



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:
PROPUESTA DE METODOLOGÍA COMPLEMENTARIA A LOS DISEÑOS
DE PAVIMENTOS SEGÚN AASHTO 93**

AUTOR:
Cedeño Cevallos, Jimmy Antonio

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:
Ing. Vila Romaní, Rolando, PhD

**Guayaquil, Ecuador
2014**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Jimmy Antonio Cedeño Cevallos**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Vila Romaní, Rolando, PhD

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Dueñas Rossi, Mario

Guayaquil, a los 24 días del mes de septiembre del año 2014



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Jimmy Antonio Cedeño Cevallos**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Propuesta a Metodología Complementaria a los Diseños de Pavimentos Según AASHTO 93** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 24 días del mes de septiembre del año 2014

EL AUTOR

Jimmy Antonio Cedeño Cevallos



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Jimmy Antonio Cedeño Cevallos**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Propuesta a Metodología Complementaria a los Diseños de Pavimentos Según AASHTO 93**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 24 días del mes de septiembre del año 2014

EL AUTOR:

Jimmy Antonio Cedeño Cevallos

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios que me ha otorgado voluntad y sabiduría para continuar avanzando; a mi familia, sobre todo a mis padres por todo el apoyo y confianza brindados a lo largo de toda mi vida.

Al Dr. Rolando Vila, tutor de este trabajo de grado, por su invaluable ayuda y toda la dedicación de su tiempo en la elaboración de este proyecto.

Jimmy Cedeño

DEDICATORIA

A mi familia.

Jimmy Cedeño



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACIÓN

**Ing. Rolando Vila Romaní, PhD
PROFESOR GUÍA O TUTOR**

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
I.1 Consideraciones.....	1
I.2 Antecedentes	1
I.3 Descripción de la Problemática	2
I.4 Justificación.....	3
I.5 Enfoque Metodológico.....	3
I.6 Alcance.....	4
I.7 Objetivos	4
CAPÍTULO 1 PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Guía de diseño AASHTO 93	7
1.3 AASHTO Road Test.	7
1.2 Consideraciones de diseño según AASHTO 93.....	8
CAPÍTULO 2 ANALISIS DE TRÁFICO	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Volúmenes de tránsito.....	9
2.2.1 Tráfico promedio diario de camiones.....	10
2.3 LEF (Load Equivalent Factor).....	10
2.4 Serviciabilidad	12
2.5 Período de diseño.	12
2.6 Factor de distribución por dirección.....	13
2.7 Factor de distribución por carril.	13
2.8 Factor camión eje.....	15
2.9 Factor de crecimiento.....	15
2.10 Cálculo de ejes equivalentes.....	16
2.10.1 Consideraciones para el cálculo de ejes equivalentes.....	16
2.10.2 Procedimiento general para el cálculo de ejes equivalentes.	16
2.11 Métodos utilizados para el análisis de tráfico.	18
2.11.1 Tráfico método 1.....	18
2.11.2 Tráfico método 2.....	20

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	24
3.1 Introducción.....	24
3.2 Valor del soporte California (CBR, AASHTO T-193).	25
3.3 Subrasantes.	26
3.3.1 Materiales.	27
3.4 Sub-base.	27
3.4.1 Materiales.	28
3.4.2 Determinación del módulo elástico.	29
3.4.3 Coeficiente estructural de capa <i>ai</i>	30
3.5 Base.	30
3.5.1 Base granular.	31
3.5.1.1 Determinación del módulo elástico.	31
3.5.1.2 Coeficiente estructural de capa <i>ai</i>	32
3.5.2 Base estabilizada con cemento portland.	33
3.5.2.1 Determinación del módulo elástico.	34
3.5.2.2 Coeficiente estructural de capa <i>ai</i>	36
3.5.3 Base estabilizada con emulsión asfáltica o bituminosa.	37
.....	38
3.5.3.1 Determinación del módulo elástico.	38
3.5.2.2 Coeficiente estructural de capa <i>ai</i>	38
3.6 Carpeta asfáltica.	40
3.6.1 Materiales.	40
3.4.2 Módulo dinámico.....	40
3.4.3 Coeficiente estructural de capa <i>ai</i>	41
 CAPÍTULO 4 DISEÑO DE ESPESORES.	 42
4.1 Introducción.....	42
4.2 Objetivos del diseño de pavimentos flexibles	42
4.3 Parámetros para el diseño.	43
4.3.1 Confiabilidad (R).	43
4.3.2 Serviciabilidad.....	43
4.3.3 Análisis de tráfico y período de diseño.	44
4.3.4 Propiedades de los materiales.....	44
4.3.5 Drenaje (<i>mi</i>).....	44
4.3.5 Número estructural (SN).	45
4.4 Ecuaciones de diseño.	45
4.4.1 Ecuaciones originales.	46

4.4.2 Ecuaciones modificadas.....	47
4.5 Selección del espesor de capa.....	48
CAPÍTULO 5 Análisis de los pavimentos flexibles.....	50
5.1 Introducción.....	50
5.2 Teoría de la elasticidad.....	50
5.2.1 Parámetros de la elasticidad.....	52
5.3 Ecuaciones de Boussinesq.....	53
.....	54
5.4 Distribución de esfuerzos en los sistemas multicapa de pavimentos flexibles.....	54
5.5 Método de Odemark-Boussinesq.....	56
5.6 Consideración para análisis por ruedas robles.....	57
CAPÍTULO 6.....	58
Metodologías complementarias para el diseño de pavimentos flexibles.....	58
6.1 Introducción.....	58
6.2 Transferencia de la temperatura ambiente hacia la carpeta asfáltica.....	58
6.3 Variación del módulo elástico de carpeta asfáltica en función de la temperatura.....	59
6.5 Hipótesis de Miner.....	59
6.4 Modelo de deterioro por fatiga del Instituto del Asfalto.....	61
CAPÍTULO 7.....	62
Aplicación para el diseño y análisis aproximado de pavimentos flexibles....	62
7.1 Introducción.....	62
7.1 Presentación de la aplicación.....	62
7.2 Ejemplo de aplicación del programa.....	63
7.2 Análisis de resultados para metodologías complementarias.....	66
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
8.1 Conclusiones.....	69
8.2 Recomendaciones.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Consideraciones para período de diseño (Guía Para El Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	13
Tabla 2.2 Ejemplo de cálculo para el factor camión.....	15
Tabla 2.3 Vehículos pesados tipo en el Ecuador y sus características (Ministerio de Obras Públicas del Ecuador).....	18
Tabla 2.4 Ejemplo de aplicación del Método 1 para el análisis de tráfico .	19
Tabla 2.5a Espectro de carga para ejes simples, aplicación del método 2.	21
Tabla 2.5b Espectro de carga para ejes tandem, aplicación del método 2.	21
Tabla 2.5c Espectro de carga para ejes triples, aplicación del método 2 .	22
Tabla 2.6 Ejemplo de análisis de tráfico por método 2	23
Tabla 4.1 Niveles de confiabilidad sugeridos (Guía Para El Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	43
Tabla 4.2 Coeficientes de modificación m_i que toman en consideración el drenaje (Guía Para El Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993).....	45
Tabla 4.3 Espesores mínimos recomendados (Guía Para El Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	48

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.1 Típica sección para pavimento flexibles y rígidos. (Guía Para El Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	6
Figura 2.1 Proporción de camiones en el carril de diseño en vía de múltiples carriles. (PCA., 1984).....	14
Figura 2.2 Balanza tipo para el peso de eje/vehículo	20
Figura 3.1 Nomograma que presenta relaciones entre parámetros de resistencia de la capa sub-base (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993).....	29
Figura 3.2 Relación entre módulo elástico y CBR en la capa sub-base (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	29
Figura 3.3 Nomograma que presenta relaciones entre parámetros de resistencia de la capa base granular (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	31
Figura 3.4 Relación entre módulo elástico y CBR en la capa sub-base (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	32
Figura 3.5 Estabilización de capa base con cemento portland (www.osusa.com)	34
Figura 3.6 Nomograma que presenta relaciones entre parámetros de resistencia de la capa base estabilizada con cemento portland (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	35
Figura 3.7 Relación entre módulo elástico y resistencia a la compresión simple en bases estabilizadas con cemento portland (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	35
Figura 3.8 Relación entre módulo elástico y el coeficiente de capa en bases estabilizadas con cemento portland (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993).....	36
Figura 3.9 Estabilización de capa base con emulsión asfáltica (www.osusa.com)	38
Figura 3.10 Relación entre el módulo elástico y el coeficiente de capa en bases estabilizadas con emulsión asfáltica (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	39
Figura 3.11 Nomograma que presenta relaciones entre parámetros de resistencia de la capa base granular (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	39
Figura 3.12 Relación entre coeficiente estructural de capa y módulo dinámico. (Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	41
Figura 4.1 Procedimiento para calcular los espesores de capa (Guía Para El Diseño de Pavimentos AASHTO, 1993)	49
Figura 5.1 Respuesta del pavimento ante la carga (esfuerzos , deformaciones y deflexiones)	51
Figura 5.2 Desempeño del pavimento (agrietamiento)	51
Figura 5.3 Parámetros elásticos para esfuerzos uniaxiales.....	52
Figura 5.4 Análisis propuesto por Boussinesq en un espacio seminfinito... ..	54
Figura 5.5 Sistema multicapa (Yoder y Witczak, 1975)	55
Figura 5.6 Esquematación del método de Odemark	56

RESUMEN

La metodología AASHTO-93 para el diseño convencional de pavimentos flexibles se fundamenta en la idea de encontrar los espesores óptimos para número de capas seleccionados con los materiales seleccionados para poder resistir un número total de pasadas de ejes equivalentes (ESAL) durante el período de diseño tomando en cuenta que los distintos criterios de falla se encuentren dentro de los límites permisibles. En el Ecuador comúnmente se diseña bajo esta metodología empírica ya que destaca por su sencillez de aplicación y confiabilidad en el diseño; sin embargo generalmente no se toman en cuenta criterios adicionales para el afinamiento del diseño como son la intervención de la temperatura en la variabilidad de la resistencia de la capa asfáltica a través del tiempo o los distintos volúmenes de tráfico alrededor del día entre otros. En este trabajo se analiza un complemento del diseño AASHTO 93 que permitirán analizar daños en el pavimento utilizando ecuaciones de comportamiento y considerando las temperaturas existentes en las distintas regiones del país.

Palabras Claves: espesores mínimos, metodología complementaria, temperatura, asfalto, volumen de tráfico, diseño, análisis, desempeño.

ABSTRACT

The AASHTO 93 methodology for conventional flexible pavement design is based on the idea of finding the optimal thickness for selected number of passes of equivalent axle load (ESAL) during the analysis period taking into account the different failure criteria are within the permissible limits. In Ecuador commonly design under mechanistic-empirical method and noted for its simplicity of implementation and reliability in the design; though generally additional criteria for the refinement of the design are not taken into account such as intervention of the temperature variation of the resistance of the asphalt layer over time or different traffic volumes around day among others. This work complements the AASHTO 93 design that will analyze pavement damage using a behavioral equations and considering the temperatures in the different regions in Ecuador.

Key Words: minimum thickness, complementary methodologies, temperature, asphalt, traffic volume, pavement design, analysis, performance

INTRODUCCIÓN

I.1 Consideraciones

El transporte terrestre en un futuro se enfrenta a enormes desafíos: un aumento de los requerimientos de mantenimiento, aumento en la demanda de transporte por parte de los usuarios, reducir contaminación entre otros. Tomando en cuenta el punto del aumento de la demanda del transporte y con ello de vías, se ve la necesidad en Ecuador de proponer métodos complementarios de diseño por medio de herramientas (hojas de cálculo, tablas de diseño, etc.) que permitan eficiencia y comodidad en los procesamientos de la realización de los cálculos de las nuevas estructuras.

I.2 Antecedentes

Para el diseño de pavimentos flexibles se han utilizado en sus inicios métodos que tenían un enfoque empírico que se basan en resultados de experimentos y experiencias. Estos métodos requieren un número de observaciones a fin de determinar las relaciones entre las variables que se ingresan y los resultados que se obtienen, sin embargo se reconoce que esta metodología presenta ciertos límites a la hora del diseño debido a las condiciones cambiantes de un lugar a otro.

Gracias a que la observación y experiencia en diseño de pavimentos flexibles no fue suficiente, se desarrollaron con el tiempo métodos empíricos mecanicistas que describían con mejor acierto el comportamiento de un pavimento frente a las cargas aplicadas.

En el año de 1993 AASHTO publicó una guía de diseño para pavimentos que utilizaba ecuaciones provenientes de métodos empíricos desarrollados en el AASHTO Road Test, donde se determinaron relaciones entre las distintas variables que intervienen en el diseño de pavimentos sea flexible o rígido.

La investigación patrocinada por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales (AASHO ahora AASHTO) fue concebida como un estudio del desempeño de las estructuras de pavimentos de conocido espesor frente a distintas cargas de tráfico. La información obtenida en la investigación fue crucial en el avance del conocimiento de las estructuras de pavimento, diseño, desempeño entre otros. Todos los resultados permitieron elaborar ecuaciones empíricas luego afinadas con métodos mecanicistas para el diseño y mantenimiento de los pavimentos en Estados Unidos.

I.3 Descripción de la Problemática

La red vial del Ecuador es un pilar básico para el fomento de la productividad y el desarrollo, gracias a esto se requiere que las carreteras tengan una serviciabilidad adecuada para el tránsito regular de los vehículos. Todo esto a partir del diseño propio del pavimento que se pondrá en obra y que requiere que las condiciones idealizadas por el ingeniero diseñador se representen de la manera más fiel en el campo. El método de diseño AASHTO 93 para pavimentos flexibles, es un método empírico muy utilizado para el diseño gracias a que permite la consideración de muchas de las variables que intervienen en la interacción del pavimento con la carga producida por tránsito vehicular.

La calidad de los materiales, características del tráfico, condiciones ambientales, tipos y niveles de deterioro de la capa asfáltica por regiones en el Ecuador (Sierra, Costa, Amazonía en estudio) son distintas, lo que ocasiona que un solo modelo de diseño para todas las regiones no sea suficiente para representar de la manera más real lo que sucederá con la estructura del pavimento, necesitándose a nuestro juicio un análisis complementario.

I.4 Justificación

Debido a que las condiciones a las que está sujeta la estructura de pavimento flexible presentan diferencias en cuanto a zonas o regiones en el Ecuador se refiere, se ha visto la oportunidad de buscar alternativas complementarias al diseño AASHTO 93 para pavimentos flexibles que permitan una mejor aproximación a las condiciones reales a las que está sujeta el pavimento en las 3 zonas más relevantes en el País (Sierra, Costa y Amazonía) y poder conseguir un diseño más fiable que pueda soportar la carga de tráfico que actúa sobre la estructura.

I.5 Enfoque Metodológico

El enfoque metodológico de la presente investigación es un enfoque cuantitativo y de tipo descriptivo.

La metodología a usar consiste en la realización de una aplicación de fácil uso y aprendizaje por medio de hoja de cálculo y programación en Visual Basic, la cual incorporará la caracterización del tráfico, caracterización de los materiales y el drenaje, condiciones para el diseño y ejecución del mismo, y por último un análisis aproximado de la estructura diseñada por medio de metodologías complementarias que describan las condiciones a las que está sujeto el pavimento en las distintas regiones del país. Luego se harán varias ejecuciones de la aplicación para comprobar su nivel de aproximación con los métodos elásticos comunes usados en muchos programas para pavimentos como el BISAR3 (Shell) que se tomara como referencia para el análisis; por último se ejecutarán los métodos complementarios ingresando para el análisis las condiciones climatológicas en las 3 regiones del país (Sierra, Costa y Amazonía) y se hallarán conclusiones para determinar espesores mínimos de capa asfáltica propuestos que se deberían adoptar en los diseños de vías en el país.

I.6 Alcance

El alcance del siguiente trabajo de investigación consiste en exponer las diferencias que se genera al analizar un diseño para las condiciones en las distintas regiones del país y de qué manera las metodologías complementarias permiten una mejor aproximación que se adapten a esas condiciones.

I.7 Objetivos

En el presente documento se pretende lograr los siguientes objetivos:

- Elaborar una aplicación que permita un rápido diseño y análisis aproximado de una estructura de pavimento flexible tomando en consideración todas las variables y ecuaciones propuestas por la metodología de diseño AASHTO 93.
- Complementar el diseño propuesto por AASHTO 93 con otras metodologías que permitan considerar las condiciones de temperatura a las que está sujeta la estructura de pavimento (flexible) en las distintas regiones del país y su incidencia en el tipo de daño por fatiga.
- Elaborar un análisis por regiones para conocer los efectos de fatiga generados a partir de los cambios de temperatura alrededor del año en las distintas regiones del país.

CAPÍTULO 1

PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

1.1 Introducción

La guía de diseño para estructuras de pavimento AASHTO 93 está provista de una serie de procedimientos que pueden ser usados para el diseño o rehabilitación de los pavimentos flexibles o rígidos. La guía fue desarrollada para proporcionar recomendaciones respecto a la determinación de la estructura de pavimento. Las recomendaciones incluyen la determinación de los espesores de la estructura de pavimento y cada uno de sus componentes.

Se debe recordar que la series de recomendaciones requeridas para asegurar un desempeño confiable de la estructura de pavimento, incluirá muchos factores adicionales a la determinación de los espesores de las capas de cada uno de los componentes; por ejemplo los requerimientos de materiales, construcción y control de calidad tendrá mucha incidencia en la capacidad de la estructura de pavimento para el desempeño de acuerdo a las expectativas idealizadas. En otras palabras el diseño de pavimentos involucra más que simplemente escoger espesores, sino también interviene la calidad del trabajo que se ejecuta.

