_r$ : Factor que toma en cuenta el incremento del tránsito hasta el año  $n$ .

$$K_r = \frac{(1+r)^n - 1}{\ln(1+r)} \quad (2.4)$$

$r$ : Razón anual de crecimiento de tránsito para los vehículos pesados. Su obtención exige el estudio de las tendencias de crecimiento en la red. Como aproximación puede utilizarse el incremento anual del Producto Social Global. Se recomienda, para los casos en que no se disponga de información más precisa, una razón de crecimiento entre 0,03 y 0,04.

$n$ : Período de diseño, tiempo medido en años para el cual se diseña la estructura. Intervalo de tiempo comprendido entre la terminación de la pavimentación y el momento en que la vía requerirá un refuerzo debido al agotamiento de su capacidad estructural.

En general se establece el período de diseño en 20 años, salvo en vías urbanas donde para las arterias principales y secundarias, así como en calles y avenidas colectoras, puede extenderse hasta 30 años.

Se definen 3 tipos de tráfico de proyecto, de acuerdo al valor de  $\Sigma N$ : ligero, medio y pesado, los que se subdividen en 7 categorías.

**Tabla 2.3 Clasificación del tráfico en función de los ejes de cálculos acumulados ( $\Sigma N$ ). Fuente: NC 334**

SIMBOLO	TIPO	CATEGORIA	$\Sigma N$
T11	Pesado	Muy pesado	Mayor que $2,0 \times 10^6$
T12		Pesado	$1,0 \times 10^6 - 2,0 \times 10^6$
T23	Medio	Medio pesado	$5,1 \times 10^5 - 1,0 \times 10^6$
T24		Medio	$2,6 \times 10^5 - 5,1 \times 10^5$
T25		Medio ligero	$1,3 \times 10^5 - 2,6 \times 10^5$
T36	Ligero	Ligero	$6,4 \times 10^4 - 1,3 \times 10^5$
T37		Muy ligero	$\leq 6,4 \times 10^4$

### 2.1.3. Obtención de la resistencia de diseño de la subrasante

El valor característico de resistencia de diseño de la subrasante (CBR) puede ser obtenido por medio de ensayos de laboratorio o mediante la medida in situ de este.

a) Resistencia de diseño mediante ensayos de laboratorio.

Se define la humedad inicial de diseño mediante el gráfico del Proctor Modificado según el tipo de emplazamiento.

Se preparan en el laboratorio entre 5 y 8 muestras en moldes de CBR en las condiciones que define la NC 54-150:1983 para realizar dichos ensayos.

Se selecciona aleatoriamente una muestra cada 24 horas para ser ensayada a CBR. Se mide en cada muestra el CBR, el hinchamiento y la humedad final.

Los resultados obtenidos se plotean en un gráfico de CBR sumergido vs contenido de humedad final, ajustando la curva y se determina el valor de CBR de diseño en este gráfico con la humedad final de diseño.

El valor obtenido para el CBR de diseño define la categoría de subrasante según los criterios de la tabla 2.4.

**Tabla 2.4 Categorías de subrasante. Fuente: NC 334**

CLASIFICACION DE SUBRASANTE	RESISTENCIA
ACEPTABLE	$5\% \leq \text{CBR} \leq 10\%$

MEDIA	$10\% \leq \text{CBR} \leq 10\%$
BUENA	$\text{CBR} \geq 15\%$

#### 2.1.4. Resistencia de diseño sin ensayos de laboratorio

En ausencia de ensayos de resistencia puede inferirse la categoría que ha de tener la subrasante compactada y se considerarán las características del suelo con el cual se construirá, según los criterios de la tabla 1 del Anexo 2, considerando como CBR de diseño el mínimo para cada categoría de subrasante.

Cuando sea posible la determinación del ensayo de CBR in situ, se determinará en cada tramo el valor característico de diseño mediante procedimientos estadísticos cuyo valor se corrige para las condiciones de humedad más desfavorables (humedad de cálculo). Este procedimiento de obtención del CBR de diseño in situ se encuentra integrado en los anexos de la NC 334.

#### 2.1.5. Aceptación de los materiales dado los requisitos de calidad de estos

Se definen valores de calidad en la selección de los materiales para la construcción de bases y subbases. Los valores representativos de CBR, equivalencia de arena, índice plástico e índice líquido de los materiales, han de ser los más significativos para dicha sección.

**Tabla 2.5 Requisitos de calidad para materiales de bases y subbases. Fuente: NC 334**

Parámetros	Material de Bases		Material de Subbase	
	$\sum Nn < 5 \times 10^5$ ejes de 100kN	$\sum Nn > 5 \times 10^5$ ejes de 100kN	Drenaje Desfavorable	Drenaje Favorable
C.B.R (mínimo)	60-80%	80-100%	20-30%	20-30%
Límite Líquido(máximo)	25%	25%	25%	35%
Índice Plástico(máximo)	6%	6%	6%	10%
Equivalente Arena	30 %	50%	-	-

Se debe considerar que cuando los materiales de bases o subbases tengan un IP superior a 6% deben compactarse como mínimo a una densidad del 95% del valor máximo obtenido en el ensayo Proctor Modificado, en caso contrario ( $IP < 6\%$ ), se alcanzarán densidades iguales o superiores al 100% del ensayo modificado.

### **2.1.6. Cálculo del espesor total equivalente del pavimento (T)**

Se obtiene el espesor total T expresado en base granular equivalente de 500 MPa, con el nomograma de la figura 1 del Anexo 3, interpolando, si es necesario, a partir del tráfico de diseño y la resistencia de la subrasante. Puede también usarse para el cálculo de T la siguiente expresión:

$$T = (25,96 \log(\sum N) - 89,88) \left[ \frac{5}{CBR} \right]^{0,4} \quad (cm) \quad (2.5)$$

Donde:

$\sum N$ : Número de ejes equivalentes de 100 kN para el período de diseño.

CBR: Resistencia de cálculo para la sub-rasante.

### **2.1.7. Determinación del espesor mínimo de superficie (T<sub>S</sub>)**

Se colocará un espesor mínimo de superficie de hormigón asfáltico para evitar que las deformaciones horizontales admisibles en las fibras inferiores de la capa sean superadas. Los espesores mínimos equivalentes a colocar en la capa asfáltica (T<sub>S</sub>) pueden obtenerse con la figura 1 del Anexo 4.

### **2.1.8. Determinación del espesor mínimo de base (T<sub>B</sub>)**

El espesor mínimo de base (T<sub>B</sub>), expresado como equivalente de base de 500 MPa, será de 15 cm cuando el tráfico de proyecto es inferior a  $5,1 \times 10^5$  ejes, en tráficos superiores deberá incrementarse a 20 cm.

### **2.1.9. Cálculo del espesor mínimo de subbase (T<sub>SB</sub>)**

El espesor mínimo de subbase (T<sub>SB</sub>) se halla restando los espesores mínimos de superficie y base al espesor total, expresados todos en equivalentes de base de 500 MPa como:

$$T_{SB} = T - T_B - T_S \quad (cm) \quad (2.6)$$

Donde:

T: espesor total equivalente para base granular de 500 MPa (cm).

T<sub>B</sub>: espesor mínimo de base (cm).

T<sub>S</sub>: espesor mínimo de subbase (cm).

### 2.1.10. Determinación de los espesores reales (h<sub>i</sub>)

Cada espesor equivalente (T<sub>i</sub>) se convierte en el espesor real a colocar de superficie, base y subbase con ayuda de los coeficientes de equivalencia de espesores de cada material que se dispone para la construcción del pavimento, utilizando la expresión:

$$h_i = \frac{T_i}{a_i} \quad (cm) \quad (2.7)$$

Donde:

h<sub>i</sub>: Espesores reales a colocar para las capas de superficie, base y sub-base (cm).

T<sub>i</sub>: Espesor equivalente de cada capa *i* (superficie, base o sub-base).

a<sub>i</sub>: Coeficiente de equivalencia respecto a una base de 500 MPa de la capa *i*. Los valores de los coeficientes de equivalencia se toman de las tablas 1, 2, 3 y 4 del Anexo 5.

## 2.2. Ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba

El procedimiento de diseño que establece la NC 334 para el dimensionamiento de los pavimentos flexibles, parte de un modelo matemático determinado experimentalmente denominado "ley de comportamiento", dicha ley relaciona los valores mínimos de deflexión elástica recuperada en la superficie de la estructura con las repeticiones de una carga normalizada.

Esta ley de comportamiento de los pavimentos flexibles no se encuentra expuesta en la normativa cubana, pero sí se encuentra implícita en su procedimiento de cálculo para el dimensionamiento. Dado que, con esta ley de comportamiento obteniéndose sobre la superficie la deflexión elástica recuperada de una estructura de pavimento flexible como respuesta a la aplicación del número de ejes equivalentes de la carga de cálculo, se pueden alcanzar los espesores mínimos necesarios a colocar para soportar las solicitaciones de las cargas impuestas por la acción repetitiva del tránsito, además de que es posible evaluar

integralmente la capacidad estructural del pavimento. De este modo se puede llegar a predecir el tiempo de duración de la estructura según sea la deflexión elástica obtenida.

La ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba para la determinación del valor de deflexión admisible de un pavimento flexible en función del tráfico, se encuentra expresada mediante el siguiente modelo matemático: (Higuera, 2007)

$$\Delta Z_{adm} = E * N^{-F} \quad (2.8)$$

Donde:

$\Delta Z_{adm}$ : es la deflexión admisible del modelo estructural del pavimento flexible (mm/100).

$N$ : tránsito de diseño expresado en repeticiones de cargas equivalentes acumuladas.

$E$  y  $F$ : coeficientes de correlación determinados a partir de pruebas de laboratorio; para el caso de Cuba estos coeficientes presentan valores de 2073 y 0,22 respectivamente.

### 2.3. Análisis tenso-deformacional del pavimento flexible

La acción del paso de los neumáticos sobre el pavimento flexible genera esfuerzos verticales y esfuerzos horizontales; donde los esfuerzos horizontales son disipados a través de la carpeta asfáltica, tomando un valor positivo en la superficie y uno negativo en la fibra inferior, efecto que origina esfuerzos de tracción ( $\sigma$ ) en la fibra inferior de la carpeta asfáltica. El mayor porcentaje de los esfuerzos verticales son asumidos por la carpeta asfáltica y la base granular (Sánchez, 2014). A nivel de subrasante, llega el mismo nivel de esfuerzos, lo que indica que el incremento del espesor de la carpeta asfáltica no reduce las deformaciones en la subrasante. En la Figura 2.1 se muestra la distribución de esfuerzos horizontales ( $\sigma_H$ ) y verticales ( $\sigma_v$ ) de pavimentos típicos.

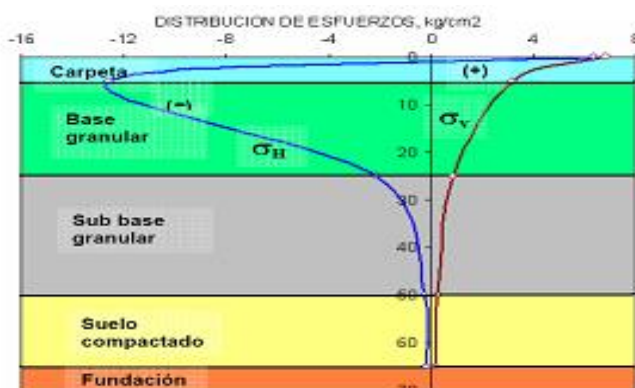


Figura 2.1. Esquema de la distribución de esfuerzos en pavimentos.

Fuente Triste de Ceita, 2009.

Los esfuerzos así provocados producto de las cargas generadas por el paso del tráfico y su acción repetitiva se manifiestan en diferentes deterioros en el pavimento que posteriormente son reflejados en la superficie, pero hay solo dos en particular donde las metodologías existentes hoy en el mundo se enfocan para el diseño estructural de pavimentos flexibles, estos son (Triste de Ceita, 2009): las deformaciones permanentes (ahuellamiento) y el agrietamiento por fatiga (fisuras y grietas).

### 2.3.1. Cálculo de la deformación permanente

La deformación permanente es uno de los deterioros más importantes asociados con las cargas del tránsito en los sistemas de pavimentos flexibles y no es más que la acumulación de pequeñas deformaciones producidas por las cargas del tránsito, las cuales son irrecuperables. Se destaca mencionar que estas están dadas casi siempre por problemas de resistencia a cortante de algunas de las capas o el cimiento de la estructura del pavimento.

La estimación del deterioro por deformación permanente total sobre esta base está dada por la siguiente relación:

$$RD = \sum_{i=1}^n \varepsilon_p^i h^i \quad (\text{pulg/pulg}) \quad (2.9)$$

Donde:

RD = Deformación permanente total (pulg/pulg).

n = Número de subcapas.

$\varepsilon_p^i$  = Tensión plástica total en las subcapas i.

$h^i$  = Espesor de subcapas (pulg).

La Guía de la AASHTO del año 1993 propone una ecuación para pronosticar la deformación permanente en mezclas asfálticas, basada en un campo de análisis estadístico calibrado en laboratorio a base de pruebas de deformación permanente producto de repetidas cargas y otra para las bases no aglomeradas de la estructura y la subrasante de la misma.

a) Deformación permanente en mezclas asfálticas.

La deformación permanente en la carpeta asfáltica del pavimento flexible está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 * 10^{-3.4488T^{1.5606}N^{0.479244}} \quad (2.10)$$

Donde:

$\epsilon_p$ : Deformación plástica acumulada en N repeticiones de carga (pulg/pulg).

$\epsilon_r$ : Tensión de resiliencia de los materiales asfálticos, función de las propiedades de las mezclas, la temperatura y el tiempo de carga (pulg/pulg).

N: Número de repeticiones de carga

T: Temperatura (°F)

$K_1$ : Función del espesor total de la capa asfáltica y la profundidad para corregir la presión limitada sobre diferentes profundidades

b) Deformación permanente en las capas/subcapas y suelo de subrasante

La deformación permanente en las capas componentes y el suelo de subrasante del pavimento flexible está dada por la siguiente ecuación:

$$\delta_a(N) = \beta_{CB} \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \epsilon_v \quad (2.11)$$

Donde:

$\delta_a$ : Deformación permanente para la capa/subcapas o subrasante (pulg).

N: Número de repeticiones de tráfico.

$\epsilon_0$ ,  $\beta$ , y  $\rho$ : Propiedades de los materiales de la capa/subcapas o suelo de subrasante.

$\epsilon_r$ : Tensión resiliente (pulg/pulg).

$\epsilon_v$ : Promedio de la tensión resiliente vertical en capa/subcapas (pulg/pulg).

h: Espesor de la capa/ subcapa (pulg).

$\beta_{GB}$ : Factor de calibración

En el cálculo de la deformación permanente ( $\delta_a$ ) para la capa/subcapas (pulg) se utiliza el factor de calibración  $\beta_{GB} = 1,673$  y para el cálculo de la deformación permanente en la subrasante  $\beta_{GB} = 1,35$ .

La deformación permanente en la estructura del pavimento es igual a la sumatoria de las deformaciones permanentes totales de capa individual. La deformación permanente total puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$RD_{TOTAL} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG} < 0,3 \sim 0,5 \text{ (pulg)} \quad (2.12)$$

Donde:

$RD_{TOTAL}$ : Deformación permanente total (pulg)

$RD_{AC}$ : Deformación permanente de la carpeta asfáltica (pulg)

$RD_{GB}$ : Deformación permanente de la capa base (pulg)

$RD_{SG}$ : Deformación permanente de la subrasante (pulg)

Como se puede apreciar, el valor típico aceptable de deformación permanente total en la estructura del pavimento está en un orden de 0,3 a 0,5 pulgadas.

### 2.3.2. Cálculo del daño por fatiga en los materiales

Otro de los deterioros más frecuentes que se chequean y se tratan de predecir en una estructura de pavimento es la fatiga. El cálculo del deterioro por fatiga es analizado para las capas asfálticas y no asfálticas.

La ubicación de la tensión crítica para que se produzca depende de algunos factores, los más importantes son la rigidez de la capa y la configuración de la carga. La estimación del deterioro por fatiga se basa en la expresión de la Ley de Miner y está dado por la siguiente relación:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad (2.13)$$

Donde:

D: Daño por fatiga.

T: Número total del período.

$n_i$ : Tránsito actual para cada período  $i$ .

$N_i$ : Tráfico admitido bajo las condiciones predominantes en  $i$ .

El agrietamiento por fatiga que se presenta en las mezclas asfálticas se puede manifestar de dos maneras: de la base hacia la superficie y de la superficie hacia la base.

#### a) El agrietamiento de la base hacia la superficie

El criterio para la evaluación del agrietamiento de la base hacia la superficie se define como el área máxima de grieta (piel de cocodrilo) expresada como un porcentaje del área de la longitud total que se permite ocurrir encima del período de diseño. El valor típico aceptable del agrietamiento de la base hacia la superficie está en el orden de 25 a 50% del área de la longitud total.

$$FC_{inferior} = \left( \frac{6000}{1+e^{(C_1 * C'_1 + C_2 * C'_2 * \log_{10}(D * 100))}} \right) * \left( \frac{1}{60} \right) \quad (2.14)$$

Donde:

$FC_{inferior}$ : El agrietamiento de la base hacia la superficie, (ft/mi)

D: Daño por fatiga de la base hacia la superficie

$$C_1 = C_2 = 1,0 \quad (2.15)$$

$$C'_1 = -2 * C'_2 \quad (2.16)$$

$$C'_2 = -2,40874 - 39,748 * (1 + h_{ac})^{-2,856} \quad (2.17)$$

b) El agrietamiento de la superficie hacia la base

El criterio para la evaluación del agrietamiento de la superficie hacia la base es definido como la longitud máxima aceptable de agrietamiento por la milla de pavimento que se permite ocurrir encima del período del diseño. El valor típico aceptable del agrietamiento de la superficie hacia la base está en el orden de 1000 ft/mi de pavimento (valor obtenido en la calibración de un modelo de sección de 500 ft).

$$FC_{superior} = \left( \frac{1000}{1+e^{(7 * 3,5 * \log_{10}(D * 100))}} \right) * (10,56) \quad (2.18)$$

Donde:

$FC_{superior}$ : Agrietamiento de la superficie hacia la base, (ft/mi).

D: Daño de la superficie hacia la base.

## 2.4. Análisis tenso-deformacional de estructuras de pavimento flexible mediante el software Kenlayer

El *software* Kenlayer presenta procedimientos empírico-mecanicistas en la interpretación de los esfuerzos asociados a la acción del tránsito en los pavimentos flexibles por medio de sistemas multicapa de comportamiento elástico, no lineal elástico y visco-elástico de las capas componentes. El mismo realiza un análisis del daño del pavimento y estima la vida de diseño de este en función de las solicitaciones de las cargas originadas por el tráfico a través del tiempo, además de la consideración de otros factores en el diseño como: la resistencia mecánica de los materiales y algunos parámetros climáticos.

### 2.4.1. Procedimiento para la determinación de los esfuerzos y deformaciones en una estructura de pavimento empleando el software Kenlayer

Para realizar la modelación de una estructura de pavimento flexible a través del software Kenlayer, es importante conocer la presencia de los módulos que hacen más viable el trabajo en este.

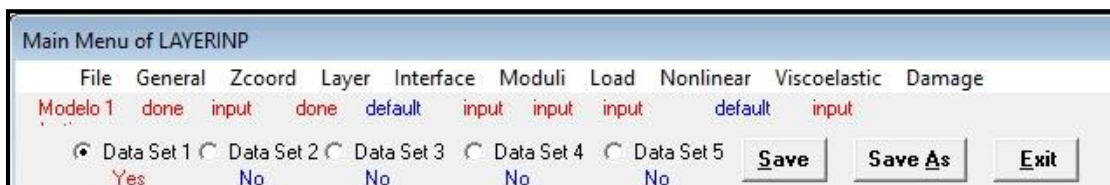


Figura 2.2. Módulos de entrada de datos para la modelación a través del Kenlayer

Como se muestra en la figura 2.2 el software presenta 10 módulos principales para la entrada de los datos en la modelación de la estructura flexible en estudio.

La entrada de los datos del problema en estudio debe realizarse de izquierda a derecha, es decir, que la entrada de los parámetros específicos para cada módulo en general debe realizarse una vez completados los datos de entrada del módulo anterior. En la figura 2.2 se muestra el estado de cada módulo reflejado por las palabras en color rojo: *input* cuando la entrada de datos es requerida y *done* cuando ya ha sido completada la entrada de todos los datos para el módulo.

En ocasiones, según el tipo de problema en desarrollo, se encontrarán módulos sin necesidad de la especificación de sus datos, manifestados estos por una palabra en color azul denominada *default* que caracteriza el estado del módulo.

A continuación se muestran los módulos en el orden correspondiente en la entrada de los datos para la modelación de las estructuras flexibles bajo estudio:

- a) Módulo *File*: Se especifica la creación de un archivo nuevo o la selección de uno anteriormente creado para su edición.
- b) Módulo *General*: Se especifica de forma general el tipo de problema en desarrollo, dado que se define el número de capas para el análisis (NL), así como el tipo de comportamiento de los materiales constituyentes en estas (elástico lineal, elástico no lineal, visco-elástico y su combinación). Además, se establece el número de períodos por año para el análisis (NPY), así como el número de grupos de cargas de tráfico (NLG) y se

especifica si es requerido un análisis de daño o deterioro en la estructura (NDAMA). La figura 2.3 muestra los datos necesarios para la especificación general del problema.