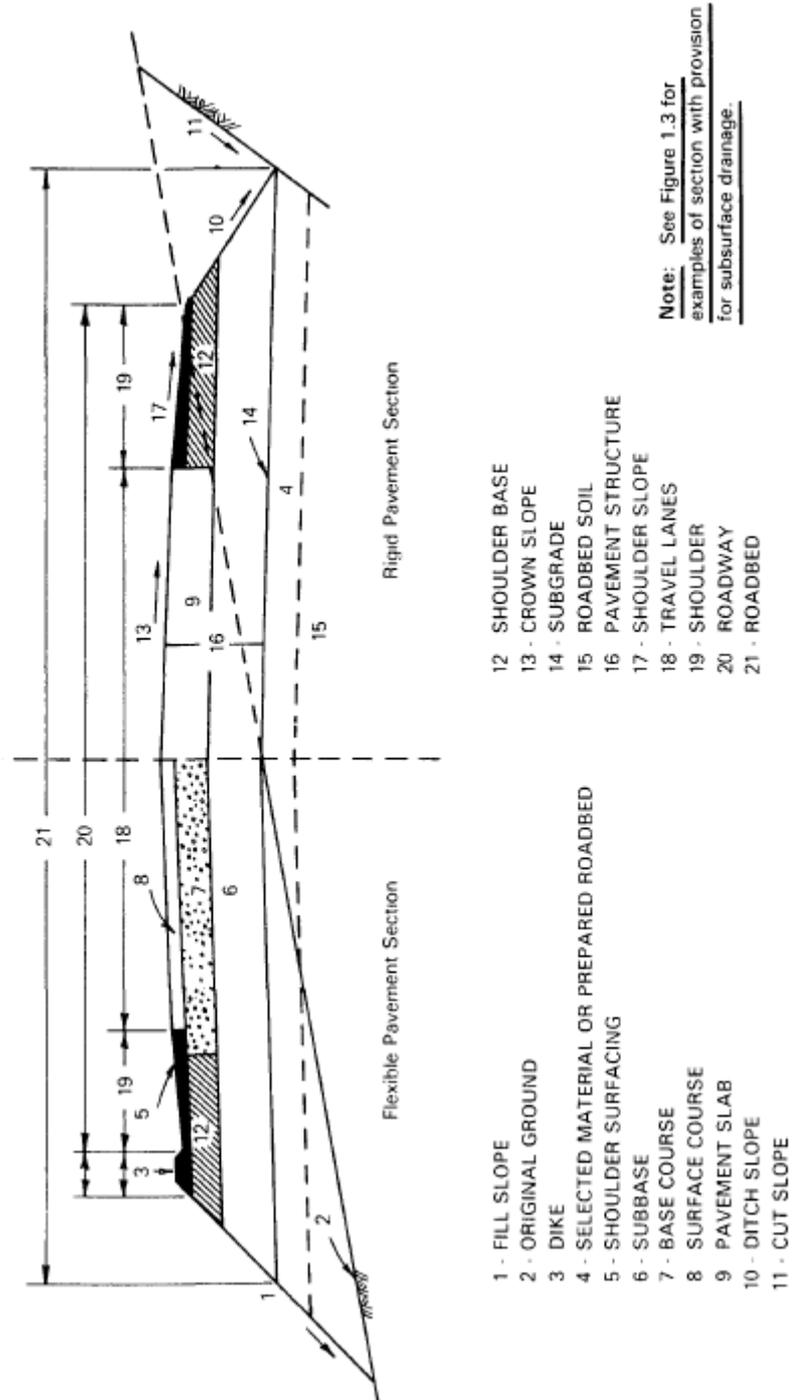


Fig 1.1 Típica sección para pavimentos flexibles y rígidos (AASHTO 93)

1.2 Guía de diseño AASHTO 93

Uno de los mayores objetivos del AASHO Road Test fue la de proveer información que pueda ser usada para desarrollar criterios y procedimientos de diseño para pavimentos. En 1961 el comité de diseño de AASHO desarrolló y puso en circulación la “Guía de diseño AASHO para pavimentos flexibles y rígidos”, la guía se basó en los resultados del AASHO Road Test complementado con procedimientos de diseño y teorías ya existentes.

Después de muchos años de uso de la guía, el comité de diseño de AASHTO publicó “Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos”. Las revisiones fueron hechas en 1981 y en 1983 el comité de diseño concluyó que había que agregar capítulos como el de rehabilitación a la guía y debía ser revisado por otras entidades gubernamentales.

1.3 AASHO Road Test.

El AASHO Road Test, una investigación de \$27 millones de dólares y el experimento en vías más largo de su tiempo, fue concebido y patrocinado por la Asociación Americana de Funcionarios de carreteras estatales (AASHO luego conocida como AASHTO) como un estudio del desempeño de estructuras de pavimentos en carreteras de conocido espesor y bajo magnitud de cargas conocidas.

La información obtenida del AASHO Road Test fue crucial para el avance en el conocimiento del diseño estructural del pavimento, desempeño del pavimento, equivalencias de carga, efectos de clima y mucho más. La información básica de desempeño dio como resultado ecuaciones y nomogramas usados para el diseño descritos en la guía de AASHTO. Las ecuaciones generadas de manera empírica luego fueron complementadas por métodos mecanicistas y permitieron la consideración de condiciones ambientales y variabilidad de subrasantes.

1.2 Consideraciones de diseño según AASHTO 93

El método de diseño propuesto en la guía incluye la consideración de los siguientes ítems para pavimentos flexibles:

- a) Desempeño del pavimento
- b) Tráfico
- c) Subrasante
- d) Materiales de construcción
- e) Ambiente
- f) Drenaje
- g) Confiabilidad
- h) Ciclo de vida, y costos

Cada uno de estos factores se han incorporado a la metodología de diseño de la estructura de pavimento. Sin embargo la guía de diseño AASHTO 93 no puede hacer absolutamente todas las consideraciones y reconoce que es necesario adaptarse a las condiciones para cada tipo de región.

CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DE TRÁFICO

2.1 Introducción

El factor más importante para el diseño de pavimentos es el tráfico. La consideración del tráfico debería incluir la magnitud de la carga, configuración y el número de repeticiones. El método de diseño AASHTO 93 requiere cierta información para la resolución y análisis de las ecuaciones propuestas como: la carga por eje, la configuración del mismo, así como el número de aplicaciones o paso de este eje sobre la superficie del pavimento.

Los pavimentos se diseñan en función del efecto del daño que produce el paso de un eje con una carga y para que resistan un determinado número de cargas aplicadas durante su vida útil. Un tránsito mixto está compuesto de vehículos de diferentes pesos, por lo que será procesado hasta llegar a un número de ejes equivalentes de 80kN o 18 kips, que se le denominará "Equivalent Simple Axial Load" o **ESAL** (ejes equivalentes).

La descripción de los diferentes parámetros implicados en el manejo del tráfico en AASHTO 93 se presenta a continuación, y fue tomada directamente para varios de estos parámetros del Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos, que en gran parte es una traducción de AASHTO 93.

2.2 Volúmenes de tránsito.

Para el diseño de estructuras de pavimento es necesario conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado. Para el efecto se realizan estudios de volúmenes de tránsito, los cuales pueden variar desde lo más amplios en un sistema de caminos, hasta el recuento en lugares específicos tales como: puentes, túneles o intersecciones de carreteras.

En todo estudio de volúmenes de tránsito es necesario obtener 2 datos básicos: el tránsito medio diario general y el tránsito medio diario de

camiones. Estos se pueden obtener al efectuar censos o aforos de tránsito en el lugar de la construcción. El tránsito cambia según el día de la semana, cambia según la semana de mes, cambia según la estación o época del año, cambia según los días de descanso, etc. Por lo que es necesario hasta donde sea posible, contar con estadísticas de períodos largos de evaluación del tránsito, para analizar el comportamiento de los diferentes volúmenes y tipos de vehículos, que nos permitan en mejor forma evaluar las cargas que se aplicaran a la estructura de pavimento (Manual Centroamericano para El Diseño de Pavimentos, 2002).

2.2.1 Tráfico promedio diario de camiones.

La mínima información requerida para un diseño de pavimento es el tráfico promedio diario de camiones al comienzo del período de diseño. Esta información puede ser obtenida de conteos actualizados en la vía existente en donde se vaya a realizar una rehabilitación o en las vías aledañas a la nueva vía a diseñar que presente características similares en los patrones de tráfico. Los conteos de tráfico deben ser ajustados por variaciones al día o por temporada.

2.3 LEF (Load Equivalent Factor).

El LEF representa la relación del número de repeticiones de cualquier carga por eje y configuración (simple, doble o triple) necesario para causar la misma reducción en el índice de serviciabilidad presente (PSI) tal cual una aplicación de un eje simple de 80 kN (18 kips). El LEF puede ser definido como:

$$LEF_{WC} = \frac{N_{18S}}{N_{WC}} \quad (2.1)$$

Dónde:

LEF_{WC} = el LEF de un eje de peso “w” y configuración “c”,

N_{18s} = el número de repeticiones de un eje simple de 80kN requerido para causar un reducción específica en el PSI

N_{wc} = el número de repeticiones de un eje de peso “w” y configuración “c” requerido para causar la reducción equivalente en PSI.

El LEF depende del tipo de pavimento, espesores o capacidad estructural y las condiciones finales en las cuales el pavimento se considera que ha fallado. Uno de los métodos más usados para hallar el LEF está basado en las ecuaciones empíricas desarrolladas por AASHO Road Test (AASHTO 1972).

Las siguientes ecuaciones de regresión basadas en los resultados de la evaluación de caminos (AASHO Road Test) pueden ser usadas para determinar el LEF:

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4.79 \log(18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (2.2a)$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5}\right) \quad (2.2b)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (2.2c)$$

En estas ecuaciones, W_{tx} es el número de aplicaciones de carga de x-ejes al final del tiempo t ; W_{t18} es el número de aplicaciones de carga de un eje simple de 80 kN al tiempo t ; L_x es la carga en kips de un eje simple, un set de ejes tándem o un set de ejes triples; L_2 es el código de eje (1 para eje simple, 2 para eje tándem y 3 para eje triple); SN es el número estructural, que está en función del espesor y el módulo de cada capa y condiciones de drenaje de la base y sub-base; P_t es la serviciabilidad final, que indica que las condiciones del pavimento ya no son las apropiadas; G_t es función de P_t y β_{18} es el valor de β_x cuando L_x es igual a 18 y L_2 es igual a uno (Manual Centroamericano para El Diseño de Pavimentos, 2002).

2.4 Serviciabilidad

El índice de serviciabilidad de un pavimento, es el valor que indica el grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal de un vehículo; en otras palabras, un pavimento en perfecto estado se le asigna un valor de serviciabilidad inicial que depende del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción, 5 es excelente condiciones, y un pavimento en franco deterioro o con un índice de serviciabilidad final que depende de la categoría del camino y se adopta en base a esto y al criterio del proyectista, con un valor de 0 (pésimas condiciones).

La diferencia entre estos valores se le conoce como la pérdida de serviciabilidad (Δ PSI) o sea el índice de serviciabilidad presente. Los valores recomendados para pavimentos flexibles son los siguientes (Manual Centroamericano para El Diseño de Pavimentos, 2002):

Índice de serviciabilidad inicial:

$P_o = 4.2$

Índice de serviciabilidad final:

$P_t = 2.5$ o más para caminos importantes.

$P_t = 2.0$ para caminos de tránsito menor.

2.5 Período de diseño.

El período de diseño hace referencia a la magnitud de tiempo que cualquier estrategia de diseño debe cubrir; es una analogía al término “vida del diseño”. En el pasado, los pavimentos generalmente se diseñaban y analizaban para un desempeño óptimo por 20 años. Ahora es recomendable una consideración de períodos de análisis más largos ya que estos pueden ser más adecuados para la evaluación de alternativas a largo plazo con referencia al costo de mantenimiento del pavimento. (Manual Centroamericano para El Diseño de Pavimentos, 2002). Las consideraciones

deben extender el período de análisis para incluir al menos una rehabilitación de la estructura. Para autopistas urbanas, períodos de análisis mayores serán considerados de acuerdo a la siguiente guía:

Condiciones de la carretera	Período de análisis (años)
Urbanas con alto volumen de tráfico	30-50
Rurales con alto volumen de tráfico	20-50
Pavimentadas con bajo volumen	15-25
Superficie de agregados con bajo volumen	10-20

Tabla 2.1 Consideraciones para período de diseño (AASHTO 93)

2.6 Factor de distribución por dirección

Es el factor total del flujo vehicular censado, en la mayoría de los casos este valor es de 0.5; ya que la mitad de los vehículos va en una dirección y la otra mitad en la otra dirección. Puede darse el caso de ser mayor en una dirección que en la otra, lo cual puede deducirse del conteo de tránsito efectuado. Lo más importante de esto, será la diferencia de peso entre los vehículos que van en una y otra dirección; como puede suceder por la cercanía de una fábrica, puerto, etc.

2.7 Factor de distribución por carril.

Se define por el carril de diseño aquel que recibe el mayor número de ESAL's. Para un camino de 2 carriles, cualquiera de las 2 puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza por ese carril. Para caminos de varios carriles, el de diseño será el externo, por el hecho de que los vehículos pesados van en ese carril.

Para un vía de varios de varios carriles se pueden obtener los porcentajes de la distribución por carril tomando siempre como referencia el carril más cargado. Existen gráficas para estos análisis propuestos por la PCA (Portland Cement Association) en donde se determina la proporción aproximada de los camiones por el carril de diseño, se observará que las gráficas poseen una distribución lineal.

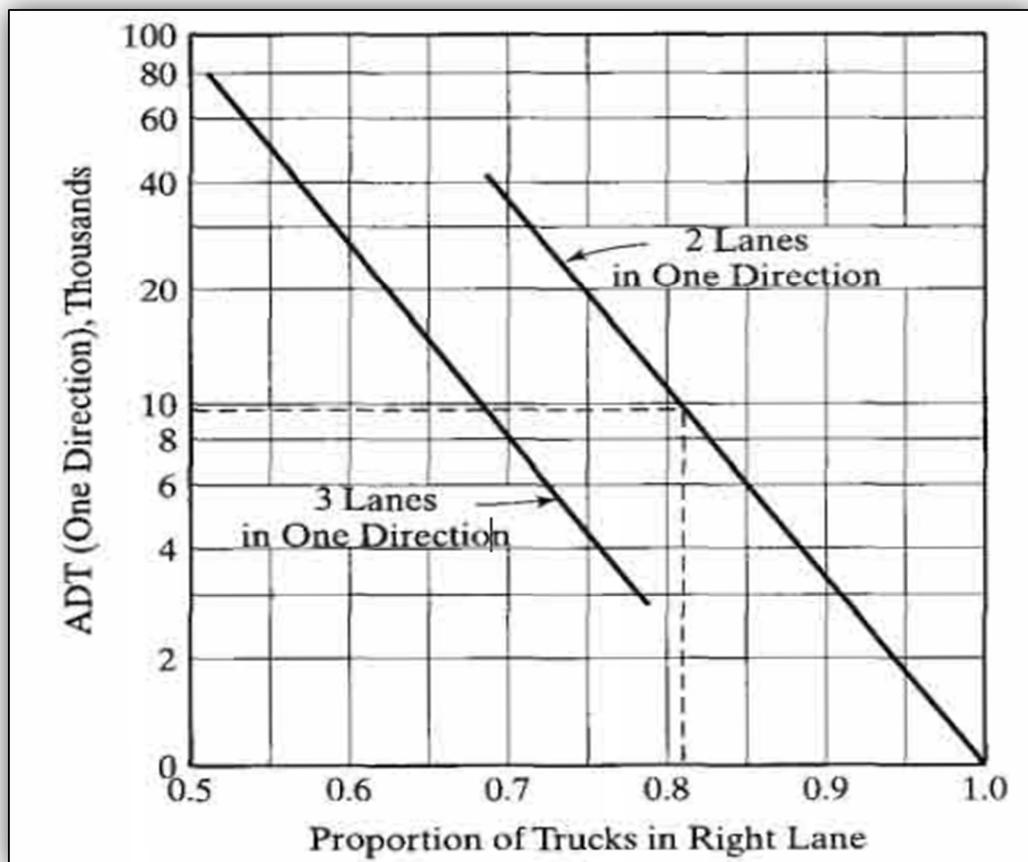


Figura 2.1 Proporción de camiones en el carril de diseño en vía de múltiples carriles

(PCA 1894)

2.8 Factor camión eje.

El factor camión valor representativo número de ejes simples equivalentes de 8.2 ton para cada uno de los vehículos pesados de la muestra analizada para todos los camiones. No obstante la incidencia o valoración de la carga involucrada no se realiza a través de este factor de carácter más general, sino determinando los factores de equivalencia de carga representativos por cada tipo de vehículos (Σ LEF).

Generalmente para calcular el factor camión se empieza considerando un SN=5 Y un Pt=2.5 y representa la suma de los factores de equivalencia de carga (LEF) de cada tipo de eje de un camión.

Por ejemplo:

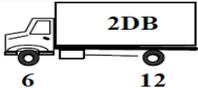
Tipo camión	1ER EJE		2DO EJE		3ER EJE		Σ LEF
	PESO (ton)	LEF	PESO (ton)	LEF	PESO (ton)	LEF	
 3 7	3	0.015	7	0.533			0.548
 6 12	6	0.281	12	4.328			4.611

Tabla 2.2 Ejemplo de cálculo para el factor camión

2.9 Factor de crecimiento.

Una manera simple de proyectar el tráfico a través del tiempo es asumiendo una tasa de crecimiento anual de tráfico y usando el tráfico promedio al inicio y al final del periodo de diseño como el tráfico de diseño. El Instituto del Asfalto (AI, 1981a) y la guía de diseño AASHTO (AASHTO, 1986) recomiendan el uso del tráfico a través de todo el período de diseño para determinar el factor de crecimiento total tal como se indica (Manual Centroamericano para El Diseño de Pavimentos, 2002):

$$\text{Factor de crecimiento total} \quad G = \frac{(1+r)^Y - 1}{r} \quad (2.3)$$

Dónde:

r = tasa de crecimiento anual.