General Information of LAYERINP for Set No. 1		
TITLE	EX. 1: LINEAR ELASTIC THREE-LAYER SYSTEM UNDER DUAL-TANDEM TIRES	
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	0
Number of periods per year	(NPY)	1
Number of load groups	(NLG)	1
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0.001
Number of layers	(NL)	3
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	3
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	1
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	1
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1
Number of layers for top compression	(NLTC)	1
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	0

**Figura 2.3 Especificación general del problema. Módulo *General*.**

- c) Módulo *Zcoord*: Está condicionado por el tipo de problema en estudio debido a que resulta necesario la entrada de datos en el mismo cuando no se realiza un análisis de daño, en este se define el número de coordenadas verticales y la profundidad que han de ser los puntos específicos para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones.
- d) Módulo *Layer*: En este se definen los espesores de las capas (TH) para el análisis, así como el peso específico y el valor del coeficiente de Poisson (PR) en cada capa.
- e) Módulo *Interface*: Se especifica si existe fricción entre las capas componentes.
- f) Módulo *Muduli*: En este se establecen los valores correspondientes de los módulos de elasticidad (E) de las capas para los diferentes períodos por años definidos en la descripción general del problema, lográndose con estos datos la obtención de un módulo resiliente efectivo ponderado para los materiales a lo largo del año.
- g) Módulo *Load*: Se define el tipo de carga (simple, tandem y tridem) y la configuración de estas para los diferentes grupos de carga definidos anteriormente, así como la definición de puntos radiales (NR) o de coordenadas cartesianas (NPT) para el análisis de las cargas según la asimetría de las cargas.

En la figura 2.4 se muestran en detalle los datos de la especificación del tipo de carga y su configuración para cada grupo de carga.

Load Information for Data Set No. 1

**Double click anywhere on a line to get auxiliary form for NR or NPT.**

Unit	cm	kPa	cm	cm		
Load Group No	LOAD	CR	CP	YW	XW	NR or NPT
1	0	15.24	689.5	0	0	1

**Figura 2.4 Especificación del tipo de carga para cada grupo de carga**

- h) Módulo *Nonlinear*: Está condicionado por el tipo de comportamiento asignado para los materiales de las capas en la especificación general del problema. En este módulo se especifican con la entrada de los datos requeridos: el número de capas bajo este tipo de modelo de comportamiento elástico no lineal en los materiales (NOLAY), el número de puntos radiales o coordenadas cartesianas para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones. Además, se especifican los valores mecánicos asociados a la relación constitutiva simple de los módulos de resiliencia de los materiales y a la primera invariante de tensión.

Nonlinear General Information for Data Set No. 1

Number of nonlinear layers	(NOLAY)	3
Maximum number of iterations	(ITENOL)	15
Radial coordinate for nonlinear analysis in cm	(RCNOL)	0
X coordinate for nonlinear analysis in cm	(XPTNOL)	0
Y coordinate for nonlinear analysis in cm	(YPTNOL)	7.5
Slope of load distribution	(SLD)	0
Tolerance for nonlinear analysis	(DELNOL)	0.001

OK

**Figura 2.5 Parámetros generales en el análisis no lineal de los materiales**

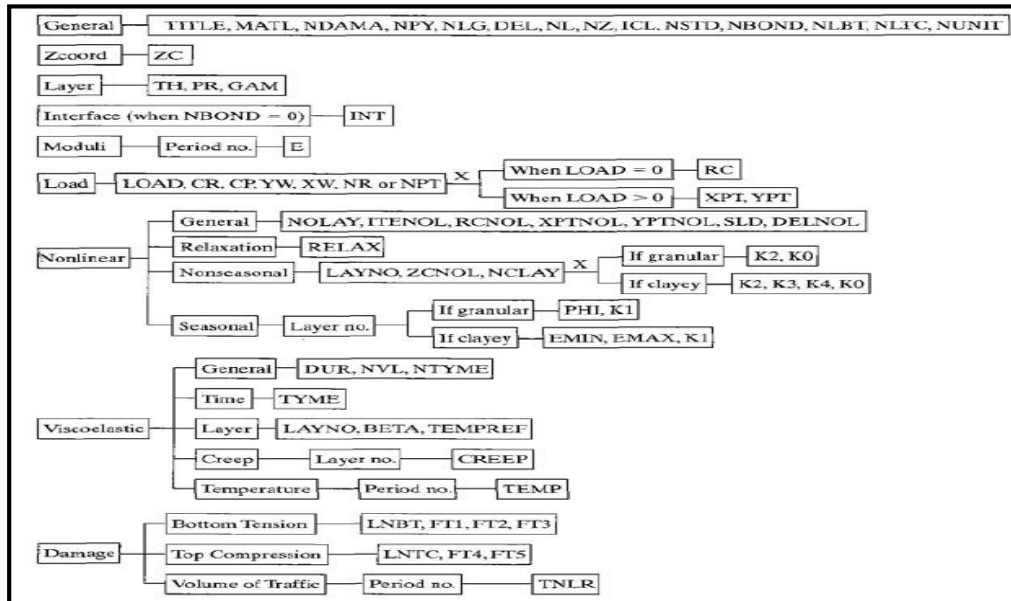
- i) Módulo *Viscoelastic*: Está condicionado igualmente, como otros módulos, por el tipo de comportamiento asignado para los materiales de las capas en la especificación general del problema. En este se define el número de capas asignadas al tipo de comportamiento visco-elástico en los materiales. También se establecen los parámetros como: la temperatura, la velocidad de aplicación de las cargas y el número de períodos asignados para este tipo de análisis. Además, se definen los valores representativos de la fluencia viscosa de las capas en función del tiempo establecido.

Viscoelastic General Information for Data Set No. 1

Load duration (0 for stationary load, 0.1 sec for moving load at 40 mph)	(DUR)	0.1
Number of viscoelastic layers	(NVL)	1
Number of time durations for creep compliances	(NTYME)	1

**Figura 2.6 Parámetros generales en el análisis viscoelástico de los materiales**

j) Módulo *Damage*: En este módulo se requiere la entrada de los datos cuando se ha especificado en la descripción general del problema la realización de un análisis de los daños y para la estimación de la vida de diseño del pavimento flexible. Dicho módulo requiere la especificación de coeficientes para el cálculo de los daños asociados a la fatiga en los materiales componentes y la acumulación de deformaciones en el tiempo a nivel de subrasante. Igualmente se debe especificar en este el número de repeticiones para cada grupo de cargas.



**Figura 2.5** Parámetros de entrada del *software* Kenlayer para cada módulo. Fuente: H. Hong, 1993.

La figura 2.5 es un ejemplo del procedimiento general propuesto por el programa para modelar diferentes tipos de estructuras de pavimentos teniendo en cuenta el comportamiento de sus capas.

Los resultados tras el análisis desarrollado por el *software* en la solución de un problema son mostrados mediante sumarios y tablas donde se especifican los esfuerzos principales generados en la estructura flexible modelada, así como las deformaciones unitarias asociadas a estos esfuerzos para cada posición definida en el análisis. Estos resultados son exportados por el *software* para su visualización en archivos txt y pdf. La figura 2.6 representa cómo son mostrados los resultados tras finalizar un análisis.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda				
Modelo 1 elastico no lineal (DAÑO).TXT: Bloc de notas					LAYER NUMBER AND ADJUSTED THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC			
STRESSES FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:					3	172,272	37,459	37,459
2	567,383	197,330	217,023					
4	89,099	19,374	19,374					
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)		
1	9,00000	0,07388	618,093	618,797	214,823	215,016		
1	59,00010	0,05280	6,519E-04	6,531E-04	-4,710E-05	-4,712E-05		
			72,081	74,509	-0,210	3,989		
			2,231E-04	2,340E-04	-1,013E-04	-1,013E-04		
AT BOTTOM OF LAYER 1 TENSILE STRAIN =				-4,712E-05				
ALLOWABLE LOAD REPETITIONS =				1,327E+08	DAMAGE RATIO = 7,716E-02			
AT TOP OF LAYER 4 COMPRESSIVE STRAIN =				2,231E-04				
ALLOWABLE LOAD REPETITIONS =				3,042E+07	DAMAGE RATIO = 1,259E-02			
*****								
* SUMMARY OF DAMAGE ANALYSIS *								
*****								
AT BOTTOM OF LAYER 1				SUM OF DAMAGE RATIO = 7,716E-02				
AT TOP OF LAYER 4				SUM OF DAMAGE RATIO = 1,259E-02				
MAXIMUM DAMAGE RATIO =				7,716E-02	DESIGN LIFE IN YEARS = 12,96			

Figura 2.6 Visualización de los resultados luego del análisis del software.

## 2.5. Conclusiones parciales

La metodología de cálculo que establece la NC 334 tiene como objetivo el dimensionamiento de los pavimentos flexibles. Esta, por medio de procedimientos de cálculos determina un espesor equivalente (T) para una base granular de 500 MPa en función de un determinado tráfico de diseño ( $\Sigma N$ ) y resistencia de subrasante.

El procedimiento de diseño que establece la NC 334 para el dimensionamiento de los pavimentos flexibles parte de un modelo matemático denominado “ley de comportamiento”, que relaciona los valores mínimos de deflexión elástica recuperada en la superficie de la estructura con las repeticiones de una carga normalizada.

El sistema multicapa que utiliza el software Kenlayer en el análisis estructural de los pavimentos flexibles, considerando el comportamiento de los materiales de las capas componentes como: lineal elástico, no lineal elástico y visco-elástico, garantiza un mejor estudio y la obtención de datos más reales a nivel deformacional que puede presentar el pavimento flexible bajo la acción repetitiva de las cargas del tránsito.

## **Capítulo 3: “Interpretación y análisis de los resultados en la comprobación del período de diseño de la NC 334:2004 para el diseño de estructuras de pavimento flexible”**

En el presente capítulo se procederá a realizar un análisis del período de diseño que plantea la NC 334 para estructuras de pavimento flexible a través de la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba y las deformaciones obtenidas tras la modelación estructural con el *software* Kenlayer de cuatro tipos de vías flexibles en estudio. Igualmente, por medio de la modelación estructural, pero bajo la consideración de modelos de falla en el análisis de los deterioros en los pavimentos flexibles debido a la acción repetitiva de las cargas del tráfico, se obtendrán los períodos de diseño asociados a este criterio para las estructuras flexibles bajo estudio.

### **3.1. Datos generales de los cuatro tipos de vías flexibles en estudio**

En el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo de investigación se seleccionaron varios datos recomendados por la NC 334 en el diseño estructural de cuatro tipos de vías en función del tráfico de proyecto considerado para estas.

Los datos generales considerados para el diseño estructural de los cuatro tipos de vías flexibles en estudio son mostrados a continuación:

- Los cuatro tipos de vías flexibles en estudio son de entorno rural, estas presentan dos carriles de circulación donde se pronostica un flujo balanceado en ambos sentidos de circulación.
- Los parámetros del tránsito considerados para las cuatro vías flexibles son expuestos en la tabla 3.1, donde se definieron condiciones variadas del tránsito para el análisis.

**Tabla 3.1 Parámetros generales del tránsito de las cuatro vías flexibles**

Tipo de Vía	Categoría (NC 753)	PAIDT <sub>0</sub> veh/día	Pcd (%)	Pvp (%)	f <sub>ce</sub>	ICD <sub>0</sub> (cam/día)
1	II	4000	60	100	0.6	1200
2	III	2000	50	80	0.4	400
3	III	1000	50	80	0.4	200
4	IV	250	40	65	0.4	40

Las categorías de las cuatro vías flexibles se establecieron según la NC 753:2010 “Carreteras. Vías Rurales. Clasificación Funcional”, debido a que los volúmenes diarios de tránsito considerados suplen los volúmenes necesarios de tránsito para realizar el análisis de las vías en estudio, dado que presentan valores de tráfico desde muy pesados hasta ligeros, por lo que se determinó no considerar volúmenes de tránsito superiores ni inferiores a los establecidos para este tipo de vías.

- Se establecen como parámetros climáticos una temperatura de cálculo de 50°C y una humedad de cálculo estable en los materiales sin influencia del manto freático; establecidos ambos para un período de cálculo comprendido entre los meses de mayo a octubre.
- Los materiales de las capas componentes y sus características se definen en la tabla 3.2, dado que es el objetivo de la presente investigación realizar el análisis a nivel de proyecto de las estructuras flexibles a diseñar posteriormente.

**Tabla 3.2 Materiales componentes de las estructuras en análisis**

Capa	CBR(%)	E (MPa)	Observaciones (según la NC 334)
Superficie	-	750	Hormigón asfáltico en caliente, mezcla densa, tamaño máximo < 19 mm
Base	80	400	Base pétreo de granulometría continua, colocada encima de una sub-base
Subbase	40	200	Subbase de mejoramiento calizo, colocado encima de una subrasante

Subrasante	15	100	Suelo seleccionado, bueno para subrasante de carretera.
------------	----	-----	---

### 3.2. Diseño estructural de los cuatro tipos de vías flexibles en análisis mediante la metodología de cálculo de la NC 334

El dimensionamiento estructural de las vías flexibles en análisis se realizó siguiendo la metodología de cálculo que establece la NC 334, explicada en el epígrafe 2.1, donde apoyados en datos previamente considerados fueron proyectadas estructuralmente las cuatro vías flexibles para un período de diseño de 20 años y para una razón de crecimiento del tránsito anual igual al 3%.

Del análisis de los parámetros del tránsito definidos para cada vía flexible se obtuvo el valor representativo del tráfico de proyecto en cada una de estas. Luego, en función de la resistencia de cálculo de la subrasante y el valor del tráfico de proyecto calculado para cada estructura de pavimento flexible en diseño, se obtuvieron los espesores totales equivalentes a una base granular de 500 MPa. Posteriormente fueron calculados los espesores mínimos de capa para la superficie, la base y la subbase de cada estructura flexible y con ayuda de los coeficientes de equivalencia obtenidos dadas las características de los materiales definidos, se expresaron estos espesores mínimos en valores reales y finalmente en valores constructivos. La tabla 3.3 muestra en detalle lo mencionado anteriormente.

**Tabla 3.3 Resultados del diseño de las estructuras de pavimento flexibles**

Estructura	Tipo de Tráfico	$\Sigma N$ (ejes de 100 kN)	$T_i$ (cm)	$H_s$ (cm)	$H_b$ (cm)	$H_{sb}$ (cm)	Total (cm)
Nº 1	Muy Pesado	$7,2 \times 10^6$	57	11	25	40	76
Nº 2	Pesado	$1,6 \times 10^6$	46	9	25	25	59
Nº 3	Medio	$7,8 \times 10^5$	41	8	25	20	53
Nº 4	Ligero	$1,3 \times 10^5$	30	7	20	15	42

A fin de facilitar y agilizar el dimensionamiento de estas estructuras flexibles se implementaron varias hojas de cálculo en los *software* Mathcad y Microsoft Excel.

### 3.3. Implementación del *software* Kenlayer en la modelación de las estructuras de pavimento flexible diseñadas

Para la modelación estructural de las cuatro vías flexibles en estudio se utilizó el *software* Kenlayer como herramienta computacional, a fin de facilitar y agilizar la obtención de datos en el alcance de los resultados tras el análisis a dichas estructuras flexibles.

La obtención de los esfuerzos y el cálculo de las deflexiones verticales en las cuatro estructuras de pavimento flexible diseñadas, se realizó bajo la consideración de tres tipos de modelos de comportamiento para las capas componentes de cada estructura de pavimento flexible diseñada, siguiendo la metodología de trabajo que se muestra en el epígrafe 2.3 para la modelación a través del *software* Kenlayer.

- Modelos tipo 1: comportamiento elástico lineal para toda la estructura.
- Modelos tipo 2: comportamiento elástico lineal para la superficie con comportamiento elástico no lineal para las restantes capas componentes de la estructura.
- Modelos tipo 3: comportamiento visco-elástico para la superficie con comportamiento elástico no lineal para las restantes capas componentes de la estructura.

Los datos de forma general para el desarrollo por medio del *software* Kenlayer de cada tipo de modelo en el análisis de las cuatro estructuras flexibles diseñadas son mostrados en las tablas 3.4, 3.5 y 3.6.

**Tabla 3.4 Datos generales para los modelos del tipo 1**

Módulos	Datos de entrada				
<i>General</i>	MATL	NDAMA	NPY	NLG	NL
	0	0	1	1	4
<i>Moduli</i>	Capa N <sup>o</sup>	1	2	3	4
	E (kPa)	7,5 x 10 <sup>5</sup>	4,0 x 10 <sup>5</sup>	2,0 x 10 <sup>5</sup>	1,0 x 10 <sup>5</sup>
<i>Layer</i>	Capa N <sup>o</sup>	1	2	3	4
	Poisson(PR)	0.3	0.35	0.35	0.4
<i>Load</i>	Tipo de Carga	CR (cm)	CP (kPa)	YW (cm)	XW (cm)
	1	15	700	37.5	0

Para modelos del tipo 1 cuyos datos representativos son expuestos en la tabla 3.4 se muestra que el tipo de comportamiento establecido en los materiales (MATL) es del tipo elástico lineal, donde el número de capas (NL) considerado es igual a 4 y donde se especifica el módulo elástico (E) definido para los materiales componentes de capas, así como el coeficiente de Poisson (PR).

El valor representativo de la presión de contacto (CP) se calculó para un radio equivalente de aplicación de la carga de 15 cm, dada una carga de cálculo de 100 kN para un eje simple de ruedas dobles.

Para los modelos tipo 2, se especifican los mismos datos considerados en los módulos de entrada de los modelos tipo 1, a diferencia de que se define un comportamiento elástico no lineal en los materiales componentes de las capas establecidas (MATL=2).

**Tabla 3.5 Datos generales para los modelos del tipo 2**

Módulos	Datos de entrada				
<i>General</i>	MATL	NDAMA	NPY	NLG	NL
	2	0	1	1	4
<i>Moduli</i>	Capa N <sup>o</sup>	1	2	3	4
	E (kPa)	7,5 x 10 <sup>5</sup>	4,0 x 10 <sup>5</sup>	2,0 x 10 <sup>5</sup>	1,0 x 10 <sup>5</sup>
<i>Layer</i>	Capa N <sup>o</sup>	1	2	3	4
	Poisson(PR)	0.3	0.35	0.35	0.4
	kN/m <sup>3</sup>	22.8	21.2	21.2	20
<i>Load</i>	Tipo de Carga	CR (cm)	CP (kPa)	YW (cm)	XW (cm)
	1	15	700	37.5	0
<i>Nonlinear</i>	Capa N <sup>o</sup>	1	2	3	4
	K <sub>0</sub>	-	0.6	0.6	0.6
	K <sub>1</sub> (kPa)	-	3,2 x 10 <sup>4</sup>	2,9 x 10 <sup>4</sup>	2,76 x 10 <sup>4</sup>
	K <sub>2</sub>	-	0.5	0.5	0.5
	PHI(degree)		90	90	60

Para estos tipos de modelos en el módulo *Nonlinear* los valores K<sub>0</sub>, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> son derivados de experimentos de laboratorio y PHI como valor representativo de la primera invariante de

esfuerzos, son coeficientes que caracterizan el comportamiento elástico no lineal para las capas definidas donde estos se establecieron bajo criterios recopilados del Instituto del Asfalto, 1993 y la Guía de la AASTHO, 1993, expuestos en tablas en el libro *Pavement Analyses and Design* por el Dr. Yang Hong Huang de la Universidad de Kentucky.

En los modelos tipo 3 los datos generales se mantienen iguales a los modelos tipos 2 a diferencia de que se establece para la capa de superficie un comportamiento visco-elástico, donde al *item* MATL le corresponde el valor de 4, no se especifica módulo elástico para la primera capa y se especifica la entrada de los datos en el módulo *Viscoelastic*.

**Tabla 3.6 Datos generales para los modelos del tipo 3**

Módulos	Datos de entrada				
<i>General</i>	MATL	NDAMA	NPY	NLG	NL
	4	0	1	1	4
<i>Moduli</i>	Capa N°	1	2	3	4
	E (kPa)	-	4,0 x 10 <sup>5</sup>	2,0 x 10 <sup>5</sup>	1,0 x 10 <sup>5</sup>
<i>Layer</i>	Capa N°	1	2	3	4
	Poisson(PR)	0.3	0.35	0.35	0.4
	kN/m <sup>3</sup>	22.8	21.2	21.2	20
<i>Load</i>	Tipo de Carga	CR (cm)	CP (kPa)	YW (cm)	XW (cm)
	1	15	700	37.5	0
<i>Nonlinear</i>	Layer N°	1	2	3	4
	K <sub>0</sub>	-	0.6	0.6	0.6
	K <sub>1</sub> (kPa)	-	3,2 x 10 <sup>4</sup>	2,9 x 10 <sup>4</sup>	2,76 x 10 <sup>4</sup>
	K <sub>2</sub>	-	0.5	0.5	0.5
	PHI(degree)		90	90	60
<i>Viscoelastic</i>	DUR	LAYER	BETA	CREEP (kPa)	TEMP (°C)
	0.1	1	0.117	6,0 x 10 <sup>-6</sup>	50

Los valores definidos en el módulo *Viscoelastic* para este tipo de modelo se establecieron por valores recomendados en el libro *Pavement Analyses and Design*, donde para una carga de cálculo a una velocidad de acción sobre el pavimento de 64 km/h (40 mph) (DUR) y para una temperatura de referencia en el pavimento (TEMP) igual a 50 °C, se obtiene un *creep* (valor

de deformación por fluencia lenta en el tiempo) para una mezcla densa con comportamiento viscoso igual a 0.000006 kPa.