Y = Período de diseño.

2.10 Cálculo de ejes equivalentes.

2.10.1 Consideraciones para el cálculo de ejes equivalentes.

Las diferentes cargas que actúan sobre un pavimento producen a su vez diferentes tensiones y deformaciones en el mismo; los diferentes espesores de pavimentos y diferentes materiales, responden en igual forma de diferente manera a igual carga. Como estas cargas producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, las fallas tendrán que ser distintas.

Para tomar en cuenta esta diferencia, el volumen de tránsito se transforma en un número equivalente de ejes de una determinada carga, que a su vez producirá el mismo daño que toda la composición de tránsito mixto de los vehículos. Esta carga uniformizada según AASHTO es de 8.2ton y la conversión se hace a través de los Factores equivalentes de carga **LEF** (Load Equivalent Factor).

El proceso de convertir un tránsito mixto en un número de **ESAL's** de 8.2ton fue desarrollado por el Road Test de AASHO. Para este ensayo se cargaron pavimentos similares con diferentes configuraciones de ejes y cargas, para analizar el daño que produjeron.

2.10.2 Procedimiento general para el cálculo de ejes equivalentes.

Para diseñar un carretero de pavimento, es necesario predecir el número de repeticiones de cada grupo de carga por eje durante el período de diseño. La información de tráfico inicial puede ser obtenida por mediciones en campo que consisten en contar el número de vehículos o

pesar ciertos vehículos como muestreo y poder obtener de esa manera los datos suficientes. El tráfico inicial diario se distribuye en 2 direcciones y el carril más crítico (más cargado) generalmente es el carril exterior; debido a esas variantes el tráfico de diseño debe ser corregido por los factores de distribución por carril y por dirección (Véase 2.6 y 2.7).

El tráfico usado para el diseño es el tráfico promedio durante el período de diseño, quiere decir que el tráfico inicial debe ser multiplicado por un factor de crecimiento. Además el tráfico debe ser referido a ejes equivalentes de esa manera que cada grupo de vehículos pesados o cada tipo de eje debe ser multiplicado por su factor de equivalencia de carga (LEF).

Si n_i es el número total de repeticiones o pasadas que serán usadas en el diseño por cada grupo de carga i , entonces:

$$n_i = (n_o)_i (G)(D)(L)(365)(Y)(LEF) \quad (2.4)$$

En donde $(n_o)_i$ es el número inicial de repeticiones por día para grupo de carga i , G es el factor de crecimiento de tráfico (Véase 2.9), D es el factor por distribución direccional que usualmente se asume como 0.5 (Véase 2.6), L es factor de distribución por carril que varía con el volumen de tráfico y el número de carriles (Véase 2.7), y Y es el período de diseño en años.

Si se tiene el tráfico promedio diario anual para el análisis se procede de la siguiente manera:

$$n_i = (G)(D)(L)(365)(Y)(FC)(TPDA)(T) \quad (2.5)$$

En donde $TPDA$ es el tráfico promedio diario anual, T es el porcentaje de vehículos pesados del total del $TPDA$ y FC es el factor camión.

2.11 Métodos utilizados para el análisis de tráfico.

2.11.1 Tráfico método 1.

El método 1 utilizado para el análisis del tráfico consiste en un conteo de campo en donde se registran los tipos de vehículos y número de pasadas en un intervalo de tiempo determinado. Los tipos de vehículos así como su peso están normados por el MOP (Ministerio de Obras Públicas ahora llamado Ministerio de Transporte y Obras Públicas), la tabla presenta una clasificación de vehículos pesados donde se complementa con una descripción de los mismos, pesos máximos permitidos y longitudes máximas permitidas. Toda esta información es útil para predecir el número de pasadas para el diseño o en otras palabras; el número total de ESAL's al final del período de diseño.


MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR
 DIRECCION TÉCNICA DE AREA CONSERVACION RED VIAL ESTATAL
 IMPORTACIONES
 

CUADRO DEMOSTRATIVO DE PESO BRUTO VEHICULAR Y LONGITUDES MAXIMAS PERMISIBLES PARA LA IMPORTACION DE VEHICULOS

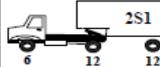
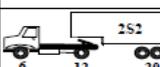
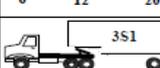
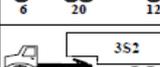
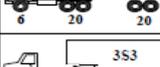
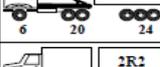
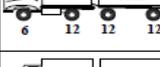
TIPO	GRAFICO Y CAPACIDADES DE CARGA POR EJE (Ton.)	DESCRIPCION	PESOS MAXIMOS PERMITIDOS (Toneladas)		LONGITUDES MAXIMAS PERMITIDAS (METROS)		
			Peso: Ecuador	Peso: Pacto Andino	Largo	Ancho	Alto
2DA		CAMION DE 2 EJES MEDIANOS	10.0	-	7.5	2.6	3.5
2DB		CAMION DE 2 EJES GRANDES	18.0	17.0	12.0	2.6	4.1
3-A		CAMION DE 3 EJES (TANDEM POSTERIOR)	26.0	26.0	12.2	2.6	4.1
4-C		CAMION DE 4 EJES (TRIDEM POSTERIOR)	30.0	30.0	12.2	2.6	4.1
2S1		TRACTO CAMION DE 2 EJES Y SEMIREMOLQUE DE 1 EJE	30.0	28.0	18.5	2.6	4.1
2S2		TRACTO CAMION DE 2 EJES Y SEMIREMOLQUE DE 2 EJES	38.0	37.0	18.5	2.6	4.1
3S1		TRACTO CAMION DE 3 EJES Y SEMIREMOLQUE DE 1 EJE	38.0	37.0	18.5	2.6	4.1
3S2		TRACTO CAMION DE 3 EJES Y SEMIREMOLQUE DE 2 EJES	46.0	46.0	18.5	2.6	4.1
3S3		TRACTO CAMION DE 3 EJES Y SEMIREMOLQUE DE 3 EJES	48.0	48.0	18.5	2.6	4.1
2R2		CAMION REMOLCADOR DE 2 EJES Y REMOLQUE DE 2 EJES	38.0	39.0	18.5	2.6	4.1
2R3		CAMION REMOLCADOR DE 2 EJES Y REMOLQUE DE 3 EJES	48.0	48.0	18.5	2.6	4.1

Tabla 2.3 Vehículos pesados tipo en el Ecuador y sus características (MOP)

Con la tabla proporcionada por el MOP se realiza un conteo y se diferencia entre tipos de vehículos pesados debido a que cada uno tiene un factor de equivalencia de carga (LEF) (Véase 2.8) correspondiente y se ejecutan los cálculos de ESAL con los demás factores que intervienen como: factor de crecimiento, factor de distribución por dirección y por carril, etc. (Véase 2.10.2)

PERIODO DE DISEÑO (años) :		20				
NUMERO DE CARRILES EN 1 DIRECCIÓN		2				
% VEH. PESADOS CARRIL DISEÑO :		92				
% DISTRIBUCION DIRECCIONAL :		50				
TIPO DE VEHICULO	TRAFICO DIARIO INICIAL	TASA ANUAL CRECIM.	FACTOR DE CRECIM.	TRAFICO DE DISEÑO	FACTOR EQUIV. DE CARGA	NO. DE EJES EQUIV. DE 8.2 TON
2DA	134	3.00	26.87	604095	0.5485	331332
2DB	50	3.00	26.87	225408	4.6108	1039321
3A	150	3.00	26.87	676225	3.2832	2220162
4C	45	3.00	26.87	202868	1.7976	364677
2S1	100	3.00	26.87	450817	8.9398	4030214
2S2	25	3.00	26.87	112704	7.6121	857920
3S1	14	3.00	26.87	63114	3.2832	207215
3S2	16	3.00	26.87	72131	6.2845	453303
3S3	18	3.00	26.87	81147	4.5382	368265
TOTAL	552					
TOTAL DE EJES EQUIV. DE 8.2 TON:				2,488,509		9,872,409

Tabla 2.4 Ejemplo de aplicación del Método 1 para análisis de tráfico.

La primera columna indica el tipo de vehículo pesado tomado en consideración, el código mostrado hace referencia a la tabla propuesta por el MOP; la segunda columna indica el número de pasadas de cada uno de los vehículos pesados referenciados, valor obtenido de un estudio de conteo de tráfico en campo; la tercera columna indica la tasa anual de crecimiento considerada; la cuarta columna indica el cálculo del factor de crecimiento del

tráfico hacia el final período de diseño; la quinta columna muestra el valor del tráfico predicho al final del periodo de diseño por medio de la multiplicación con los distintos factores; la sexta columna presenta el cálculo de los factores de equivalencia de cada tipo de vehículo para transformar el peso del camión en eje simple estándar (8.2 ton), por último en la séptima columna se encuentran calculados los ESAL's correspondiente a cada pesado. La sumatoria de todos los ESAL da como resultado el tráfico de diseño (valor marcado en rojo) e indica el total de pasadas de ejes equivalentes de 8.2 ton (ESAL) al final del período de diseño que deberá resistir la estructura del pavimento.

2.11.2 Tráfico método 2.

El método 2 utilizado en el análisis de tráfico consiste en el cálculo del tráfico de diseño por medio de un espectro de carga en donde se clasifican los ejes de cada vehículo pesado por tipo y peso. Para ejecutar este tipo de análisis no es suficiente un conteo de tráfico, también hará falta pesar un cierto número de ejes (muestra representativa) de cada tipo para un procesamiento estadístico fiable para ubicarlos en el cuadro respectivo de acuerdo a su clasificación.



Figura 2.2 Balanza tipo para el peso de eje/vehículo

EJES SIMPLES			
GRUPO DE CARGA POR EJE	No. de ejes por 1000 veh.	LEF	EAL
UNI: Toneladas			
< 1.50	208	0.001	0.2121
1.50 - 3.00	300	0.005	1.4434
3.00 - 3.50	140	0.021	3.0048
3.50 - 5.50	190	0.084	15.9683
5.50 - 7.00	154	0.334	51.4476
7.00 - 8.00	75	0.706	52.9244
8.00 - 9.00	33	1.163	38.3754
9.00 - 10.00	5	1.793	8.9649
10.00 - 10.50	2	2.397	4.7931
10.50 - 12.00	1	3.402	3.4024
12.00 - 13.00	1	5.039	5.0395
13.00 - 14.00	1	6.714	6.7137
14.00 - 15.00	1	8.778	8.7785
15.00 - 16.00	1	11.307	11.3075
16.00 - 17.00	1	14.386	14.3859
17.00 - 18.00	1	18.111	18.1108
			244.8721

Tabla 2.5a Espectro de carga para ejes simples aplicación del método 2.

EJES TANDEM			
GRUPO DE CARGA POR EJE	No. de ejes por 1000 veh.	LEF	EAL
UNI: Toneladas			
< 2.50	0	0.0007	0.0000
2.50 - 5.00	5	0.0032	0.0162
5.00 - 8.00	12	0.0295	0.3543
8.00 - 10.00	23	0.1156	2.6589
10.00 - 13.00	0	0.3245	0.0000
13.00 - 14.50	0	0.6811	0.0000
14.50 - 15.00	33	0.9068	29.9256
15.00 - 16.00	45	1.1077	49.8475
16.00 - 17.00	22	1.4216	31.2750
17.00 - 18.00	34	1.7925	60.9440
18.00 - 18.50	34	2.111	71.7725
18.50 - 19.50	12	2.4663	29.5959
19.50 - 20.00	13	2.8608	37.1898
20.00 - 25.00	14	4.6801	65.5216
25.00 - 27.00	4	8.022	32.0881
27.00 - 30.00	4	11.309	45.2380
			456.4274

Tabla 2.5b Espectro de carga para ejes tándem aplicación del método 2

EJES TRIPLES			
GRUPO DE CARGA POR EJE	No. de ejes por 1000 veh.	LEF	EAL
UNI: Toneladas			
< 3.00	0	0.0004	0.0000
3.00 - 7.00	0	0.0004	0.0000
7.00 - 12.00	0	0.0091	0.0000
12.00 - 15.00	0	0.0837	0.0000
15.00 - 17.00	0	0.2147	0.0000
17.00 - 21.00	0	0.3566	0.0000
21.00 - 23.00	14	0.8661	12.1250
23.00 - 25.00	55	1.2501	68.7557
25.00 - 27.00	23	1.7407	40.0358
27.00 - 30.00	31	2.3219	71.9796
30.00 - 33.00	11	3.4792	38.2707
33.00 - 35.00	12	5.0533	60.6395
35.00 - 37.00	14	6.3012	88.2172
37.00 - 40.00	0	7.667	0.0000
40.00 - 42.00	0	10.391	0.0000
42.00 - 45.00	0	12.364	0.0000
			380.0234

Tabla 2.5c Espectro de carga para ejes triples aplicación del método 2

Las tablas anteriores presentan el espectro de carga para cada tipo de eje (simple, tándem, triple) en donde por medio de intervalos se detallan la carga que presentará cada uno; para cada intervalo se colocará el número de ejes pesados en campo.

El factor de equivalencia (LEF) se calculará tomando el promedio de entre cada intervalo de la misma manera como se vio anteriormente (Véase 2.3). Para el cálculo de EAL (Equivalent Axle Load) se multiplica simplemente el número de vehículos por el factor de equivalencia (LEF) y se suman todos los ejes equivalentes pertenecientes al mismo tipo de eje.

Finalmente se suman los resultados parciales de EAL de cada tipo de eje y se divide para 1000 debido a que el conteo es por cada 1000 ejes como se puede observar en las tablas 2.5, el resultado obtenido de esas

operaciones dará como resultado el factor camión representativo de todos los vehículos que sirve para el cálculo del tráfico de diseño o número de ESAL's para el período de diseño.

ΣEAL=		1081.323				
FACTOR CAMION EJE=		1.08				
DATOS						
PERIODO DE DISEÑO (años) :		20				
NUMERO DE CARRILES EN 1 DIRECCIÓN		2				
% VEH. PESADOS CARRIL DISEÑO :		91				
% DISTRIBUCION DIRECCIONAL :		50				
TIPO DE EJE	TRAFICO DIARIO INICIAL DE VEH. PESADOS	TASA ANUAL DE CREC.	FACTOR DE CREC.	TRAFICO DE DISEÑO	FACTOR DE EQUIV	No. DE EJES EQUIVALENTES
Todos	2,000	3	26.87	8,941,386.06	1.08	9,668,525

Tabla 2.6 Ejemplo de análisis de tráfico por método 2

Como se puede observar el cálculo del tráfico de diseño es muy similar método 1 con la utilización de los factores de distribución direccional y por carril para obtener el número ESAL al final del período de diseño.

La diferencia entre métodos propuestos para el análisis de tráfico (método 1 y método 2) reside en el tipo de toma de datos que se realiza, mientras en el método 1 solo se realiza un conteo, en el método 2 se deben pesar los ejes de una muestra representativa de vehículo pesados. Aunque ciertamente el método 2 tenga una ejecución más compleja, da una mejor idea del tráfico de diseño gracias al que el análisis es ejecutado por intervalos de carga y por tipo de eje.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.1 Introducción

Los pavimentos flexibles generalmente consisten en una subrasante que se encuentra debajo de las demás capas y a la vez sirve de apoyo para las para las mismas que son comúnmente sub-base, base y carpeta asfáltica. En ciertos casos la sub-base o la base son estabilizadas para maximizar el uso y resistencia del material.

El pavimento con mezcla asfáltica en caliente (Hot Mix Asphalt, HMA) es conocido en otros países con muchos otros nombres como: concreto asfáltico, mezcla bituminosa, concreto bituminoso y otros. Con la implementación del Superpave alrededor del mundo, se ha tratado de estandarizar la metodología y usar mezcla asfáltica en caliente para pavimentos flexibles comunes.

La mezcla asfáltica es una combinación de 2 ingredientes primarios: los agregados y el ligante o aglomerante asfáltico. Los agregados representan el 90% al 95% del peso total de la mezcla y el ligante asfáltico representa aproximadamente el 8%. Esta estructura descrita anteriormente junto con las demás capas de material (base y sub-base generalmente) conforman la estructura de una vía que estará sujeta a cargas de tráfico sobre todo y deberá resistir las mismas durante un período de diseño provisto. (Manual Centroamericano para El Diseño de Pavimentos, 2002).

La característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la estructura debajo de la carpeta asfáltica (base, sub-base y subrasante) se conoce como módulo de resiliencia (Mr). Generalmente para la conocer los módulos de resiliencia de los materiales que intervienen en el diseño de un pavimento flexible se usa el ensayo CBR, por medio de este parámetro y ecuaciones de ajuste se puede obtener fácilmente el Mr. de los materiales.

La descripción de los diferentes aspectos relacionados con los materiales dentro de la normativa AASHTO 93 se presenta a continuación, y fue tomada directamente en varios casos del Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos, que en gran parte es una traducción de AASHTO 93.