La realización de los tres tipos de modelos para cada una de las cuatro estructuras de pavimento flexible diseñadas dio un total de 12 modelos desarrollados en el *software* Kenlayer, en el cálculo de los esfuerzos y las deformaciones verticales generadas en dichas estructuras producto a los datos especificados.

Los resultados obtenidos tras la corrida de estos modelos desarrollados son expuestos en las tablas 3.7, 3.8 y 3.9, donde se muestran las deflexiones unitarias ocurridas en cada capa de las estructuras modeladas en consecuencia al estado de esfuerzos generados por las cargas y el tipo de comportamiento considerado en el análisis.

**Tabla 3.7 Deflexiones y esfuerzos obtenidos para los modelos tipo 1**

Estructura	Posición Vertical (cm)	Deformación Vertical (cm)	Esfuerzos Verticales $\sigma_v$ (kPa)	Esfuerzos Horizontales $\sigma_H$ (kPa)
Nº 1	0	0,0865	700,00	862,56
	11	0,0793	503,69	16,54
	36	0,0625	134,63	63,38
	76	0,0466	41,20	26,17
Nº 2	0	0,0971	700,00	1093,61
	9	0,0872	562,25	37,43
	34	0,0688	141,16	77,20
	59	0,0554	60,07	35,42
Nº 3	0	0,1045	700,00	1114,00
	8	0,0912	592,16	76,972
	33	0,0720	144,73	85,69
	53	0,0601	70,08	39,79
Nº 4	0	0,1171	700,00	1241,04
	7	0,1010	616,50	126,83
	27	0,0735	185,07	108,20
	42	0,0329	98,12	50,44

**Tabla 3.8 Deflexiones y esfuerzos obtenidos para los modelos tipo 2**

Estructura	Posición Vertical (cm)	Deformación Vertical (cm)	Esfuerzos Verticales $\sigma_v$ (kPa)	Esfuerzos Horizontales $\sigma_H$ (kPa)
Nº 1	0	0,0692	700,00	858,82
	11	0,0549	568,81	162,26
	36	0,0466	150,74	63,94
	76	0,0385	47,91	19,61
Nº 2	0	0,0884	700,00	838,43
	9	0,0739	618,09	215,02
	34	0,0670	158,54	81,31
	59	0,0528	72,08	18,62
Nº 3	0	0,0961	700,00	826,45
	8	0,0756	639,11	247,45
	33	0,0602	163,27	89,67
	53	0,0492	84,82	16,97
Nº 4	0	0,1098	700,00	822,97
	7	0,0732	654,00	280,31
	27	0,0667	217,69	90,23
	42	0,038	122,68	16,26

**Tabla 3.9 Deflexiones y esfuerzos obtenidos para los modelos tipo 3**

Estructura	Posición Vertical (cm)	Deformación Vertical (cm)	Esfuerzos Verticales $\sigma_v$ (kPa)	Esfuerzos Horizontales $\sigma_H$ (kPa)
Nº 1	0	0,0621	700,00	664,35
	11	0,0583	585,41	213,35
	36	0,0495	161,65	68,94
	76	0,0358	43,91	17,23
Nº 2	0	0,0711	700,00	858,82
	9	0,0620	571,19	162,26
	34	0,0590	144,57	63,94

	59	0,0480	67,11	19,61
Nº 3	0	0,0796	700,00	813,95
	8	0,0737	621,74	212,51
	33	0,0484	163,27	85,74
	53	0,0373	80,72	11,47
Nº 4	0	0,098	700,00	853,51
	7	0,063	649,77	208,73
	27	0,058	214,32	85,74
	42	0,031	111,84	14,55

En la obtención de la estimación de la vida de diseño que realiza el *software* Kenlayer para las estructuras flexibles diseñadas se desarrollaron un total de 8 modelos, cuatro para los modelos tipo 2 y cuatro para los modelos tipo 3, especificándose para cada uno de estos un análisis de los daños debido a los esfuerzos generados bajo la acción repetitiva de las cargas. Se descarta la consideración de un análisis de los deterioros para los modelos tipo 1, pues este tipo de modelos propone un comportamiento elástico lineal en toda la estructura por lo que las deformaciones que se producen en la estructura son instantáneas y no existe por lo tanto una acumulación de daños para este tipo de comportamiento estructural.

Los datos de entrada para los modelos en el análisis de los daños en las estructuras diseñadas se muestran en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10 Datos para el análisis de daño en cada estructura.**

Módulo	Estructura	Tráfico ( $\Sigma N$ )	Tensión inferior				Compresión superior		
		TNLR	Capa	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	Capa	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>
<i>Damage</i>	Nº 1	7,2E+06	1	0,0796	3,291	8,54	4	1,365x10 <sup>-6</sup>	4,477
	Nº 2	1,6E+06							
	Nº 3	7,8E+05							
	Nº 4	1,3E+05							

Dichos datos se especificaron en el módulo *Damage* de cada modelo desarrollado, los datos expuestos son valores recomendados por el Instituto del Asfalto, 1993 y la Guía de la AASTHO,

1993, para el cálculo de los deterioros en los pavimentos flexibles debido al agrietamiento por fatiga de la capa asfáltica y la deformación permanente a nivel de subrasante producto a la acción de las cargas del tránsito.

Los resultados obtenidos, luego de realizar los modelos para la estimación de la vida de diseño en años por el *software* Kenlayer, son mostrados en la tabla 3.11.

**Tabla 3.11 Estimación de la vida de diseño en años por el Kenlayer para las estructuras flexibles diseñadas**

Estructura	Modelos tipo 2	Modelos tipo 3
Nº 1	7,76	14,3
Nº 2	10,25	17,34
Nº 3	14,68	21,81
Nº 4	22,21	31,96

### 3.4. Cálculo del período de diseño de las estructuras flexibles diseñadas por medio de la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba

En función de las deformaciones obtenidas en la superficie de cada estructura flexible modelada, mostradas en las tablas 3.8, 3.9, y en relación con valores exigidos por la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba se calcula el período de diseño de las estructuras flexibles diseñadas, tras la siguiente expresión matemática:

$$n = \log_{1.03} \left[ \left[ \frac{\left( \frac{2073}{\Delta Z} \right)^{\frac{100}{22}}}{365 * ICD_0 * f_{CE}} \right] * \ln(1.03) + 1 \right] \text{ (años)} \quad (3.1)$$

Donde:

$\Delta Z$ : Deflexión en la superficie obtenida en cada modelo desarrollado.

$ICD_0$ : La intensidad diaria de vehículos pesados en el carril de diseño, durante el primer año de servicio para cada tipo de vía flexible en análisis. (tabla 3.1)

$f_{CE}$ : Factor camión eje de cada tipo de vía flexible. (tabla 3.1)

La tabla 3.12 muestra los resultados obtenidos al evaluar los datos en la expresión 3.1 para el cálculo del período de diseño de las estructuras flexibles diseñadas.

**Tabla 3.12 Períodos de diseño derivados de la correlación matemática entre las deflexiones superficiales obtenidas y la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba.**

Estructura	Modelos tipo 2	Modelos tipo 3
Nº 1	15,47	22,51
Nº 2	20,90	40,38
Nº 3	26,20	44,83
Nº 4	47,42	61,44

### **3.5. Interpretación de los resultados obtenidos en el análisis del período de diseño que establece la NC 334 para las estructuras de pavimento flexible diseñadas**

Luego de obtenidos los resultados tras la modelación a través del *software* Kenlayer de las cuatro estructuras de pavimento flexible diseñadas mediante la metodología de cálculo de la NC 334 y el cálculo de los períodos de diseño que establece la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba para dichas estructuras, se procede al análisis e interpretación de los resultados alcanzados.

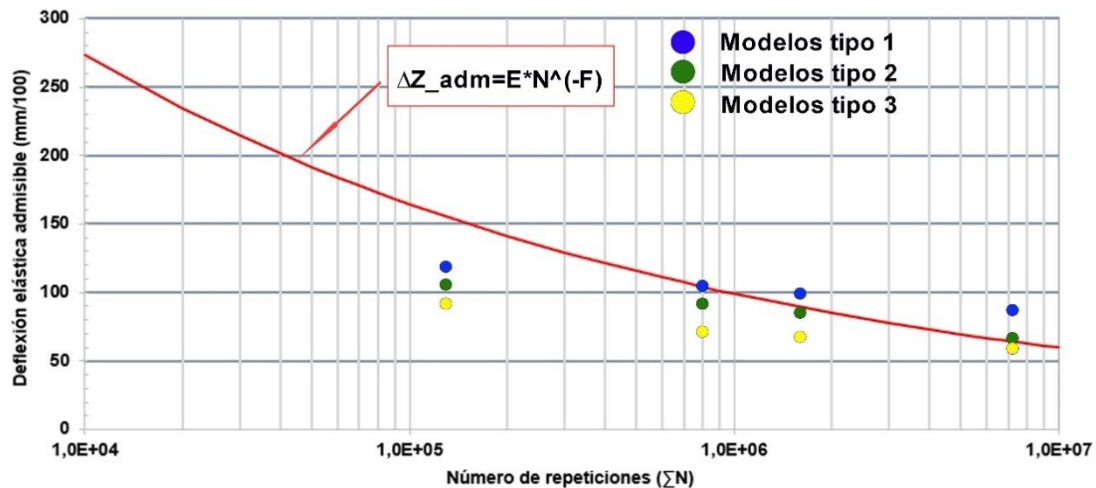
Al evaluar el tráfico de proyecto considerado para las cuatro estructuras flexibles diseñadas en la ecuación 2.8 que rige la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba, se obtienen las deflexiones admisibles en dichas estructuras bajo este criterio.

La tabla 3.13 expone las deflexiones admisibles que exige la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba en función de un tráfico de proyecto considerado en las cuatro vías flexibles. Además, la tabla muestra las deflexiones en la superficie obtenidas previamente en la modelación a fin de realizarse una comparación de dichos valores obtenidos.

**Tabla 3.13 Deflexión admisible exigida por la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba en función del tráfico de proyecto considerado para las estructuras flexibles diseñadas.**

Estructura	Tráfico de Proyecto	Ley de comportamiento	Modelos tipo 1	Modelos tipo 2	Modelos tipo 3
	$\Sigma N$ de ejes (100 kN)	$\Delta Z$ (mm/100)	$\Delta Z$ (mm/100)	$\Delta Z$ (mm/100)	$\Delta Z$ (mm/100)
Nº 1	7,2E+06	64,267	86,47	69,20	62,12
Nº 2	1,6E+06	89,473	97,08	88,40	71,12
Nº 3	7,8E+05	104,794	104,53	96,12	79,56
Nº 4	1,3E+05	155,429	117,1	109,63	97,81

La gráfica 3.1 muestra para un mejor análisis los resultados expuestos en la tabla 3.13.

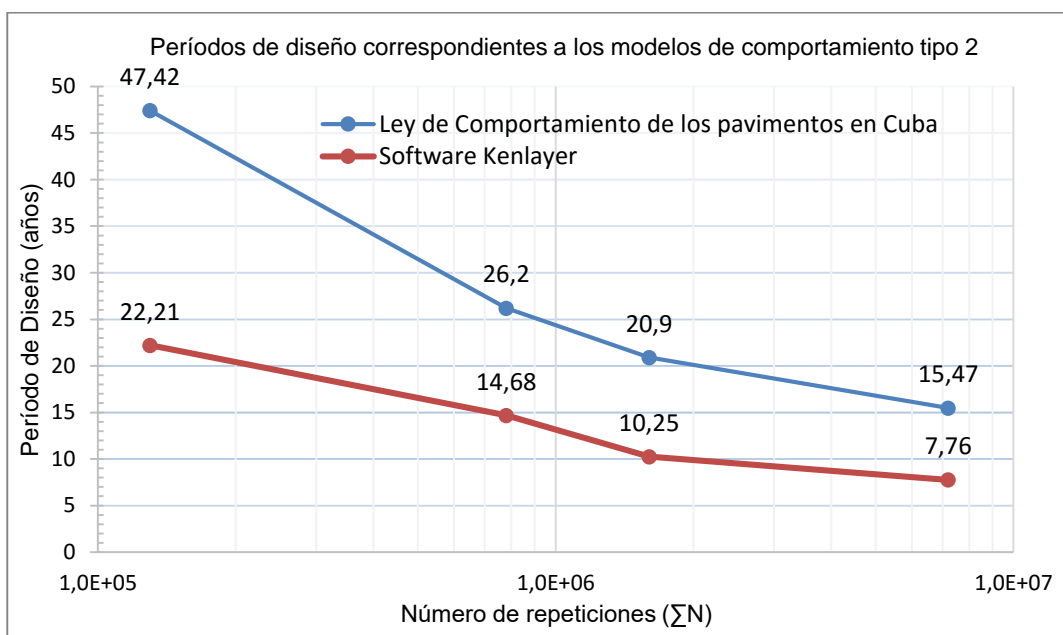


**Gráfico 3.1 Ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba. Deflexiones superficiales obtenidas para los diferentes modelos desarrollados en el Kenlayer.**

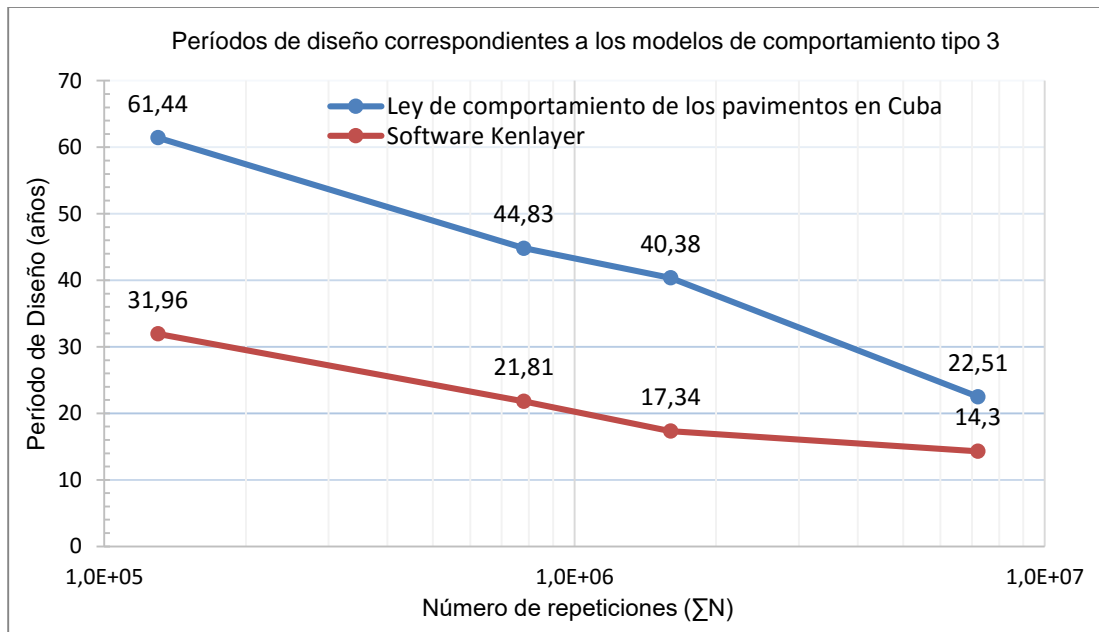
La representación gráfica de los valores en la figura 3.1 muestra cómo los tres tipos de modelos exponen valores diferentes y se comprobó que es en los modelos tipo 1 donde mayores deflexiones en la superficie se alcanzaron con respecto a los otros dos modelos desarrollados. Se observa además cómo 9 de las deflexiones obtenidas para los tres tipos de modelos desarrollados en el *software* Kenlayer no superaron las deflexiones admisibles que establece la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba, con la excepción de tres valores. comprobó

Solo tres valores se encuentran por encima de las deflexiones admisibles de la ley de comportamiento, 0,8647 mm y 0,6920 mm como valores de los modelos tipo 1 de la primera estructura flexible diseñada a la cual le corresponde un tráfico de proyecto de la categoría muy pesado y 0,9708 mm para la segunda estructura flexible diseñada de los modelos tipo 1, a la cual le corresponde un tráfico de diseño de la categoría de pesado. Se demostró que son los volúmenes de tráfico de la categoría de muy pesado los que no están acorde con las deflexiones exigidas por la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba.

En la interpretación de los resultados mostrados en las tablas 3.11 y 3.12 se confeccionaron los gráficos 3.2 y 3.3 en Microsoft Excel que muestran los períodos de diseño que establece la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba para las estructuras diseñadas, en relación a las deflexiones presentadas y la vida de diseño estimada por el *software* Kenlayer tras la consideración de la acumulación de los daños presentados en las estructuras flexibles modeladas.



**Gráfico 3.2** Períodos de diseño correspondientes a los modelos de comportamiento tipo 2 obtenidos por la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba y la vida de diseño estimada por el *software* Kenlayer.



**Gráfico 3.3 Períodos de diseño correspondientes a los modelos de comportamiento tipo 3 obtenidos por la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba y la vida de diseño estimada por el software Kenlayer.**

Al comparar los períodos de diseño obtenidos en cada tipo de modelo desarrollado, ya sea los calculados tras la ecuación que describe la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba o los obtenidos por la estimación que realiza el *software* Kenlayer, se puede afirmar que a medida que disminuye el número de repeticiones de la carga de cálculo normada aumenta el período de diseño de las estructuras de pavimento flexible diseñadas por la NC 334, siendo el tráfico un factor influyente en la vida del pavimento.

Los períodos de diseño obtenidos mediante la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba dadas las deflexiones obtenidas en la superficie de cada tipo de modelo desarrollado, muestran cómo los 20 años estimados por la NC 334:2004 resultan correctos como período de diseño para estructuras con tráfico pesado, mediano y ligero, dado que en todos los tipos de modelos de comportamiento desarrollados los valores alcanzados son aceptables, no así para el valor de tráfico muy pesado en el modelo de comportamiento tipo 2 (15,47 años), donde se aprecia que este período de diseño obtenido es inferior al normado.

Para el caso de la estimación de la vida de diseño para las estructuras flexibles modeladas que establece el *software* Kenlayer a través de la implementación de los modelos de fallo desarrollados, los resultados muestran cómo para valores desde tráfico mediano hasta tráfico

muy pesado en los modelos de comportamiento tipo 2 los valores resultan inferiores a los 20 años estimados por la NC 334:2004 y de igual manera se aprecia en los modelos de comportamiento tipo 3, donde resultan inferiores igualmente los períodos de diseño representativos para tráficos pesados y muy pesados; se evidencia por lo tanto de forma general cómo los criterios empíricos mecanicistas en los que se fundamenta este *software* presentan valores más exactos en el análisis estructural de los pavimentos flexibles en relación con los que se obtienen por medio de la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba; se infiere entonces que los criterios en los que se fundamenta el Kenlayer exigen que las vías flexibles diseñadas requieran una intervención más temprana debido a su agotamiento estructural que lo que estipula el criterio empírico de diseño de la normativa cubana.

Las tablas 3.14 y 3.15 muestran la diferencia que existe entre el período de diseño obtenido por la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba y la vida de diseño estimada por el *software* Kenlayer en cada estructura flexible diseñada en los modelos de análisis desarrollados de tipo 2 y de tipo 3.

**Tabla 3.14 Diferencia en años existente entre la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba y el *software* Kenlayer en los modelos de tipo 2**

Estructura	Ley de comportamiento (años)	KENLAYER (años)	Diferencia (años)	Diferencia (%)	Media de diferencia (%)
Nº 1	15,47	7,76	7,71	49,8	49,5
Nº 2	20,9	10,25	10,65	51,0	
Nº 3	26,2	14,68	11,52	44,0	
Nº 4	47,42	22,21	25,21	53,2	

**Tabla 3.15 Diferencia en años existente entre la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba y el *software* Kenlayer en los modelos de tipo 3**

Estructura	Ley de comportamiento (años)	KENLAYER (años)	Diferencia (años)	Diferencia (%)	Media de diferencia (%)
Nº 1	22,51	14,3	8,21	36,5	48,2
Nº 2	40,38	17,34	23,04	57,1	
Nº 3	44,83	21,81	23,02	51,3	
Nº 4	61,44	31,96	29,48	48,0	

Como se observa en ambos tipos de modelos desarrollados existe una diferencia aproximada de un 50 %, entre los años que define la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles como período de diseño para las estructuras flexibles diseñadas y los años estimados por el *software* Kenlayer como vida diseño tras el análisis de los deterioros en estas estructuras. Se demostró cómo ambos criterios difieren debido a que el criterio empírico mecanicista del *software* Kenlayer considera que las estructuras flexibles bajo estudio presentarán fallos estructurales aproximadamente a la mitad del período de diseño que estipula la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba.

### **3.6. Conclusiones parciales**

Los tres tipos de modelos desarrollados por medio de la modelación computacional a través del *software* Kenlayer reflejan un comportamiento estructural diferente en cada vía flexible bajo estudio, resultando los modelos que consideran un comportamiento elástico lineal para todas las partes de la estructura los que presentaron las mayores deformaciones.

Al compararse las deformaciones obtenidas por medio de la modelación a través del *software* Kenlayer con respecto a las deflexiones admisibles que establece la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba, se puede apreciar cómo para volúmenes de tránsito correspondientes a la categoría de tráfico muy pesado las deflexiones ocurridas superan los valores límites exigidos por dicha ley.

Los criterios empíricos mecanicistas en los que se fundamenta el *software* Kenlayer establecen que se requiere una intervención estructural en las vías flexibles diseñadas más temprano en relación con lo que establece la metodología empírica de la NC334, reflejándose cómo al considerarse en un análisis estructural diferentes modelos de comportamiento para los materiales componentes de las estructuras diseñadas se obtienen valores más puntuales.