3.2 Valor del soporte California (CBR, AASHTO T-193).

En este ensayo se mide la resistencia que opone un suelo a la penetración de un pitón de 3 plg² de área en una muestra de suelo de 6 plg de diámetro y 5 plg de altura, a una velocidad de 1.27 mm/min. La fuerza necesaria para que el pistón penetre dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración; estas fuerzas medidas, se comparan con las que se necesitan para producir iguales penetraciones en una muestra que sirve de patrón, la cual es piedra partida bien graduada; la definición de CBR es:

$$\text{CBR} = \frac{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5mm en un suelo}}{\text{Fuerza necesario para producir una penetración de 2.5mm en la muestra patrón}}$$

Relación que da como resultado un valor que se indica en porcentaje, el cual puede ser muy variable dependiendo de los suelos analizados; hasta un 70% o más en materiales granulares de buena calidad. Todos los suelos finos como gruesos o sus mezclas, se compactan a diferentes contenidos de humedad tanto arriba como bajo de su humedad óptima. Las muestra elaboradas bajo estos procedimientos, se sumergen en agua durante un período mínimo de 96 horas, antes de proceder a su ensayo, con el objeto de simular las condiciones de saturación a las cuales van a estar sometidos los suelos como las subrasante de una carretera. En el ensayo y en inmersión, se colocan pesos sobre las muestras, con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares, como de la estructura de pavimento, a las cuales van a estar sometidos los suelos de subrasante por ejemplo.

El método del CBR para diseño de pavimentos, fue uno de los primeros en utilizarse y se basa principalmente en que a menor valor de

CBR del material es necesario colocar mayores espesores en la estructura de pavimento para protegerlo de la frecuencia de las cargas de tránsito (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002).

3.3 Subrasantes.

La subrasante es la capa de suelo en la que se apoya la estructura del pavimento, esta compactado y preparado para soportar dicha estructura.

Inicialmente cuando se comenzaron a efectuar los primeros diseños de pavimento, este concepto estaba basado en propiedades de la subrasante tales como: (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002).

- Granulometría
- Plasticidad
- Clasificación de suelos
- Resistencia al corte
- Susceptibilidad a las variaciones de temperatura
- Drenaje

Posteriormente se tomaron en cuenta las propiedades básicas de la subrasante y se analizaron otros tipos de ensayos que permitieran conocer en forma el comportamiento de estos suelos. Se efectuaron ensayos utilizando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación como el CBR, ensayos de compresión simple. Estos ensayos se cambiaron por ensayos dinámicos y de repetición de cargas como el módulo de resiliencia, que son pruebas que demuestran en mejor forma el comportamiento y lo que sucede debajo de los pavimentos en lo que respecta a tensiones y deformaciones.

La correlación que me permite conocer el valor del módulo de resiliencia en una subrasante en función del CBR, según AASHTO 93 es la siguiente:

$$Mr = 1500(CBR) \quad (3.1)$$

La expresión propuesta por Heukelom y Klomp (1962) muestra la relación CBR/Mr en donde Mr es el módulo de resiliencia en psi . El coeficiente de 1500 puede variar de 750 a 3000 dependiendo del tipo de suelo. Esta correlación se muestra más razonable para suelos finos como arena fina más que para suelos granulares.

3.3.1 Materiales.

La subrasante que servirá como base para la estructura de pavimento tiene que estar libre de vegetación y materia orgánica, de lo contrario, el material deberá reemplazarse por material adecuado para subrasante en el tramo correspondiente o considerar la estabilización de los suelos subyacentes. En general los materiales apropiados para la capa de subrasante, son los suelos de preferencia granulares con porcentajes de hinchamiento según ensayos AASHTO T-93 y que no tengan características inferiores a los suelos que se encuentran en el tramo. Según AASHTO M-145, los suelos clasificados A-8, son materiales inadecuados para la capa de subrasante, ya que son suelos orgánicos constituidos por materiales vegetales o fangosos. Estos suelos generalmente tienen textura fibrosa y son altamente compresibles, con muy baja resistencia.

Cuando en subrasantes aparezcan con este tipo de material, deberá reemplazarse por otro que llene los requisitos para subrasante, haciendo previamente remoción del material inapropiado. (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002).

3.4 Sub-base.

La capa de sub-base es la porción de la estructura del pavimento flexible entre la subrasante y la capa base. Consiste usualmente una capa de material granular compactado. Se distingue de la capa base por sus especificaciones menos estrictas en cuanto a la resistencia, plasticidad y gradación de sus materiales, sin embargo debe ser de mejor calidad que el material de subrasante por razones de economía. Está destinada

fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura del pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la sub-base. La sub-base debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una subrasante o sub-base adecuada (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002).

3.4.1 Materiales.

El material de sub-base deberá ser seleccionado y tener mayor valor de soporte (CBR) que el material de subrasante y su espesor será variable por tramos, dependiendo de las condiciones y características de los existentes en la subrasante. Los materiales de sub-base deben ser suelos del tipo granular gracias a que son suelos con buena capacidad portante.

3.4.2 Determinación del módulo elástico.

Para la determinación del módulo elástico de la capa sub-base se usarán los datos obtenidos por medio de nomogramas presentados en la guía de diseño AASHTO 93. Estos nomogramas relacionan el coeficiente estructural de capa, CBR, Valor R, Texas Triaxial y el módulo elástico como lo muestra la Fig.

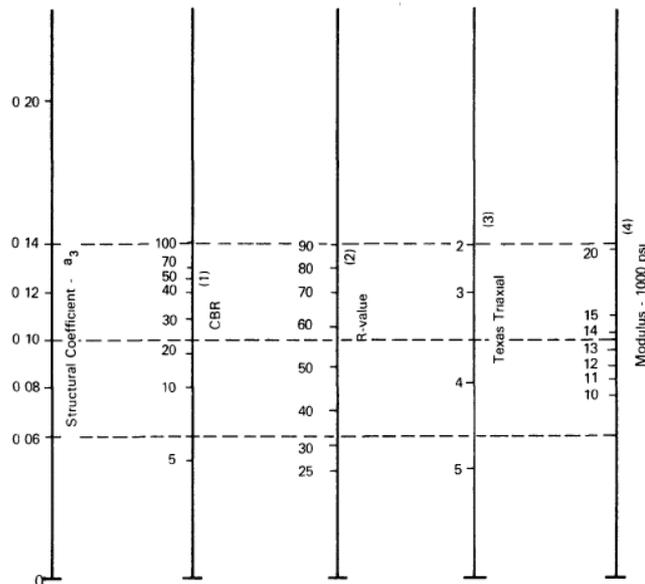


Figura 3.1 Nomograma que presenta relaciones entre parámetros de resistencia de la capa sub-base AASHTO 93

Siendo el CBR la prueba más común de resistencia para suelos no aglomerados en el país, se decidió correlacionar a partir del nomograma el CBR y el módulo elástico, en este caso para la capa de sub-base y se obtiene la siguiente gráfica:

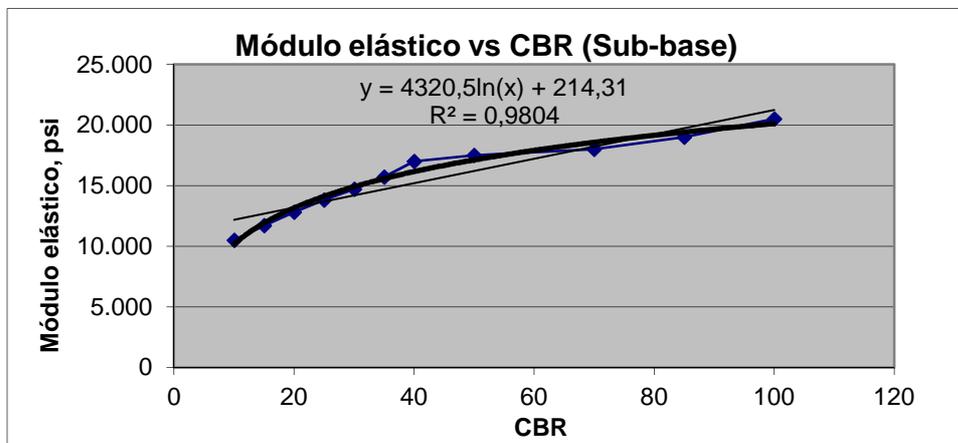


Figura 3.2 Relación entre módulo elástico y CBR en la capa sub-base (AASHTO 93).

Una vez trazada la curva y por medio de líneas de tendencia se puede obtener la ecuación de aproximación que defina dicha curva. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$Esb = 4320.5 \ln(CBR) + 214.31 \quad (3.1)$$

En donde se puede calcular el módulo elástico de sub-base (psi) en función del valor del CBR del material.

3.4.3 Coeficiente estructural de capa *ai*.

Para el diseño estándar de los espesores del pavimento flexible se requiere conocer el coeficiente estructural asignado a cada capa de material que interviene en la estructura del pavimento con el fin de convertir el actual espesor de capa en un número estructural (SN). Este coeficiente de capa expresa la relación empírica entre el SN y el espesor, y es una medida relativa de la capacidad del material para funcionar como un componente estructural del pavimento.

La siguiente relación presentada en el manual de diseño AASHTO 93 define el coeficiente estructural de capa sub-base en función de su módulo elástico como se presenta a continuación:

$$a_3 = 0.227 \ln(E_{SB}) - 0.839 \quad (3.2)$$

3.5 Base.

La capa base es la porción de la estructura de pavimento inmediata que se encuentra debajo de la carpeta asfáltica. Es construida sobre la capa de sub-base o de no haber sub-base sobre la subrasante. Su mayor función en el pavimento es la de dar soporte estructural. Transmite y distribuye las cargas generadas por el tránsito, a la sub-base y a través de esta finalmente a la subrasante. El uso de la capa base puede tener variantes como la estabilización con cemento portland o con emulsión asfáltica; ambas

comunes y especificadas en la guía de diseño AASHTO 93. ((Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002).

3.5.1 Base granular.

Material constituido por piedra de buena calidad, triturada y mezclada con material de relleno o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural. Todos estos materiales deben ser clasificados para formar una base integrante de la estructura de pavimento. Su estabilidad dependerá de la graduación de las partículas, su forma, densidad relativa, fricción interna y cohesión, y todas estas propiedades dependerán de proporción de finos con respecto al agregado grueso.

3.5.1.1 Determinación del módulo elástico.

Para la determinación del módulo elástico de la capa base granular se usarán los datos obtenidos por medio de nomogramas presentados en la guía de diseño AASHTO 93. Estos nomogramas relacionan el coeficiente estructural de capa, CBR, Valor R, Texas Triaxial y el módulo elástico como lo muestra la Fig.

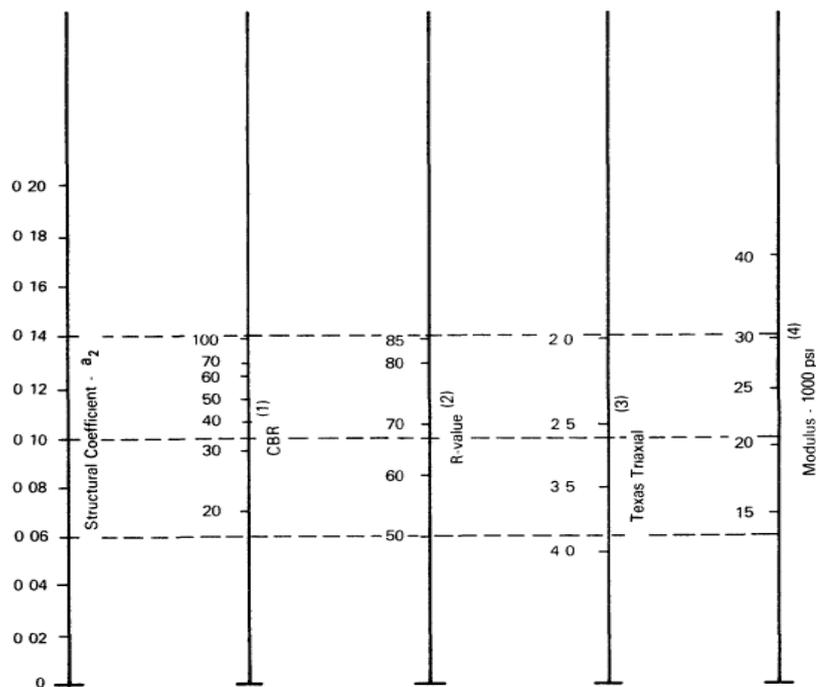


Figura 3.3 Nomograma que presenta relaciones entre parámetros de resistencia de la capa base granular AASHTO 93.

Con los datos obtenidos por medio de la relación en el nomograma entre el CBR (prueba más común) y el módulo elástico se obtiene la siguiente gráfica:

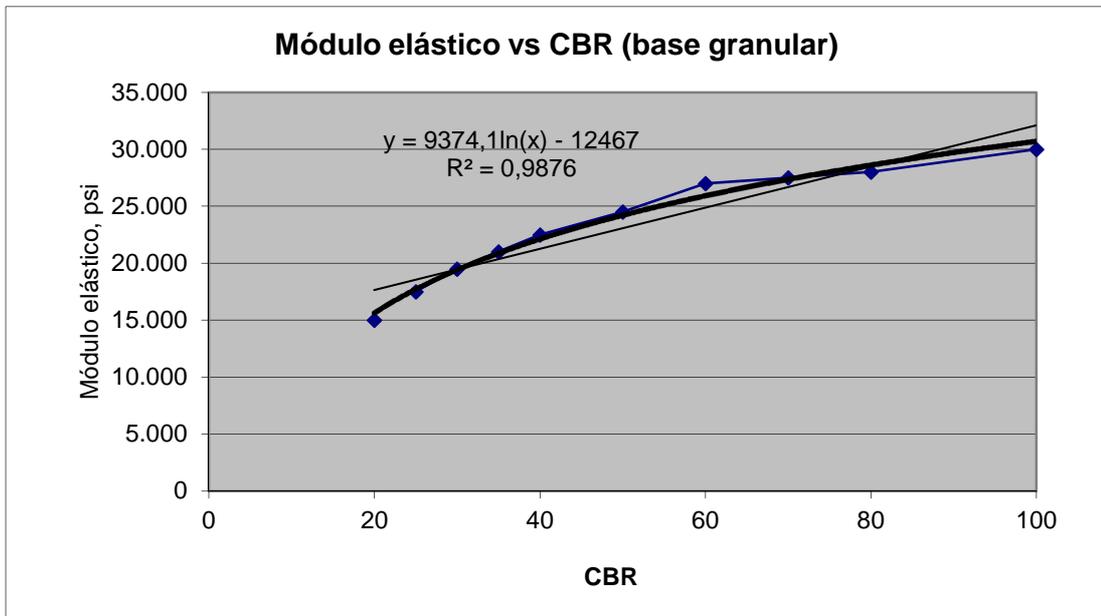


Figura 3.4 Relación entre módulo elástico y CBR en la capa base granular AASHTO 93

Una vez trazada la curva y por medio de líneas de tendencia se puede obtener la ecuación de aproximación que defina dicha curva. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$E_{bg} = 9374.1 \ln(CBR) + 12467 \quad (3.3)$$

En donde se puede calcular el módulo elástico de base granular (psi) en función del valor del CBR del material.

3.5.1.2 Coeficiente estructural de capa *ai*.

Para el diseño estándar de los espesores del pavimento flexible se requiere conocer el coeficiente estructural asignado a cada capa de material que interviene en la estructura del pavimento con el fin de convertir el actual espesor de capa en un número estructural (SN).

La siguiente relación presentada en el manual de diseño AASHTO 93 define el coeficiente estructural de capa sub-base en función de su módulo elástico como se presenta a continuación:

$$a_2 = 0.249 \ln(E_{bg}) - 0.977 \quad (3.4)$$

3.5.2 Base estabilizada con cemento portland.

Es la capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con material de relleno, mezclados con materiales o productos estabilizadores, en este caso el cemento portland, preparada y construida aplicando técnicas de estabilización, para mejorar sus condiciones de estabilidad y resistencia, para constituir una base integrante del pavimento destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a la capa sub-base.

La utilización de cemento Portland para la estabilización de materiales de base, se considera cuando es necesario cambiar algunas características físicas y mejorar sus condiciones mecánicas. Es conveniente que al utilizar cemento para estabilizar suelos, se realicen pruebas en el laboratorio, que permitan determinar el contenido máximo que se puede utilizar, sin que se produzcan agrietamientos en las muestras. (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.)

Es necesario tomar en cuenta, que no es lo mismo estabilizar que rigidizar, ya que los materiales obtienen del producto estabilizador algunas condiciones de beneficio como son la impermeabilidad, disminución de los límites de consistencia y aumento del CBR.

Ya que para la base estabilizada con cemento el parámetro más común que la define es la resistencia a la compresión simple y se puede correlacionar por medio del nomograma con el coeficiente estructural de capa.



Figura 3.5 Estabilización de capa base con cemento Portland cortesía de www.osusa.com

3.5.2.1 Determinación del módulo elástico.

Para la determinación del módulo elástico de la capa base estabilizada con cemento Portland se usarán los datos obtenidos por medio de nomogramas presentados en la guía de diseño AASHTO 93. Estos nomogramas relacionan coeficiente estructural de capa, resistencia a la compresión sin confinar y el módulo elástico.

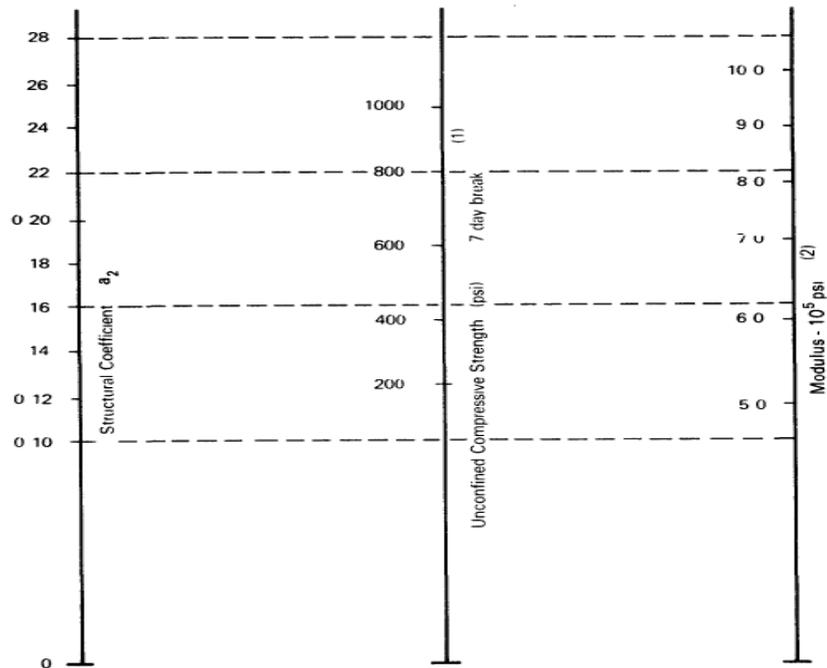


Figura 3.6 Nomograma que presenta relaciones entre parámetros de resistencia de la capa base estabilizada con cemento Portland AASHTO 93.