## Conclusiones generales

Al constituirse diferentes modelos de comportamiento para las capas componentes de una estructura de pavimentos en el análisis estructural de una vía de pavimento flexible, se propicia la obtención de resultados más confiables y se garantiza la proyección de diseños más racionales.

Los resultados obtenidos por medio de la modelación estructural de las vías flexibles bajo estudio a través del *software* Kenlayer en relación con los valores admisibles de deflexión exigidos por la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba, muestra cómo el tráfico influye a nivel de proyecto en el período de diseño considerado por la NC 334, resultando los volúmenes altos de tráfico los que mayor influencia presentan en la vida del pavimento, siendo la acción de estos los que aminoran mucho más rápido de manera gradual la capacidad estructural del pavimento.

Los criterios empíricos mecanicistas en los que se fundamenta el *software* Kenlayer establecen que se requiere una intervención estructural en las vías flexibles proyectadas más temprana en relación con lo que establece la metodología empírica de la NC 334, al reflejarse cómo en los modelos desarrollados en dicho *software* existe una diferencia aproximada de un 50 %, entre los años que define la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba como período de diseño para las estructuras flexibles diseñadas y los años estimados por el *software* Kenlayer como vida de diseño.

## Recomendaciones

Comparar de igual manera el período de diseño propuesto por la NC 334 pero considerando la variación de otros factores predominantes en el diseño y mediante la implementación de otros programas de cómputo.

A pesar de que en Cuba actualmente no existe una norma para el diseño de pavimentos rígidos se pudiera explotar la componente del *software* Kenpave que se refiere a este tipo de pavimento para futuras investigaciones.

Gracias a que el *software* Kenlayer no requiere grandes propiedades de procesamiento se puede implementar en el trabajo docente para aumentar el conocimiento de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil sobre el comportamiento de los pavimentos desde el punto de vista de esfuerzo y deformaciones.

## Bibliografía

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation

Officials. (1986). *Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, D. C. USA.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, D. C. USA.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. (2004). *Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, D. C. USA.

AASHTO T 193: American Association of State Highway and Transportation Officials (2010).

Alfonso, M. F. (2006). *Ingeniería de pavimentos*. Tomo I y II, Universidad Católica de Colombia, Bogotá.

ARQHYS. (2017). Pavimentos articulados. *ARQHYS*, I (1), 2.

Balay, J., A. Correia, et al. (1997). *Mechanical behaviour of soils and unbound granular materials, modelling of flexible pavements-recent advances*. Eighth International Conference on Asphalt Pavements.

Bradbury, R., D. (1938). *Reinforced Concrete Pavements*. Wire Reinforcement Institute, Washington, D.C.

Burmister, D. (1945). *The general theory of stresses and displacements in layered soil systems. III*. Journal of applied physics 16(5): 296-302.

Burmister, D. M. (1945). *The general theory of stresses and displacements in layered soil systems. II*. Journal of applied physics 16(3): 126-127.

Burmister, D. M. (1945). *The general theory of stresses and displacements in layered systems. I*. Journal of applied physics 16(2): 89-94.

Corte, J. (1997). French Design Manual for Pavement Structures.

Elliot, R. & Thompson, M. (1985). *Mechanistic Design Concepts for Conventional Flexible Pavements*. University of Illinois. Urbana. Illinois. USA.

Fundora, G. (2010). Conservación de Carreteras. ISPJAE.

Fonseca, A. M. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para carreteras* Tomo I. Colombia: Ediciones y Publicaciones Universidad Católica de Colombia.

- García, R. R. (2014). *Análisis de estructuras de pavimento flexible de Cuba con criterios empírico-mecanicistas de la Guía AASHTO 2004*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Santa Clara.
- Garnica Anguas, P. & A. Correa (2004). *Conceptos mecanicistas en pavimentos*. Publicación técnica (258). Secretaría de comunicaciones y Transporte (SCI). Sanfandila. México.
- Higuera, C. (2007). Ley de comportamiento de la deflexión admisible en pavimentos flexibles. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 16(22), 7-14.
- Higuera, C. (2011). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras*. Volumen II, Teoría, métodos de diseño y ejemplos de aplicación, Tunja: UPTC.
- Huang, Y. H. (1993). *Pavement analysis and design*.
- Iturbide, J. C. (2002). *Manual centroamericano para diseño de pavimentos*. SIECA. Guatemala.
- LCPC – SETRA. (1997). *French Design Manual for Pavement Structures*, Paris.
- Manual, H. S. (2010). *AASHTO*. Washington, DC 529.
- Medina, L. (2010) Chequeo de estructuras de pavimentos flexibles a través de criterios empírico mecanicistas. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Moll, R. M. (2016). *Procedimiento para el diseño estructural de pavimentos flexibles en Cuba con el empleo de bases recicladas utilizando ligantes asfálticos*. CUJAE. La Habana.
- Minervino, C., B. Sivakumar, et al. (2004). *New AASHTO Guide manual for load and resistance factor rating of highway bridges*. *Journal of Bridge Engineering* 9(1): 43-54.
- Moreno, V. L., & Pinto, M. P. (2007). Estado del arte en el estudio de las deformaciones plásticas en pavimentos. España.
- NC 253. (2005). Norma Cubana. *Carreteras. Materiales Bituminosos*. Hormigón Asfáltico Caliente. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, 1. Edición, La Habana.
- NC 334. (2004). Norma Cubana. *Carreteras. Diseño de Pavimento Flexible*. Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, 1. Edición, La Habana.

- NC 54-150. (1983). Norma Cubana. *Materiales y productos de construcción. Suelos. Determinación del Índice de CBR en el laboratorio.* Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, 1. Edición, La Habana.
- NC 753. (2010). Norma Cubana. *Carreteras. Vías Rurales. Clasificación Funcional.* Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, 1. Edición, La Habana.
- NC 822. (2010). Norma Cubana. *Carreteras Rurales. Explanaciones. Requisitos de Diseño.* Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, 1. Edición, La Habana.
- Plan, A. S. H. S. (1998). *American Association of State Highway and Transportation Officials.* Washington, DC.
- Rico Rodríguez, A., R. Téllez Gutiérrez, et al. (1998). *Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias.* Publicación técnica (104).
- Road Note 31. (1975). *A Guide to the Structural Design of Bitumen-surfaced Roads in Tropical and Subtropical Countries.* Department of the Environment, Road Research Laboratory, 3 ed. HMSO. London. UK.
- Road Note 31. (1993). *A Guide to the Structural Design of Bitumen-surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Countries.* Overseas Development Administration, Transport Research Laboratory. 4 ed. HMSO. London. UK, Gran Bretaña
- Sánchez, F. S. (2014). *Curso básico de diseño de pavimentos.* Colombia.
- Shell International Petroleum Company, I. (1978). *Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic,* Shell International Petroleum Company.
- SHELL International Petroleum Company. (1985). *Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavement and Overlays for Road Traffic.* London.
- SHELL International Petroleum Company. (1993). *Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavement and Overlays for Road Traffic.* Society of Civil Engineers, vol. 98, London.
- Timm, D. Birgisson, B. Newcomb, D. (1998). *Development of Mechanistic-Empirical Pavement Design in Minnesota. The Main Line.* Newsletter of Minnesota Road Research. Minnesota Department of Transportation. MnRoad. Maplewood. Minnesota, USA.
- Torres Vila, J. (1985). *Diseño de Pavimentos para Carretera y Aeropuerto.* La Habana. Editorial, Félix Varela 1.

Triste de Ceita, U. P. (2009). *Aplicación de conceptos empírico-mecanicistas en el diseño de pavimentos flexibles*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Santa Clara.

Vásquez, T., Luis Carlos. (2004). *Coeficientes de Capas Asfálticas usando el Ensayo de Tensión Indirecta*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Colombia.

Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design* (Second ed.). New York, USA.

## Anexos

### Anexo 1: Definición de los parámetros del tránsito para el diseño de estructuras de pavimento flexible por medio de la NC 334:2004

Tabla 1. Composición típica del tránsito para diferentes tipos de vías

TIPO DE VÍA		PORCENTAJE DE VEHICULOS PESADOS	
		EN LA CORRIENTE VEHICULAR (P <sub>VP</sub> )	EN EL CARRIL DE DISEÑO (P <sub>CD</sub> )
CALLES Y AVENIDAS COLECTORAS	Con limitación de camiones, sin excluir ómnibus	30 – 40	55 – 65
	Sin limitación a la circulación de camiones	45 – 50	
ARTERIAS PRINCIPALES Y SECUNDARIAS	Dentro del casco urbano	40 – 50	Principales (80 – 85) Secundarias (70-80)
	En accesos a la ciudad	50 –60	
ARTERIAS Y OTRAS CARRETERAS EN ÁREAS SUBURBANAS		60 – 65	2 carriles 100 4 carriles (70 – 85) 6 ó más (50 – 70)
CARRETERAS RURALES DE CATEGORÍAS I, II Y AUTOPISTAS		60 - 70	

**Tabla 2. Factor camión-eje de acuerdo al tipo de estructura (f<sub>CE</sub>)**

TIPO DE VÍA		FACTOR CAMION-EJE	
		FLEXIBLES	SEMIRIGIDAS
CALLES Y AVENIDAS COLECTORAS	Con limitación de camiones, sin excluir ómnibus	0,30 - 0,35	0,15 - 0,23
	Sin limitación a la circulación de camiones	0,35 - 0,40	0,23 - 0,30
ARTERIAS PRINCIPALES Y SECUNDARIAS	Dentro del casco urbano	0,25 - 0,30	0,11 - 0,19
	En accesos a la ciudad	0,30 - 0,35	0,15 - 0,23
ARTERIAS Y OTRAS CARRETERAS EN ÁREAS SUBURBANAS		0,35 - 0,40	0,23 - 0,30
CARRETERAS RURALES DE CATEGORÍAS I, II Y AUTOPISTAS	AUTOPISTAS Y CARRETERAS DE CATEGORIA I	0,70 - 1,00	0,55 - 0,80
	OTRAS VÍAS RURALES	0,55 - 0,70	0,40 - 0,55

## Anexo 2: Resistencia de diseño de la subrasante sin ensayos de laboratorio

Tabla 1. Categorías de subrasante

CLASIFICACION DE SUBRASANTE		CARACTERÍSTICAS	RESISTENCIA
SUBRASANTE ACEPTABLE (SA)	Suelo Aceptable	Menos del 35% pasa el tamiz No. 200 LL < 30% ó 30 < LL ≤ 40 e IP ≥ 0,73 (LL-20) Materia orgánica < 2% % de hinchamiento < 2%	CBR = 5%
	Suelo-cal o suelo-cemento	Suelos no adecuados, mejorados con cal o cemento. > 2% de cal o cemento	CBR = 5% a los 7 días
SUBRASANTE MEDIA (SM)	Suelo adecuado	Pasa el tamiz No. 200 < 25% Tamiz No. 20 > 70% Tamiz No. 2 < 80% LL < 30% Materia orgánica < 1% % de hinchamiento < 2%	CBR = 10%
	Suelo-cemento	Suelos aceptables, mejorados con cal o cemento. > 4% de cemento	CBR = 10% a los 7 días ó 1,5MPa
SUBRASANTE BUENA (SB)	Suelo seleccionado	Pasa el tamiz No. 200 < 20% Tamiz No. 20 > 70% Tamiz No. 2 < 75% LL < 30% Materia orgánica < 1% Hinchamiento < 1%	CBR = 15%

### Anexo 3: Obtención del espesor total equivalente (T)

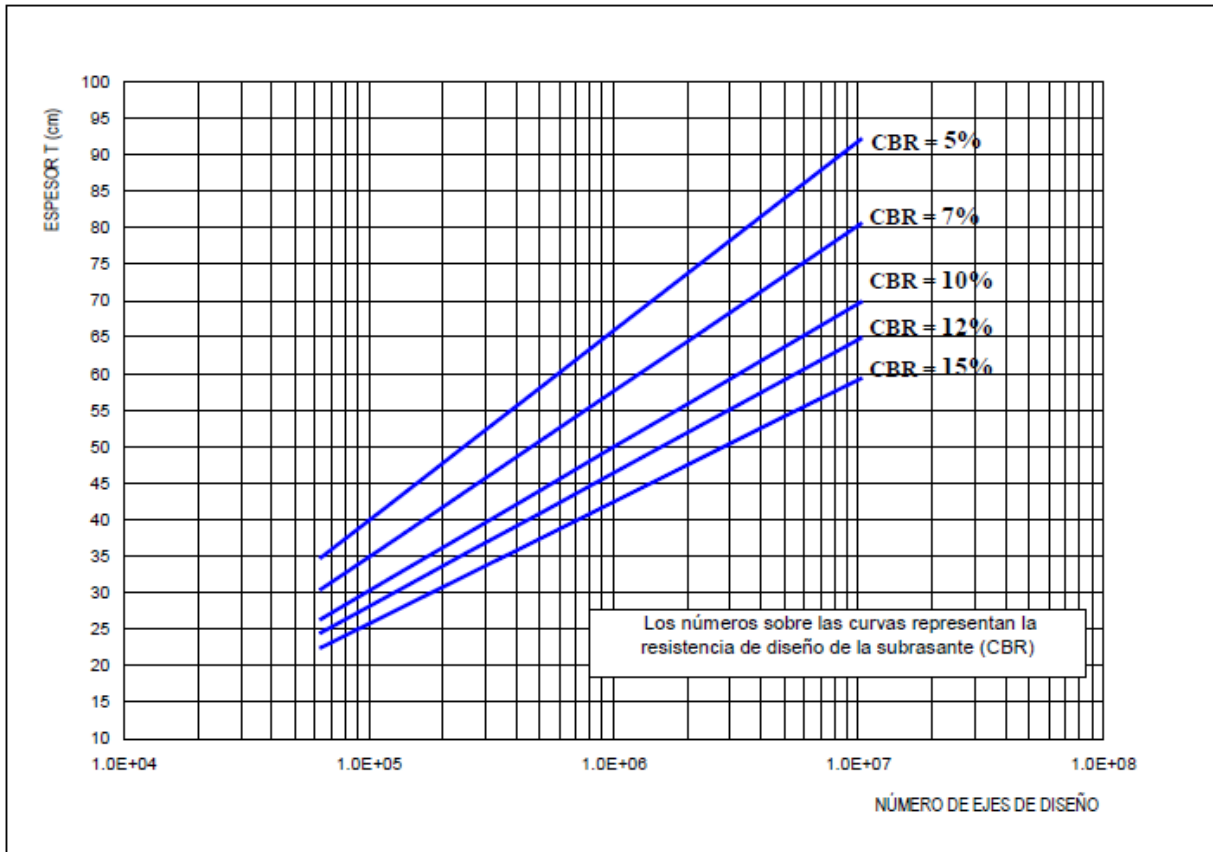


Figura 1: Espesor T equivalente de base granular de 500MPa.

#### Anexo 4: Obtención del espesor mínimo de hormigón asfáltico

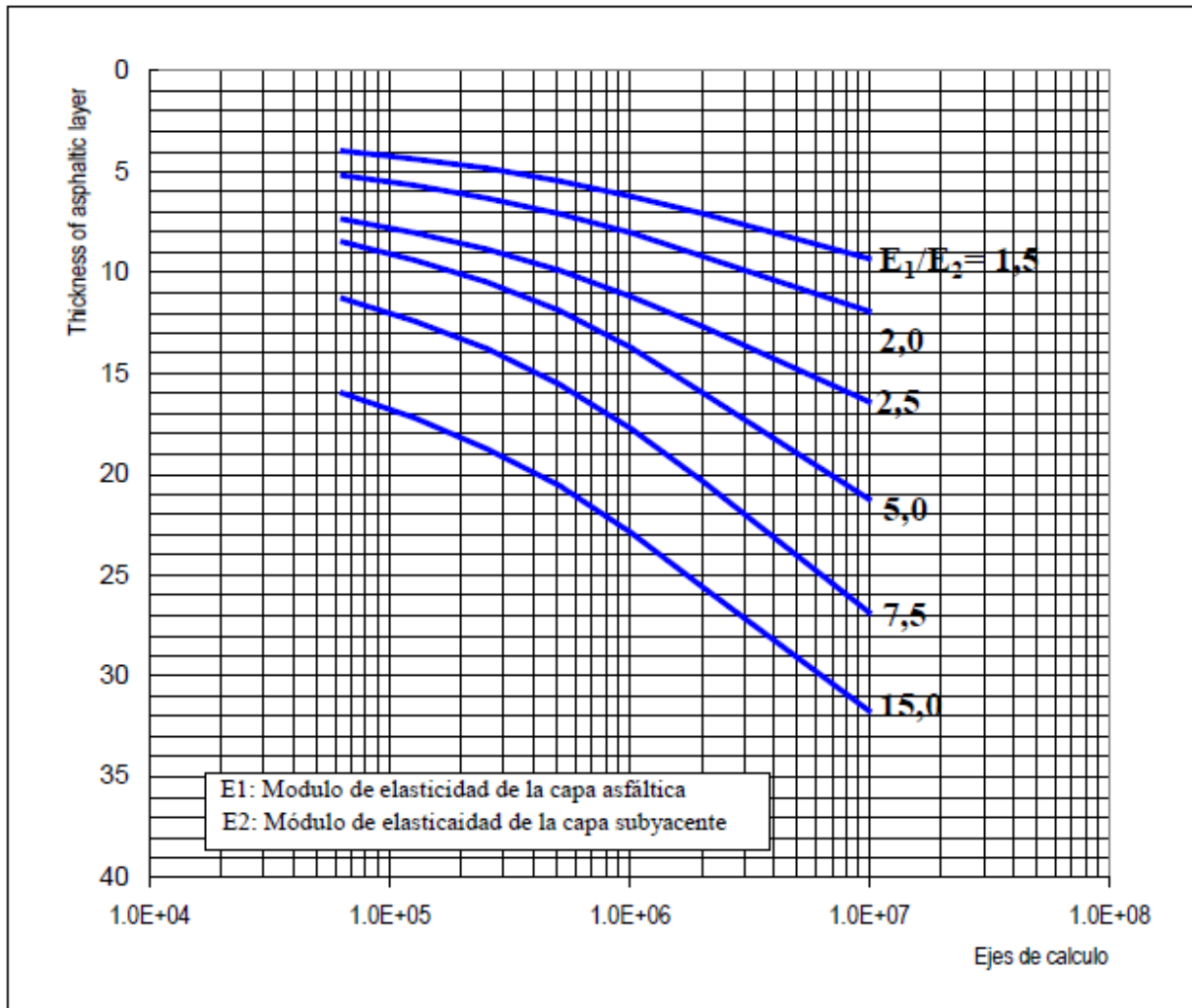


Figura 1. Espesores mínimos de hormigón asfáltico (Ts), expresados en base granular equivalente a 500 MPa

## Anexo 5: Coeficientes de equivalencia de espesores

**Tabla 1. Coeficientes de equivalencia para materiales de superficie.**

TIPO DE MATERIAL		MÓDULO DE ELASTICIDAD E (MPa)	COEFICIENTES DE EQUIVALENCIA (a)
HORMIGÓN ASFÁLTICO EN CALIENTE.	Mezclas densas y semidensas Tamaño máximo >19mm	1000	1,25
	Mezclas densas y semidensas Tamaño máximo <19mm	750	1,12

**Tabla 2. Coeficientes de equivalencia para materiales de bases no aglomeradas.**

MATERIALES DE BASE	MÓDULO E <sub>B</sub> (MPa)	RELACION E <sub>B</sub> /E <sub>SB</sub>			
		1,0	1,5	> 2,0	
Piedra triturada limpia, bien graduada (CBR > 80)	500	1,00	0,90	0,85	
Base pétreo de granulometría continua	350-400	0,90	0,85	0,80	
Grava arenosa bien graduada (CBR > 80%)	500	1,00	0,90	0,85	
Grava natural bien graduada (60% < CBR < 80%)	300	0,85	0,80	0,75	
Material seleccionado calizo	(CBR > 80%)	350	0,87	0,82	0,77
	60% < CBR < 80%	300	0,85	0,80	0,75

**Tabla 3. Coeficientes de equivalencia para bases tratadas con cemento.**

GRAVAS TRATADAS CON CEMENTO			MÓDULO $E_B$ (MPa)	MODULO DE SUBBASE		
				100MP a	175MP a	250MP a
TIPO DE TRÁFICO	Pesado	$R_c > 5,0$ MPa	2500	1,10	1,40	1,65
	Medio	$3,0 < R_c < 5,0$ MPa	2000	1,25	1,50	2,00
	Ligero	$1,5 < R_c < 3,0$ MPa	1500	1,33	2,00	2,50

**Tabla 4. Coeficientes de equivalencia para materiales de subbase.**

MATERIALES DE SUB-BASE		MÓDULO $E_{SB}$ (MPa)	TIPO DE SUBRASANTE		
			SA	SM	SB
Grava bien graduada (CBR > 80%)	CBR > 25%	>250	0,62	0,68	0,70
Material seleccionado calizo (mejoramiento)	CBR > 25%	180 - 250	0,60	0,66	0,68
Gravas areno - arcillosas pobremente graduadas	$30\% < CBR < 50\%$	100-150	0,57	0,63	-
	$20\% < CBR < 30\%$	70-100	0,50	-	-
Gravas naturales mal graduadas ( $20\% < CBR < 30\%$ )		> 70	0,48	-	-
Arenas arcillosas (materiales de relleno) $15\% < CBR < 25\%$		50-70	0,46	-	-
Suelo-cemento ( $R_c > 2$ MPa)		1000	1,45	1,85	2,00