Una vez trazada la curva con los datos y por medio de líneas de tendencia se puede obtener la ecuación de aproximación que defina dicha curva. La ecuación obtenida es la siguiente:

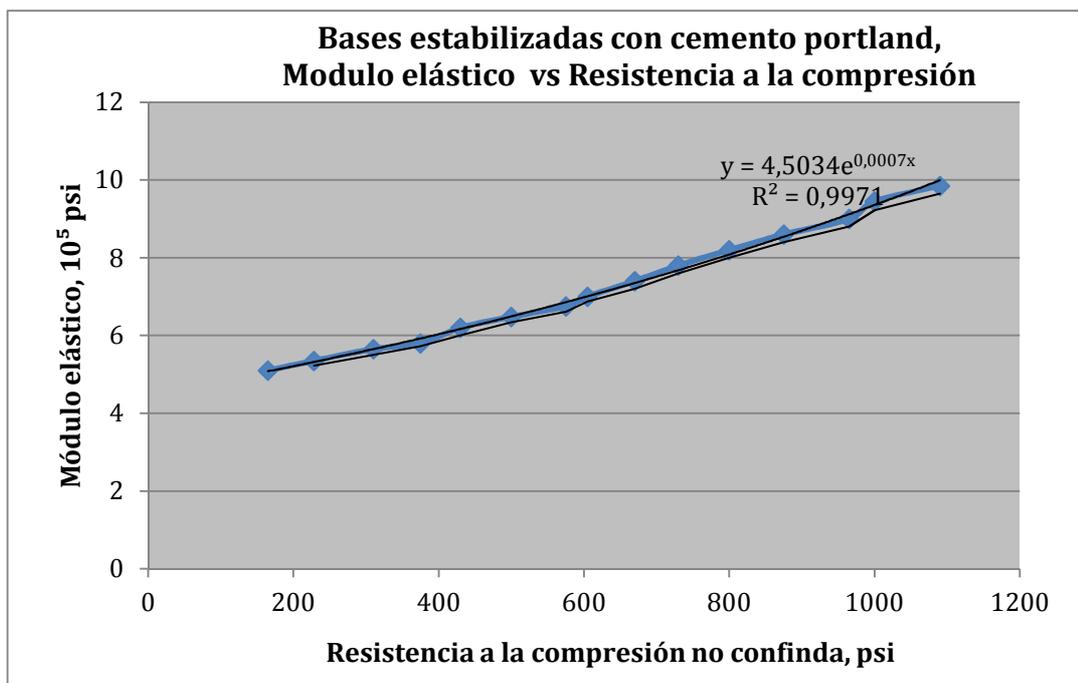


Figura 3.7 Relación entre módulo elástico y resistencia a la compresión simple en bases estabilizadas con cemento portland, AASHTO 93

$$E_{bcp} = (4.5034 * e^{0.0007\sigma}) * 10^5 \quad (3.5)$$

En donde se puede calcular el módulo elástico de la base estabilizada con cemento (psi) en función del valor σ (resistencia a la compresión no confinada) del material (psi).

3.5.2.2 Coeficiente estructural de capa a_i .

Para el diseño estándar de los espesores del pavimento flexible se requiere conocer el coeficiente estructural asignado a cada capa de material que interviene en la estructura del pavimento con el fin de convertir el actual espesor de capa en un número estructural (SN).

La siguiente relación se la puede encontrar a partir del trazado de curva de tendencia con referencia a la figura 3.6 en donde se relaciona el coeficiente estructural de capa (a_2') con el módulo elástico de la base estabilizada con cemento Portland. Al calcular la ecuación de ajuste de dicha curva se obtiene lo siguiente:

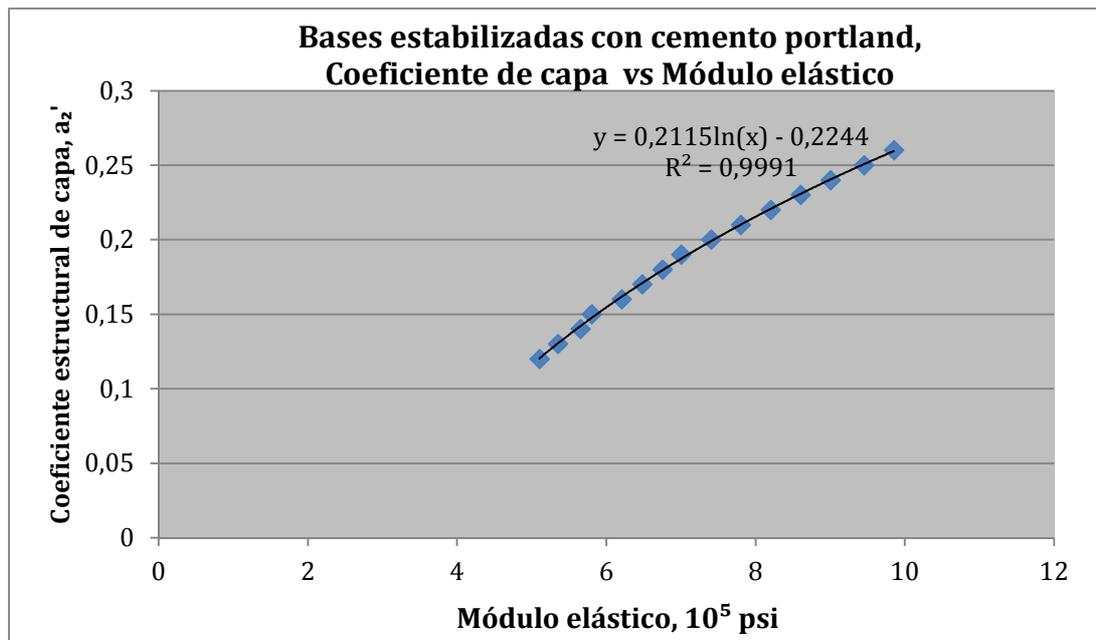


Figura 3.8 Relación entre módulo elástico y el coeficiente de capa en bases estabilizadas con cemento portland, AASHTO 93.

$$a_2' = 0.2115 \ln(E_{bcp}) - 0.2244 \quad (3.6)$$

Donde E_{bcp} es el módulo elástico de la base estabilizada con cemento en 10000 psi

3.5.3 Base estabilizada con emulsión asfáltica o bituminosa.

Es la capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con material de relleno, mezclados con materiales o productos estabilizadores, en este caso la emulsión asfáltica, preparada y construida aplicando técnicas de estabilización, para mejorar sus condiciones de estabilidad y resistencia, para constituir una base integrante del pavimento destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a la capa sub-base.

El asfalto es el último producto resultante de la destilación del petróleo. La combinación de suelos con asfalto mejora las condiciones de estabilidad y resistencia a la humedad, proporcionando mejor distribución de las cargas ocasionadas por el tránsito a las capas subyacentes de la estructura del pavimento.

El material bituminoso debe ser cemento asfáltico de alta penetración, asfaltos rebajados, emulsiones asfálticas y alquitranes. La cantidad de emulsión asfáltica puede variar entre 4% y 8% respecto al peso del material a estabilizar. (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.)



Figura 3.9 Estabilización de capa base con emulsión asfáltica cortesía de www.osusa.com

3.5.3.1 Determinación del módulo elástico.

La determinación del módulo elástico es directa y se ensayan muestras en laboratorio o ensayos en el campo, de esa manera se puede conocer el módulo elástico del material.

3.5.2.2 Coeficiente estructural de capa a_i .

Para el diseño estándar de los espesores del pavimento flexible se requiere conocer el coeficiente estructural asignado a cada capa de material que interviene en la estructura del pavimento con el fin de convertir el actual espesor de capa en un número estructural (SN).

La siguiente relación se la puede encontrar a partir del trazado de curva de tendencia con referencia a la figura 3.11 en donde se relaciona el coeficiente estructural de capa con el módulo de la base estabilizada con emulsión asfáltica, encontrando la ecuación de aproximación de dicha curva se obtiene lo siguiente:

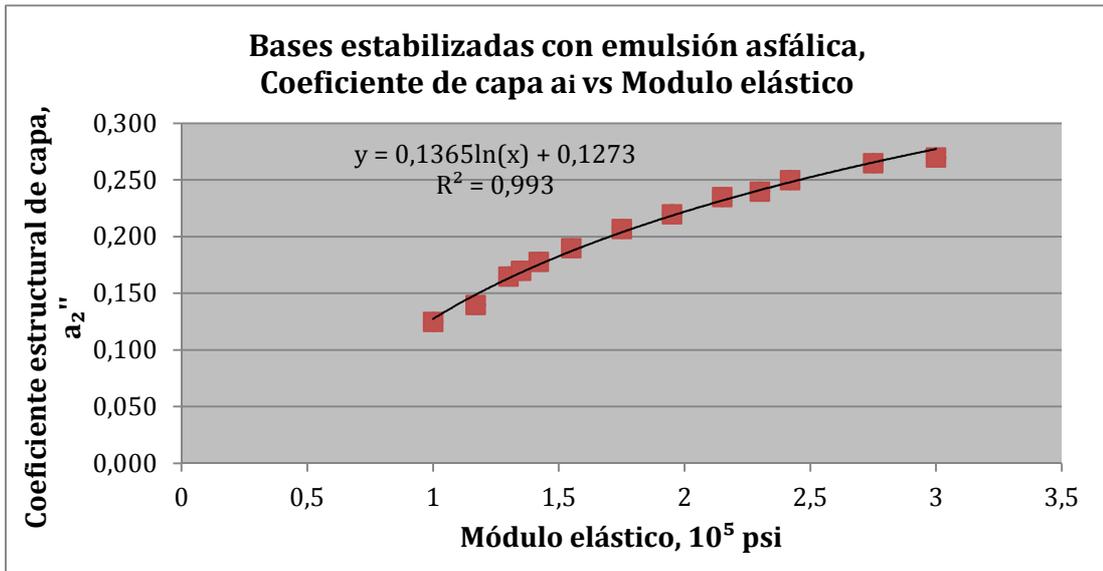


Figura 3.10 Relación entre módulo elástico y el coeficiente de capa en bases estabilizadas con emulsión asfáltica, AASHTO 93.

$$a_2'' = 0.1365 \ln(E_{bea}) - 0.2244 \quad (3.7)$$

Donde E_{bea} es el módulo elástico de la base estabilizada con emulsión asfáltica en 10000 psi.

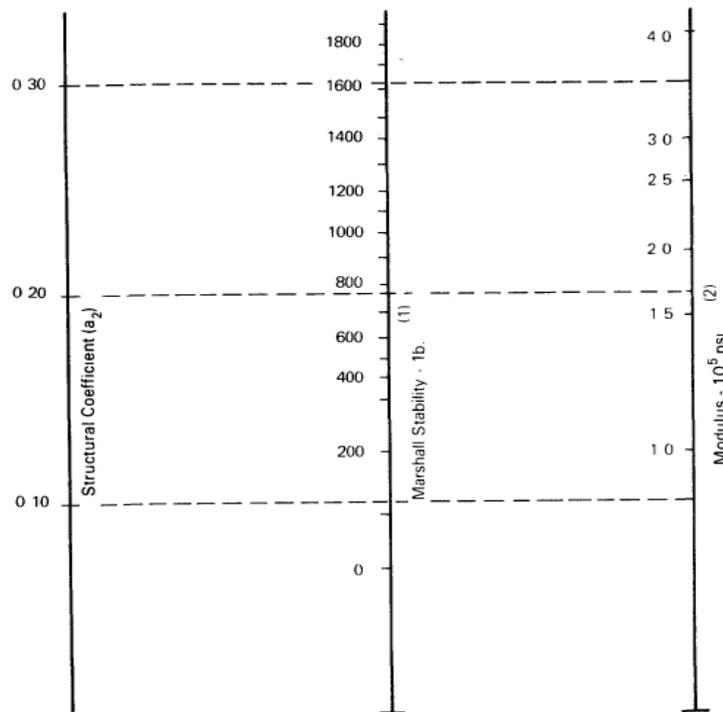


Figura 3.11 Nomograma que presenta relaciones entre parámetros de resistencia de la capa base estabilizada con emulsión asfáltica AASHTO 93.

3.6 Carpeta asfáltica.

La carpeta asfáltica de una estructura de pavimento flexible que consiste en una mezcla de agregados pétreos y materiales bituminosos colocados en la capa superior y usualmente construido sobre la capa base. Además de servir como soporte estructural sobre todo también se diseña para resistir la abrasión producida por el tráfico.

El éxito de la capa asfáltica depende del grado en que se obtenga la mezcla con la gradación óptima de los agregados y un porcentaje del ligante bituminoso adecuado para que sea durable y resistente a la fractura actuando en ambientes de tráfico y climas esperados. El uso del procedimiento de diseño de laboratorio es esencial para segura que la mezcla será satisfactoria.

3.6.1 Materiales.

El material bituminoso para la fabricación de la mezcla será una Emulsión asfáltica o asfalto rebajado seleccionado de acuerdo al tipo de agregados que se pretenda utilizar, cumpliendo con AASHTO M140 y M-208.

Los agregados pétreos deben cumplir con el ensayo de abrasión según AASHTO T-96; equivalente de arena según AASHTO T-176; límite plástico según AASHTO T-90; límite líquido según AASHTO T-89 y desintegración al sulfato de sodio según AASHTO T-104

3.4.2 Módulo dinámico.

La determinación del módulo elástico es directa y se ensayan muestras en laboratorio con el compactador giratorio, finalmente se puede conocer el módulo dinámico del material.

3.4.3 Coeficiente estructural de capa *a₁*.

Para el diseño estándar de los espesores del pavimento flexible se requiere conocer el coeficiente estructural asignado a cada capa de material que interviene en la estructura del pavimento con el fin de convertir el actual espesor de capa en un número estructural (SN). Este coeficiente de capa expresa la relación empírica entre el SN y el espesor, y es una medida relativa de la capacidad del material para funcionar como un componente estructural del pavimento.

La siguiente relación presentada en el manual de diseño AASHTO 93 define el coeficiente estructural de capa asfáltica en función de su módulo dinámico como se presenta a continuación:

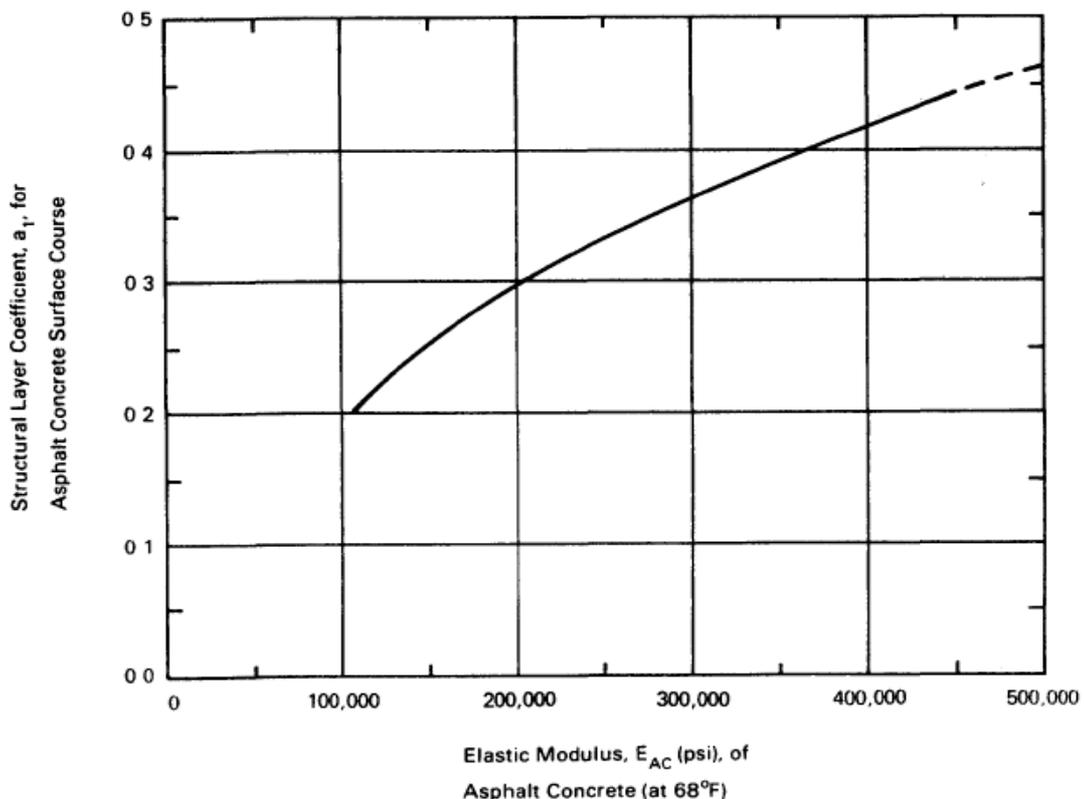


Figura 3.12 Relación entre coeficiente estructural de capa y módulo dinámico AASHTO 93

Por medio de ecuaciones de ajuste se obtiene la siguiente expresión:

$$a_1 = 0.1707 \ln(E_{CA}) - 1.7847 \quad (3.8)$$

CAPÍTULO 4 DISEÑO DE ESPESORES.

4.1 Introducción

En este capítulo se describe el procedimiento para el diseño de pavimentos flexibles según la guía de diseño AASHTO 93. El concepto del diseño de pavimentos flexibles es determinar primero el espesor de la estructura basado en el nivel de tránsito como en las propiedades de los materiales; el período de desempeño de un pavimento está en función de la pérdida de serviciabilidad. (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.)

4.2 Objetivos del diseño de pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles deben estar diseñados para obtener las siguientes propiedades:

- Resistencia a la deformación permanente: la estructura no debería deformarse o desplazarse excesivamente cuando está sujeta al tráfico y especialmente en elevadas temperaturas.
- Resistencia a la fatiga: La estructura no debería fallar durante la acción de cargar repetidas durante un determinado período de tiempo.
- Durabilidad: La mezcla de capa asfáltica debe contener suficiente aglomerante bituminoso para asegurar un buen comportamiento junto a los agregados pétreos.
- Resistencia a la humedad: La estructura debe ser resistente a la humedad sin presentar pérdida de adhesión entre sus componentes.
- Laborabilidad: La estructura de pavimento debe ser fácilmente construible, utilizando materiales en lo posible que se encuentren cercanos a la puesta en obra.

4.3 Parámetros para el diseño.

4.3.1 Confiabilidad (R).

Es el factor de diseño que incorpora cierto grado de incertidumbre en el proceso de diseño para asegurar un grado de holgura a la hora de estimar el tráfico de diseño durante el período de diseño y luego provee un nivel de garantía en el que las secciones de la estructura del pavimento no fallaran durante el período considerado para el diseño.

La guía de diseño AASHTO 93 sugiere niveles de confiabilidad para varios tipos de vías en función a su uso o afluencia de tráfico estimada:

Clasificación	Nivel recomendado de confiabilidad	
	Urbano	Rural
<i>Carretera interestatal</i>	85%-99%	80%-99%
<i>Arterias principales</i>	80%-99%	75%-95%
<i>Colectores</i>	80-95%	75%-95%
<i>Local</i>	50%-80%	50%-80%

Tabla 4.1 Niveles de confiabilidad sugeridos (AASHTO93)

4.3.2 Serviciabilidad.

La serviciabilidad es la capacidad de una estructura de pavimento, es la capacidad que tiene éste de servir al tipo y volumen de tránsito para el cual fue diseñado. El índice de serviciabilidad se califica entre 0 (malas condiciones) y 5 (perfecto). (Véase 2.4)

Para el diseño de pavimentos debe asumirse la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad final; la inicial (P_o) es función directa del diseño de la estructura de pavimento y de la calidad con que se construye la carretera, la final o terminal (P_t) va en función de la categoría del camino y se adopta en base a esto y al criterio del diseñador Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.), los valores recomendados son:

- **Serviciabilidad inicial.**

$P_o = 4.2$ para pavimentos flexibles

- **Serviciabilidad final**

$P_t = 2.5$ o más para caminos principales.

$P_t = 2.0$ para caminos de tránsito menor.

4.3.3 Análisis de tráfico y período de diseño.

Estas variables son las calculadas en el capítulo 2, que es el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 ton o ESAL a través de un período de diseño. La conversión de una carga dado por eje a eje equivalente o ESAL se hace a través de los factores de equivalencia de carga.

4.3.4 Propiedades de los materiales

En el capítulo 3 se explicaron las propiedades de estos materiales (SN).

4.3.5 Drenaje (*m*).

Se deben definir ciertos niveles de drenaje en la predicción del desempeño de la estructura de pavimento.

El obligación del ingeniero diseñador identificar el nivel y calidad del drenaje requerido para los posibles inconvenientes producidos por acumulación de humedad en las carreteras.

La siguiente tabla propuesta por la guía de diseño AASHTO 93 presenta valores para la modificación de los coeficientes estructurales de capa para bases y sub-bases debido a la consideración del nivel y calidad del drenaje.

Quality of Drainage	Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			
	Less Than 1%	1-5%	5-25%	Greater Than 25%
Excellent	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Good	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Fair	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Poor	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Very poor	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Tabla 4.2 Coeficientes de modificación m_i que toman en consideración el drenaje (AASHTO 93)

4.3.5 Número estructural (SN).

El diseño de pavimentos flexibles se basa en identificar un número estructural para soportar el nivel de carga proyectado a través de del período de diseño. El SN puede ser obtenido por medio de un nomograma propuesto por la guía de diseño AASHTO 93, sin embargo también puede ser asumido (generalmente SN=5) para un prediseño de la estructura.

4.4 Ecuaciones de diseño.

Las ecuaciones de diseño originales se basaron puramente en los resultados del AASHO Road Test pero fueron modificadas luego por la teoría y la experiencia para cuidar las condiciones de subrasante y las condiciones climáticas.

4.4.1 Ecuaciones originales.

Las siguientes son las ecuaciones básicas desarrolladas del AASHO Road Test para pavimentos flexibles (HRB, 1962)

$$G_t = \beta(\log W_t - \log \rho) \quad (4.1)$$

$$\beta = 0.4 + \frac{[(0.081(L_1+L_2))]^{3.23}}{(SN+1)^{5.19}L_2^{3.23}} \quad (4.2)$$

$$\log \rho = 5.93 + 9.36 \log(SN + 1) - 4.79 \log(L_1 + L_2) + 4.33 \log L_2 \quad (4.3)$$

Dónde:

G_t = logaritmo de la relación de pérdida de serviciabilidad en el tiempo t versus la pérdida potencial tomada en el punto donde $P_t = 1.5$, o $G_t = \log [(4.2 - P_t)/(4.2 - 1.5)]$, notar que la 4.2 es la serviciabilidad inicial para pavimentos flexibles.

β = está en función del diseño y la carga variable.

ρ = está en función del diseño y de la carga variable.

W_t = carga aplicada al final del tiempo t

P_t = serviciabilidad final en el tiempo t

L_1 = carga en una eje simple o un set de ejes tándem, en kips

L_2 = código de eje 1 para eje simple, 2 para ejes tándem.

SN = Número estructural del pavimento, que es calculado así:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (4.4)$$

En donde a_1 , a_2 , a_3 son los coeficientes estructurales para la capa superficial, base y sub-base respectivamente, y D_1 , D_2 , D_3 son los espesores de la capa superficial, base y sub-base respectivamente.

4.4.2 Ecuaciones modificadas.

Las siguientes son las ecuaciones modificadas y actualizadas que toman en cuenta las condiciones ambientales y las condiciones de subrasante.

$$\log W_{t18} = 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\text{Log}\left(\frac{4.2-Pt}{4.2-1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} \right) + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad (4.5)$$

En donde M_R es el módulo resiliente de la subrasante. Para tomar en cuenta la precipitación local y las condiciones de drenaje la ecuación (4.4) fue modificada a:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (4.6)$$

En donde m_2 es el coeficiente de drenaje de la capa base y m_3 es el coeficiente de drenaje de la capa sub-base.

La ecuación (4.5) es la ecuación de desempeño que da como resultado el número admisible de pasadas de un eje estándar W_{t18} (eje simple de 8.2 ton) para causar la reducción del PSI a Pt . Si el número de pasadas calculado para el período de diseño W_{18} es igual a W_{t18} , la confiabilidad del diseño es solamente del 50%, porque todas las variables en la ecuación (4.5) se basan en los valores medios. Para conseguir un mayor nivel confiabilidad, W_{18} debe ser menor a W_{t18} por una desviación normal Z_R como se muestra a continuación:

$$Z_R = \frac{\log W_{18} - W_{t18}}{S_0} \quad (4.7)$$

Z_R es la desviación normal para una confiabilidad R, y S_0 es la desviación estándar. Combinando las ecuaciones (4.5) y (4.7) se tiene que:

$$\log W_{t18} = Z_R S_0 * 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \left(\frac{\text{Log}\left(\frac{4.2-Pt}{4.2-1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} \right) + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad (4.8)$$

La ecuación (4.8) es la ecuación final para pavimentos flexibles

4.5 Selección del espesor de capa.

Una vez seleccionado es número estructural SN (generalmente 5 para prediseño) es necesario identificar una serie de espesores de capa de pavimento, las cuales, combinadas, proveerán de capacidad estructural al pavimento y podrá soportar carga que se le imponga.

La ecuación $SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3$ es la base para convertir SN en espesores de capa asfáltica, base y sub-base.

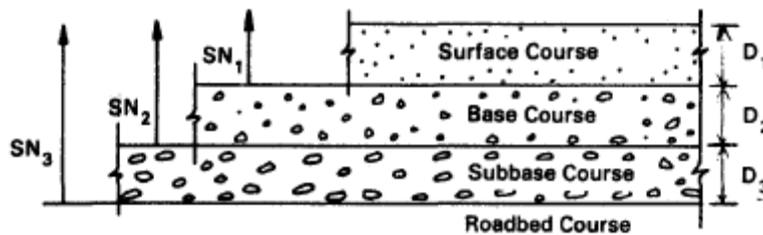
La ecuación para SN (ecuación 4.6) no tiene una solución única sino que existen múltiples combinaciones con distintos espesores de capa que pueden ser soluciones satisfactorias para la estructura de pavimento.

La guía de diseño AASHTO 93 para pavimentos presenta una tabla con los espesores mínimos recomendados, sin embargo estos espesores pueden ser variables debido a distintas condiciones por región si es que se aplica en el Ecuador. La tabla con espesores mínimos presentada (Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.) es la siguiente:

ESPEORES MINIMOS SEGÚN AASHTO 93 (mm)		
Tráfico, ESAL	Capa Asfáltica	Base granular
50000	25	100
50000-150000	50	100
150000-500000	62.5	100
500000-2000000	75	120
2000000-7000000	87.5	120
más de 7000000	100	120

Tabla 4.3 Espesores mínimos recomendados (AASHTO 93)

La estructura de pavimento flexible debe ser diseñada de acorde con los principios mostrados en la Fig 4.1. Primero, el número estructural requerido sobre la subrasante debe ser calculado o puede ser asumido y luego se harán los ajustes requeridos. La figura mostrada a continuación muestra el procedimiento propuesto por la guía de diseño AASHTO 93:



$$D^*_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN^*_1 = a_1 D^*_1 \geq SN_1$$

$$D^*_2 \geq \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_2 m_2}$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2$$

$$D^*_3 \geq \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3 m_3}$$

- a, D, m y SN son los valores previamente definidos.
- El asterisco (*) en D o SN indica que representa el valor actualmente usado, que debe ser igual o mayor al valor requerido

Figura 4.1 Procedimiento para calcular los espesores de capa (AASHTO 93)

CAPÍTULO 5

Análisis de los pavimentos flexibles

5.1 Introducción

Un gran número de modelos han sido desarrollados para el diseño de pavimentos. Antes de entrar en los diferentes modelos analíticos que van a ser usados para los pavimentos flexibles es necesario recalcar el propósito de la administración de los pavimentos, que es asegurar el menor costo de transportación para la sociedad.

Para cumplir con esta premisa varios modelos son requeridos:

- a) Un grupo de modelos para determinar los costos de la sociedad para las diferentes condiciones del pavimento, diferentes condiciones de tráfico, medio ambiente etc.
- b) Y otro grupo de modelos que permita predecir las condiciones a futuro de los pavimentos en función de la carga de tráfico, clima, materiales, mantenimiento, etc.

La capacidad del pavimento no concierne de manera directa al usuario, pero tiene una importante influencia en la tasa en que el pavimento se deteriora. Todos los pavimentos se deterioran con el tiempo. El problema de los pavimentos es asegurar un nivel de “servicio” a los usuarios y al ambiente, por los menores costos posibles.

5.2 Teoría de la elasticidad

El método empírico mecanicista para el diseño de pavimentos flexible ha ganado popularidad entre los ingenieros en los últimos tiempos. Este método usa fundamentalmente propiedades físicas y modelos teóricos para predecir los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones, i.e. la respuestas del pavimento, debido a cargas que actúan sobre el mismo.

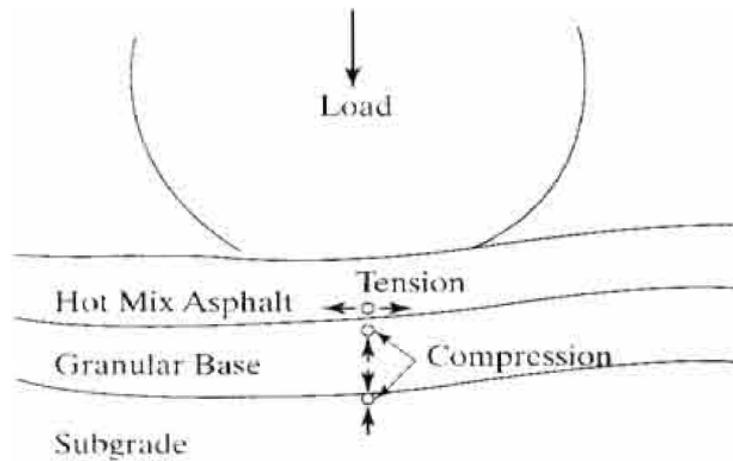


Figura 5.1 Respuesta del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones)

Si las suposiciones básicas respecto a los materiales y a las condiciones de borde son correctas, este método es válido y puede ser usado para predecir la respuesta para cualquier combinación de carga, efectos de clima y características de los materiales.

En la segunda parte del método se usa todavía relaciones empíricas, pero estas relaciones empíricas se basan en la respuesta del pavimento. El agrietamiento del asfalto es predicho por la deformación unitaria máxima por tensión en la capa asfáltica y la deformación permanente es determinada por la deformación unitaria máxima en la interfaz entre subrasante y sub-base.



Figura 5.2 Desempeño del pavimento (agrietamiento)

En el presente se ha hecho mucho esfuerzo en reducir la parte empírica del método. La deformación permanente por ejemplo puede ser calculada directamente si las relaciones esfuerzo-deformación para el material son conocidas.

5.2.1 Parámetros de la elasticidad.

Sometiendo un cubo o un cilindro a esfuerzos uniformes en la dirección z (vertical), σ_z como se muestra en la figura 5.3, resultará en un cambio en la longitud de los costados. Cuando las deformaciones son muy pequeñas comparadas con la dimensión del cubo las deformaciones unitarias serán igual al cambio relativo de longitud.

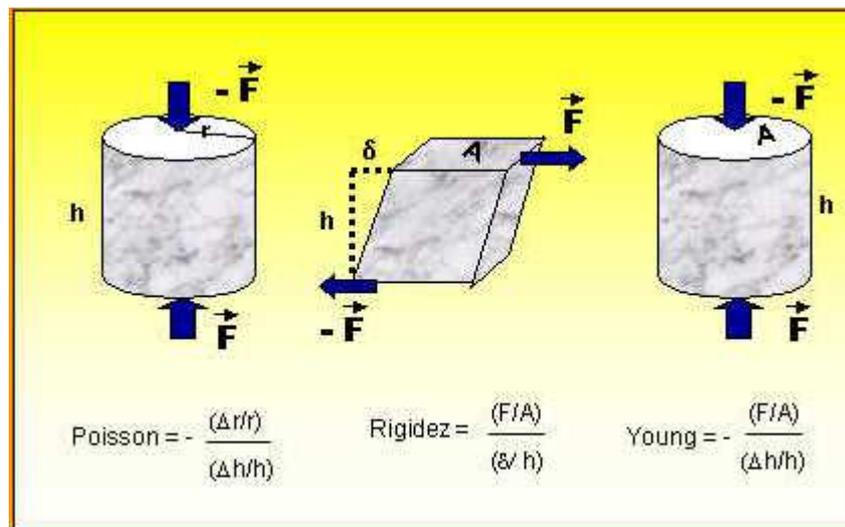


Figura 5.3 Parámetros elásticos para esfuerzos uniaxiales.

Si el material es lineal elástico, entonces la relación entre el esfuerzo vertical σ_z la deformación unitaria ϵ_z será una constante conocido como el coeficiente de elasticidad o módulo de Young (E). Estos es conocido como la ley de Hook. La relación entre la deformación lateral (ϵ_x o ϵ_y) y la deformación vertical es también constante. La relación será negativa y el valor positivo es conocido como relación de Poisson (ν). Un esfuerzo en una dirección produce una deformación proporcional a $-\nu/E$ en la dirección perpendicular.

Un esfuerzo cortante $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ producirá una deformación por cortante, $\gamma_{xz} = \gamma_{zx}$. Si el material es isotrópico, la constante conocida como módulo de cortante G sera:

$$G = \tau_{xz} / 2\gamma_{xz}$$

5.3 Ecuaciones de Boussinesq

Las ecuaciones para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en un espacio homogéneo, isotrópico, lineal elástico semi-infinito, con módulo E y relación de Poisson ν , cargado por una carga puntual P perpendicular a la superficie, fueron dadas por Boussinesq en 1885, las ecuaciones desarrolladas se presentan a continuación:

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (5.1)$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[1 + 2\nu - \frac{2(1 + \nu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (5.2)$$

Note que σ_z y σ_r son independientes de E y ν .

$$\epsilon_z = \frac{(1 + \nu)q}{E} \left[1 - 2\nu + \frac{2\nu z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (5.3)$$

$$\epsilon_r = \frac{(1 + \nu)q}{2E} \left[1 - 2\nu - \frac{2(1 - \nu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (5.4)$$

La deflexión vertical w puede ser determinada de:

$$w = \frac{(1 + \nu)qa}{E} \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{1 - 2\nu}{a} \left[(a^2 + z^2)^{0.5} - z \right] \right\} \quad (5.5)$$

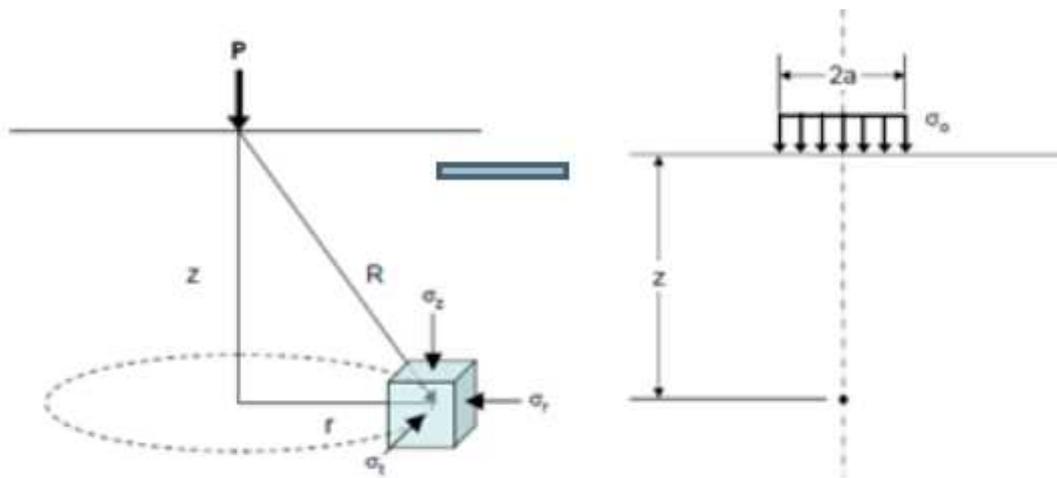


Figura 5.4 Análisis propuesto por Boussinesq en un espacio seminfinito.

En donde a es el radio de rueda, q es la presión de inflado y z es la profundidad en donde se desea conocer los esfuerzos.

5.4 Distribución de esfuerzos en los sistemas multicapa de pavimentos flexibles.

Burmister propuso en 1943, la teoría multicapa elástica para analizar el estado de esfuerzos de una estructura de pavimentos. Primero propuso la solución basada en 2 capas y después ésta fue extendida a n capas.

Según Huang (1993) existen ciertas consideraciones que se deben tener en cuenta para aplicar esta teoría:

- Cada una de capas es homogénea, isotrópica y linealmente elástica.
- El material no tiene peso.

- Cada capa tiene un espesor finito “h”, a excepción de la capa más baja que es infinita.
- Existe una carga uniforme “q” que es aplicada en la superficie sobre un área circular de diámetro “a”.
- La fricción se desarrolla completamente entre cada una de las capas.
- Los esfuerzos de corte no están presentes en la superficie.
- La solución del esfuerzo se basa en 2 propiedades de los materiales para cada capa; la relación de Poisson “ ν ” y el módulo de elasticidad “E”.

Las condiciones de continuidad se cumplen en las interfaces de cada capa, como se indica en el mismo esfuerzo vertical, esfuerzo cortante, desplazamiento vertical y radial. Ver figura 5.5

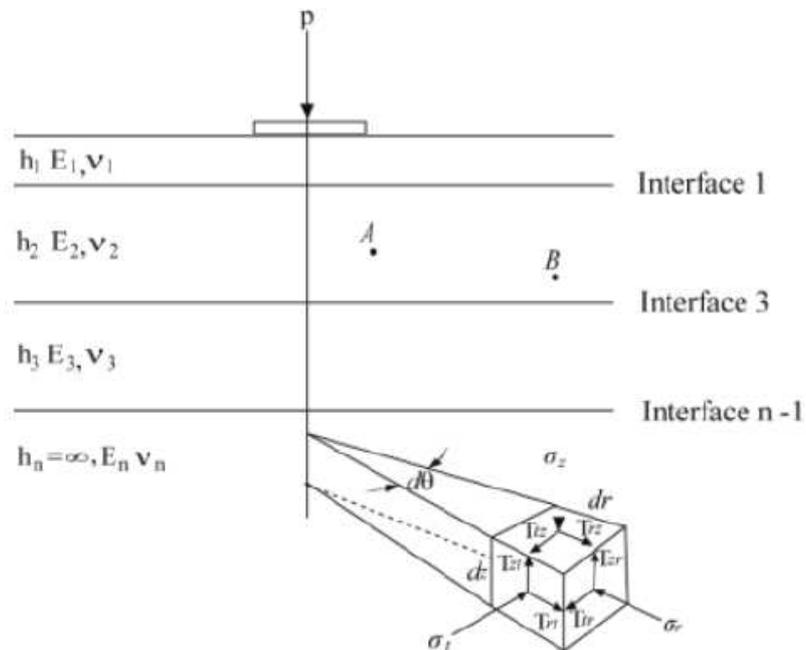


Figura 5.5 Sistema multicapa (Yoder y Witczak, 1975)

5.5 Método de Odemark-Boussinesq

El método de Odemark (1949) está basado en la suposición de que los esfuerzos y deformaciones por debajo de una capa dependen de la rigidez de esa capa solamente. Si el espesor, el módulo y la relación de Poisson de una capa son cambiados, para la rigidez permanece sin cambiar, los esfuerzos y deformaciones por debajo de la capa deben permanecer también sin cambiar. Ver figura 5.3. Es decir que el método consiste en encontrar un espesor equivalente, h_e , para la primera capa, con módulo igual a la segunda capa, E_2 . Entonces, se tendría un espacio semi-infinito homogéneo donde se puede utilizar la solución de Boussinesq (eq 5.1, 5.2, 5.3).

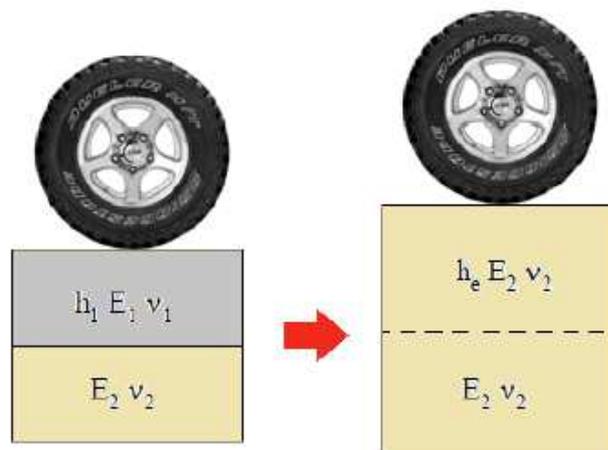


Figura 5.6 Esquematización del método de Odemark.

Como el método de Odemark es una aproximación, se debe introducir un factor de corrección f , que va desde 1 a 0.8 en ruedas simples y puede llegar hasta 1.2 en la solución para ruedas dobles de acuerdo a ajustes con los métodos elásticos.

La ecuación que define el método de Odemark es la siguiente:

$$h_e = f * h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (5.6)$$

Dónde:

- $f = 1.0$ para la primera interface, independiente del número de capas.
- $f = 0.8$ para la segunda capa de un sistema de dos capas
- $f = 0.9$ para la segunda capa en delante de un sistema de n -capas.

Los coeficientes de corrección pueden ser variables y deben ser ajustados según ensayos o aproximaciones a la teoría de la elasticidad.

Para un sistema multicapa el espesor equivalente de la capa superior $n-1$ con respecto al módulo de la capa n , puede ser calculado por:

$$h_{e,n} = f * \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (5.7)$$

5.6 Consideración para análisis por ruedas robles.

Para ejecutar un análisis por rueda doble se hace uso del concepto de ESAR (Equivalent Simple Axial Radius) que permite determinar un radio equivalente de rueda simple que llevaría a la misma respuesta del pavimento como si se cargara con la misma carga total proporcionada por un conjunto de ruedas dobles. La siguiente expresión fue desarrollada por medio de un análisis de regresión y fue desarrollada por Anastasios M. Ioannides y Lev Khazanovich en 1985.

$$\frac{a_{eq}}{a} = 1.00 + 0.241683 \left(\frac{S}{a}\right) \quad (5.8)$$

Donde a es el radio de una rueda y S es la distancia centro a centro entre ruedas, todo esto en pulgadas.

CAPÍTULO 6

Metodologías complementarias para el diseño de pavimentos flexibles

6.1 Introducción

Para describir mejor el comportamiento de un pavimento bajo condiciones determinadas por el tipo de región en donde han sido o van a ser construidos, se requiere el uso de metodologías complementarias que permitan considerar los factores climáticos que afectan a la capa asfáltica en una estructura de pavimento flexible.

Además de la consideración de la temperatura en la variabilidad de un pavimento, se han hecho análisis de daño acumulado (Hipótesis de Miner) alrededor del tiempo para conocer si realmente el pavimento está diseñado para soportar la fatiga durante toda su vida útil (período de diseño).

6.2 Transferencia de la temperatura ambiente hacia la carpeta asfáltica.

La temperatura siempre varía alrededor del día y de los meses del año siendo así que en el Ecuador se cuentan con 2 estaciones bien marcadas que son invierno y verano cada una con los comportamientos meteorológicos de acuerdo a su época (invierno=lluvia). Las distintas regiones del país se comportan de distinta manera durante el año ante las estaciones, siendo en la costa el registro de temperaturas más altas en invierno y en verano las más bajas. La transferencia de la temperatura ambiente hacia la capa asfáltica perteneciente a la estructura de pavimento flexible es definida por medio de la siguiente ecuación:

$$Temp. asf. = \left(Temp. Amb * \left(1 + \left(\frac{1}{\frac{h}{3} + 4} \right) \right) \right) - \left(\frac{34}{\frac{h}{3} + 4} \right) + 6 \quad (6.1)$$

En donde h es el espesor de capa asfáltica y la temp. está en °F.

6.3 Variación del módulo elástico de carpeta asfáltica en función de la temperatura.

El módulo en mezclas asfálticas es altamente sensible a la temperatura debido a que es un material viscoelástico. Se han desarrollado varios métodos para predecir la variabilidad del módulo elástico con la temperatura, desde ensayos de laboratorio hasta relaciones empíricas calculadas a partir de curvas de regresión. El Instituto del Asfalto propone la siguiente ecuación para determinar el módulo de elasticidad en función a la temperatura a la que se encontrará la capa asfáltica:

$$E_{ca} = \left(10^{(6.48 - 0.01 * ((Temp.Asf. * 1.8) + 32))}\right) * 0.0069 \quad (6.2)$$

En donde E_{ca} es el módulo de elasticidad de la capa asfáltica calculado en MPa y la $Temp.Asf.$ debe ser ingresada en centígrados.

La expresión permite un cálculo del módulo elástico de la carpeta asfáltica por medio de la temperatura media en la misma capa, de acuerdo a eso, mientras varíe la temperatura varía por ende el módulo de la carpeta asfáltica.

6.5 Hipótesis de Miner.

La mayoría de las veces la estructura del pavimento sufre cargas variables de amplitud no necesariamente constantes a lo largo de la vida de fatiga, dificultando el análisis por fatiga de la propia estructura. En muchos casos la secuencia con que la magnitud de la carga varía es aleatoria.

Un proceso simple fue propuesto por Palmgren y representado por Miner, siendo conocido como la regla de Palmgren-Miner o regla lineal de acumulación de daño. De acuerdo con esta regla, el daño que la pieza sufrió bajo la acción de una dada amplitud de la tensión cíclica es directamente proporcional al número de ciclos actuantes en que se desarrolló esa amplitud de tensión.

Entonces según la regla de Palmgren-Miner, el daño provocado por esta solicitud cíclica será:

$$D_i = n_i / N_i \quad (6.3)$$

Siendo n_i el número de ciclos actuantes o pasadas, para cierta amplitud de tensión y N_i la vida o número de pasadas permisibles bajo la misma amplitud actuando aisladamente. El criterio de falla por fatiga, en una situación con acumulación de daño, indica un daño máximo de $D=1$, entonces es un caso en donde la falla ocurre cuando $n_i = N_i$.

La expresión de acumulación lineal de daños presenta ciertas limitaciones, tales como:

- En muchos casos fue verificado que la suma de los daños parciales en el instante de falla es muy diferente de uno, pudiendo alcanzar en situaciones extremas, valores tan bajos como 0.13 o tan elevados como 22. Estos valores son alcanzados cuando la carga es de amplitud sucesivamente creciente o de amplitud sucesivamente decreciente, respectivamente.
- El daño en fatiga no es necesariamente lineal con el número de ciclos o con la razón n_i / N_i
- La regla lineal del daño no considera, por lo menos explícitamente, la existencia de una interacción en los daños de varios niveles de tensión, principalmente por la presencia de tensiones residuales que quedan en los puntos críticos.

A pesar de las limitaciones de la regla de Palmgren-Miner, es muy utilizada como una orientación muy aproximada, pues práctica y sencilla de usar como complemento de un análisis de fatiga acumulada en los pavimentos.

6.4 Modelo de deterioro por fatiga del Instituto del Asfalto.

La ecuación de fatiga propuesta por el Instituto del Asfalto se basa en modificaciones de ensayos en esfuerzo constante en laboratorio con referencia a los criterios de fatiga. El número de repeticiones de carga para la falla está expresado en la misma forma matemática que el modelo de Shell y está dado por:

$$N_f = 0.00432C \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3.291} \left(\frac{1}{E}\right)^{0.854} \quad (5.9)$$

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \frac{V_b}{(V_a + V_b)} - 0.069 \quad (5.9)$$

Dónde:

V_b = volumen de asfalto en porcentaje.

V_a = volumen de vacíos en porcentaje.

Esta ecuación (modelo) fue desarrollada por Witczak para la novena edición de la publicación del Instituto del Asfalto MS-1, utilizó la relación básica de fatiga desarrollada en NCRHP 1-10 por Fred Finn y luego modificada por Witczak para incorporar los ajustes volumétricos de la mezcla desarrollados por Monismith.

CAPÍTULO 7

Aplicación para el diseño y análisis aproximado de pavimentos flexibles.

7.1 Introducción

Gracias a las herramientas a disposición como una hoja de cálculo electrónica que permite integrar macros en Visual Basic, se ha podido recrear el método de diseño AASHTO 93 y un análisis tenso-deformacional por medio de la metodología aproximada propuesta por Odemark-Boussinesq. La herramienta de cálculo descrita en el trabajo de investigación incluye todos aquellos parámetros necesarios para un diseño y un análisis aproximado de la estructura de pavimento, sin embargo la aplicación trata de ir más allá presentando además las metodologías complementarias antes expuestas como son la consideración de la variación de la temperatura con el tiempo y la evaluación del daño acumulado por fatiga en la capa asfáltica a través del tiempo también. Todas las consideraciones hechas en la aplicación se han expuesto a través de capítulos anteriores, se compararán resultados obtenidos del análisis por medio de programas con metodologías elásticas y el método de análisis aproximado (Odemark-Boussinesq) propuesto en la aplicación elaborada.

7.1 Presentación de la aplicación

En el trabajo presente se ha elaborado una aplicación utilizando herramientas a disposición como hojas de cálculo en Excel en las que se incluyen subrutinas de programación en lenguaje Visual Basic.

El enfoque de la aplicación consiste en elaborar un diseño de estructura de pavimento flexible por medio de la metodología propuesta en la guía de diseño AASHTO 93 para luego proceder a su análisis tenso-deformacional con métodos aproximados (Odemark-Boussinesq).

Por último se incluye un análisis con métodos complementarios a la estructura ya diseñada que toma en consideración la variabilidad del módulo de la capa asfáltica a través del tiempo y con ello la variación de la resistencia para luego proceder a realizar un análisis de daño acumulado por el método de Miner.

7.2 Ejemplo de aplicación del programa.

Se presentará a continuación un ejemplo de aplicación al programa:

- 1) Se ingresan todas las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos flexibles incluyendo la carga de tráfico por uno de los 2 métodos antes explicados en el cap.2.

Capas del pavimento flexible	Módulo de elasticidad (psi)	Módulo de elasticidad (Mpa)	Coefficiente de capa (a_i)	Coefficiente de drenaje (m_i)
<i>Carpeta Asf.</i>	450,000	3105.00	0.44	----
<i>Base Granular</i>	30,221	208.53	0.14	1.00
<i>Sub-base</i>	17,116	118.10	0.12	0.90
<i>Sub-rasante</i>	7,200	49.68	----	----

NUMEROS ESTRUCTURALES

SN1	SN2	SN3
2.5	3.1	4.0

La aplicación calcula automáticamente los números estructurales necesarios para que el diseño sea óptimo bajo la metodología AASHTO 93. El número de ejes totales escogidos para el diseño es un **ESAL de 5'000000.**

- 2) Una vez que se han calculado los números estructurales, se procede a colocar los espesores de capa requeridos para ejecutar posteriormente el análisis por métodos aproximados.

DETERMINACION DE ESPESORES:

CARPETA ASFALTICA	D1* :	REAL,mm :	145.2	AJUST,mm :	140.00
	SN1* :	2.4			
BASE GRANULAR	D2* :	REAL,mm :	126.4	AJUST,mm :	150.00
	SN2* :	3.2			
SUB-BASE	D3* :	REAL,mm :	178.4	AJUST,mm :	250.00
	SN3* :	4.3			

- 3) Elegidos los espesores requeridos para el diseño se procede a realizar un análisis aproximado por medio de la metodología de (Odemark-Boussinesq) y se calcularán los esfuerzos y deformaciones ingresando el tipo de rueda (simples o dobles), presión de inflado y carga que baja por la rueda; si se usan ruedas dobles se debe ingresar el espaciamiento de centro a centro en ruedas.

Datos ingresados (análisis por rueda doble):

Presión de contacto:	0.7
Carga por rueda:	2.1
Sd:	300
Radio de rueda*:	170.23

Capas del pavimento flexible	Espesores (mm)	Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de Poisson
<i>Carpeta Asf.</i>	140	3105.00	0.35
<i>Base Granular</i>	150	208.53	0.35
<i>Sub-base</i>	250	118.10	0.35
<i>Subrasante</i>	0	49.68	0.35

Resultados de análisis aproximado.

ESFUERZO AXIAL (MPa)

σ_z

CARPETA ASFALTICA	0.13
BASE GRANULAR	0.0504
SUB-BASE	0.0150
SUBRASANTE	

DEFORMACIONES UNITARIAS VERTICALES

ϵ_z

CARPETA ASFALTICA	0.00064
BASE GRANULAR	0.000438
SUB-BASE	0.000311
SUBRASANTE	

DEFLEXIONES (mm)

CARPETA ASFALTICA	0.020
BASE GRANULAR	0.075
SUB-BASE	0.084
SUBRASANTE	0.446

DEFORMACIONES UNITARIAS HORIZONTALES

ϵ_t

CARPETA ASFALTICA	-0.000228622 
BASE GRANULAR	
SUB-BASE	
SUBRASANTE	

TOTAL= 0.624 mm

7.2 Análisis de resultados para metodologías complementarias.

La estructura de pavimento expuesta en el ejemplo anterior fue evaluada por medio de un análisis de acumulación de fatiga, que toma en consideración la variación de temperatura a través del tiempo en las distintas regiones del Ecuador.

Para demostrar que la aplicación tiene una buena aproximación con relación a los resultados expuestos con un programa de análisis elástico (BISAR3) se presenta los siguientes resultados.

REGION COSTA (Guayaquil)

Método Odemark-Boussinesq (espesores equivalentes)

MESES	Temp. Media Aire (°C)	Temp. Media Pav (°C)	Eac (MPa) I.A.	Def. Unit. ξ_t	Nfi	% dist. Mensual	ni	Dri
Enero	27.4	35.2	2,338	-0.000264	1,291,668	8.3	416,678	0.3226
Febrero	27.5	35.4	2,338	-0.000264	1,291,668	8.3	416,678	0.3226
Marzo	27.9	35.8	2,243	-0.000270	1,250,555	8.3	416,678	0.3332
Abril	28.2	36.2	2,243	-0.000270	1,250,555	8.3	416,678	0.3332
Mayo	27.4	35.2	2,338	-0.000264	1,291,668	8.3	416,678	0.3226
Junio	25.7	33.2	2,540	-0.000254	1,380,229	8.3	416,678	0.3019
Julio	25.5	33.0	2,540	-0.000254	1,380,229	8.3	416,678	0.3019
Agosto	24.7	32.1	2,648	-0.000248	1,427,886	8.3	416,678	0.2918
Septiembre	25.0	32.4	2,648	-0.000248	1,427,886	8.3	416,678	0.2918
Octubre	25.5	33.0	2,540	-0.000254	1,380,229	8.3	416,678	0.3019
Noviembre	25.6	33.1	2,540	-0.000254	1,380,229	8.3	416,678	0.3019
Diciembre	25.8	33.4	2,540	-0.000254	1,380,229	8.3	416,678	0.3019
	Referencia					100	Dr	3.7272

Método elástico (BISAR3)

MESES	Temp. Media Aire (°C)	Temp. Media Pav (°C)	Eac (MPa) I.A.	Def. Unit. ξ_t	Nfi	% dist. Mensual	ni	Dri
Enero	27.4	35.2	2,338	-0.000264	1,297,164	8.3	416,678	0.3212
Febrero	27.5	35.4	2,338	-0.000264	1,297,164	8.3	416,678	0.3212
Marzo	27.9	35.8	2,243	-0.000269	1,263,428	8.3	416,678	0.3298
Abril	28.2	36.2	2,243	-0.000269	1,263,428	8.3	416,678	0.3298
Mayo	27.4	35.2	2,338	-0.000264	1,297,164	8.3	416,678	0.3212
Junio	25.7	33.2	2,540	-0.000254	1,372,277	8.3	416,678	0.3036
Julio	25.5	33.0	2,540	-0.000254	1,372,277	8.3	416,678	0.3036
Agosto	24.7	32.1	2,648	-0.000249	1,414,117	8.3	416,678	0.2947
Septiembre	25.0	32.4	2,648	-0.000249	1,414,117	8.3	416,678	0.2947
Octubre	25.5	33.0	2,540	-0.000254	1,372,277	8.3	416,678	0.3036
Noviembre	25.6	33.1	2,540	-0.000254	1,372,277	8.3	416,678	0.3036
Diciembre	25.8	33.4	2,540	-0.000254	1,372,277	8.3	416,678	0.3036
	Referencia					100	Dr	3.7308

La tabla presenta varias columnas en donde se detallan los meses del año, las temperaturas promedio del mes respectivo tomando como referencia una ciudad, en el caso de la costa se tomó como referencia la ciudad de Guayaquil, en la región sierra la ciudad de Quito y en la región amazónica la zona de Nuevo Rocafuerte.

La temperatura media del pavimento se la calcula con la temperatura ambiente con las ecuaciones expuestas en el capítulo anterior, luego se procede al cálculo de los módulos elásticos usando hipótesis del Instituto del Asfalto. Con eso datos ingresados a continuación se ejecuta el programa y calcula automáticamente las deformaciones por tensión en la parte inferior de la capa asfáltica; con los valores de deformación se calculan el número de ejes permisibles con modelos de fatiga propuestos por el Instituto del asfalto y por último se ejecuta un análisis de fatiga acumulada propuesto por Miner.

El valor marcado en rojo muestra el resultado de la aplicación de la hipótesis de Miner y con ello se concluye el análisis.

Se ha realizado una comparación entre los valores de deformación obtenidos por los métodos aproximados aplicados en el programa y los valores obtenidos por un programa de análisis elástico como el BISAR3 (Shell). Se puede observar que las 2 metodologías presentan resultados similares.

REGION SIERRA (Quito)

Método Odemark-Boussinesq (espesores equivalentes)

MESES	Temp. Media Aire (°C)	Temp. Media Pav (°C)	Eac (MPa) I.A.	Def. Unit. T	Nfi	% dist. Mensual	ni	Dri
Enero	16.5	22.5	4,007	-0.000199	2,058,823	8.3	416,678	0.2024
Febrero	17.0	23.1	3,845	-0.000204	1,980,842	8.3	416,678	0.2104
Marzo	16.8	22.8	3,845	-0.000204	1,980,842	8.3	416,678	0.2104
Abril	15.7	21.5	4,007	-0.000199	2,058,823	8.3	416,678	0.2024
Mayo	15.3	21.1	4,177	-0.000195	2,140,761	8.3	416,678	0.1946
Junio	15.0	20.7	4,177	-0.000195	2,140,761	8.3	416,678	0.1946
Julio	14.6	20.2	4,354	-0.000191	2,226,860	8.3	416,678	0.1871
Agosto	15.0	20.7	4,177	-0.000195	2,140,761	8.3	416,678	0.1946
Septiembre	15.1	20.8	4,177	-0.000195	2,140,761	8.3	416,678	0.1946
Octubre	15.2	20.9	4,177	-0.000195	2,140,761	8.3	416,678	0.1946
Noviembre	13.6	19.1	4,538	-0.000186	2,317,341	8.3	416,678	0.1798
Diciembre	14.0	19.5	4,354	-0.000191	2,226,860	8.3	416,678	0.1871
	Referencia					100	Dr	2.3527

Método elástico (BISAR3)

MESES	Temp. Media Aire (°C)	Temp. Media Pav (°C)	Eac (MPa) I.A.	Def. Unit. T	Nfi	% dist. Mensual	ni	Dri
Enero	16.5	22.5	4,007	-0.000200	2,041,586	8.3	416,678	0.2041
Febrero	17.0	23.1	3,845	-0.000205	1,950,058	8.3	416,678	0.2137
Marzo	16.8	22.8	3,845	-0.000205	1,950,058	8.3	416,678	0.2137
Abril	15.7	21.5	4,007	-0.000200	2,041,586	8.3	416,678	0.2041
Mayo	15.3	21.1	4,177	-0.000196	2,106,060	8.3	416,678	0.1978
Junio	15.0	20.7	4,177	-0.000196	2,106,060	8.3	416,678	0.1978
Julio	14.6	20.2	4,354	-0.000192	2,175,550	8.3	416,678	0.1915
Agosto	15.0	20.7	4,177	-0.000196	2,106,060	8.3	416,678	0.1978
Septiembre	15.1	20.8	4,177	-0.000196	2,106,060	8.3	416,678	0.1978
Octubre	15.2	20.9	4,177	-0.000196	2,106,060	8.3	416,678	0.1978
Noviembre	13.6	19.1	4,538	-0.000187	2,290,396	8.3	416,678	0.1819
Diciembre	14.0	19.5	4,354	-0.000192	2,175,550	8.3	416,678	0.1915
	Referencia					100	Dr	2.3898

REGION AMAZONICA (Nuevo Rocafuerte)

Método Odemark-Boussinesq (espesores equivalentes)

MESES	Temp. Media Aire (°C)	Temp. Media Pav (°C)	Eac (MPa) I.A.	Def. Unit. T	Nfi	% dist. Mensual	ni	Dri
Enero	22.2	29.1	2,998	-0.000233	1,585,758	8.3	416,678	0.2628
Febrero	23.4	30.6	2,760	-0.000243	1,477,946	8.3	416,678	0.2819
Marzo	23.1	30.2	2,876	-0.000238	1,530,527	8.3	416,678	0.2722
Abril	23.2	30.3	2,876	-0.000238	1,530,527	8.3	416,678	0.2722
Mayo	22.8	29.8	2,876	-0.000238	1,530,527	8.3	416,678	0.2722
Junio	22.3	29.3	2,998	-0.000233	1,585,758	8.3	416,678	0.2628
Julio	21.4	28.2	3,125	-0.000228	1,643,773	8.3	416,678	0.2535
Agosto	22.1	29.0	2,998	-0.000233	1,585,758	8.3	416,678	0.2628
Septiembre	22.2	29.1	2,998	-0.000233	1,585,758	8.3	416,678	0.2628
Octubre	22.0	28.9	2,998	-0.000233	1,585,758	8.3	416,678	0.2628
Noviembre	22.4	29.4	2,998	-0.000233	1,585,758	8.3	416,678	0.2628
Diciembre	22.1	29.0	2,998	-0.000233	1,585,758	8.3	416,678	0.2628
						100	Dr	3.1915

Método elástico (BISAR3)

MESES	Temp. Media Aire (°C)	Temp. Media Pav (°C)	Eac (MPa) I.A.	Def. Unit. T	Nfi	% dist. Mensual	ni	Dri
Enero	22.2	29.1	2,998	-0.000234	1,560,170	8.3	416,678	0.2671
Febrero	23.4	30.6	2,760	-0.000244	1,459,169	8.3	416,678	0.2856
Marzo	23.1	30.2	2,876	-0.000239	1,507,738	8.3	416,678	0.2764
Abril	23.2	30.3	2,876	-0.000239	1,507,738	8.3	416,678	0.2764
Mayo	22.8	29.8	2,876	-0.000239	1,507,738	8.3	416,678	0.2764
Junio	22.3	29.3	2,998	-0.000234	1,560,170	8.3	416,678	0.2671
Julio	21.4	28.2	3,125	-0.000229	1,616,854	8.3	416,678	0.2577
Agosto	22.1	29.0	2,998	-0.000234	1,560,170	8.3	416,678	0.2671
Septiembre	22.2	29.1	2,998	-0.000234	1,560,170	8.3	416,678	0.2671
Octubre	22.0	28.9	2,998	-0.000234	1,560,170	8.3	416,678	0.2671
Noviembre	22.4	29.4	2,998	-0.000234	1,560,170	8.3	416,678	0.2671
Diciembre	22.1	29.0	2,998	-0.000234	1,560,170	8.3	416,678	0.2671
						100	Dr	3.2419

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

Como se pudo observar en las tablas la estructura de pavimento que están sujetos a la más altas temperaturas en el Ecuador son principalmente los pavimentos de la costa, en la sierra los pavimentos muestran un mejor comportamiento ante la fatiga de capa asfáltica debido a sus bajas temperaturas (alrededor de 15°) sin embargo a bajas temperaturas se debe tomar en cuenta el aumento de rigidez de la capa asfáltica que de no tener suficiente resistencia puede fatigarse con más facilidad que una capa asfáltica más flexible, la región amazónica tiene temperaturas que están entre los 2 topes que son la sierra y la costa mostrando un comportamiento favorable durante una temporada del año.

Tener este tipo de información disponible permite al diseñador considerar distintas opciones al conocer los comportamientos variables que se presentan en las distintas regiones del país.

Por medio de análisis por métodos aproximados en conjunto con métodos complementarios se puede tener una idea bastante acertada acerca de lo que conviene en el diseño de espesores y se pueden tomar mejores decisiones con niveles de incertidumbre muchos más bajos.

La aplicación propuesta en el trabajo resulta muy útil y cumple de manera eficiente con su cometido ya que permite al diseñador ingresar una serie de pocos datos y conseguir un resultado aproximado acerca del comportamiento de la estructura del pavimento flexible frente a cargas y efectos del medio ambiente.

Los valores marcados en rojo muestran sin embargo que el método es imperfecto y que se necesitarían valores de deformación por tensión muy bajos para que se pueda cumplir la hipótesis de Miner de manera favorable ocasionando que en varios casos se alejen de la realidad.

8.2 Recomendaciones

Usar los métodos complementarios propuestos para mejorar el nivel de incertidumbre y elaborar un diseño que tome en cuenta las condiciones variables en las distintas regiones del país.

Complementar la aplicación por medio de investigación de laboratorio para obtener una mejor idea acerca del comportamiento de la estructura del pavimento ante la fatiga considerando las distintas condiciones climáticas presentes en el país.

Tomar en cuenta como alternativa de diseño y análisis aproximado, la aplicación propuesta gracias a que presenta datos confiables mas no exactos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. Design of Pavement Structures (1993). Washington D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, "The AASHTO Road Test", Report 5, Pavement Research, Washington, DC. 1962.
- Ahmed, N.V., Lu, D.Y., Lytton, R.L., Mahoney, J.P. and Phillips, D.T. "The Texas Rehabilitation and Maintenance District Optimization System" Research Report 207-3, Texas A&M University, 1978.
- Askegaard, V. "Stress and strain Measurement in Solid Materials", Structural Research Laboratory, Technical University of Denmark, Rapport Nr. R92, 1978.
- Diseño de espesores de pavimentos flexibles para pavimentación urbana, Ing. Jorge M. Lockhart. Comisión permanente del asfalto. Buenos Aires. 1970.
- Pavimentos urbanos de Hormigón de Cemento Pórtland. Instituto del Cemento Portland Argentino.
- Apuntes de materia Construcción de Carreteras. Universidad de Buenos Aires.
- Profesores Ings. Rodó, Juan Manuel Campana y Ana María Lima
- Corro S. y Prado G. (1974). "Diseño estructural de carreteras con pavimento flexible", Series Azules, Publicación Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, DF, No. 325.
- Corro S. y Prado G. (1999). "Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. DISPAV-5 Versión 2.0", Series Azules, Publicación Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, DF, CI-8.
- Huang Y. H. (1993). "Pavement Analysis and Design", Prentice Hall, New Jersey: 45-89, 94- 131, 244-265, 279-326, 472-528 pp.
- Kim, Jong R., Leslie Titus-Glover, Michael I. Darter, and Robert K. Kumapley. "Axle Load Distribution Characterization for Mechanistic Pavement Design". In Transportation Research Record 1629, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1998, pp. 13-17.76
- Manual Centroamericano Para el Diseño de Pavimentos, Guatemala 2002, Coronado Iturbide.
- Minnesota Mechanistic-Empirical Pavement Design: MnPAVE Homepage. Minnesota Department of Transportation, <http://www.mrr.dot.state.mn.us/research/mnpave/mnpave.asp>, Accessed July 11, 2005.

- Modelling Flexible Pavement Response and Performance. (1998). Per Ullidtz, Technical University of Denmark.
- NCHRP Design Guide Homepage. National Cooperative Highway Research Program 1-37A, <http://www.trb.org/mepdg/home.htm>, Accessed July 11, 2005.
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>, 28 October, 2002.
- Qu, Tongbin, Clyde E. Lee, and Liren Huang. Traffic-Load Forecasting Using Weigh- In-Motion Data. Center for Transportation Research: The University of Texas at Austin, March 1997
- Siegel, Sidney. Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences. New York: McGraw-Hill Book Company, 1956.
- Timm, D.H. and D. E. Newcomb. Calibration of Flexible Pavement Performance Equations. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1853, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2003, pp. 134-142.
- Timm, D.H., D.E. Newcomb and T.V. Galambos. Incorporation of Reliability into Mechanistic-Empirical Pavement Design. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1730, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 73-80.
- Timm, D.H. and J. Young. The Effects of Load Spectra and Variability on Perpetual Pavement Design. International Symposium on Design & Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements, Auburn, AL, 2004, pp. 131-152.
- Traffic Data and Analysis Manual. 2001.<http://www.manuals.dot.state.tx.us/docs/coltrsys/forms/tda/pdf>, 18 February, 2003.
- Van Cauwelaert, F.J., D.R Alexander, T.D. White and W.R. Barker. Multilayer Elastic Program for Backcalculation Layer Moduli in Pavement Evaluation. First International Symposium on Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026, 1989.
- Wu, S-S. "Procedure to Estimate Loading From Weigh-In-Motion Data". In Transportation Research Record 1536, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996, pp. 19-24.
- Yoder, E. J. and Witczak, M.W. Principles of Pavement Design. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1975.

